



Achim Kampker
Heiner Hans Heimes *Hrsg.*

Elektromobilität

Grundlagen einer Fortschrittstechnologie

3. Auflage

OPEN ACCESS

 Springer Vieweg



Elektromobilität

Achim Kampker • Heiner Hans Heimes
Hrsg.

Elektromobilität

Grundlagen einer Fortschrittstechnologie

3. Auflage

Hrsg.

Achim Kampker
Universitätsprofessor, Production Engineering
of E-Mobility Components (PEM)
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

Heiner Hans Heimes
Mitglied der Institutsleitung, Production
Engineering of E-Mobility Components (PEM)
RWTH Aachen
Aachen, Deutschland



ISBN 978-3-662-65811-6 ISBN 978-3-662-65812-3 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-65812-3>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en) 2013, 2018, 2024

Open Access Dieses Buch wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Buch enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Autor: Simon Voß (simonvoss.com), LinkedIn: [linkedin.com/in/simon-voss-a65382118](https://www.linkedin.com/in/simon-voss-a65382118)

Planung/Lektorat: Markus Braun

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Grußwort

Liebe Leser: innen,

gäbe es schon jetzt eine Abstimmung zum Wort des Jahrzehnts, würde ich „Elektromobilität“ wählen. Denn kaum ein anderer Begriff dominiert gegenwärtig – und künftig wohl immer mehr – die Debatten in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. Das ist nicht verwunderlich, da sich die Fahrzeug- und Antriebskonzepte grundlegend wandeln werden. Auch – oder gerade – aus Verbrauchersicht resultiert daraus die zentrale Frage, wie ressourcenschonend und klimafreundlich wir heute und in Zukunft mobil sein wollen, können und müssen. Bei diesen drei Hilfsverben gibt es allerdings eine klare Hierarchie, sie bedingen einander. Der Transformationsprozess, der geschehen muss, benötigt den Willen intensiver Forschung und Entwicklung, um eine nachhaltige und wirtschaftliche Elektromobilität umsetzen zu können.

Basis dafür ist Grundlagenwissen, das die Autor:innen dieses Werks der Öffentlichkeit fundiert und kompakt zugänglich machen. So liegt Ihnen, liebe Leser:innen, das Buch „Elektromobilität – Grundlagen einer Fortschrittstechnologie“ als Open-Access-Publikation jetzt bereits in einer dritten, komplett neu überarbeiteten Auflage vor. Dieses Werk zu unterstützen, ist uns ein echtes Anliegen und eine große Freude.

Diese Unterstützung leisten wir aus voller Überzeugung. Schließlich sind wir als elexis AG durch unsere Tochter BST bereits seit einigen Jahren ein wichtiger Vertreter im Batteriemarkt. Bevor wir in diesen Zukunftsmarkt erfolgreich eingetreten sind, haben wir mit Hilfe einiger in diesem Werk mitwirkender Autoren eine Marktstudie durchgeführt. Der Grund: Wir wollten die Anforderungen und Aufwände im Bereich der Elektromobilität vollständig verstehen, um in diesen Markt mit unseren Entwicklungen optimal einzusteigen. Für jenen fruchtbaren und weiterhin engen Fachaustausch bin ich den Herausgebern sowie den Autor:innen sehr dankbar. Umso mehr, weil davon in erster Linie unsere Kunden profitieren, die wir mit unseren Produkten im Zukunftsmarkt Elektromobilität wettbewerbsfähig machen und begeistern können.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre.

CEO elexis AG und BST GmbH
Bielefeld, Deutschland

Dr. Rolf Merte,

Vorwort

Gemeinsames Vorwort

Bewegte Zeiten gab es immer wieder. Doch selten waren sie so rasant wie heute. Die Geschwindigkeit, in der grundlegende Neuerungen Fahrt aufnehmen und wissenschaftliche Entwicklungen sich ihren Weg bahnen, ist faszinierend. Was vor zehn Jahren noch als Zukunftsszenario begann, ist inzwischen fester Bestandteil unseres Alltags. Deshalb haben wir den Untertitel „Grundlagen einer Zukunftstechnologie“ der zweiten Auflage dieses Buches aus dem Jahr 2017 neu ausgerichtet. Die Elektromobilität liegt nicht mehr irgendwo in der Zukunft. Sie geschieht. Hier und jetzt. Und sie schreitet fort, in rapidem Tempo. Dabei beschränkt sie sich keineswegs auf die im Straßenverkehr mittlerweile regelmäßig zu sehenden Elektrofahrzeuge, sondern sie findet auch immer mehr Platz in den verschiedenen Bereichen der Gesellschaft und der Wirtschaft. Mit der dritten Auflage dieses Buchs möchten wir die hochspannende Weiterentwicklung der Elektromobilität aus unterschiedlichen Perspektiven diskutieren.

„Grundlagen einer Fortschrittstechnologie“: Mit diesem Untertitel möchten wir Ihre Aufmerksamkeit, liebe Leser:innen, auf die dritte und vollständig überarbeitete Auflage dieses Buches lenken. Dabei schätzen wir uns glücklich, unser Wissen mit den Einblicken und der Kompetenz zahlreicher Autor:innen ergänzen zu können, bei denen wir uns an dieser Stelle herzlich bedanken. Denn dieses Buch zeigt aus vielen Perspektiven: Heute sind bewegte Zeiten auch bewegende Zeiten.

Achim Kampker



PEM der RWTH Aachen University
Dr.-Ing., Universitätsprofessor
Achim Kampker
 Lehrstuhlleiter

Telefon +49 241 80 23042
 E-Mail A.Kampker@pem.rwth-aachen.de
 Web www.pem.rwth-aachen.de

Haben Sie Interesse an
 einem fachlichen Austausch?
 Treten Sie gerne in Kontakt.



Wenn ich auf die kurze Zeit zwischen der zweiten und der aktuellen Auflage dieses Buchs zurückblicke, erkenne ich eine turbulente Entwicklung. Sie spiegelt sich glasklar in meiner täglichen Arbeit mit den zahlreichen Mitarbeitenden des PEM der RWTH Aachen wider. Im alten Sprachgebrauch würde man wohl sagen: „Sie brennen für die Sache.“ Ich würde vielmehr sagen: „Sie sind elektrisiert!“ Dass uns die Elektromobilität in sämtlichen Lebensbereichen stärker miteinander verbinden kann, dürfte mittlerweile unumstritten sein. So blicke ich voller Hoffnung und Zuversicht darauf, dass wir als Gesellschaft diesen Weg weiter beschreiten. Die Herausgabe des Buches „Elektromobilität“ steht für mein Bestreben, den Fortschritt auf dieser Reise zu unterstützen. Ich hoffe, dass Sie, liebe Leser:innen, viele Aha-Momente und Denkanstöße mitnehmen können. Für mich war das während der Zusammenführung dieses Buches zweifelsohne oft der Fall. Meinen herzlichen Dank, dass dieses Werk Ihnen nun in Gänze vorliegt, möchte ich an alle Autor:innen und insbesondere an meine Kolleg:innen der benachbarten Lehrstühle der RWTH Aachen richten. Sie alle haben es ermöglicht, durch ihr Fachwissen ein ganzheitliches Bild der fortschreitenden Elektromobilität zu zeichnen.

Heiner Hans Heimes



PEM der RWTH Aachen University
Prof. Dr.-Ing. Heiner Heimes
 Mitglied der Institutsleitung

Telefon +49 241 80 23029
 E-Mail H.Heimes@pem.rwth-aachen.de
 Web www.pem.rwth-aachen.de

Sind Sie an einem
 Expertenaustausch interessiert?
 Kommen Sie gerne auf uns zu!



Im Jahr 2019 wurden John Goodenough, M. Stanley Whittingham und Akira Yoshino für ihre Arbeiten zur Lithium-Ionen-Batterie mit dem Nobelpreis für Chemie geehrt. Diese Wissenschaftler legten mit ihren Arbeiten den Grundstein für eine „wiederaufladbare Welt“. Ihren Arbeiten ist es zu verdanken, dass die Elektromobilität in der heutigen Form möglich ist. Nun liegt es in der Verantwortung der aktuellen Wissenschaftler:innen, diese Technologie weiterzuentwickeln und die Elektromobilität sowie die Kernkomponenten Batterie, Elektromotor und Brennstoffzelle kosten- und ressourceneffizient zu gestalten.

Die Kraftanstrengungen, die europäische Forschungsinstitute vollbringen, müssen auch dem Ziel dienen, im globalen Wettbewerb zu bestehen. Um dies erreichen zu können, ist die Aus- und Weiterbildung ein unverzichtbares Element. Dazu soll die dritte Auflage dieses Buchs einen Beitrag leisten. Der aktuelle Stand der Elektromobilität und die künftigen Entwicklungen werden durch die Autor:innen zusammengefasst. Dieses aufbereitete Wissen kann Ihnen, liebe Leser:innen, eine Orientierung bieten, um den Transformationsprozess hin zur Elektromobilität mitzugestalten. Hierbei wünsche ich Ihnen von Herzen viel Erfolg!

Inhaltlicher Überblick

Bei der Darlegung der Inhalte haben wir eine möglichst intuitive Struktur gewählt. Nach dem einleitenden Teil zum Hintergrund der Elektromobilität erfolgt die Darlegung der Inhalte „von innen nach außen“ – angefangen bei den Kernkomponenten des Elektromobils in Teil II, in dem Bauteile und Systeme des elektrischen Antriebsstrangs angemessen detailliert beschrieben und erläutert werden. Im Anschluss können die Lesenden in Teil III die Fabrik „betreten“ und Prozesse begreifen, die diese Kernkomponenten fertigen. Nach der Herstellung gilt es, das Elektrofahrzeug „verkehrstauglich“ zu machen: Somit beleuchtet Teil IV, wie und unter welchen Rahmenbedingungen das E-Mobil seine Zulassung und seinen Einsatz im Straßenverkehr findet. Da die Einbringung des Elektrofahrzeugs auch Einfluss auf das Straßenbild nimmt, wird in Teil V betrachtet, welche Implikationen sich dadurch für die Infrastruktur unseres Verkehrssystems ergeben. Auf welche Weise das Elektrofahrzeug einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaft nimmt, verdeutlicht Teil VI, der darstellt, wie Geschäftsmodelle neu aufkommen oder bestehende sich wandeln. Zum Abschluss betrachten wir in Teil VII den in der Öffentlichkeit häufig diskutierten Aspekt der Nachhaltigkeit – mit Blick auf die Elektromobilität.

Dank an den Verlag, den Sponsor und das Organisationsteam

Die Erstellung eines derart umfassenden Werks mit zahlreichen Autor:innen erfordert eine sorgfältige Planung und Durchführung. Stellvertretend für den gesamten Springer-Verlag möchten wir Herrn Markus Braun für die Begleitung des Erstellungsprozesses danken. Insbesondere die Unterstützung, dieses Werk im „Open Access“ zu veröffentlichen, hat

uns sehr gefreut. Durch die „Open Access“-Publikation kann dieses Buch die größtmögliche Leserschaft erreichen. Wir danken Herrn Dr. Rolf Merte herzlich für die Unterstützung durch BST und elexis. Abschließend bedanken wir uns beim gesamten Organisations-Team rund um Herrn Simon Voß.

Wir wünschen Ihnen viel Freude beim Lesen und Diskutieren der Inhalte!

Dr.-Ing., Universitätsprofessor, Lehrstuhlleiter
Aachen, Deutschland

Achim Kampker

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing., Mitglied der Institutsleitung
Aachen, Deutschland

Heiner Hans Heimes

Inhaltsverzeichnis

Teil I Einführung in die Elektromobilität

1 Eine historisch basierte Analyse	3
Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns, Konstantin Sasse, Björn Vetter und Paul Thomes	
1.1 Motivation und Methode	4
1.2 Paradigmenbildung – Öl statt Strom	6
1.3 Leben in einer Nische – Spezialfahrzeuge als Know-how-Speicher	10
1.4 Renaissance eines Zukunftskonzeptes	12
1.5 Vom Zukunftskonzept zum Paradigma	21
Literatur	24
2 Aktuelle Herausforderungen der Elektromobilität	29
Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Benjamin Dorn, Christian Offermanns und Florian Brans	
2.1 Kostendruck	30
2.2 Technische Hürden und unsichere Technologieentwicklung	33
2.3 Herausforderungen aus produktionstechnologischer Sicht	35
Literatur	37
3 Elektromobilität als Schlüsseltechnologie der Mobilitätswende	39
Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns, Janis Vienenkötter, Merlin Frank, Tobias Robben, Domenic Klohs, Natalia Soldan Cattani, Nikolaus Lackner, Nils Christen, Kim Kreisköther, Christoph Deutskens, Kai Kreisköther und Sarah Fluchs	
3.1 Aktuelle Marktsituation	40
3.2 Verbraucherperspektive	46
3.3 Politische Perspektive	47
3.3.1 Politische Anreize zur Etablierung Deutschlands als Leitmarkt für Elektromobilität	47

3.3.2	Politische Anreize zur Etablierung Deutschlands als Leitanbieter für Elektromobilität	49
3.3.3	Internationale politische Rahmenbedingungen für die Elektromobilität	51
3.4	Perspektive der Automobilindustrie	55
3.5	Energiewirtschaftliche Perspektive	58
	Literatur	59
4	Formen der Elektromobilität	63
	Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns, Konstantin Sasse, Jonas Gorsch und Moritz Frieges	
	Literatur	65
 Teil II Elektrofahrzeugspezifische Systeme		
5	Fahrzeugstruktur	69
	Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Mario Kehrer, Simon Dünwald, Lennart Heetfeld, Jens Polzenberg, Lucas Budde, Maximilian Keusen, Rahul Pandey und Thilo Röth	
5.1	„Conversion Design“ vs. „Purpose Design“ für Elektrofahrzeuge	74
5.2	Package für Elektrofahrzeuge	76
5.2.1	Batterieelektrische Fahrzeuge	77
5.2.2	Brennstoffzellenfahrzeuge	79
5.3	Body für Elektrofahrzeuge	80
5.3.1	Eigenschaftsmanagement von Elektrofahrzeugkarosserien	81
5.3.2	Evolution aus dem modernen Fahrzeugbau	84
5.3.3	„Conversion Design“	85
5.3.4	Karosserie von „Inline-Design“-Elektrofahrzeugen	86
5.3.5	Karosserie von „Purpose-Design“-Elektrofahrzeugen	87
5.3.6	Karosseriestrukturkonzept in Abhängigkeit vom mechanischen Package	87
5.3.7	Karosseriebaukasten für Elektrofahrzeuge: Ein Blick in die Zukunft	88
5.4	Leichtbau	93
	Literatur	103
6	Elektrischer Antriebsstrang	107
	Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns, Benjamin Dorn, Sebastian Hagedorn, Konstantin Sasse, Till Augustin Backes, Moritz Frieges, Jens Polzenberg, José Guillermo Dorantes Gómez, Christoph Deuskens, Kai Kreisköther, Ruben Förstmann und Carsten Nee	
6.1	Veränderungen im Antriebsstrang	108
6.2	Antriebsstrangkonzepete in Elektrofahrzeugen	110

6.3	Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs	113
6.3.1	Elektromotoren für den Traktionsantrieb.....	116
6.3.2	Hochvolt-Traktionsbatterien für Elektrofahrzeuge	118
6.3.3	Brennstoffzelle.....	120
6.3.4	Optimale Spannungslevel für Antriebssysteme.....	121
6.4	Modularisierung des elektrischen Antriebsstrangs	123
	Literatur.....	126
7	Batteriesysteme und deren Steuerung	129
	Dirk Uwe Sauer und Florian Ringbeck	
7.1	Lithium-Ionen-Batterien	130
7.1.1	Technologie	130
7.1.2	Elektrische Leistungsfähigkeit.....	133
7.1.3	Alterung und Lebensdauer.....	136
7.1.4	Sicherheit	137
7.1.5	Zelldesigns.....	139
7.1.6	Kosten	140
7.1.7	Materialverfügbarkeiten & Recycling	141
7.2	Beyond-Lithium-Ionen-Technologie	143
7.2.1	Festkörperbatterien	144
7.2.2	Lithium-Schwefel-Batterien	145
7.2.3	Lithium-Luft- und Metall-Luft-Batterien	145
7.2.4	Natrium-Ionen-Batterien	146
7.3	Typische Batteriebelastung und Lebensdaueranforderung	146
7.4	Batteriesystemdesign	148
7.4.1	Verschaltung.....	149
7.4.2	Batteriemanagementsystem.....	150
8	Brennstoffzellensysteme	153
	Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Mario Kehrer, Christoph Schön, Sebastian Hagedorn, Sebastian Biegler und Philipp Reims	
8.1	Typen von Brennstoffzellen für mobile Anwendungen	154
8.2	Funktionsprinzip der PEM-Brennstoffzelle.....	155
8.3	Aufbau von Brennstoffzellensystemen	156
8.3.1	Komponenten des Brennstoffzellen-Stacks	157
8.3.2	Komponenten der Balance-of-Plant.....	160
	Literatur.....	163
9	Elektrische Maschinen	165
	Kay Hameyer, Daniel Butterweck, Niklas Driendl, Marius Franck, Benedikt Groschup, Kevin Jansen, Nora Leuning, Sebastian Mönninghoff, Martin Nell und Michael Schröder	
9.1	Elektroblechpaket	173
9.2	Hartmagnete.....	175

9.3	Wicklungen elektrischer Maschinen	176
9.4	Aufbau von Isoliersystemen.	178
9.5	Kühlsystem	181
9.6	Lagerung	182
	Literatur.	183
10	Leistungselektronik	187
	Rik W. De Doncker, Niklas Fritz und Duc Pham	
10.1	Einführung in die Leistungselektronik.	187
10.2	Leistungselektronische Bauelemente.	190
10.3	DC/DC-Wandler.	192
10.4	Ladegeräte	194
10.5	Wechselrichter	196
10.6	Regelungsplattform für Wechselrichter	198
	Literatur.	201
11	Thermomanagement in Elektrofahrzeugen	203
	Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns, Mario Kehrer, Francesco Maltoni und Hendrik Löbbberding	
11.1	Herausforderungen des Thermomanagementsystems in Elektrofahrzeugen	204
11.2	Thermomanagement der Elektromobilkomponenten	204
11.2.1	Thermomanagement der Batterie.	205
11.2.2	Thermomanagement des Elektromotors	208
11.2.3	Thermomanagement der Hochvoltkomponenten.	209
11.2.4	Thermomanagement des Fahrzeuginnenraums	209
11.2.5	Gesamtsystembetrachtung des Thermomanagements	210
11.3	Bauraum der Thermomanagement-Komponenten.	211
11.4	Computerbasierte Systemmodellierungsansätze des Thermomanagements.	211
	Literatur.	212
Teil III Produktion von elektrofahrzeugspezifischen Systemen		
12	Vom Prototypen zur Serienfertigung	217
	Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Benjamin Dorn, Andreas Kraus und Michael Nankemann	
12.1	Anlaufmanagement	218
12.2	Lieferantenmanagement.	220
12.3	Logistikmanagement	221
12.4	Produktionsmanagement	222
12.5	Änderungsmanagement	223
12.6	Kostenmanagement	223
	Literatur.	224

13	Produktionsprozesse der Fahrzeugstruktur	227
	Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Benjamin Dorn, Mario Kehrer, Simon Dünnwald, Dennis Badura, Maximilian Terren und Thilo Röth	
13.1	Stückzahlsspezifische Produktionsverfahren der Außenhautkomponenten	228
13.1.1	Stückzahlabhängige Produktionsverfahren auf Basis von Kunststoffwerkstoffen	229
13.1.2	Die technischen Verfahren der Kunststoff-Teileproduktion in der Übersicht	230
13.1.3	Stückzahlabhängige Produktionsverfahren auf Basis von Metallen	232
13.1.4	Vierkant-Hohlprofil-Herstellung	232
13.1.5	Die technischen Verfahren der Vierkant-Hohlprofil- Herstellung in der Übersicht	233
13.1.6	Das technische Tiefziehen für die Stirnwandproduktion.	235
13.1.7	Space-Frame-Knoten-Herstellung.	236
13.1.8	Die technischen Verfahren der Space-Frame-Knoten- Herstellung in der Übersicht	237
13.1.9	Herstellung der Federbeinaufnahme	237
13.1.10	CNC-Fräsen als Herstellungsverfahren in der Übersicht	238
13.1.11	Weitere stückzahlabhängige Produktionsverfahren.	239
13.2	Fügen von Außenhaut und Karosserie	240
13.2.1	Schweißverfahren zum Fügen von Außenhaut und Karosserie .	241
13.2.2	Weitere Verfahren zum Fügen von Außenhaut und Karosserie .	242
13.2.3	Verfahren zum Fügen von elektrischen Komponenten	243
	Literatur.	246
14	Montage von Elektrofahrzeugen	249
	Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Benjamin Dorn, Mario Kehrer, Simon Dünnwald, Lucas Budde, Maximilian Keusen, Felix Rosen, Christoph Deutskens, Kai Kreisköther, Ruben Förstmann und Carsten Nee	
14.1	Grundlagen der Montage	251
14.2	Montageveränderungen gegenüber konventioneller Fahrzeugmontage . . .	253
	Literatur.	256
15	Produktionsverfahren von Batteriezellen und -systemen	259
	Heiner Hans Heimes, Benjamin Dorn, Marc Locke, Sarah Wennemar, Robert Ludwigs, Lorenz Plocher und Simon Voß	
15.1	Herstellungsprozess einer Batteriezelle.	260
15.1.1	Elektrodenfertigung	260
15.1.2	Zellassemblierung	262
15.1.3	Zellfinalisierung.	264

15.2	Batteriemodul- und -packmontage.	266
15.2.1	Montageprozess des Moduls	267
15.2.2	Montageprozess des Packs.	269
15.3	Die Zukunft der Batterieproduktion.	270
	Literatur.	272
16	Produktionsverfahren von Brennstoffzellen und -systemen	275
	Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Benjamin Dorn, Christoph Schön, Sebastian Hagedorn, Philipp Reims und Moritz Müller-Roden	
16.1	Herstellung der Stack-Komponenten	276
16.1.1	Produktion von Bipolarplatten.	276
16.1.2	Produktion von Membran-Elektroden-Einheiten.	278
16.1.3	CCM.	278
16.1.4	GDL.	279
16.1.5	MEA.	280
16.1.6	Produktion weiterer Komponenten	281
16.2	Fertigung des Brennstoffzellen-Stacks	281
16.3	Assemblierung des Gesamtsystems	283
	Literatur.	286
17	Produktionsverfahren elektrischer Maschinen	289
	Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Benjamin Dorn, Michael Nankemann, Andreas Kraus, Christian Stäck und Henrik Born	
17.1	Herstellung des Elektroblechpakets	290
17.2	Rotorproduktion.	293
17.2.1	Fremderregte Synchronmaschine (FSM).	295
17.2.2	Permanenterregte Synchronmaschine (PMSM).	295
17.2.3	Asynchronmaschine (ASM).	297
17.3	Statorproduktion	297
17.3.1	Kupferlackdrahtproduktion	299
17.3.2	Wicklungsherstellung.	301
17.3.3	Verarbeitung von Isoliersystemen	306
17.4	Endmontage elektrischer Maschinen	308
17.4.1	Endmontagetechnik	308
17.4.2	EoL-Prüftechnik.	310
	Literatur.	311

18	Produktionsverfahren in der Leistungselektronik	313
	Rik W. De Doncker, Isabel Austrup, Sven Kalker und Lukas Ruppert	
18.1	Aufbau- und Verbindungstechnik von Leistungshalbleitern	314
18.2	Kühlung	317
18.3	Passive Bauelemente	318
18.3.1	Kondensatoren	318
18.3.2	Magnetika	319
18.4	Treiberschaltung	320
18.5	Produktionsumgebung und ESD-Schutz	323
	Literatur	323
Teil IV	Technische und regulatorische Rahmenbedingungen der Elektromobilität	
19	Lösungsstrategien der Produktentstehung	329
	Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns, Konstantin Sasse, Jonas Gorsch, Kai Kreisköther, Ruben Förstmann und Carsten Nee	
19.1	Lösungsraum- und Spezifikationsmanagement als Kernkompetenz des Systemintegrators	330
19.2	Front- und Side-Loading für eine kurze Time-to-Market	331
19.3	Frühzeitige Validierung mittels früher Prototypen	332
19.4	Agile Methoden für eine hohe Reaktionsfähigkeit und kurze Time-to-Market	333
19.5	Möglichkeiten zur Integration der Montage eines „Conversion-Design“-Fahrzeuges in bestehende Montagestrukturen	335
19.6	Schaffung skalierbarer Montagestrukturen	336
	Literatur	338
20	Produktentwicklungsprozess	341
	Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Fabian Schmitt und Michael Demming	
20.1	Schritte des Produktentwicklungsprozesses	342
20.1.1	Konzeptphase	343
20.1.2	Serientwicklung	344
20.1.3	Validierung	344
20.2	Entwicklungsmodelle	346
20.2.1	V-Modell	346
20.2.2	W-Modell	348
20.2.3	Agile Fahrzeugentwicklung	348
20.3	Integrierte Produktentwicklung	349
	Literatur	350

21 Gesetzliche Anforderungen	353
Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns, Mario Kehrer, Konstantin Sasse, Simon Dünwald, Janis Vienenkötter, Amira Meyer, Moritz Friege, Merlin Frank, Björn Vetter, Dirk-W. Morche, Klaus Genuit und Olaf Elsen	
21.1 Technische Prüfstellen und Technische Dienste	355
21.2 Fahrzeugklassen	355
21.2.1 Internationale Regelung der Fahrzeugklassen	356
21.2.2 Nationale und europäische Regelung der Fahrzeugklassen	356
21.2.3 Fahrzeugunterklassen	357
21.2.4 Fahrzeugklasse L	358
21.2.5 Fahrzeugklassen für Elektrofahrzeuge	359
21.2.6 Klassifizierung elektrifizierter Antriebskonzepte	361
21.3 Zulassungsarten	363
21.3.1 Typgenehmigung	364
21.3.2 Einzelbetriebserlaubnis	365
21.4 Normen und Standards	366
21.4.1 Produkt- und Betriebssicherheit	366
21.4.2 Elektrische Sicherheit	368
21.4.3 Funktionale Sicherheit	371
21.4.4 Batteriebaukastensysteme	372
21.4.5 Kabel- und Steckverbindungen	373
21.4.6 Ladeinfrastruktur	377
21.5 Noise, Vibration, Harshness (NVH)	379
21.5.1 NVH-Aufgaben in den vergangenen Jahren	380
21.5.2 NVH in Zukunft	384
21.5.3 Fahrzeuginnengeräusche	386
21.5.4 Fahrzeugaußengeräusche	392
21.5.5 Ausblick	395
21.6 Elektromagnetische Verträglichkeit	396
21.6.1 Einführung	396
21.6.2 Historische Entwicklung	399
21.6.3 Kopplungsmodell und Kopplungsmechanismen	400
21.6.4 EMV-Design am E-Fahrzeug	404
21.7 Zulassung und Zertifizierung von Batteriepacks	406
21.7.1 Institutionen, Standards und Normen	407
21.7.2 Internationaler Vergleich	408
21.7.3 Zulassung	411
21.7.4 Transportvorschriften	414
Literatur	416

Teil V Infrastruktur für die Elektromobilität

22	Mobilitätsverhalten und Fahrzeugnutzung	425
	Tobias Kuhnimhof	
22.1	Grundlagen zum Mobilitätsverhalten	426
22.2	Pkw der Privathaushalte	427
22.3	Zweiräder	432
22.4	Busse des öffentlichen Verkehrs	434
22.5	Fahrzeuge des Wirtschaftsverkehrs	434
	Literatur	436
23	Einsatzfelder von Elektrofahrzeugen	439
	Tobias Kuhnimhof und Marcel Porschen	
23.1	Elektromobilität in Privathaushalten: Elektrische Pkw	439
23.2	Elektromobilität in Privathaushalten: Pedelecs	442
23.3	Öffentlicher Verkehr	443
23.4	Mobilitätskonzepte – Elektrifizierung der Shared Micromobility	444
	23.4.1 Pedelecs	444
	23.4.2 E-Scooter	445
	23.4.3 Carsharing	446
23.5	Wirtschaftsverkehr	447
	23.5.1 „Last-Mile“-Logistik	447
	23.5.2 Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeuge	448
	Literatur	449
24	Lade- und Ladeinfrastruktur-Technologie	453
	Christopher Hecht, Jan Figgenger und Dirk Uwe Sauer	
24.1	Lademöglichkeiten	454
	24.1.1 Schuko-Notlader	455
	24.1.2 Wallbox	455
	24.1.3 Ladesäule (AC)	456
	24.1.4 Schnellladesäule (DC)	456
24.2	Steckertypen	458
24.3	Gleichrichteraufbauten	459
24.4	Batteriespeicher	461
24.5	Mess- und Abrechnungssysteme	461
24.6	Kommunikationsprotokolle	463
	Literatur	464

25 Ladebedarf und Ladeinfrastrukturbedarf	467
Marcel Porschen, Fabian Kühnel, Tobias Kuhnimhof, Chris Martin	
Vertgewall, Niklas Wehbring und Andreas Ulbig	
25.1 Einflussfaktoren auf den Ladebedarf	468
25.2 Typisierung von Ladebedarfen	470
25.2.1 Ladepunkte und Ladestandorttypen	470
25.2.2 Einteilung der Fahrzeuge in Ladebedarfsgruppen	474
25.2.3 Verflechtung von Ladestandorttypen und Ladebedarfsgruppen ...	476
25.2.4 Schnellladebedarf in den verschiedenen Gruppen	477
25.3 Räumlich-zeitliche Struktur von Ladebedarfen	477
25.4 Ladeleistung	480
25.4.1 Prognose von Ladevorgängen	481
25.4.2 Exemplarische Fahr- und Ladeprofile	483
Literatur	484
26 Ladeinfrastruktur im Status quo	487
Christopher Hecht, Jan Figgenger und Dirk Uwe Sauer	
26.1 Private Ladeinfrastrukturnutzung am Wohnort	488
26.2 Öffentliche Ladeinfrastrukturnutzung	489
26.3 Nutzung von elektrifizierten Flotten	492
Literatur	496
27 Netzintegration	497
Chris Martin Vertgewall, Niklas Wehbring und Andreas Ulbig	
27.1 Energieversorgung in Deutschland	498
27.1.1 Stromerzeugung und Kraftwerkspark	498
27.1.2 Energiebedarf und elektrische Verbraucher	501
27.2 Stromnetze	503
27.2.1 Übertragungsnetz	503
27.2.2 Verteilungsnetz	505
27.2.3 Zukünftige Herausforderungen	505
27.3 Auswirkungen von Elektromobilität auf das Energiesystem	507
27.3.1 Netzanschlussmöglichkeiten	507
27.3.2 Energiebedarf und Leistungsspitzen	509
27.3.3 Netzausbaubedarf durch Elektromobilität	512
27.4 Intelligente Netzintegration	512
27.4.1 Spitzenglättung	512
27.4.2 Ausgestaltungsmöglichkeiten	513
27.4.3 „Vehicle-to-X“ und Pooling	516
Literatur	517

28	Rechtliche Grundlagen zum Aufbau von Ladeinfrastruktur	521
	Marcel Porschen, Tobias Kuhnimhof, Chris Martin Vertgehall, Niklas Wehbring und Andreas Ulbig	
28.1	Aufbau privater Ladeinfrastruktur	523
28.1.1	Bauordnungs- und Bauplanungsrecht	523
28.1.2	Wohnungseigentumsmodernisierungsgesetz (WEMoG)	525
28.1.3	Gebäude-Elektromobilitätsinfrastruktur-Gesetz (GEIG)	526
28.1.4	Stellplatzsatzungen	527
28.2	Aufbau öffentlicher Ladeinfrastruktur	528
28.3	Betrieb von Ladeinfrastruktur	529
28.3.1	Private Ladeinfrastruktur	529
28.3.2	Öffentliche Ladeinfrastruktur	530
	Literatur.	531
29	Weitere Implikationen für Verkehrsinfrastruktur	533
	Fabian Kühnel, Marcel Porschen und Tobias Kuhnimhof	
29.1	Tankstellen	533
29.2	Lärm- und Schadstoffemissionen.	534
29.3	Flächeninanspruchnahme.	535
	Literatur.	536
30	Schlussfolgerungen und Ausblick	537
	Tobias Kuhnimhof und Marcel Porschen	
Teil VI Geschäftsmodelle entlang der elektromobilen Wertschöpfungskette		
31	Gezeitenwende in der Automobilindustrie	541
	Garnet Kasperk, Sarah Fluchs und Julius Hausmann	
	Literatur.	542
32	Das elektromobile Wertschöpfungssystem	545
	Garnet Kasperk, Sarah Fluchs und Julius Hausmann	
32.1	Das Elektromobilitätsangebot	545
32.2	Fahrzeugbezogene Wertschöpfungsstruktur	546
32.3	Die globale fahrzeugbezogene Wertschöpfung	549
32.3.1	Fahrzeugproduktion	549
32.3.2	Zusammensetzung der Wertschöpfung bei der Elektromobilproduktion.	555
32.3.3	Batterie: Rohstoffe, Zellen, Komponenten	559
32.3.4	Elektromotor und Leistungselektronik	561
	Literatur.	563

33	Wertschöpfungspotenziale entlang der elektromobilen	
	Wertschöpfungskette	565
	Garnet Kasperk, Sarah Fluchs und Julius Hausmann	
33.1	Fahrzeugbezogene Potenziale	565
33.2	Wertschöpfungspotenziale der Lithium-Ionen-Batterie	571
33.3	Wertschöpfungspotenziale im Bereich Energieversorgung und Ladeinfrastruktur	575
33.4	Wertschöpfungspotenziale im Bereich Dienstleistungen	579
	Literatur	582
34	Elemente der elektromobilerorientierten Geschäftsmodelle	585
	Garnet Kasperk, Sarah Fluchs und Julius Hausmann	
34.1	Elemente von Geschäftsmodellen	585
34.2	Fahrzeugbezogene Geschäftsmodelle	588
34.2.1	Fahrzeugverkauf	588
34.2.2	E-Flotten	593
34.2.3	E-Carsharing	594
34.2.4	Multimodaler Transport	596
34.3	Energie-/infrastrukturbezogene Geschäftsmodelle	598
34.3.1	Aufbau, Instandhaltung und Betrieb von Ladesäulen	598
34.3.2	Ladeinfrastrukturbezogene Dienstleistungen	599
34.4	Weitergehende dienstleistungsorientierte und integrierte Geschäftsmodelle	601
34.5	Kooperative Geschäftsmodelle	604
34.6	Kooperationen von Automobilherstellern	607
34.7	Kooperationen von Automobilzulieferern	608
34.8	Kooperationen von Energieversorgungsunternehmen	610
	Literatur	611
35	Geschäftsmodelle der Elektromobilität	613
	Garnet Kasperk, Sarah Fluchs und Julius Hausmann	
35.1	Geschäftsmodellinnovationen	613
35.2	Geschäftsmodelloptionen aus Sicht der Automobilhersteller	616
35.3	Geschäftsmodelloptionen aus Sicht der Automobilzulieferer	620
35.4	Geschäftsmodelloptionen aus Sicht der Energieversorger	621
	Literatur	623
36	Zusammenfassung	625
	Garnet Kasperk, Sarah Fluchs und Julius Hausmann	

Teil VII Nachhaltigkeitspotenziale der Elektromobilität

37	Drei Säulen der Nachhaltigkeit und Bewertungsansätze	629
	Jana Gerta Backes, Rose Nangah Mankaa und Marzia Traverso	
37.1	Ökologische Dimension: „Life Cycle Assessment“	631
37.2	Ökonomische Dimension: „Life Cycle Costing“	634
37.3	Soziale Dimension: „Social Life Cycle Assessment“	635
37.4	Beispiel-Case-Study soziale Nachhaltigkeit in der Elektromobilität – Fokus: Soziale-Hotspot-Analyse von Lithium-Ionen-Batterien	637
	Literatur.	640
38	Die ökologischen Aspekte des Elektromobils während des gesamten Lebenszyklus	643
	Jana Gerta Backes, Rose Nangah Mankaa und Marzia Traverso	
38.1	Ziel und Untersuchungsrahmen	644
38.2	Sachbilanz und Datensammlung	645
38.3	Wirkungsabschätzung oder „Life Cycle Impact Assessment“	645
38.3.1	Sieben Grundsätze zu Ökobilanzen von Elektrofahrzeugen	650
	Literatur.	651
39	Potenziale von Second-Use-Anwendungen für Lithium-Ionen-Batterien	655
	Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns, Nikolaus Lackner, Domenic Klohs, Mark Junker und Kim Kreisköther	
39.1	Aufkommen und Zustand von Batterien für die Second-Life-Phase	657
39.2	Nutzungskonzepte für Second-Life-Batterien	660
39.3	Ausblick für Second-Life-Batterien.	665
39.4	Zusammenfassung	666
	Literatur.	667
40	Refurbishment von Lithium-Ionen-Batterien	669
	Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns, Janis Vienenkötter und Merlin Frank	
	Literatur.	671
41	Demontage von Lithium-Ionen-Batterien.	673
	Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns, Domenic Klohs und Kim Kreisköther	
	Literatur.	676

42	Remanufacturing von Lithium-Ionen-Batterien	679
	Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns, Domenic Klohs, Nikolaus Lackner und Kim Kreisköther	
42.1	Konzeptansätze zum Remanufacturing von Lithium-Ionen-Batterien.....	681
42.2	Herausforderungen des Remanufacturings in der Batterie	682
42.3	Ökonomischer und ökologischer Nutzen des Remanufacturings	684
	42.3.1 Zusammenfassung und Ausblick	685
	Literatur.....	686
43	Recycling von Lithium-Ionen-Batterien	687
	Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns, Janis Vienenkötter, Francesco Maltoni, Natalia Soldan Cattani, Nils Christen und Kim Kreisköther	
43.1	Gesetzliche Rahmenbedingungen	688
43.2	Überblick zu Batterie-Recycling-Verfahren.....	692
43.3	Stand der Technik in Forschung und Entwicklung	693
	43.3.1 Stand der Technik industrieller Recycling-Verfahren	695
	Literatur.....	701
	Abkürzungsverzeichnis	705
	Stichwortverzeichnis	711

Autorenverzeichnis

Isabel Austrup	Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen
Till Augustin Backes	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Jana Gerta Backes	Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Institut für Nachhaltigkeit im Bauwesen (INAB), RWTH Aachen
Dennis Badura	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Sebastian Biegler	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Henrik Born	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Florian Brans	Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Lucas Budde	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Daniel Butterweck	Oberingenieur, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen
Natalia Soldan Cattani	Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Nils Christen	Business Development E-Mobility, STAWAG, Stadtwerke Aachen AG
Michael Demming	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Christoph Deutskens	CEO & Partner, PEM Motion GmbH, Aachen
Rik W. De Doncker	Universitätsprofessor, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen
Benjamin Dorn	Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Niklas Driendl	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen
Simon Dünwald	Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Olaf Elsen	Senior Projektmanager, FEV Europe GmbH, Aachen

Jan Figgener	Abteilungsleiter, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen
Sarah Fluchs	Economist im Bereich Umwelt, Energie, Infrastruktur, Institut der deutschen Wirtschaft, Köln
Ruben Förstmann	Projektleiter, TQ-Systems GmbH, Wetter (Ruhr)
Marius Franck	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen
Merlin Frank	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Moritz Frieiges	Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Niklas Fritz	Gruppenleiter, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen
Klaus Genuit	HEAD acoustics GmbH
José Guillermo Dorantes Gómez	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Jonas Gorsch	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Benedikt Groschup	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen
Sebastian Hagedorn	Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Kay Hameyer	Universitätsprofessor, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen
Julius Hausmann	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Christopher Hecht	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen
Lennart Heetfeld	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Heiner Hans Heimes	Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Kevin Jansen	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen
Mark Junker	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen
Sven Kalker	Gruppenleiter, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen
Achim Kampker	Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Garnet Kasperk	Leiterin Center for International Automobile Management, Lehrstuhl für Internationale Wirtschaftsbeziehungen RWTH Aachen
Mario Kehrer	Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Maximilian Keusen	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen

Domenic Klohs	Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Andreas Kraus	Senior Expert Data Engineering, PowerCo SE, Salzgitter
Kai Kreisköther	Co-Founder & CEO, Ducktrain, Aachen
Kim Kreisköther	Specialist Battery Cell/ System – Adhesives Automotive Components, Henkel
Fabian Kühnel	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Lehrstuhl und Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr (ISB), RWTH Aachen
Tobias Kuhnimhof	Universitätsprofessor, Lehrstuhl und Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr (ISB), RWTH Aachen
Nikolaus Lackner	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Nora Leuning	Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen
Hendrik Löbbberding	Team Leader Battery Cell, FEV Europe GmbH, Aachen
Marc Locke	Senior Battery Expert, ACCURE Battery Intelligence, Aachen
Robert Ludwigs	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Francesco Maltoni	Technical Specialist, Business Unit Electric Powertrain – FEV Europe GmbH, Aachen
Rose Nangah Mankaa	Oberingenieurin, Institut für Nachhaltigkeit im Bauwesen (INAB), RWTH Aachen
Amira Meyer	Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Sebastian Mönninghoff	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen
Dirk-W. Morche	Gründer und Leiter DWM Beteiligungs- und Beratungsgesellschaft mbH
Moritz Müller-Roden	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Michael Nankemann	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Carsten Nee	Associate Partner, McKinsey & Company Inc., Hamburg
Martin Nell	Gruppenleiter, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen
Christian Offermanns	Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Rahul Pandey	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Duc Huu Pham	Gruppenleiter, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen
Lorenz Plocher	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Jens Polzenberg	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen

Marcel Porschen	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Lehrstuhl und Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr (ISB), RWTH Aachen
Philipp Reims	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Florian Ringbeck	Geschäftsführender Oberingenieur, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen
Tobias Robben	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Felix Rosen	Trainee E-Mobility, Aumann Beelen GmbH, Beelen
Thilo Röth	FH Aachen – University of Applied Sciences, Lehr- und Forschungsgebiet Karosserietechnik, Aachen, Deutschland
Lukas Ruppert	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen
Konstantin Sasse	Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Dirk Uwe Sauer	Universitätsprofessor, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen
Fabian Schmitt	Bereichsleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Christoph Schön	E-Mobility Innovation Manager, LKQ Europe, Schweiz
Michael Schröder	Technical Specialist, FEV Europe GmbH, Aachen
Christian Stäck	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Maximilian Terren	Projektleiter, Fensterbau Mersch
Paul Thomes	em. Universitätsprofessor, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der RWTH Aachen
Marzia Traverso	Universitätsprofessorin, Institut für Nachhaltigkeit im Bauwesen (INAB), RWTH Aachen
Andreas Ulbig	Universitätsprofessor, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft (IAEW), RWTH Aachen
Chris Martin VertgeWall	Gruppenleiter, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft (IAEW), RWTH Aachen
Björn Vetter	Commissioning Engineer, Siemens Mobility
Janis Vienenkötter	Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Simon Voß	Geschäftsführer eLab und Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen
Niklas Wehbring	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft (IAEW), RWTH Aachen
Sarah Wennemar	Gruppenleiterin, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen

Einführung in die Elektromobilität

Als Basis für alle weiterführenden Kapitel dieses Buchs beschäftigt sich der zweite Abschnitt zunächst mit den Grundlagen der Elektromobilität. Den Auftakt macht Kap. 1 mit einem historischen Blick auf die Entwicklung der E-Mobilität. Dabei werden die langjährige Dominanz des Verbrennungsmotors sowie die Ursachen für den Wandel hin zur Elektromobilität unter die Lupe genommen. Kap. 2 widmet sich daraufhin aktuellen Herausforderungen wie dem Kostendruck insbesondere bei Anschaffungsinvestitionen, technologischen Hürden mit Blick auf die Technologievelfalt und zuletzt auch produktionsstechnischen Fragestellungen. Kap. 3 hebt die Elektromobilität als Schlüsseltechnologie hervor, die das Potenzial besitzt, die aktuelle Verkehrssituation nachhaltig zu verändern. Dabei werden Wege zur Großserie aufgezeigt sowie Perspektiven und aktuelle Bestrebungen zahlreicher Akteure von den Verbrauchenden bis zur Politik und von der Automobilindustrie bis zur Energiewirtschaft dargelegt. Abschließend nimmt Kap. 4 verschiedene Formen der Elektromobilität in den Blick. Dazu zählt eine große Bandbreite elektrisch angetriebener Verkehrsmittel mit Fokus auf den motorisierten Individualverkehr, Wasserstoff als Energieträger und die Elektromobilität in der Luftfahrtindustrie.



Eine historisch basierte Analyse

1

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns,
Konstantin Sasse, Björn Vetter und Paul Thomes

Um den vollständigen geschichtlichen Verlauf der Elektromobilität und seine Ursachen zu erläutern, wurde die folgende historisch basierte Analyse in fünf Teilaspekte gegliedert. Im ersten Schritt wird die Ausgangssituation der Analyse in Abschn. 1.1 dargestellt. Sie ist durch die Fragestellung nach der Ursache des Aufstiegs und der langjährigen Dominanz

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

C. Offermanns

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland
E-Mail: c.offermanns@pem.rwth-aachen.de

K. Sasse

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland
E-Mail: k.sasse@pem.rwth-aachen.de

B. Vetter (✉)

Commissioning Engineer, Siemens Mobility, Munich, Deutschland
E-Mail: bjoern.Vetter@rwth-aachen.de

P. Thomes

em. Universitätsprofessor, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland
E-Mail: thomes@wisotech.rwth-aachen.de

des Verbrennungsmotors gekennzeichnet, der ursprünglich in Konkurrenz zum elektrischen Antrieb stand. Dieser Vorrang mündete in einem Paradigma zugunsten des Verbrennungsmotors. Die Erklärung jener Paradigmenbildung erfolgt in Abschn. 1.2 – mit Blick auf die zeitgeschichtlichen Umstände. Die Technologie elektrischer Antriebe hatte trotz des Verbrennungsmotoren-Paradigmas kontinuierlich in Spezialanwendungen Bestand, wodurch das Know-how rund um diese Technologie erhalten geblieben ist. Die Gründe dafür und der Einfluss dieses Aspekts sind in Abschn. 1.3 beschrieben. Der in den 1990er-Jahren aufkommende Aufschwung der elektrischen Antriebstechnologie in mobilen Anwendungen und deren Etablierung als Zieltechnologie für künftige Mobilität ist Inhalt des Abschn. 1.4. Die bei dieser Entwicklung relevanten Aspekte und Erscheinungsformen werden schrittweise erläutert. Die Tragweite und die Umstände, welche die Elektromobilität zum aktuellen Zeitpunkt und in der prognostizierbaren Zukunft kennzeichnen, sind Gegenstand von Abschn. 1.5. Es stellt den Abschluss der Analyse dar und verdeutlicht, weshalb Elektromobilität als Schlüssel zu einer nachhaltigen Mobilität gelten darf.

1.1 Motivation und Methode

Elektromotoren als Antriebsquelle von Fahrzeugen besitzen eine rund 200 Jahre alte Geschichte. Ihre Ursprünge liegen auf der Straße, der Schiene und dem Wasser und fallen unmittelbar mit der beginnenden Praxistauglichkeit des Elektromotors in den 1830er-Jahren zusammen. Bereits 1838 entwickelte Hermann Jacobi einen 220 W starken Elektromotor und stattete ein 14 Personen fassendes Boot damit aus. Bedeutende Innovationen wie geeignete Bleiakkumulatoren in den 1850ern und die Entwicklung des dynamoelektrischen Prinzips durch Siemens im Jahr 1866 verhalfen dem Elektromotor zum Durchbruch. Das Konzept elektrischer Mobilität ist damit sogar älter als die mobile Anwendung des Verbrennungsmotors. Mit diesem waren erste Mobilitätslösungen in den 1860er-Jahren zu Wasser und mit Hilfe des Lenoir'schen Gasmotors zu Land unterwegs. Den Durchbruch schaffte das Konzept des Verbrennungsmotors 1885/1886 in den Fahrzeugkonstruktionen von Daimler und Benz, die auf dem 1876 patentierten Ottomotor basierten.

Der Verbrennungsmotor ist ein weitaus jüngerer Antriebskonzept als das der Dampfmaschine. Diese realisierte erstmals das Konzept des ermüdungsfreien Antriebs, dessen Anfänge durch James Watt sich bis in die zweite Hälfte des 18. Jahrhunderts zurückverfolgen lassen. Die Dampfisenbahn katapultierte seit den 1820er-Jahren, ausgehend von Großbritannien als Wiege der Industrialisierung, die Effizienz und die Qualität des Transports von Menschen und Gütern in ungeahnte Dimensionen. Sie bildet damit zweifelsohne einen Meilenstein in der technischen Geschichte. Dieser Erfolg setzte indes neue Anreize für den bis dato überwiegend pferdebewegten Straßenverkehr.^{1,2}

Auch „La Mancelle“, das erste seriengefertigte Auto, war mit einem Dampfmotor ausgestattet. 1878 wurden 50 Exemplare produziert und verkauft. Nur ein Jahr später

¹Vgl. Schiedt 2010.

²Vgl. Weiher und Goetzler 1981.

präsentierte Siemens die weltweit erste elektrisch betriebene Lokomotive. Das erste Elektroauto fand in Frankreich spätestens 1881 seinen Weg auf die Straße – als Dreirad und als Vierrad. Noch im selben Jahr ging die erste Straßenbahn, wiederum ein Produkt von Siemens, dauerhaft in Betrieb. Nur ein Jahr später folgte mit dem „Elektromote“ in Berlin der weltweit erste Oberleitungsbus. Die erste Ober-Buslinie startete 1900 im Kontext der Pariser Weltausstellung. Ein Elektroauto mit dem bezeichnenden Namen „La Jamais Contente“ (Französisch für „Die nie Zufriedene“) bewegte 1899 erstmals einen Menschen auf der Straße schneller als 100 Stundenkilometer. Ein elektrischer Wagen des französischen Herstellers Krieger, der erstmals Rekuperationsbremsen verbaute, legte 1901 eine Strecke von mehr als 100 km mit einer mittleren Geschwindigkeit von knapp 20 km/h ohne Nachladen zurück. Die 200-Stundenkilometer-Marke wurde bereits 1896, jedoch zuerst von einem Dampfwagen, erreicht.^{3,4,5,6}

Die gezeigten Meilensteine verdeutlichen: Mobilität ist ein menschliches Grundbedürfnis, für das hohe Anstrengungen erbracht wurden und immer noch werden. Die Erfindung des motorischen Antriebs erhöhte die Geschwindigkeit im Landverkehr rasant, die zuvor über Jahrtausende hinweg konstant gewesen war, und führte zu einem vollkommen veränderten Mobilitätskonsum und -verhalten. Neue Aktivitäten auf einem sich gerade entwickelnden Wachstumsmarkt kamen auf. Im Bereich der Automobile entstand dadurch die Konkurrenz zwischen den Antriebskonzepten Elektromotor, Dampfmotor und Verbrennungsmotor. Dieser Wettbewerb dauerte rund zwei Jahrzehnte an, bis der Verbrennungsmotor im frühen 20. Jahrhundert zu Wasser und zu Land die Märkte zu dominieren begann. Prägend für den Ausgang des Wettstreits der Antriebskonzepte ist das von KUHN sogenannte Verbrenner-Paradigma.^{7,8,9} Die ursprünglich verheißungsvolle Marktchance durch das „Golden Age“ des Elektroautos zwischen 1900 und 1920 fiel in sich zusammen.

Der Technikhistoriker GJMS MOM hat sich auf der Suche nach den Ursachen für den damaligen Karrierebruch „des Autos von morgen“ systematisch und philosophisch mit den historischen Zusammenhängen auseinandergesetzt. Er macht eine Mischung technischer und soziokultureller Faktoren für die Paradigmenentscheidung zugunsten des Verbrennungskonzepts verantwortlich, die gleichzeitig das Auto als Mobilitätssystem zum Erfolg führte.^{10,11,12}

³Vgl. Abt 1998.

⁴Vgl. Kirsch 2000.

⁵Vgl. Mom 2004.

⁶Vgl. Weiher und Goetzeler 1981.

⁷Vgl. Zapf 2016.

⁸Vgl. Dienel und Trischler 1997.

⁹Vgl. Rammler und Weider 2011.

¹⁰Vgl. Mom 2004.

¹¹Vgl. Canzler und Knie 1994.

¹²Vgl. Möser 2002.

Ausgehend von der Annahme einer Mensch-Technologie-Beziehung, lässt sich das Auto als soziotechnisches Konstrukt definieren. Daher kommt hier ein methodischer, technik- und kulturverbindender Erklärungsansatz zur Anwendung.^{13,14} Er bezieht sich weitgehend auf die industrialisierte Welt und umfasst alle automobilen Nutzungsarten, die aufgrund spezifischer Rahmenbedingungen eine bestimmende Rolle spielten und spielen. Das Ziel ist die Analyse der Faktoren und Bedingungen von Elektromobilität im Vergleich zum auf fossilen Energiequellen basierenden Verbrenner-Paradigma. In diesem Zusammenhang existieren zwei Leitfragen. Zum einen, weshalb Elektrik und Elektronik seit der Etablierung des Automobils zunehmend zum Einsatz kommen, die Antriebsquelle aber bis in die 2000er-Jahre hinein fast ausschließlich der Verbrennungsmotor darstellt. Zum anderen: Warum findet ein regenerativ-energetischer Paradigmenwechsel, verbunden mit der Elektrifizierung der Antriebsquelle, erst jetzt – in den 2020er-Jahren – statt, wenn die Dringlichkeit einer nachhaltigen Mobilität mit Blick auf den Klimawandel und seine Auswirkungen bereits einen kritischen Punkt erreicht hat?

1.2 Paradigmenbildung – Öl statt Strom

Den Ausgangspunkt für die Untersuchung der Paradigmenbildung bildet eine vergleichende quantitative Bestandsaufnahme und eine Stärken-Schwächen-Analyse der Antriebskonzepte Verbrennungs- und Elektromotor. Die Untersuchung erfasst zunächst die Phase vor dem Ersten Weltkrieg, in der der Ursprung des Verbrenner-Paradigmas lag.

Ein Blick auf die USA als Treiber der automobilen Fortbewegung zu Beginn des 20. Jahrhunderts zeigt, dass vor dem Ersten Weltkrieg noch kein Antriebskonzept absolut dominant gewesen ist. Ungefähr 40 % der Kraftfahrzeuge wurden mit Dampf, 38 % mit Strom und 22 % mit Benzin angetrieben. 1901 lagen in New York die Elektroautos mit einem Anteil von 50 % an der Spitze, gefolgt von Dampfautos mit etwa 30 %. In absolute Zahlen konnten 1912, auf dem Höhepunkt des frühen E-Mobilitätsbooms in den USA, beachtliche 33.842 Elektroautos von 20 Herstellern verbucht werden. Allein in Detroit, im damaligen Zentrum der US-Elektromobilität, waren 1913 rund 6000 Einheiten zugelassen. Andererseits rollten im selben Jahr landesweit mindestens 80.000 Einheiten des seit 1908 von Ford gebauten „Model T“ auf die Straße. 1914 war das Typenspektrum genauso vielfältig wie es die Antriebskonzepte waren. Zu dieser Zeit gab es bereits alle im privaten und kommerziellen Bereich wesentlichen Varianten – vom Sportauto bis hin zum Zehn-Tonner-Schwerlastwagen.^{15,16,17,18}

¹³ Vgl. Abt 1998.

¹⁴ Vgl. Ropohl 1979.

¹⁵ Vgl. Banham 2002.

¹⁶ Vgl. Kirsch 2000.

¹⁷ Vgl. Möser 2002.

¹⁸ Vgl. Rao 2009.

Mit herausragenden Leistungen tat sich indes schon im Jahr 1900 der österreichisch-deutsche Konstrukteur Ferdinand Porsche hervor: Die Wiener Kutschenfabrik Lohner präsentierte zu dieser Zeit ein von Porsche entwickeltes Elektroauto bei der Pariser Weltausstellung. Der „Semper Vivus“ erregte wegen seiner innovativen Technik in Frankreich als Zentrum des europäischen Automobile-Treibens großes Aufsehen. Mit zwei Radnabenmotoren an der Vorderachse gilt das Fahrzeug als das erste transmissionslose und vorderadgetriebene Auto. Der Wirkungsgrad soll bei mehr als 80 % gelegen haben, während eine 410 kg schwere Bleibatterie für 50 Stundenkilometer Höchstgeschwindigkeit und bis zu 50 km Reichweite bei einer Normleistung von rund 2,5 PS pro Motor sorgte. Eine Rennversion mit vier Radnabenmotoren, einer Leistung von jeweils sieben PS und einem Batteriegewicht von 1800 kg gilt als das weltweit erste Allradauto.^{19,20} Einen weiteren Meilenstein markierte kurz darauf die „Mixte“, der erste serielle benzin-elektrische Hybrid. Die Preise des Lohner-Porsche begannen ab 8500 Mark – etwa der zehnfache durchschnittliche Jahreslohn eines damaligen Arbeiters. Abnehmer waren die europäische Avantgarde der Adligen sowie Unternehmer und Künstler. Insgesamt wurden 300 Einheiten des Prestigeobjekts gebaut. Zum Vergleich: Der erste Opel kostete 1899 als günstiges Benzinfahrzeug mit Luftreifen und vier PS rund 4300 Mark, der legendäre erste Mercedes im Jahr 1901 mit 35 PS rund 16.000 Mark.^{21,22,23}

Allein das Angebot der Fahrzeuge jener Zeit spiegelt bereits das ausgeprägte individuelle Mobilitätsbedürfnis der Menschen wider. Zum einen ging es von der Erfindung der jeweiligen Antriebstechnologie bis zu ihrer mobilen Anwendung rasend schnell, zum anderen zeigt sich eine prinzipielle Offenheit des Antriebsspektrums. Dieses Schema sollte sich bald ändern: Wenig später begann der Ottomotor seine Erfolgsgeschichte als dominierender Automobilantrieb, während das Dampfkonzep vor allem aufgrund seiner eingeschränkten Handhabbarkeit für den Straßeneinsatz komplett ausschied.^{24,25,26}

Zu welchem Ergebnis gelangt nun eine Analyse der Stärken und Schwächen jener Fahrzeuge aus der Zeit der Jahrhundertwende? Als Vorzüge des Elektroautos galten vor allem sein anspruchloser und drehmomentstarker Antrieb, die einfache Bedienung, eine gut dosierbare Geschwindigkeitsregelung, die Effizienz in Form von mäßigen Betriebskosten und eine gute Zuverlässigkeit sowie seine Umweltverträglichkeit, die sich in einer geringen Geräusch- und Geruchsentwicklung offenbarte. Insbesondere die letztgenannten Eigenschaften halfen dabei, die durchaus verbreiteten Widerstände gegen das Auto-

¹⁹ Vgl. Norton 1985.

²⁰ Vgl. Lewandowski 1987.

²¹ Vgl. Barthel und Lingnau 1986.

²² Vgl. Fersen 1986.

²³ Vgl. Seherr-Thoss 1979.

²⁴ Vgl. Abt 1998.

²⁵ Vgl. Lewandowski 1987.

²⁶ Vgl. Möser 2002.

mobil zu vermindern. Jene kritische Haltung verdeutlicht der damalige „Red Flag Act“: Das bis 1896 im Vereinigten Königreich geltende Gesetz zur Verminderung von Unfällen im Straßenverkehr begrenzte die maximal zulässige Geschwindigkeit von Dampfwagen auf vier Meilen pro Stunde außerorts sowie auf zwei Meilen pro Stunde innerorts. Zusätzlich verpflichtete das Gesetz zur Führung eines Fahrzeugs durch zwei Personen sowie einer dritten Person, die mit einer roten Flagge vorangeht, um die Bevölkerung vor dem herannahenden Gefährt zu warnen. Ein Aspekt des Gesetzbeschlusses lag in der Ausdehnung der Straßennutzungsrechte unter den Verkehrsteilnehmern. Das bezüglich Geräusch- und Geruchswahrnehmung angenehme Elektroauto erfuhr schließlich eine höhere Akzeptanz, ebnete damit aber indirekt auch dem Auto mit Verbrennungsmotor den Weg.²⁷

Als Schwächen kristallisierten sich die immer mehr als begrenzt empfundene Reichweite sowie die recht kurze Batterielebensdauer heraus, die sich durch Kälteempfindlichkeit und Erschütterungsanfälligkeit ergab. Der Lebenszyklus betrug bis zu 6000 km. Als psychologisches Moment wird außerdem der subjektiv geringe Spaßfaktor angeführt, der in einfacher Beherrschbarkeit und niedrigerer Geschwindigkeit begründet lag. So taugte das Elektroauto nur bedingt zum Rennsport, der schon damals ein hohes Ansehen genoss. Die spezifischen Produktionsstrukturen von Elektroautos haben ebenfalls nachteilig gewirkt: In den meisten Fällen konstruierten die Hersteller diese Autos nicht selbst, sondern bauten sie aus zugelieferten Teilen zusammen, was die technische Entwicklung gehemmt haben könnte.²⁸

Als schärfste Bedrohung des Elektroautos erwies sich jedoch die rasche Entwicklung der Verbrennungsmotorentechnologie. Das Benzinauto holte so einerseits positive Eigenschaften seines elektrischen Konkurrenten auf – vor allem die verbesserte Zuverlässigkeit und Handhabbarkeit verkürzten den Komfortvorsprung des Elektroautos. Andererseits konnten die Fahrer einer „Lust an den Vibrationen des Verbrennungsmotors“ ebenso wie dem geschwindigkeitsaffinen „joy riding“ mit steigender Begeisterung nachgehen, während die Reichweite der Autos trotz höherer Geschwindigkeiten wuchs. Diese Aspekte fielen mit sich verändernden individuellen mobilen Bedürfnissen zusammen, die ebenfalls zu Lasten des Elektroautos gingen. So sah sich das gesamte Konzept der Elektromobilität zu Beginn des 20. Jahrhunderts vor mehrere Herausforderungen gestellt: Es musste sich dem Benzinkonkurrenten anpassen, zugleich weiter an eigener Kontur gewinnen, und der Ausbau der Versorgungsinfrastruktur musste ebenso schnell vorangetrieben werden wie die Batterietechnik. Vielleicht wären auch ein erhöhtes Umweltbewusstsein und ein steigendes Einkommen in den wachsenden städtischen Ballungsräumen notwendig gewesen, um die Marktanteile zumindest zu stabilisieren – dann hätten die daraus entstandenen Skaleneffekte womöglich den sich immer mehr abzeichnenden Preisnachteil gegenüber dem Benzinauto kompensieren können. So veränderte sich das Elektroauto zwischen 1905 und 1925 in mehreren Aspekten. In dieser Zeit lassen sich alle jene Anwendungen finden, die

²⁷Vgl. Norton 1985.

²⁸Vgl. Rammler und Weider 2011.

auch heute Relevanz beanspruchen. So experimentierte unter anderem Porsche mit elektromotorischen Range-Extendern. Schon im Jahr 1896 setzte man in Taxis zur Verlängerung der Betriebszeiten Batteriewechselsysteme ein. Zugleich wurden die Batterien robuster und leistungsfähiger. Das erhöhte den Bewegungsradius und die Geschwindigkeit. Außerdem gab es Fortschritte bei der Schnellladung und der Weiterentwicklung der Ladeinfrastruktur. Solche Anlagen trugen einerseits dazu bei, das Elektroauto von seinem Image als reines Nahverkehrsvehikel zu befreien, und andererseits dokumentieren sie die potenzielle Investitionsbereitschaft und damit den Glauben an den Erfolg des Konzepts.^{29,30}

Allerdings gab es auch mindestens zwei gravierende Rückschläge: Der seit 1912 zunehmend in Serie verbaute elektrische Anlasser für Benzinmotoren, seit 1919 auch in Fords „Model T“, bedeutete den Verlust eines zentralen Komfortvorteils des Elektroautos. Das gerne nach außen getragene „Lady Image“ des Elektroautos verkam zum „Old Lady Image“ – einer von mehreren Misserfolgsgründen und damit gleichzeitig ein Erfolgsfaktor für die konkurrierenden Fahrzeuge mit Benzinmotor. Aber auch der Erste Weltkrieg spielte eine entscheidende Rolle. In dieser Zeit wurde die Leistungsfähigkeit von Verbrennungsmotoren in mobilen Anwendungen unter schwierigsten Bedingungen offenbart: Die fortgeschrittene Motorisierung der alliierten Truppen gilt als ein kriegsentscheidendes Kriterium. Dies hatte langfristige Folgen, da die forcierte Entwicklung von Benzinmotoren zusammen mit der Massenproduktion die Motorenpreise schnell sinken ließ und die der Elektromotoren bestenfalls stagnierten.^{31,32,33}

Zwar gab es in den frühen 1920er-Jahren noch eine kurze Erfolgsphase der Elektroautos, die im Wesentlichen auf der Wiederaufnahme der zivilen Produktion nach dem Krieg beruhte. Ein neuer Boom der Elektromobilität blieb aus. Das Konzept des Elektroautos hatte lediglich in bestimmten Nischen Bestand, wo es dem Benziner eindeutig überlegen war – und es bis heute ist –, wie das folgende Kapitel dokumentiert.³⁴

Mit Blick auf die 1920er-Jahre zeigt die Analyse also überwiegend Nachteile der damaligen Elektromobile. Die Optimierung des Konzepts reichte nicht aus, um den Markterfolg zu sichern. Zwar nahmen die Hersteller die Herausforderung an, die Erfolgsgeschichte des Verbrennungsmotors verhinderte das jedoch nicht. Vielmehr bildete sich im zweiten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts das bis heute gültige Verbrenner-Paradigma heraus. So viel ist sicher: Das Elektrofahrzeug-Konzept verhalf dem Auto entscheidend zum Markterfolg und ist daher von hoher technischer und sozioökonomischer Bedeutung. Trotz beachtlicher Technikfortschritte, vor allem aufgrund der geringen Energiedichte und Lebensdauer der Batterien sowie der hohen Kosten in einem damals unregulierten Markt, konnte es sich nicht durchsetzen.

²⁹ Vgl. Kirsch 2000.

³⁰ Vgl. Mom 2004.

³¹ Vgl. Abt 1998.

³² Vgl. Möser 2002.

³³ Vgl. Seherr-Thoss 1979.

³⁴ Vgl. Mom 2004.

1.3 Leben in einer Nische – Spezialfahrzeuge als Know-how-Speicher

Trotz der Marktdominanz von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren wurde das Konzept batterieelektrischer Fahrzeuge dennoch weiterentwickelt – und zwar dort, wo es auf die Bereitstellung sauberer Leistung in vorhersehbaren Betriebsabläufen und einem fest definierten Aktionsradius ankam. In diesen Anwendungen blieb das Prinzip des „elektrischen Pferdes“ bestehen.³⁵ Seit den 1920er-Jahren wurden Elektroautos überwiegend kommerziell genutzt, etwa als Kleintransporter in geschlossenen Räumen wie Hallen und Lagern, wo lokale Emissionsfreiheit erforderlich war. Im Außeneinsatz wurden sie vor allem im urbanen Umfeld in Form von Omnibussen, Kranken-, Feuerwehr- und Müllwagen sowie bei der Auslieferung von Milch, Post und Zeitungen eingesetzt. Vorkriegsmodelle reichten sich auch nach 1945 vereinzelt in den Verkehr ein. In Ostberlin sollen noch in den 1960er-Jahren Exemplare der in den 1920er-Jahren von der Firma Bergmann gebauten 2,5-Tonner-Kleinlastwagen zu sehen gewesen sein – auch ein Indiz für die Langlebigkeit der Technologie.³⁶

Der Blick auf den deutschen Markt zeigt interessante Resultate. In der Zwischenkriegszeit existierten mindestens zwölf Hersteller. In der zweiten Hälfte der 1930er-Jahre waren rund 5000 Elektroautos zugelassen, etwa die Hälfte von ihnen für die lokale Postzustellung. Auch Elektrotraktoren gab es – eine deutsche Entwicklung. Als flexible Alternative zur zwischenzeitlich komplett elektrifizierten Straßenbahn verbreiteten sich auch Oberleitungsbussysteme. Die auf Importunabhängigkeit vom Erdöl zielende kriegsvorbereitende NS-Autarkiepolitik spielte dabei eine erhebliche Rolle. Gleiches gilt für die erstmalige Normung von Batterien. Die bekannten konzeptionellen Schwächen – niedrige Reichweite und hohe Kosten – blieben jedoch bestehen.^{37,38}

Ein besonders elektroautoaffiner Markt war in Großbritannien zu finden. Dort kam das Elektroauto ebenfalls überwiegend im lokalen „Stop-and-go“-Liefer- und Entsorgungsgeschäft zum Einsatz. Die Stadt Birmingham unterhielt von 1917 bis 1971 durchgehend Elektroautos im Fuhrpark; das letzte dieser Fahrzeuge wurde 1948 angeschafft. Das Highlight bildete der „small electric van“, der als Auslieferungswagen für Milch und Brot fungierte. Anfang der 1930er-Jahre beförderte er rund 500 kg Nutzlast über eine Strecke von 30 km. 1946 waren 7828 des mit Batteriewechselsystemen ausgestatteten, als „milk float“ bezeichneten Elektroautos im Vereinigten Königreich registriert. Zwei britische Milchwagenhersteller starteten indes einen Elektroauto-Neuanfang: Ein viersitziges Coupé im „Petrol-Car Styling“, basierend auf einer 64-Volt-Batterie, brachte es 1935 auf eine Höchstgeschwindigkeit von 42 km/h bei einer Reichweite von 64 km. Es wurden nur 40 Exemplare verkauft, wofür der hohe Preis von 385 Pfund (heute rund 33.000 €) ausschlaggebend war. Er kostete nahezu doppelt so viel wie der populäre „Morris Ten“, der

³⁵Vgl. Mom 2004.

³⁶Vgl. Georgano und Wright 1993.

³⁷Vgl. Abt 1998.

³⁸Vgl. Möser 2002.

fast 100 Stundenkilometer bei praktisch beliebiger Reichweite versprach. In den USA begann zu ähnlicher Zeit – um 1930 – die bis heute währende Erfolgsgeschichte der zweisitzigen „Golf Carts“ und der verwandten „Shopping Carts“.^{39,40}

Der Zweite Weltkrieg führte aufgrund der starken Kraftstoffknappheit in Frankreich zu einer kleinen Blüte der Elektromobilität. So produzierte etwa der Hersteller „Véhicules Électriques Stéla“ ab 1941 ein Fahrzeug mit einer Reichweite von 130 km bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h – ein für diese Zeit beachtlicher Wert, der durch ein Bleiakkumulatorensystem realisiert wurde, dessen Gewicht eine Tonne betrug.⁴¹ Einen anderen Ansatz brachte Peugeot 1942 mit dem VLV auf die Straße: ein Mikroauto für den städtischen Bereich.⁴² Interessant sind diese Entwicklungen deshalb, weil man Elektroantriebe in Produkttypen verbaute, die ursprünglich für Verbrennungsmotoren entworfen wurden – ein fortan wiederkehrender Ansatz. Die nach dem Zweiten Weltkrieg ungebrochene Dominanz des Verbrenner-Paradigmas dokumentiert beispielsweise die Tatsache, dass ein 1946 beim ersten Pariser Nachkriegssalon gezeigter CGE-Tudor-Pkw nicht in Serie ging. Neue elektrische Pkw (Personenkraftwagen) scheiterten auch in den USA – trotz damals beachtlicher Reichweiten von knapp 200 km.⁴³

Die Ursachen des erneuten Scheiterns lagen wiederum im Verhältnis von Kosten und Nutzen, das sich nach 1945 noch stärker zugunsten der Automobile mit Verbrennungsmotoren veränderte. Ähnliches gilt für den Omnibus- und den Lkw-Bereich, in dem seit den 1920er-Jahren der sparsame und in der Leistungscharakteristik dem Elektromotor ähnliche Dieselantrieb vermehrt zum Einsatz kam. Unter anderem stoppte die deutsche Post aus diesem Grund ein nach dem Krieg gestartetes Projekt eines batterieelektrischen Lkw. Die seit 1955 in der Bundesrepublik Deutschland geltende Besteuerung der Elektroautos nach Gewicht unterband weitere Bestrebungen und veranlasste die verbliebenen Hersteller wie etwa Gaubschat, Lloyd und Esslingen dazu, ihre Produktion einzustellen. Dennoch: Ein Gaubschat-Elektro-Paketwagen mit Baujahr 1956, mit einem Antrieb der Aachener Firma Garbe-Lahmeyer, wurde noch bis 1984 im Aluminiumwerk Singen in der internen Postzustellung genutzt. Auch in Großbritannien blieben die Milchwagen erfolgreich: In den 1970er-Jahren erreichten sie mit mehr als 50.000 Einheiten ihren höchsten Bestand. In keinem anderen Staat waren bis dahin mehr Elektroautos im Einsatz. Auch die berühmten Londoner Doppeldecker fuhren zeitweise oberleitungsgespeist elektrisch. Außerdem erlebten die kostengünstigen Trolleybus-Systeme in den 1950er- und 1960er-Jahren weltweit eine Blüte, oft als Ergänzung oder Ersatz der elektrischen Straßenbahn.^{44,45,46}

³⁹Vgl. Georgano und Wright 1993.

⁴⁰Vgl. Rammler und Weider 2011.

⁴¹Vgl. Georgano 2000.

⁴²Vgl. Manz 2019.

⁴³Vgl. Möser 2002.

⁴⁴Vgl. Bonin 2003.

⁴⁵Vgl. Fersen 1986.

⁴⁶Vgl. Barthel und Lingnau 1986.

Elektromobilitäts-„Inseln“ entstanden auch in „autofreien“ Erholungsorten der Schweiz. In Zermatt, wo seit 1931 ein Verbot von Autos mit Verbrennungsmotor gilt, wuchs die Zahl der Elektroautos seit 1947 beständig, als sich ein Privatier das erste Exemplar – wahrscheinlich aus britischer Produktion kommend – zulegte. Mehrere Kleinbetriebe bauten die Elektroautos vor Ort bei wachsender Variantenvielfalt. Da die Elektrizität zudem überwiegend aus Wasserkraft stammte, gab es dort eine der ersten Umsetzungen eines mit regenerativer Energie betriebenen und emissionsfreien Verkehrskonzepts. Die weltpolitischen Krisen der 1950er-Jahre, wie der Koreakrieg und die Suezkrise 1956, führten zu ersten Ölpreisschocks, hatten jedoch aufgrund der Kürze keine Auswirkungen auf das Paradigma. Öl überschwemmte als billige Energie zu diesen Zeiten regelrecht die Märkte. Die Wirtschaftlichkeit von Verbrennungsmotoren in Ländern mit höheren Kraftstoffpreisen wurde durch die dort zunehmende Verbreitung von Pkw-Diesel sichergestellt. Es gab daher keine triftigen Gründe, sich vom Verbrennungsmotor abzuwenden.^{47,48,49}

Zugleich begann mit dem wachsenden Wohlstand das Zeitalter der Massenmobilisierung auf individueller Basis.⁵⁰ Der Verbrennungsmotor bildete aufgrund seiner Verbreitung und seiner Wirtschaftlichkeit den idealen Antrieb dafür. Wohl deshalb fand die Präsentation des ersten einsatzfähigen Fahrzeugs mit Brennstoffzelle durch den Landmaschinenhersteller Allis-Chalmers im Jahr 1959 kaum Beachtung. Bei dem Gefährt handelte es sich um einen Traktor mit 20 PS und einem Wirkungsgrad von 90 %, der auf dem bereits seit den 1830er-Jahren bekannten Brennstoffzellenprinzip basierte. So wurde die Zukunft des Elektroautos in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts ungewisser als je zuvor – abgesehen von Ausnahmen wie den britischen „milk floats“. Technik- und Gebrauchsparadigma der Mobilität formten sich wechselwirksam nach dem US-Muster in einem stabilen, fossilen und verbrennungsbasierten Automobilisierungspfad.⁵¹

1.4 Renaissance eines Zukunftskonzeptes

Im Verlauf der Nachkriegszeit entwickelte sich vor allem in den USA schnell eine Gesellschaft, die im Überfluss lebte. Aus den Folgen des unkontrollierten Wirtschaftswachstums entwickelte sich ein Umweltbewusstsein in Teilen der Gesellschaft, das dem Elektroauto-Konzept eine neue Chance eröffnete. In den USA verstärkte die wachsende ökologische Sensibilisierung – Stichwort: „Smog“ – seit Mitte der 1960er-Jahre, getrieben durch einen ersten „Clean Air Act“, die Suche nach Alternativen zum Verbrennungsmotor, während der Vietnamkrieg und die Hippie-Bewegung die Gesellschaft in großer Breite kritischer gegenüber dem Status quo werden ließen. Die Giganten Ford und General Motors

⁴⁷Vgl. Bonin 2003.

⁴⁸Vgl. Möser 2002.

⁴⁹Vgl. Zapf 2016.

⁵⁰Vgl. Andersen 1997.

⁵¹Vgl. Rammler und Weider 2011.

reagierten mit umgerüsteten Modellen wie dem Opel Kadett auf Basis von Blei- und Zinkbatterien – doch die Autos blieben Demonstrationsobjekte. Weitere Bestrebungen gab es von Unternehmen, die umgebaute elektrifizierte Renaults in geringer Stückzahl vertrieben. 1968 präsentierte General Electric einen innovativen Versuchsträger, der zur Beschleunigung Zink- und zum Fahren Nickelbatterien einsetzte. Doch das Vorhaben verlief sich in einem Show-Effekt, da die angestrebte Verfügbarkeit leistungsfähigerer Batterien ausblieb.^{52,53,54}

Ein Grund für den Misserfolg dieser Prototypen war der Mangel an verbindlichen gesetzlichen Regelungen, auf die man sich in den USA nicht einigen konnte. Daher blieb es bei unkoordinierten Initiativen einzelner Automobilhersteller und bestimmter Interessengruppen wie Elektroindustrie, Elektrizitätserzeuger und Batteriehersteller. Eine systematische Forschung kam ebenfalls nicht zustande. Ein Langstreckenwettbewerb zwischen MIT und CalTech offenbarte 1968 das katastrophale Ergebnis, dass es kaum einen Fortschritt zum Stand der 1920er-Jahre gab – denn die Durchschnittsgeschwindigkeit lag bei etwa 25 Stundenkilometern auf einer Strecke von 3300 Meilen. Der fast gleichzeitig und ebenfalls in den USA von Jerry Kugel in Kooperation mit Ford erzielte Geschwindigkeitsrekord von rund 223 Stundenkilometern hatte nur einen statistischen Wert. Zwei Jahre später motivierte die weitere Verschärfung des Umweltrechts zu Beginn der 1970er erstmals koordinierte Aktionen. Die US-Aktivitäten belebten auch global das Interesse an Elektroautos neu. Die 1972 publizierte Studie des „Club of Rome“ mit dem mahnenden Titel „Die Grenzen des Wachstums“ und die schockierende Ölpreiskrise 1973/1974 trugen dazu bei, dass elektrifizierte Nutz- und Personenwagen als Versuchsträger weltweit gebaut wurden. Beteiligt war der komplette Fahrzeug- und Zuliefermarkt. Bei den Autos handelte es sich in der Regel um umgerüstete Modelle – wie etwa 1976 die „CitySTROMer“ auf Basis des VW Golf. Zu den Ausnahmen zählten der auf der Insel Syros seit 1972 produzierte Kleinwagen Enfield-Neorion und ein 1976 hergestellter Stadtauto-Prototyp von Fiat. Die Serienproduktion von Elektroautos lag jedoch nach wie vor in weiter Ferne. Neben ungelösten Problemen wie Reichweite, Kosten und Ladeinfrastruktur egalisierte die dominante fossile Stromerzeugung das Alleinstellungsmerkmal der potenziellen Emissionsfreiheit von Elektromobilen. Die Elektromobilität war zu diesem Zeitpunkt daher noch kein praxisgerechter Ansatz zur erstmals aufkommenden Frage nach einer globalen Emissionsreduktion.^{55,56}

Elektrische Mobilität war allerdings abseits der Automobile ab den späteren Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts deutlich erfolgreicher. Beispielsweise stellte die Deutsche Bundesbahn 1977 den regulären Dampflokbetrieb ein. Alle Hauptstrecken waren seinerzeit bereits elektrifiziert. Der Fahrrad- und Motorradhersteller Hercules baute zwischen 1973

⁵² Vgl. Adams 2012.

⁵³ Vgl. Möser 2002.

⁵⁴ Vgl. Wehler 2008.

⁵⁵ Vgl. Abt 1998.

⁵⁶ Vgl. Adams 2012.

und 1977 mehrere Tausend elektrisch betriebener Kleinmotorräder des Typs E1.⁵⁷ Auch das bewies einmal mehr die prinzipiell hohe Leistungsfähigkeit des elektrischen Antriebs. Mitte der 1980er-Jahre, als die zweite Ölkrise die Gesellschaft erneut kurzzeitig für das Thema einer nachhaltigen Mobilität sensibilisierte, definierten Experten den Fahrzeugtyp des Vans und das Anwendungsgebiet der Elektromobilität in Unternehmensflotten als optimalen Markt für die Etablierung der Technologie. Darüber hinaus gelang eine Steigerung der Batterieenergiedichte, und mit der Wiederentdeckung der Brennstoffzelle als Antriebsmodul tauchte eine Alternative zur Batterieelektrik auf. Parallel zum langsam wachsenden Umweltbewusstsein gab es wieder Impulse durch kleinere Hersteller von Elektroautos. Größere Produzenten rüsteten vermehrt Kleinwagen um. Und dennoch: An der Marktdominanz der Automobile mit Verbrennungsmotor änderte das auch in den 1980er-Jahren nichts.^{58,59}

Im Zweiradsegment indes machte 1985 abermals Hercules mit einer Weltneuheit – einem Elektrofahrrad mit Nabenmotor und Scheibenbremse – auf sich aufmerksam. Lediglich 20 Prototypen wurden hergestellt. Nichtsdestotrotz handelte es sich um einen technischen Meilenstein, insbesondere mit Blick auf den Erfolg der heutigen Pedelecs und Elektrofahrräder. Das elektrische Leichtmofoa Electra hingegen, von dem sich etwa 19.000 Exemplare verkauften, erwies sich fünf Jahre später als großer Erfolg für Hercules.⁶⁰

Die sich verschärfende umwelttechnische Gesetzgebung, verbunden mit immer konkreteren Maßnahmen, verbesserte die Rahmenbedingungen für die Elektromobilität ab den 1990er-Jahren. Ein flächendeckender Markteintritt scheiterte auch diesmal wieder an den bekannten technischen Schwachpunkten in Verbindung mit der politischen Unentschlossenheit zu einer anreizorientierten Marktsteuerung, dem freiheitsgeprägten und damit reichweitenorientierten individuellen Mobilitätsbedürfnis, dem fehlenden Nutzermehrwert und letztlich auch der immer weiter fortschreitenden Evolution des Verbrennungsmotors.⁶¹

Ein bedeutender Akt politischer Entschlossenheit stellte 1990 das „Low Emission Program“ in Kalifornien dar, welches „Zero Emission Vehicles“, also Fahrzeuge mit lokal emissionsfreiem Antrieb, erstmals gesetzlich verankerte: Es setzte ein weltweites Zeichen, begleitet von der Forderung nach ökologischer Stromerzeugung. Als Konsequenz feierte bei der Internationalen Automobil-Ausstellung (IAA) 1991 eine Reihe von Studien und Prototypen Premiere – unter anderem von BMW, Mercedes, Opel und VW. Ein Jahr später baute Ford den „Ecostar“ mit NaS-Batterie und einer beachtlichen mittleren Reichweite von 150 km. Mehr als 100 Exemplare legten bis 1996 über 1,6 Mio. km zurück, bis Ford die Entwicklung aufgrund von Problemen mit der Batterietechnik bremste und die Entwicklung der Brennstoffzelle verstärkte. Der Konkurrent GM brachte 1996 das berühmte

⁵⁷ Vgl. Petzold 2011.

⁵⁸ Vgl. Canzler und Knie 1994.

⁵⁹ Vgl. Möser 2002.

⁶⁰ Vgl. Anderl 2021.

⁶¹ Vgl. Rammler und Weider 2011.

„EV1“ im eigenständigen „Purpose Design“ auf den Markt. Bis 1999 entstanden rund 1100 Exemplare, von denen etwa 800 an ausgewählte Kunden gingen – davon zahlreiche Prominente. Unter anderem infolge von Lobbyarbeit und erfolgreichen Klagen der größten Automobilhersteller gegen die ursprünglich radikalen Forderungen des Gesetzes „Low Emission Program“ wurde eben jenes 2003 gekippt. Verbildlicht wurde diese Thematik 2006 im Film „Who Killed the Electric Car?“, in dem das „EV1“ unfreiwillig die Hauptrolle spielte – eine erhellende, kritische Akteurs-Analyse der Ursachen für das Scheitern des Elektroautos in den 1990er-Jahren.⁶²

Ein Beispiel der neu entwickelten Elektrofahrzeuge aus den 1990er-Jahren in Deutschland ist die Neuauflage des Golf „CitySTROMer“, der 1992 in Kooperation mit Siemens entstand. Ausgestattet mit einem 20-Kilowatt-Drehstrom-Synchronmotor, Blei-Gel-Batterien und einem steckdosentauglichen Ladegerät, brachte das Fahrzeug es in drei Versionen auf insgesamt rund 120 Exemplare. Danach blieb der zwischen 1993 und 1996 gebaute Kleinwagen Hotzenblitz bis zum seit 2013 angebotenen „BMW i3“ das einzige in Deutschland entwickelte und in (Klein-) Serie produzierte Elektroauto: Rund 140 Exemplare des Fahrzeugs mit Zwölf-Kilowatt-Motor wurden damals produziert.⁶³

Die zwischenzeitliche Aufbruchstimmung der 1990er-Jahre spiegelte sich auch in neuen Flottenversuchen elektrischer Fahrzeuge von Post und Telekom wider: Auf der Insel Rügen startete 1992 ein von der Bundesregierung finanziertes Feldprojekt der Elektromobilität, an dem sich fast alle namhaften Hersteller von Fahrzeugen und Komponenten beteiligten und das bis 1996 andauerte. Impulse für die Veränderung der Mobilität waren in den 1990er-Jahren also auch in Deutschland gegeben. Doch die Auswertung des Großversuchs brachte ein negatives Ergebnis in den praxisrelevanten Kriterien Nachhaltigkeit, Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit. Infolgedessen wurde die Technologie in den nächsten Jahren nur mit wenig Nachdruck weiterverfolgt. Die enttäuschenden Resultate waren allerdings auch durch einen unökologischen Strommix und die Verwendung von umgerüsteten Fahrzeugen mit ursprünglichem Verbrennungsmotor bedingt. 15 Jahre später – Anfang 2011 – bewegten sich gerade einmal 2307 batterieelektrische Autos und lediglich 37.256 hybridelektrische Fahrzeuge auf Deutschlands Straßen.^{64,65}

Einen großen Meilenstein auf dem Weg aus der Nische elektrifizierter Fahrzeuge legte 1997 der Toyota Prius, ein Fahrzeug mit verbrauchssenkendem Hybridantrieb als System aus Benzinmotor und elektrischem Antrieb. Durch ein automatisches Energiemanagementsystem konnte das Auto Maßstäbe bei Verbrauch und Emissionen setzen. Darüber hinaus trug eine strömungsoptimierte Karosserie zur Verbrauchseinsparung bei. Der Prius verkaufte sich außerhalb von Europa hervorragend und wird bis heute in verschiedenen Generationen produziert. Weltweit veräußerte Toyota bis zum Jahr 2020 mehr als

⁶²Vgl. Rammler und Weider 2011.

⁶³Vgl. Wittler 2020.

⁶⁴Vgl. Rammler und Weider 2011.

⁶⁵Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) und Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2021.

15 Mio. Fahrzeuge mit Hybridantrieb und erzeugte damit eine Einsparung von über 120 Mio. t CO₂ im Vergleich zu konventionellen Antrieben. Zwar lässt sich nur ein geringer Anteil der Hybridfahrzeuge von Toyota über einen Stromanschluss laden, doch war der Prius das erste in Massenproduktion gefertigte Auto, das Teilstrecken rein elektrisch zurücklegen konnte und somit den Erstkontakt mit elektrischen Automobilen für die Breite der Bevölkerung darstellte. Das Modell gilt heute daher als ein Wegbereiter der Elektromobilität.^{66,67,68}

In den 2000er-Jahren versuchten vor allem unabhängige Unternehmen, eine Verbreitung von Elektroautos zu erreichen. Spätestens 2006 setzte die Tesla Inc. mit der Präsentation des „Tesla Roadster“ neue Maßstäbe: ein Sportwagen, der mit konventionellen Modellen konkurrieren konnte. Das innovative Batteriesystem mit Lithium-Ionen-Batterie bildete die Basis für den bis heute anhaltenden Erfolg des Unternehmens und verlieh der gesamten Branche einen bedeutenden Impuls. Die Applikation von Lithium-Ionen-Batterien stellt aus heutiger Sicht einen technischen Meilenstein in der Geschichte der Elektroautos dar. Der Grund für die Leistungsfähigkeit und damit auch für den Erfolg der Fahrzeuge liegt neben der kürzeren Ladezeit in der Leistungsdichte der Lithium-Ionen-Batterien begründet: Sie entspricht dem Faktor fünf der Energiedichte der Bleibatterie, mit der die ersten Elektroautos ausgestattet worden waren. Tesla gelang es, die Anzahl der Verkäufe innerhalb von sieben Jahren um mehr als den Faktor 100 zu steigern, von 3100 Verkäufen im Jahr 2012 auf 367.000 im Jahr 2019. Zwei Jahre später betrug die Reichweite des Spitzenmodells 628 km und steht konventionellen Fahrzeugmodellen damit kaum mehr nach. Tesla zählt überdies zu den Erfindern des autonomen Fahrens. Letztlich war es also Innovationskraft, die die Elektromobilität in den 2000er-Jahren aus der Nische in den Massenmarkt beförderte.^{69,70}

Inzwischen haben sämtliche Automobilhersteller ihr Portfolio um Serienmodelle mit batterieelektrischem Antrieb ergänzt. Die Ursachen liegen in einer Mischung aus verschärfte Umweltgesetzgebung und öffentlichen Subventionen sowie sinkenden Preisen – insbesondere für Batterien bei gleichzeitig höherer Leistungsfähigkeit, was bedeutet: mehr Geschwindigkeit und größere Reichweite bei zunehmend konkurrenzfähigen Preisen.⁷¹

Entsprechend stieg die Zahl elektrifizierter Fahrzeuge mit Stromanschluss, also der rein batterieelektrisch betriebenen Fahrzeuge (BEV) und der Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV), seit 2012 weltweit beträchtlich an. 2013 fuhren global gezählt rund 431.000 Elektro- und Hybridautos auf den Straßen. Bis 2015 erhöhte sich der Gesamtbestand bereits auf etwa 1,4 Mio.. Diese Dynamik setzte sich fort, sodass 2020 knapp elf Millionen Fahrzeuge zum weltweiten Bestand zählten. Die jährliche Entwicklung ist in Abb. 1.1

⁶⁶Vgl. Rammler und Weider 2011.

⁶⁷Vgl. Toyota Deutschland GmbH 2021.

⁶⁸Vgl. ecomento.de 2020.

⁶⁹Vgl. Statista 2021.

⁷⁰Vgl. Tesla 2021.

⁷¹Vgl. Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC) 2021.

Jährliche Bestandszahl von E-Autos (BEV & PHEV) weltweit in Millionen

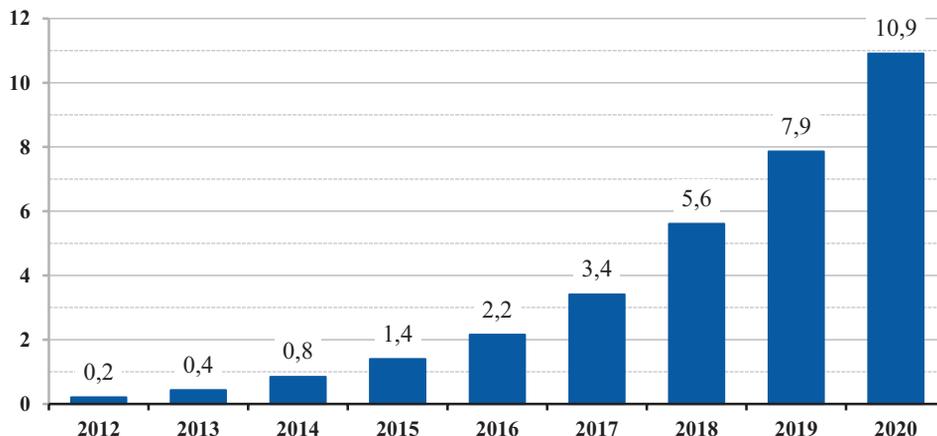


Abb. 1.1 Weltweite Entwicklung der Anzahl von Elektroautos (2012 bis 2020). (Vgl. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) 2021)

dargestellt. Das beinahe exponentielle Wachstum der jüngeren Vergangenheit zeigt: Die Elektromobilität boomt seit Beginn der 2020er-Jahre, und gleichzeitig steigt der Marktanteil in Massen Anwendungen stetig.^{72,73,74}

Bei der Verbreitung der Elektromobilität gibt es regional deutliche Unterschiede. Abb. 1.1 stellt die Marktdurchdringung von Elektroautos weltweit im Jahr 2020 anhand des Anteils von Fahrzeugen mit Stromanschluss (BEV und PHEV) an den registrierten Neuzulassungen dar. Norwegen ist dabei seit langer Zeit Spitzenreiter. Der Anteil betrug dort etwa drei von vier (74,8 %) – weltweit lag er lediglich bei knapp eins von 20 (4,6 %). Die Staaten Island, Schweden, Niederlande und Finnland folgen auf Norwegen, wenn auch mit teilweise deutlichem Abstand. Der Erfolg in diesen Ländern resultiert aus einem umfassenden öffentlichen Anreizsystem, das Steuer-, Maut- und Energiekostensubventionen miteinander kombiniert.

In Deutschland betrug der Anteil 13,5 % – gleichbedeutend mit dem weltweit achten Platz. Der Anteil ist zwar im Vergleich zu den Spitzenreitern deutlich niedriger, allerdings wächst er rasant. Bereits im Jahr 2021 (Stand: November) verzeichnete das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 25 % der Neuzulassungen von Elektroautos – eine Steigerung um 85 % im Vergleich zum Vorjahr.⁷⁵

⁷²Vgl. Irle 2021.

⁷³Vgl. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) 2021.

⁷⁴Vgl. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) 2021.

⁷⁵Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) und Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2021.

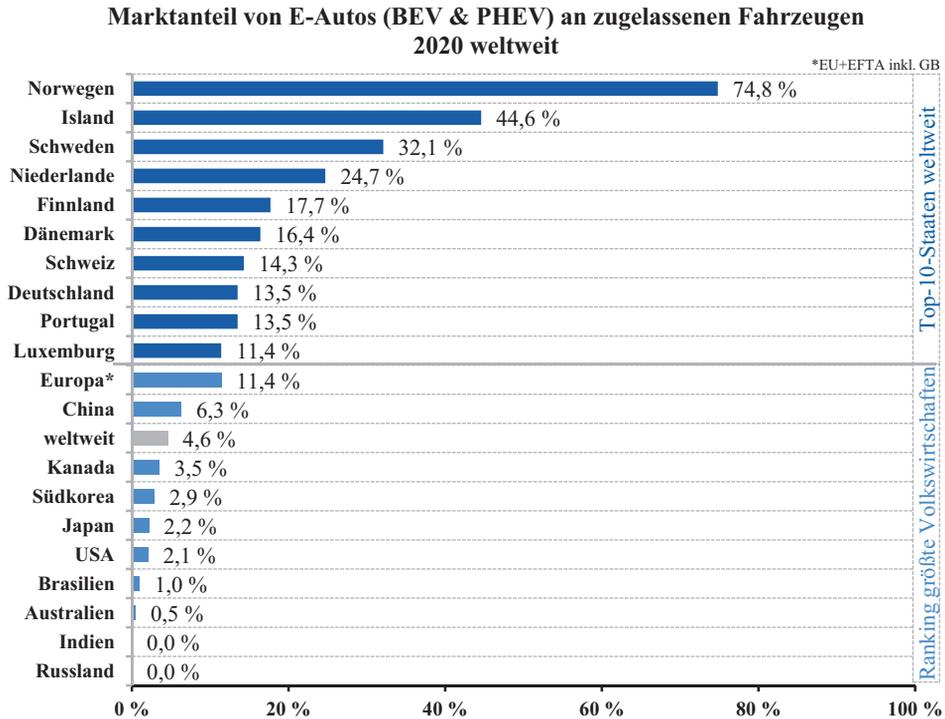


Abb. 1.2 Marktdurchdringung von Elektroautos weltweit im Jahr 2020. (Vgl. Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA) 2021; International Trade Administration | [Trade.gov](https://www.trade.gov) 2021; Employment and Social Development Canada (ESDC) 2021; ABTRA – Associação Brasileira de Terminais e Recintos Alfandegados 2021; Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) und Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2021)

Interessant ist, dass die Top-10-Staaten allesamt im europäischen Wirtschaftsraum liegen. Dadurch betrug der gemittelte Anteil jener Zone 11,4 %. Dieses Ergebnis ist im direkten Vergleich mit den größten Volkswirtschaften der Welt führend. Der Anteil auf dem chinesischen Markt war mit 6,3 % nur etwa halb so groß und derjenige auf dem US-Markt mit 2,2 % noch weiter abgeschlagen. Die Ausbreitung der Elektromobilität in Europa wuchs 2020 im internationalen Vergleich folglich am stärksten. Die vergleichsweise geringsten Anteile mit einem oder weniger als einem Prozent waren in Brasilien, Australien, Indien und Russland zu finden. Die globale Ausbreitung der Elektromobilität divergierte 2020 somit zwischen null und 74,8 % signifikant (Abb. 1.2).

Auch die Emissionen der Elektromobilität und damit Ökologie-Aspekte unterscheiden sich aufgrund der Differenzen im Energiemix je nach Region. Während in Norwegen die regenerativen Energie in Form von Wasserkraft bereits seit 2008 einen Anteil von 98 % am Energiemix hält, betrug der Anteil in Deutschland im ersten Halbjahr 2021 nur rund 47 % – Tendenz: steigend. So wundert es nicht, dass Norwegen auf dem Weg zur Klimaneutralität massiv auf Elektromobilität setzt und bereits für das Jahr 2025 ausschließlich

Neuzulassungen von lokal emissionsfreien Fahrzeugen anstrebt – ein Ziel, das die EU für das Jahr 2035 vorsieht.^{76,77,78,79}

Die Treiber der Elektromobilität waren in den 2010er-Jahren vor allem Anbieter von Carsharing und Logistikdienstleister,⁸⁰ die einen wichtigen Beitrag dazu erbrachten, die Technologie einem breiteren Publikum nahezubringen. Als ein Vorreiter profiliert sich unter anderem die Deutsche Post DHL Group. Sie setzt auf dem „Weg zurück in die Zukunft“ systematisch auf lokal emissionsfreie Fahrzeuge. Mangels eigener elektrischer Kleintransporter wurde das Unternehmen im Jahr 2014 durch den Kauf der StreetScooter GmbH vorübergehend selbst zum Produzenten von Elektroautos. Die StreetScooter-Flotte ist die mit Abstand größte in Europa und soll bis Ende 2022 auf insgesamt 21.500 Fahrzeuge erweitert werden. In der darauffolgenden Stufe soll sie bis zum Jahr 2030 zusammengenommen 80.000 elektrische Transporter umfassen und damit 60 % der Fahrzeuge für den Verteilerverkehr ausmachen. Einen wichtigen Bestandteil der klimaneutralen Zustellung der Deutschen Post bilden mit Stand vom April 2021^{81, 82} außerdem rund 8000 E-Bikes und 9000 E-Trikes.

Davon abgesehen, feiern E-Bikes in sämtlichen Varianten generell beachtliche globale Erfolge. Während sich in Deutschland 2016 etwas mehr als 600.000 Käufer für ein elektrifiziertes Fahrrad entschieden, waren es 2020 schon knapp zwei Millionen. Das bedeutete einen Anteil von 39 % am gesamten Fahrradmarkt. Auch in diesem Bereich ist ein fast exponentielles Wachstum zu beobachten (vgl. Abb. 1.3).

Dieser Erfolg ist auch im Kontext der Mobilitätswende von zentraler Bedeutung: Er belegt, dass die Technologie der Elektromobilität den Markt mit hoher Geschwindigkeit durchdringt, wenn die Verbraucher durch den Erwerb eines entsprechenden Produkts einen innovativen Nutzwert erhalten, wie es bei elektrischen Fahrrädern aufgrund des motorischen Antriebs der Fall ist. Dies ist beim Elektroauto gegenüber Autos mit Verbrennungsmotor offensichtlich nicht so – ein Grund dafür, dass die Bundesregierung den Verkauf von elektrischen Fahrzeugen seit Mai 2016 finanziell fördert (mehr zu dieser Maßnahme und Einblicke in weitere politische Instrumente zeigt Abschn. 3.3). Auch an dieser Stelle ist ein Wachstum zu verzeichnen: Anfangs betrug die Kaufprämie 2000 € für batterieelektrische Fahrzeuge, seit Juni 2020 waren es bereits 6000 €. Bei einem Fördervolumen von 2,09 Mrd. € ermöglicht das eine Kaufprämie für etwa 350.000 Fahrzeuge. Die Entwicklung der Zulassungszahlen von batterieelektrischen Fahrzeugen in Deutschland bestätigt die Wirksamkeit dieser und weiterer absatzfördernder Maßnahmen. Abb. 1.4 zeigt das annähernd exponentielle Wachstum der neuzugelassenen batterieelek-

⁷⁶ Vgl. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE 2021.

⁷⁷ Vgl. AHK Norwegen I Netzwerk für bilateralen Erfolg 2021.

⁷⁸ Vgl. tagesschau 2019.

⁷⁹ Vgl. tagesschau 2021.

⁸⁰ Vgl. Deffner et al. 2012.

⁸¹ Vgl. Deutsche Post DHL Group 2021.

⁸² Vgl. ecomento.de 2021.

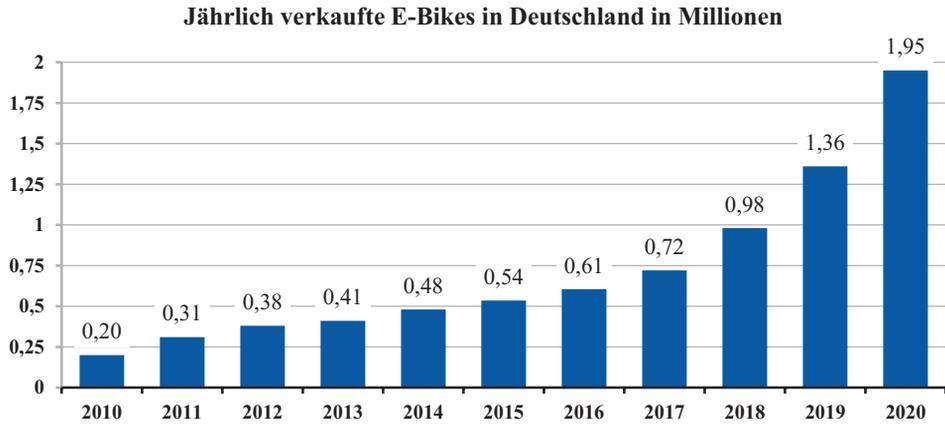


Abb. 1.3 Verkäufe von E-Bikes in Deutschland von 2010 bis 2020. (Vgl. Zweirad-Industrie-Verband (ZIV) 2021)

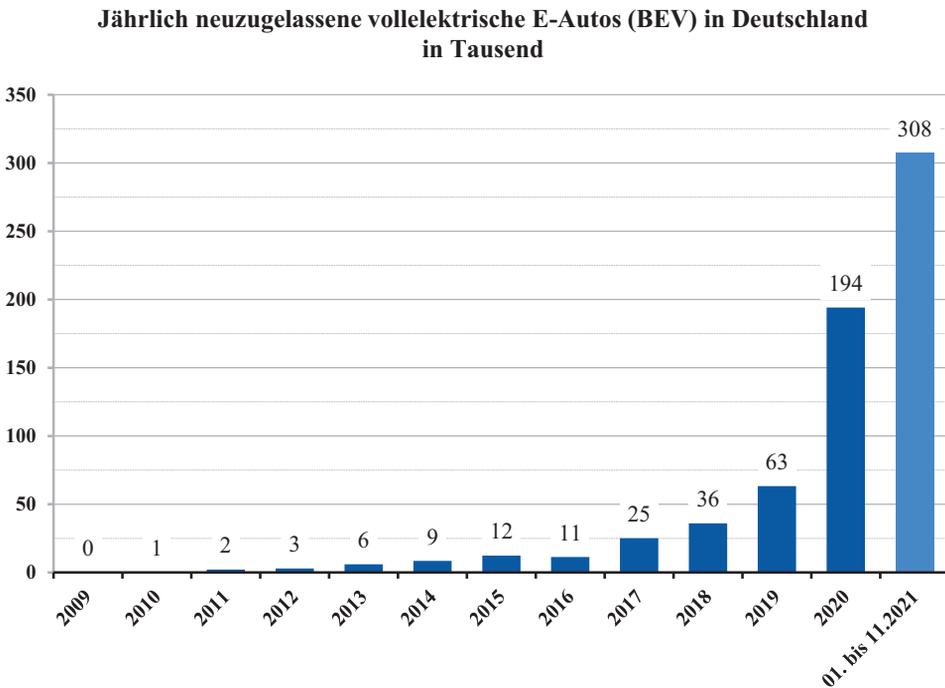


Abb. 1.4 Neuzulassungen von Elektroautos (BEV) in Deutschland von 2009 bis 11/2021. (Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2021)

trischen Fahrzeuge in Deutschland von 2009 bis November 2021. Im Jahr 2009 wurden noch weniger als 100 solcher Fahrzeuge zugelassen. Sechs Jahre später waren es immer noch kaum mehr als 11.000 Neuzulassungen. Im Jahr 2017 jedoch lag die Zahl jedoch bereits mehr als doppelt so hoch wie im vorherigen Jahr. 2017 wurde somit zum Startpunkt für eine hohe Wachstumsgeschwindigkeit, die sich in den folgenden Jahren fortsetzte. 2020 waren es knapp 200.000 Zulassungen – fast 20-mal so viele wie noch 2016. Die Wachstumsgeschwindigkeit blieb trotz Lieferengpässen und weiterer Komplikationen durch die Corona-Pandemie auch 2021 auf einem hohen Niveau. Mit Stand vom November 2021 erreichten die Neuzulassungen bereits ein Wachstum von rund 60 % gegenüber dem Vorjahr.⁸³

Offensichtlich gehört das Verbrenner-Paradigma also mit dem Beginn des dritten Jahrzehnts der 2000er-Jahre der Vergangenheit an. Die Elektromobilität wächst auf allen Märkten und lässt neue Mobilitätskonzepte entstehen – beispielsweise E-Scooter. Nicht zuletzt die rasante Digitalisierung von Technik, Wirtschaft und Gesellschaft eröffnet völlig neue, disruptive Potenziale der Mobilität. Angesichts der globalen Erderwärmung ist diese Entwicklung relevanter als jemals zuvor, denn noch immer trägt der Verkehr mit einem Anteil von rund 20 % maßgeblich zu den weltweiten CO₂-Emissionen bei.⁸⁴

1.5 Vom Zukunftskonzept zum Paradigma

Die historische Analyse zeigt, dass die technischen Grundlagen der Formen von Elektromobilität – abgesehen von der Luftfahrt – schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts bekannt waren und erprobt wurden. Das Scheitern als Massentechnologie beruhte auf einer Kombination aus technischen, sozioökonomischen und psychologischen Faktoren. Sie führten seit den 1920er-Jahren zu einem globalen Verbrenner-Paradigma, das bis in die 2000er-Jahre hinein Bestand hatte. Elektromobilität verkam in dieser Zeit zum Nischen- beziehungsweise Zukunftskonzept. Der Schienenverkehr bildet indes eine Ausnahme, bei dem sich der elektrische Antrieb ab der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts als führende Technologie durchsetzte.

Seit dem Ende der 1960er-Jahre verschoben sich die Rahmenbedingungen leicht zugunsten der Elektromobilität, da ökologische Aspekte zwischenzeitlich immer wieder Debatten über die Form der Mobilität anregten. Der System-Lock-in-Effekt verhinderte in Verbindung mit einer statischen Gesetzeslage jedoch den Durchbruch der Technologie. Lediglich in akuten Krisensituationen gab es Veränderungsansätze, die das Verbrenner-Paradigma grundlegend hinterfragten, dann allerdings gestoppt wurden, wie beispielsweise das „Low Emission Program“ durch Klagen von Industrie und Handel.

Das Zusammenspiel aus technischen Innovationen, unternehmerischen Innovatoren und den sich aufgrund des anthropogenen Klimawandels entschlosseneren politischen Be-

⁸³ Vgl. Bundesregierung 2021.

⁸⁴ Vgl. Bundesregierung 2021.

strebungen nach Emissionsreduktion ebnete der Elektromobilität seit den 2000er-Jahren schließlich den Weg aus der Nische in den Massenmarkt. Daraus entstand einerseits ein quasi-exponentielles Wachstum der Elektromobilität in Form von E-Autos, E-Bikes und E-Scootern, andererseits wird der Fahrzeugmarkt spätestens Anfang der 2020er-Jahre stärker reguliert. Politisch wurden und werden Verbote von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor in weiten Teilen der Erde in Aussicht gestellt (siehe Abschn. 3.3). So fordert beispielsweise die EU-Kommission im Rahmen des Klimaprogramms „Fit for 55“ die ausschließliche Zulassung von lokal emissionsfreien Fahrzeugen ab dem Jahr 2035 – was im Umkehrschluss das Verbot von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ausgenommen E-Fuels und Biokraftstoffe) bedeutet. Mit Stand von September 2021 müssen die EU-Länder und das EU-Parlament dem Vorschlag noch zustimmen.^{85,86}

Die Automobilindustrie hat die klimapolitischen Maßnahmen in den 2020er-Jahren – anders als zuvor in der Geschichte – nicht abgelehnt, sondern durch Strategien für die Elektrifizierung der Produktportfolios angenommen. Die Übersicht der bis 2035 geplanten Bestrebungen zur Elektrifizierung der Produktportfolios (BEV & FCEV), gelistet nach Automobilherstellern, ist in Abb. 1.5 dargestellt.⁸⁷ Gelistet sind konkrete Ziele für vollständige oder teilweise lokal emissionsfreie Portfolios für rein batterieelektrische (BEV) und auf der Brennstoffzelle (FC) basierende Fahrzeuge mit Stand von September 2021. Dort nicht aufgeführte Hersteller hatten zu diesem Zeitpunkt entweder keine entsprechenden Ziele veröffentlicht oder übernehmen auch Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV) in die angestrebten Elektrifizierungsziele. PHEV wurden hier bewusst nicht aufgenommen, da sie nicht als lokal emissionsfrei gelten können und insofern die Vergleichbarkeit der Pläne verhindern. Außerdem ist zu beachten, dass die Elektrifizierung von Automobilen aufgrund der gesetzlich reglementierten Emissionsreduktion für alle Hersteller erforderlich ist.

Die Breite der Bestrebungen im Marktumfeld verdeutlicht: Die Elektromobilität wartet nicht mehr auf den Durchbruch, sondern sie ist inzwischen selbst zum Paradigma geworden. So wird dem Verbrennungsmotor für das Jahr 2030 in Europa nur noch ein Anteil von rund 40 % prognostiziert – und damit auch der Technologie, die die Mobilität der Menschheit mehr als 100 Jahre lang geprägt hat.⁸⁸

Das neue Paradigma der Elektromobilität unterscheidet sich allerdings in der Tiefe vom Verbrenner-Paradigma, das sich in erster Linie auf die Antriebstechnik als solche beschränkte. Die Elektromobilität zeichnet sich in der aktuellen Zielvorstellung vor allem durch die angestrebte Entkopplung von fossiler Energie und Verkehrsleistung aus und geht damit weit über das Produkt des Elektroautos hinaus. Dafür ist eine strukturelle Neudefinition der Mobilität notwendig. Gefragt sind sämtliche Verkehrsformen komplementär integrierender Lösungen, verbunden mit einer kollektiv-individuellen

⁸⁵Vgl. European Automobile Clubs 2021; Vgl. Europäische Kommission 2021.

⁸⁶Vgl. tagesschau 2021.

⁸⁷Vgl. Rammler und Weider 2011.

⁸⁸Vgl. Kampker et al. 2021.

Hersteller mit Ankündigungen von lokal emissionsfreien Produktportfolios (BEV & FCEV)*

Hersteller/Jahr	2020	2025	2030	2035
Smart	100 % – 2020			
Jaguar		100 % – 2025		
Smart		100 % – 2025		
Opel		100 % – 2028		
Bentley			100 % – 2030	
Cadillac			100 % – 2030	
Cupra			100 % – 2030	
Fiat			100 % – 2030	
Ford (Welt)			40 % – 2030	
Ford (Europa)			100 % – 2030	
Mercedes ¹			100 % – 2030	
Mini		50 % – 2027	100 % – 2030	
Volvo		50 % – 2025	100 % – 2030	
Audi			100 % – 2033	
GM				100 % – 2035
Hyundai				100 % – 2035
Mazda			25 % – 2030	
VW (Europa)			70 % – 2030	100 % – 2035
Renault		65 % – 2025	90 % – 2030	
Honda			40 % – 2030	
BMW			50 % – 2030	
Skoda			50 – 70 % – 2030	
Land Rover			60 % – 2030	
Honda				80 % – 2035

*Nicht gelistete Hersteller entweder ohne veröffentlichte Ankündigungen oder mit Ankündigungen, die auch nicht lokal emissionsfreie Fahrzeuge (PHEV) beinhalten.

¹ „Überall dort, wo es die Marktbedingungen zulassen.“

■ Vollständig lokal emissionsfrei

▨ Anteilig lokal emissionsfrei

Abb. 1.5 Zielsetzungen der Hersteller von ursprünglich konventionell angetriebenen Automobilen für lokal emissionsfreie Produktportfolios bis 2035 (Stand: September 2021). (Vgl. Köllner 2021b; Fasse et al. 2021)

Bedarfoptimierung. Ein wichtiges Element dabei ist die Digitalisierung, die durch die Steuerung des Verkehrs und des Zusammenspiels von Energiebedarf und Energieerzeugung einen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann, der den Anteil der einzelnen elektrifizierten Fahrzeuge weitaus übersteigt. Letztlich bedeutet das: Die aktuelle Marktdurchdringung elektrischer Fahrzeuge ist lediglich ein Zwischenziel auf dem Weg zur dekarbonisierten Mobilität.

Literatur

Teil I: Einführung in die Elektromobilität

- Abt, D.** *Die Erklärung der Technikgenese des Elektroautomobils* (Europäische Hochschulschriften Reihe 5, Volks- und Betriebswirtschaft, 2295). Frankfurt am Main, Berlin: Lang, 1998. Zugl.: Frankfurt (Main), Univ., Diss., 1997
- ABTRA – Associação Brasileira de Terminais e Recintos Alfandegados** **ABTRA – Associação Brasileira de Terminais e Recintos Alfandegados 2021: Brazilian Automotive Industry Yearbook. Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2021.** In: ABTRA – Associação Brasileira de Terminais e Recintos Alfandegados, 12.05.2021
- Adams, W. P.** *Die USA im 20. Jahrhundert* (Oldenbourg Grundriss der Geschichte, Band 29). 2. Auflage Aufl. Munich, Germany: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2012
- AHK Norwegen I Netzwerk für bilateralen Erfolg Erneuerbare Energien I Fokus I AHK Norwegen.** <https://norwegen.ahk.de/kernbereiche/erneuerbare-energien>. Abruf 16.07.2021
- Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC)** *Elektroauto kaufen: Übersicht aktueller E-Autos*|ADAC. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/kaufen/elektroautos-uebersicht/>. Abruf 16.07.2021
- Anderl, V.** *Hercules Electra – Die Ur-Mutter aller E-Bikes*|2Rad Anderl|E-Bike- und Fahrrad-Fachmann im Ruhrgebiet. <https://www.zweirad-anderl.de/sortiment/hercules-electra%2D%2D-die-ur-mutter-aller-e-bikes.html>. Abruf 16.07.2021
- Andersen, A.:** *Der Traum vom guten Leben. Alltags- und Konsumgeschichte vom Wirtschaftswunder bis heute.* 1. Aufl. Aufl. Frankfurt/Main, New York: Campus-Verl., 1997
- Banham, R.:** *The Ford century. Ford Motor Company and the innovations that shaped the world.* 1. ed. Aufl. New York, NY: Artisan, 2002
- Barthel, M; Lingnau, G.:** *100 Jahre Daimler-Benz.* Mainz: v. Hase u. Koehler, 1986
- Bonin, H. (Hrsg.):** *Ford, 1903–2003. The European history.* Collection Ecoclio, Paris: P.L.A.G.E, 2003
- Bundesregierung:** *Kaufprämie für Elektroautos erhöht.* <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/energie/wende/kaufpraemie-fuer-elektroautos-erhoeht-369482>. Abruf 16.07.2021
- Bundesregierung:** *Mehr E-Mobilität.* <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/verkehr-1672896>. Abruf 16.07.2021
- Canzler, W; Knie, A.:** *Das Ende des Automobils. Fakten und Trends zum Umbau der Autogesellschaft* (Umwelt aktuell). 1. Aufl. Aufl. Heidelberg: Müller, 1994
- Deffner, J; Birzle-Harder, B; Hefter, T; Götz, K.:** *Elektrofahrzeuge in betrieblichen Fahrzeugflotten – Akzeptanz, Attraktivität und Nutzungsverhalten. Ergebnisbericht im Rahmen des Projekts Future Fleet,* 2012
- Deutsche Post DHL Group:** *06. Jul. 21: DHL Express elektrifiziert Zustellung in Berlin.* <https://www.dpdhl.com/de/presse/pressemitteilungen/2021/dhl-express-elektrifiziert-zustellung-in-berlin.html>. Abruf 16.07.2021
- Dienel, H.-L; Trischler, H.:** *Geschichte der Zukunft des Verkehrs. Verkehrskonzepte von der frühen Neuzeit bis zum 21. Jahrhundert* (Beiträge zur historischen Verkehrsforschung, 1). Frankfurt/Main: Campus-Verl., 1997
- ecomento.de:** *Toyota: Weltweit 15+ Millionen Hybridfahrzeuge verkauft.* In: ecomento, 27.04.2020
- ecomento.de:** *Deutsche Post DHL plant 37.000 E-Transporter bis 2025, neue StreetScooter-Version.* In: ecomento, 23.04.2021
- Employment and Social Development Canada (ESDC):** *The Daily – Zero-emission vehicle registrations down slightly in 2020.* <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/210422/dq210422e-eng.htm>. Abruf 08.12.2021

- Europäische Kommission:** *Umsetzung des europäischen Grünen Deals*. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_de. Abruf 08.09.2021
- European Automobile Clubs:** *Green Deal: Sustainable batteries*. <https://www.eaclubs.org/post/green-deal-sustainable-batteries>. Abruf 27.05.2021
- Fasse, M; Tyborski, R; Menzel, S.:** *Audi, VW, BMW: Welche Hersteller ab wann auf Verbrenner verzichten*. In: Handelsblatt, 08.07.2021
- Fersen, O. von (Hrsg.):** *Opel. Räder für die Welt*. Automobile Quarterly Publications. 3., erw. Aufl. Aufl., Stuttgart: Princeton Inst. for Histor. Research, 1986
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE:** *Anteil erneuerbarer Energien|Energy-Charts*. https://energy-charts.info/charts/renewable_share/chart.htm?l=de&c=DE. Abruf 16.07.2021
- Georgano, N. (Hrsg.):** *The Beaulieu encyclopedia of the automobile*, Chicago, Ill.: Fitzroy Dearborn, 2000
- Georgano, N; Wright, N.:** *100 Jahre amerikanische Automobile*. 1. Aufl. Aufl. Stuttgart: Motorbuch-Verl., 1993
- International Trade Administration|Trade.gov:** *Japan Transition to Electric Vehicles*. <https://www.trade.gov/market-intelligence/japan-transition-electric-vehicles>. Abruf 08.12.2021
- Irle, R.:** *EV-Volumes – The Electric Vehicle World Sales Database*. <https://www.ev-volumes.com/>. Abruf 08.12.2021
- Kampker, A; Offermanns, C; Heimes, H; Bi, P.:** *Metaanalyse zur Marktentwicklung elektrifizierter Fahrzeuge*. In: ATZ Automobiltech Z, Jg. 123, 2021, Nr. 7–8Nr., S. 60–64
- Kirsch, D. A.:** *The electric vehicle and the burden of history*. New Brunswick, N.J.: Rutgers University Press, 2000
- Köllner, C.:** *Verbrenner-Ausstieg: Die Pläne der Autohersteller*. In: springerprofessional.de, 13.07.2021b
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA):** *Jahresbilanzen 2009 bis 2021*. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahresbilanz_Bestand/fz_b_jahresbilanz_node.html. Abruf 08.12.2021
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA); Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur:** *Monatliche Neuzulassungen – Neuzulassungsbarometer im November 2021*. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/MonatlicheNeuzulassungen/2021/202111_GImonatlich/202111_nzbarometer/202111_n_barometer.html?nn=3504038&fromStatistic=3504038&yearFilter=2021&monthFilter=11_November&fromStatistic=3536106&yearFilter=2021&monthFilter=11_November. Abruf 08.12.2021
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA); Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur:** *Statistik – Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach Segmenten und Modellreihen 2011*. https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz11/fz11_gentab.html. Abruf 08.12.2021
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA); Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur:** *Jahresbilanz 2020*. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Jahresbilanz_Neuzulassungen/jahresbilanz_node.html. Abruf 08.12.2021
- Lewandowski, J.:** *Das Jahrhundert des Automobils*. München: Südwest, 1987
- Manz, V. C.:** *ZF E-Fahrzeug Historie – ZF*. In: ZF, 29.05.2019
- Mom, G.:** *The Electric Vehicle. Technology and Expectations in the Automobile Age*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2004
- Möser, K.:** *Geschichte des Autos*. Frankfurt/Main: Campus-Verl., 2002
- Norton, N.:** *100 Jahre Automobile. Autos, Rennen, Rekorde*. Hannover: Weichert, 1985
- Petzold, M.:** *Oldtimer aus der Zukunft*, 16.09.2011
- Rammler, S; Weider, M.:** *Das Elektroauto. Bilder für eine zukünftige Mobilität (Mobilität und Gesellschaft, 5)*. Berlin: Lit, 2011

- Rao, H.:** *Market rebels. How activists make or break radical innovations.* Princeton: Princeton University Press, 2009
- Ropohl, G.:** *Eine Systemtheorie der Technik. Zur Grundlegung der allgemeinen Technologie.* München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1979
- Schiedt, H.-U.:** *Verkehrsgeschichte. Histoire des transports* (Schweizerische Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialgeschichte, 25). Zürich: Chronos Verl., 2010
- Seherr-Thoss, H. C. G. von:** *Die deutsche Automobilindustrie. Eine Dokumentation von 1886 bis 1979.* (2., korrigierte u. erw. Aufl.) Aufl. (Stuttgart:) DVA, (1979)
- Statista:** *Tesla – Verkaufszahlen bis 2020*|Statista. Abruf 16.07.2021
- tagesschau:** *Ende des Verbrennungsmotors: Norwegen gibt das Tempo vor.* In: tagesschau.de, 09.04.2019
- tagesschau:** „Fit for 55“-Paket: Wie die EU-Klimaziele erreicht werden sollen. In: tagesschau.de, 14.07.2021
- tagesschau:** *Klimapaket der Kommission: EU fordert Aus für neue Verbrenner bis 2035.* In: tagesschau.de, 14.07.2021
- Tesla:** *Model S.* https://www.tesla.com/de_de/models. Abruf 16.07.2021
- Toyota Deutschland GmbH:** *Toyota verkauft 2018 weltweit 10,59 Millionen Fahrzeuge – Toyota Deutschland Media-Website.* <https://www.toyota-media.de/blog/unternehmen/artikel/toyota-verkauft-2018-weltweit-1059-millionen-fahrzeuge/text>. Abruf 16.07.2021
- Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA):** *Erstes globales E-Mobility-Ranking*|VDA. <https://www.vda.de/vda/de/presse/Pressemeldungen/210423-Erstes-globales-E-Mobility-Ranking>. Abruf 08.12.2021
- Wehler, H.-U.:** *Bundesrepublik und DDR 1949–1990* (Deutsche Gesellschaftsgeschichte, /Wehler, Hans-Ulrich; 5). broschiierte Studienausgabe Aufl. München: Beck, 2008
- Weiherr, S. von; Goetzeler, H.:** *Weg und Wirken der Siemens-Werke im Fortschritt der Elektrotechnik, 1847–1980. Ein Beitrag zur Geschichte der Elektroindustrie.* 3. Aufl. Aufl. Berlin: Siemens AG, 1981
- Wittler, M.:** *Schönes Ding: Hotzenblitz: Schwarzwälder Pirschsorte.* In: DER SPIEGEL, 25.10.2020
- Zapf, H.:** *Thomas S. Kuhn: The Structure of Scientific Revolutions, University of Chicago Press: Chicago 1962, 172 S. (dt. Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen, Suhrkamp: Frankfurt 1967, 226 S.).* In: Salzborn, S. (Hrsg.): *Klassiker der Sozialwissenschaften: 100 Schlüsselwerke im Portrait* 2. Auflage Aufl. Wiesbaden: Springer VS, 2016, S. 221–224
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW):** *Elektroautos: Bestand steigt weltweit auf 10,9 Millionen,* 09.03.2021
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW):** *Zahl der Elektroautos steigt weltweit von 3,4 auf 5,6 Millionen.* <https://www.zsw-bw.de/presse/aktuelles/detailansicht/news/detail/News/zahl-der-elektroautos-steigt-weltweit-von-34-auf-56-millionen.html>. Abruf 08.12.2021
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW):** *Zahl der Elektroautos steigt weltweit von 5,6 auf 7,9 Millionen.* <https://www.zsw-bw.de/presse/aktuelles/detailansicht/news/detail/News/zahl-der-elektroautos-steigt-weltweit-von-56-auf-79-millionen.html>. Abruf 08.12.2021
- Zweirad-Industrie-Verband (ZIV):** *Zahlen – Daten – Fakten zum Deutschen Fahrrad- und E-Bike-Markt 2020.* <https://www.ziv-zweirad.de/presse-medien/pressemitteilungen/detail/article/zahlen-daten-fakten-zum-deutschen-fahrrad-und-e-bike-markt-2020/>. Abruf 08.12.2021

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Aktuelle Herausforderungen der Elektromobilität

2

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Benjamin Dorn,
Christian Offermanns und Florian Brans

Anders als bei der generellen Skepsis, ob Elektromobilität jemals eine Rolle im (inter-)nationalen Automarkt spielen wird, sind aktuelle Herausforderungen für die E-Mobilität immer konkreter Natur. Die wichtigen Treiber – Kosten, technologische Hürden sowie produktionstechnische Fragestellungen – werden folglich nicht mehr als potenzielle Ausschlusskriterien betrachtet, sondern als Stellhebel für eine Verbesserung der Marktpenetration im klassischen Zielkorridor „Qualität, Zeit und Kosten“. Technologische Hindernisse und unsichere Technologieentwicklungen spiegeln nach wie vor die Komplexität der Elektromobilität wider und sind sowohl auf Komponenten- als auch auf Gesamtfahrzeugebene äußerst vielschichtig. Vor allem im produktionstechnischen Kontext trägt dies potenziell zu einem Wandel der OEM- und Zuliefererindustrie bei – beziehungsweise zu einer Veränderung der Wertschöpfungsstruktur, die sich im Markt der Verbrennungsmotor-Fahrzeuge etabliert hat. Auf der

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

B. Dorn · C. Offermanns

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: b.dorn@pem.rwth-aachen.de; c.offermanns@pem.rwth-aachen.de

F. Brans (✉)

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: f.brans@pem.rwth-aachen.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Kampker, H. H. Heimes (Hrsg.), *Elektromobilität*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-65812-3_2

Kostenseite wird eine Pareto-Situation zwischen den konventionellen und den elektrifizierten Antriebstopologien angestrebt – und teilweise schon erreicht. Auf der Reduktion der Kosten – insbesondere im Bereich des Hochvoltspeichers – liegt immer noch das Hauptaugenmerk der branchenübergreifenden Bemühungen zur nachhaltigen Festigung der Elektromobilität auf dem Weltmarkt.

2.1 Kostendruck

Als eine Ursache der zu Beginn zögerlichen Marktdurchdringung elektrifizierter Fahrzeuge und der teilweisen Verfehlung verkehrs- und umweltpolitischer Ziele wurden – und werden teils heute noch – die vergleichsweise hohen Anschaffungskosten für Elektrofahrzeuge genannt. Die Batterie bei batterieelektrischen Fahrzeugen sowie die Brennstoffzelle bei Brennstoffzellen-Fahrzeugen stellen auch heute noch den Großteil der Produktionskosten dar und sind somit die Hauptkostentreiber, welche die Höhe der Anschaffungskosten maßgeblich beeinflussen.

Neben der Verwendung teurer Rohstoffe kommt bei der Produktion für die automobilen Anwendung geeigneter PEM-Brennstoffzellen die Tatsache unzureichender Skaleneffekte hinzu. Auch großserientaugliche Produktionsverfahren müssen für die kostengünstige Herstellung von Brennstoffzellen neu und weiterentwickelt werden. Welche Auswirkung die Kostenentwicklung wesentlicher Kernkomponenten auf die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen hat, zeigt das Beispiel der Batterie: Lag der durchschnittliche Preis für Lithium-Ionen-Akkus im Jahr 2010 bei rund 600 €/kWh, so lag er im Jahr 2021 bei ca. 97 €/kWh. In Fachkreisen wird davon ausgegangen, dass die Kosten bis zum Jahr 2025 auf bis zu 83 €/kWh weiter sinken.¹

Der zumeist höhere Anschaffungspreis von Elektrofahrzeugen ist nach wie vor einer der meistgenannten Gründe, weshalb Käuferinnen und Käufer an Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben festhalten und sich gegen neue Antriebsformen entscheiden. Zu beobachten ist jedoch, dass Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb kostengünstiger werden. Höhere Stückzahlen und daraus resultierende Skaleneffekte in der Entwicklung und Produktion sowie langfristig angelegte Förderprogramme sorgen dafür, dass Fahrzeuge mit alternativen Antrieben gegenüber konventionellen Verbrennern nicht mehr unbedingt im Hintertreffen sind. Dennoch wird auch deutlich, dass die wirtschaftliche Nutzung von Elektrofahrzeugen stark vom individuellen Nutzerverhalten und Anwendungsfall abhängig ist.

Zu diesem Schluss kommt auch ein Kostenvergleich des ADAC aus dem Jahr 2021, in dem insgesamt 555 Fahrzeuge unterschiedlicher Segmente untersucht wurden. Kern der Gegenüberstellung war die Kostenaufschlüsselung der einzelnen Fahrzeuge in Abhängigkeit der Kilometerleistung pro Jahr.² Diese Studie dient auch als Berechnungs-

¹ Vgl. Horváth & Partner GmbH 2020.

² Vgl. ADAC 2021.

grundlage für die folgende Untersuchung. Herangezogen wurden zwei Fahrzeuge eines Herstellers aus der gleichen Fahrzeugkategorie – ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor sowie ein reines Elektrofahrzeug:

Der Grundpreis des Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor liegt im Mittel bei 36.995 € und damit nur knapp unter dem durchschnittlichen Grundanschaffungspreis des vollelektrischen Pendant (39.100 €). Bei einer Betrachtung der laufenden Kosten wird jedoch deutlich, dass die des elektrischen Fahrzeugs ungefähr 20 % geringer ausfallen als die des Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor. Während die durchschnittlichen Kosten pro Kilometer bei einer Laufleistung von 10.000 km/Jahr des Verbrenners rund 0,75 € betragen, so liegen die des Elektrofahrzeugs bei etwa 0,60 €. Bei einer Laufleistung von 30.000 km/Jahr verhalten sich die Kosten ähnlich (0,37 € zu 0,30 €). Abb. 2.1 zeigt vergleichend die Kosten des Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor und des Elektrofahrzeugs in Cent pro Kilometer und in Abhängigkeit von der jährlichen Laufleistung.

Um eine ganzheitliche Aussage über die Kostenstruktur von Fahrzeugen mit elektrischem und konventionellem Antrieb treffen zu können, muss die „Total Cost of Ownership“ (TCO) betrachtet werden. Auch hierzu werden exemplarisch die beiden Modelle der vorigen Betrachtung herangezogen. Tab. 2.1 stellt die zugrunde gelegten Annahmen analog zur eingangs beschriebenen Kostenanalyse des ADAC dar:

Abb. 2.2 zeigt die Gesamtbetreiberkosten für die jeweiligen Fahrzeugmodelle über die Jahre hinweg bei einer jährlichen Laufleistung von 20.000 km. In diesem Fallbeispiel übersteigen die Gesamtbetreiberkosten des konventionellen Fahrzeugs die des

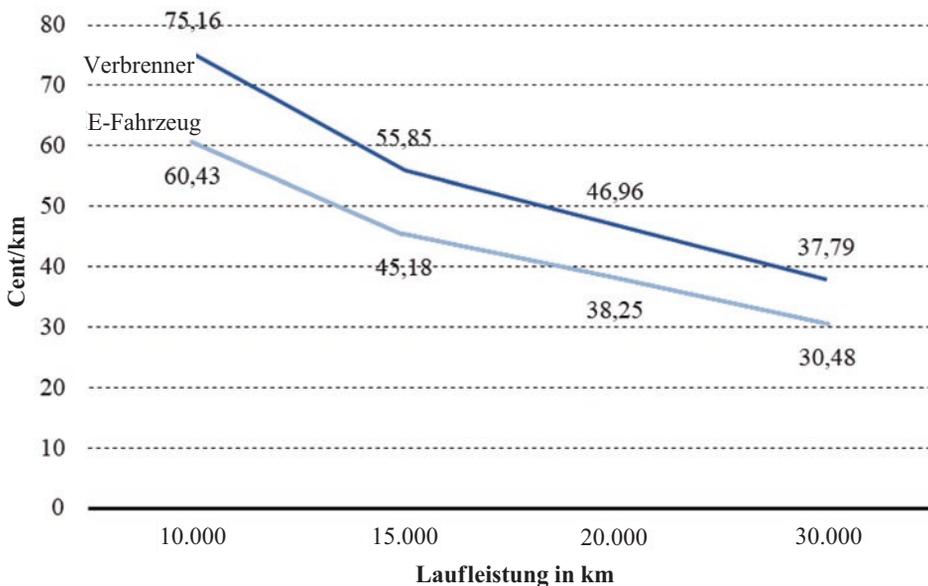


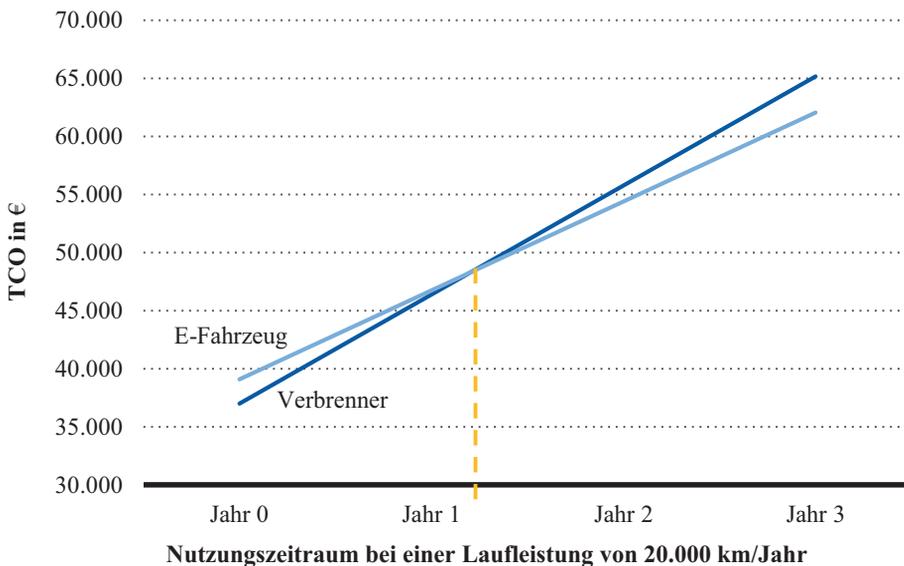
Abb. 2.1 Laufende Kosten (Cent/km) in Abhängigkeit von der Jahreslaufleistung am Beispiel eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor und eines mit batterieelektrischem Antrieb. (Vgl. ADAC 2021)

Tab. 2.1 Zugrunde gelegte Annahmen zur TCO-Berechnung

	Fahrzeug mit Verbrennungsmotor	Fahrzeug mit batterieelektrischem Antrieb
Anschaffungspreis*	36.995 €	39.100 €
Kaufprämie**	–	9000 €
Energiekosten**	1,48 €/l Super 1,30 €/l Diesel	0,36 €/kWh
Haftpflicht- & Vollkaskoversicherung**	Mit 50 %	Mit 50 %

*Errechnet wurde jeweils das Mittel aus acht (Fahrzeug mit Verbrennungsmotor) bzw. vier (Fahrzeug mit batterieelektrischem Antrieb) Modellvarianten

**gem. Kostenvergleich des ADAC (2021)

**Abb. 2.2** TCO-Vergleich eines Verbrennungsmotor-Fahrzeugs mit einem Batterie-Elektrofahrzeug

batterieelektrischen bereits nach etwas mehr als 14 Monaten. Vor diesem Hintergrund lässt sich eindeutig sagen, dass Elektrofahrzeuge schon heute nicht nur eine umweltfreundliche, sondern auch eine wirtschaftlich attraktive Alternative zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren darstellen können.

Es ist allerdings zu erwähnen, dass die dargestellte Kalkulation lediglich als Indikation für die kostenseitige Entwicklung am Markt zu betrachten ist. So profitieren Fahrzeuge mit alternativen Antrieben aktuell – und aller Voraussicht nach auch in mittelfristiger Zukunft – stark von Subventionen. Die deutsche Bundesregierung fördert den Kauf von Elektrofahrzeugen beispielsweise mit bis zu 9000 € (Stand: August 2021). Darüber hinaus sind Halter von Elektrofahrzeugen für zehn Jahre von der Kraftfahrzeugsteuer befreit und können steuerliche Vergünstigungen etwa beim Aufladen geltend machen. Welche Aus-

wirkungen politische Förderprogramme für die Etablierung alternativer Antriebe haben können, zeigt indes das Beispiel Norwegen: Im Jahr 2020 wurden dort erstmals mehr Elektrofahrzeuge als konventionelle Verbrenner verkauft. Norwegen ist weltweit das erste Land mit einer Elektrofahrzeug-Quote von mehr als 50 %.³ Ein wesentlicher Grund dafür liegt auch hier in der staatlichen Politik: Bereits im Jahr 2016 kündigte die norwegische Regierung an, dass ab 2025 keine konventionell angetriebenen Fahrzeuge mehr verkauft werden sollen. Steuerliche Anreize und eine flächendeckende Ladeinfrastruktur haben dieses Vorhaben früh untermauert.

Es bleibt also festzuhalten, dass Fahrzeuge mit alternativen Antrieben schon heute eine nicht nur umweltfreundliche, sondern auch wirtschaftlich attraktive Alternative zu Verbrennern sein können. Nichtsdestotrotz stellen insbesondere die Kernkomponenten „Batterie“ und „Brennstoffzelle“ nach wie vor wesentliche Kostentreiber dar, obgleich vor allem bei der Batterie in jüngster Vergangenheit bereits eine wesentliche Kostendegression zu beobachten war. Um Elektromobilität flächendeckend auszubauen, bleibt es eine der wesentlichen Herausforderungen, Fahrzeuge mit alternativen Antrieben – mittelfristig auch ohne staatliche Subventionen – wirtschaftlich attraktiver zu machen.

2.2 Technische Hürden und unsichere Technologieentwicklung

Eine zentrale Herausforderung der Elektromobilität besteht in der immer noch andauernden Frage danach, welche Technologie sich flächendeckend durchsetzen wird. Sowohl auf der Ebene des Gesamtfahrzeugs als auch auf derjenigen einzelner Komponenten ist diese Frage nicht hinlänglich beantwortet.

Auf Fahrzeugebene versucht der Hybridantrieb, die Effizienz und den Fahrkomfort des elektrischen Antriebs mit der Reichweite eines Fahrzeuges mit konventioneller Antriebseinheit zu vereinen. Damit einhergehende Kosteneinsparungen bei der Anschaffung – insbesondere durch den Einsatz kleinerer Batterien – und eine vorhandene Tankstellen-Infrastruktur sind für viele Verbraucherinnen und Verbraucher ausschlaggebende Argumente für hybrides Fahren. Der Mild-Hybrid als 48-Volt-Startergenerator galt lange als „Einstieg“ in die Elektrifizierung. Mittlerweile hat dieses Konzept vor allem im Premium-Segment Fahrzeuge mit konventionellem Antrieb nahezu abgelöst. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt der Voll-Hybrid (HEV), der jedoch im Vergleich zum Mild-Hybrid durch einen integrierten, leistungsstärkeren Elektromotor rein-elektrisches Fahren ermöglicht. Plug-in-Hybride sowie Konzepte mit „Range Extendern“ gewährleisten rein elektrische Fahrten über lange Strecken. Auch hier wird der elektrische Antrieb um einen Verbrennungsmotor ergänzt. Hinzu kommen rein elektrische Fahrzeuge – batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) wie auch wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV). Politische Förderprogramme ebenso wie der flächendeckende Ausbau der Infrastruktur sind nach wie vor notwendig, um den Wandel zur nachhaltigen Mobilität weiter

³Vgl. tagesschau 2021.

zu gestalten. Die Antwort auf die Frage nach dem in Zukunft dominierenden Fahrzeugkonzept ist vielschichtig – ein Mobilitätsmix aus unterschiedlichen Antriebskonzepten in Abhängigkeit von der jeweiligen Anwendung und dem Nutzungsverhalten ist das, womit Branchenfachleute derzeit rechnen. Deutlich wird an dieser Stelle die aktuell bereits bestehende Technologievielfalt. Diese bietet einerseits einen breiten Raum für weitere Innovationen, erschwert jedoch gleichzeitig die strategische Ausrichtung einzelner Unternehmen vor dem Hintergrund des Marktdurchdringungspotenzials für die eigenen Technologien.

Die Technologie-Diversität erstreckt sich bis auf die Ebene der Einzelkomponenten. Bei Elektromotoren sind im Traktionsbereich aktuell drei wesentliche Motor-Topologien zu erkennen: permanenterregte (PSM) und fremderregte Synchronmotoren (FSM) sowie Asynchronmotoren (ASM). Ein weiterer Variantentreiber liegt zudem im Wicklungskonzept. Ein branchenweiter Trend in Bezug auf eine bestimmte Motortopologie ist derzeit nicht zu beobachten – vielmehr wird die Unsicherheit der Technologieentwicklung und -auswahl anhand einer retrospektiven Betrachtung der vergangenen Jahre deutlich: Verfügt der „BMW i3“ über einen permanenterregten Synchronmotor, so basiert das aktuelle Motorenkonzept des Unternehmens auf einer fremderregten Synchronmaschine. Tesla wiederum erweitert sein Antriebsportfolio um permanenterregte Synchronmaschinen – kamen zuvor ausschließlich Asynchronmotoren zum Einsatz. Außerdem existieren weitere Topologien wie Axialflussmotoren sowie Reluktanz- und Transversalflussmaschinen, die entweder Nischenanwendungen adressieren oder sich im Konzeptstadium befinden.

Die Beispiele für unsichere Technologieentwicklungen lassen sich anhand der Batterie und der Brennstoffzelle weiterführen: Derzeit kommen Pouch-Zellen, Rundzellen und prismatische Zellen in Antriebssystemen zur Anwendung. Unterschiedliche Zelltopologien und ein Trend zu großformatigen Zellen sind ebenso Bestandteil des technologischen Fortschritts wie die Entwicklung und Industrialisierung von Feststoffbatterien. Im Bereich der Brennstoffzelltechnologie besteht Diversität hinsichtlich unterschiedlicher Zelltypen, wobei PEM-Brennstoffzellen nach heutigem Stand die zur automobilen Anwendung geeignetste Zelltopologie ist. Unterschiedliche Technologieansätze sind im Bereich der Brennstoffzellsysteme vor allem in der Wasserstoffspeicherung zu beobachten.

Die gesamte Branche ist mehr als je zuvor durch eine enorme Technologievielfalt geprägt. Unterschiedliche Antriebsstrangkonzeppte auf Fahrzeugebene eröffnen bereits heute anwendungsspezifische Lösungen und tragen somit Schritt für Schritt zur flächendeckenden Elektrifizierung bei. Ein „Mobilitätsmix“, der den individuellen Anforderungen der Nutzenden gerecht wird, trägt wesentlich zur Verkehrswende bei. Allerdings geht die Nutzung einzelner Technologien oftmals mit der Erfüllung gewisser Rahmenbedingungen einher – vor allem in Bezug auf die erforderliche Infrastruktur. Die technologische Diversität lässt sich bis auf die Betrachtungsebene einzelner Komponenten und Subkomponenten übertragen. Individualisierte und exklusive Lösungen tragen der bestehenden Branchendynamik Rechnung und führen in kurzzyklischen Abständen zu inkrementellen Innovationen in nahezu allen Bereichen. Dies hemmt jedoch unter Umständen die flächendeckende Standardisierung, was wiederum Einfluss auf die Skalierbarkeit innerhalb der Produktion haben kann.

2.3 Herausforderungen aus produktionstechnologischer Sicht

Der Wandel zur Elektromobilität ist für OEM sowie für Zulieferer auch aus Produktionsperspektive ein Thema mit wesentlicher Tragweite. Der Bedarf an deutlich weniger Fahrzeugkomponenten trägt dazu bei, dass vorhandene Fertigungskapazitäten umgestaltet werden müssen – sowohl mit Blick auf personelle Kapazitäten als auch auf fertigungstechnologische Ressourcen.

Bei der Produktion der meisten elektrischen Fahrzeuge der ersten Stunde wurde die Strategie des „Conversion Design“ verfolgt. Unter diesem Begriff versteht man den Ansatz, bestehende Fahrzeugkonzepte teilweise dahingehend umzugestalten, den Verbrennungsmotor sowie weitere Antriebskomponenten wie das Schaltgetriebe durch einen elektrischen Antrieb zu ersetzen. Die grundsätzliche Fahrzeuggestalt bleibt dabei jedoch weitestgehend unverändert. Ein bekanntes Beispiel für ein Fahrzeug dieser Art stellte beispielsweise der „e-Golf“ von Volkswagen dar. Insbesondere vor dem damaligen Hintergrund einer ungewissen Nachfrageentwicklung in Kombination mit der Möglichkeit der Nutzung bereichsübergreifender Synergien innerhalb der Konzerne war das „Conversion Design“ ein strategisch sinnvoller Ansatz, das Themenfeld der Elektromobilproduktion zu erschließen. Auch heute wird stellenweise noch die „Conversion-Design“-Strategie verfolgt. Ein bekanntes Beispiel dafür bildet das Modell iX3 von BMW.

Gemäß der steigenden Nachfrage und der strategischen Neuausrichtung vieler OEM, in Zukunft keine – oder deutlich weniger – Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren zu produzieren, ist aktuell jedoch eindeutig zu beobachten, wie Fahrzeughersteller immer mehr dem Konzept des „Purpose Design“ folgen. Die Produktion und die Entwicklung der wesentlichen Kernkomponenten stehen dabei zwar auch im Mittelpunkt, doch das Zielsystem liegt in einem vollends abgestimmten elektrischen Gesamtfahrzeug.

Die produktionstechnologischen Herausforderungen, denen sich die Industrie aktuell stellt und in Zukunft weiter stellen muss, sind vielschichtig. Zu ihnen zählen neue Prozesse und Materialien, ungelöste Problemstellungen, deren Behebung signifikante Kosten- und Effizienzvorteile bringen würden, sowie – zumindest im direkten Vergleich mit der Produktion von Verbrennungsmotor-Fahrzeugen – eher geringes Erfahrungswissen, auf das zurückgegriffen werden kann.

Die Vielschichtigkeit der Prozesse und Wirkzusammenhänge in der Produktion sowie die geringe Erfahrung auf der Seite der Hersteller führen dazu, dass der Aufbau neuer Produktionskapazitäten – insbesondere bei der Fertigung der Komponenten des E-Motors, der Brennstoffzelle und der Batterie – durch multilaterale Projektkonstitutionen geprägt ist. Im Bereich der Material- und Anlagenhersteller wurde und wird spezifisches Produkt- und Prozesswissen aufgebaut, von dem die Automobilindustrie vor allem im Zeitraum von der Vorentwicklung bis zur Industrialisierung profitiert. Um den Herausforderungen in der Industrialisierung gerecht zu werden und aus Gründen der Schnittstellenreduktion sowie Risikominimierung, ist häufig zu beobachten, dass gesamte Produktionssysteme oder Subsysteme geschlossen an einzelne Generalunternehmen vergeben werden. Geschlossene Vergaben sind insbesondere in neuen Technologiefeldern ein adäquater Weg, Produk-

tionssysteme aufzubauen: Mit der Übernahme der Prozessverantwortung in frühen Phasen durch den Generalunternehmer wird dem technischen Risiko des Anlaufs in gewisser Weise Rechnung getragen, und Produzenten sind in der Lage, kontinuierlich eigenes Prozesswissen aufzubauen. Andererseits kann dies dazu führen, dass eine gewisse Abhängigkeit zwischen Produzenten und Anlagenherstellern entsteht. Dies insbesondere vor dem Hintergrund der Tatsache, dass in der vergleichsweise jungen Vergangenheit der Elektroautomobilproduktion eine gewisse Dynamik durch schnelle Technologiewechsel zu beobachten ist, was ein Blick auf die Kernkomponenten „Elektromotor“, „Batterie“ und „Brennstoffzelle“ verdeutlicht.

Galt der E-Motor vor wenigen Jahren noch als die nahezu einzige Kernkomponente in der Elektromobilität, bei der man auf gewisse Erfahrungswerte durch andere Industriezweige blicken konnte, hat sich das in der jüngeren Vergangenheit als nur bedingt zutreffend herausgestellt. Hochintegrierte Antriebseinheiten, komplexes Thermomanagement sowie das anhaltende Streben nach mehr Performance und höherer Effizienz sind die Themen der Stunde. Auch aus produktionstechnologischer Sicht begab man sich gewissermaßen auf ungewohntes Terrain: War die Herstellung konventioneller Antriebe vor allem durch spanende Fertigungsverfahren geprägt, geht die Produktion elektrischer Antriebe mit der Entwicklung und dem Aufbau hochkomplexer Montage-Anlagen einher. Neue Materialien wie Kupferdraht, Blechpakete, Isolationspapier, Magnete und Epoxidharze sowie deren Verarbeitung stellen insbesondere Produzenten vor neue Herausforderungen. Prozessübergreifende Wirkzusammenhänge wie auch produkt-prozessbedingte Wechselwirkungen sind Themen, die Produzenten derzeit umtreiben.

Die Batterie als eine wesentliche Kernkomponente wurde bereits früh als bedeutsames und vielleicht gar bedeutsamstes Gestaltungselement im Kontext der elektromobilen Wertschöpfung identifiziert. Die anhaltend hohe Entwicklungsgeschwindigkeit im Bereich der Batterieproduktion sorgt für stetig neue und sich ändernde Rahmenbedingungen, die direkten Einfluss auf die entsprechenden Produktionssysteme haben. Insbesondere aus Gründen der Komplexitätsreduktion wurden zu Beginn der flächendeckenden Fertigung von Traktionsbatterien vergleichsweise kleine Zellen produziert. Heute stellen Zellen mit Abmaßen von einem halben Meter und mehr keine Seltenheit dar, was zwangsläufig mit einem stellenweise neuen oder angepassten Prozessdesign einhergeht. Auch Optimierungsbestrebungen, den Anteil von Inaktiv-Material oder den Verschalt- und Peripherieaufwand zu reduzieren, führen zu neuen Batteriesystemkonzepten. „Cell-to-Pack“ oder „Cell-to-Chassis“ sind Konzepte, die aus produktionstechnischer Sicht teilweise zu grundlegend neuen Herausforderungen führen.

Eine der Hauptherausforderungen bei der Brennstoffzellenproduktion besteht in der für den automobilen Massenmarkt zwingend notwendigen Skalierbarkeit. Diese ist teilweise – aber nicht ausschließlich – in der Wechselwirkung von Angebots- und Nachfragesituation begründet. Produktionstechnische beziehungsweise prozessuale Herausforderungen liegen etwa im Handling von Bipolarplatten, werden teils aber auch durch lange Prozesszeiten hervorgerufen. Ein Beispiel dafür bildet der Einfahrprozess, der – je nach Design und Größe des Systems – bis zu sieben Stunden dauern kann. Derzeitige Bestre-

bungen, dem entgegenzuwirken, liegen etwa in der systematischen Auswertung vorgelagerter Prozessdaten, die frühzeitig Aufschluss über die Qualität und Funktionalität des Systems geben soll.

Literatur

Teil I: Einführung in die Elektromobilität

ADAC Kostenvergleich e-Fahrzeuge + Plug-In Hybride gegen Benzin und Diesel, 04/2021

Horváth & Partner GmbH: *Status quo der E-Mobilität in Deutschland. Faktencheck E-Mobilität Update 2020*, 2020

tagesschau: *Norweger kaufen mehr E-Autos als Verbrenner. Staatliche Förderung wirkt.* <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/norwegen-e-autos-101.html>. Abruf 13.08.2021

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Elektromobilität als Schlüsseltechnologie der Mobilitätswende

3

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns,
Janis Vienenkötter, Merlin Frank, Tobias Robben,
Domenic Klohs, Natalia Soldan Cattani, Nikolaus Lackner,
Nils Christen, Kim Kreisköther, Christoph Deutsdens,
Kai Kreisköther und Sarah Fluchs

Elektromobilität besitzt das Potenzial, den Verkehr vollständig CO₂-frei, abgasfrei und ressourceneffizient zu gestalten. Da der Verkehrssektor im Jahr 2019 nach der Energiewirtschaft und der Industrie noch für ein Fünftel der deutschen Treibhausgasemissionen verantwortlich war, ist schnelles Handeln unabdingbar.¹ Die Vorteile der Elektromobilität wurden nach einigem Zögern der Industrie und der Politik in den 2010er-Jahren nun gemeinhin erkannt. Die E-Mobilität ist längst keine Zukunftstechnologie mehr, sondern hat mittlerweile den Weg aus der Grundlagenforschung hinein in die Großserie gefunden. Ausgehend von der aktuellen Marktsituation erörtert das folgende Kapitel die Perspektiven und die aktuellen Bestrebungen der unterschiedlichen Akteure – Verbraucher, Politik, Automobilindustrie und Energiewirtschaft.

¹ Vgl. Bundesregierung 2022.

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

C. Offermanns

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: c.offermanns@pem.rwth-aachen.de

J. Vienenkötter (✉) · D. Klohs

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: j.vienenkoetter@pem.rwth-aachen.de; d.klohs@pem.rwth-aachen.de

3.1 Aktuelle Marktsituation

Lange Zeit war die Situation in der Automobilbranche äußerst unsicher: Kommt die Mobilitätswende – und wenn ja: wann? Doch nun befindet sich der Markt in einem disruptiven Wandel, weg von verbrennungsmotorischen Fahrzeugen hin zu alternativen Antriebsarten. In den vergangenen Jahren hat sich durch verschiedene Faktoren eine klare Linie innerhalb der Politik und der Automobilindustrie in Richtung batterieelektrischer Fahrzeuge (BEV) gebildet, sodass bis 2030 mindestens 15 Mio. elektrische Pkw auf den deutschen Straßen fahren sollen.²

Während im Jahr 2018 der Anteil von BEV gegenüber der Gesamtanzahl von Pkw-Neuzulassungen noch bei rund einem Prozent lag, konnte sich der Anteil im Jahr 2019 um 75 auf 1,75 % steigern. Die größten Zuwächse gab es jedoch 2020 und 2021. Im Jahr 2020 betrug die Neuzulassungsquote der BEV schon 6,65 %, was einem Zuwachs von knapp 400 % entspricht. 2021 (im Zeitraum Januar bis Oktober) verdoppelte sich die BEV-Neuzulassungsquote noch einmal knapp auf 12,17 %.³ Gleichzeitig ist zu beachten, dass der Fahrzeugmarkt insgesamt stagniert: So wurden 2019 in Deutschland noch rund

²Vgl. SPD, FDP, Die Grünen 2021, S. 27.

³Vgl. Kraftfahrbundesamt 2021.

M. Frank · T. Robben · N. S. Cattani · N. Lackner
Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: m.frank@pem.rwth-aachen.de; t.robben@pem.rwth-aachen.de; n.soldan@pem.rwth-aachen.de; n.lackner@pem.rwth-aachen.de

N. Christen
Business Development E-Mobility, STAWAG, Stadtwerke Aachen AG, Aachen, Deutschland
E-Mail: Nils.christen@stawag.de

K. Kreisköther
Specialist Battery Cell/System – Adhesives Automotive Components, Henkel,
Düsseldorf, Deutschland
E-Mail: kim.kreiskoether@henkel.com

C. Deuskens
CEO & Partner, PEM Motion GmbH, Aachen, Deutschland
E-Mail: c.deuskens@pem-motion.com

K. Kreisköther
Co-Founder & CEO, Ducktrain, Aachen, Deutschland
E-Mail: Kai.kreiskoether@ducktrain.io

S. Fluchs
Economist im Bereich Umwelt, Energie, Infrastruktur, Institut der deutschen Wirtschaft,
Köln, Deutschland
E-Mail: Fluchs@iwkoeln.de

3,61 Mio. Fahrzeuge abgesetzt, 2020 nur noch 2,92 Mio. und 2021 (von Januar bis Oktober) lediglich 2,2 Mio. Fahrzeuge.⁴ Insgesamt waren im Oktober 2021 rund 517.000 BEV in Deutschland zugelassen. Bei rund 48,2 Mio. Pkw in Deutschland entspricht das einem Anteil von rund einem Prozent.^{5,6}

In Europa ist der Verkauf batterieelektrischer Fahrzeuge und Plug-in-Hybride im Jahr 2019 im Vergleich zum Vorjahr in Europa um 44 % auf 600.000 Fahrzeuge gestiegen und weist damit weltweit das größte Wachstum auf. In China nahmen die E-Fahrzeug-Verkäufe (BEV und PHEV) nur um 3 % auf 1,2 Mio. zu. Im US-amerikanischen Markt sind die Neuzulassungen 2019 im Vergleich zum Vorjahr sogar um 12 % auf 300.000 Fahrzeuge gesunken. 2019 wurden insgesamt 2,3 Mio. E-Fahrzeuge (BEV und PHEV) und damit 9 % mehr als im Jahr 2018 verkauft. Damit lag der Anteil der Neuzulassungen von E-Fahrzeugen (BEV und PHEV) im Jahr 2019 weltweit bei 2,8 %.⁷

Für das Jahr 2030 wird in Deutschland eine Neuzulassungsquote von Elektrofahrzeugen (BEV und PHEV) von 75 bis 95 % prognostiziert. Dies entspricht kumuliert etwa einem Bestand von 17,7 Mio. beziehungsweise 22,4 Mio. Fahrzeugen auf deutschen Straßen im Jahr 2030.⁸ Abb. 3.1 zeigt die Entwicklung der kumulierten Fahrzeugzulassungen mit rein alternativen Antrieben. Dazu zählen nur Fahrzeuge, die ohne fossile Treibstoffe betrieben werden. In Abb. 3.1 sind drei verschiedene Szenarien dargestellt, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgestellt wurden. Sie beinhalten ein Szenario aus dem Jahr 2019 und zwei spätere Szenarien, die nach Schlüsselereignissen im Markt aufgestellt wurden. Dabei handelt es sich um die Veröffentlichung des neuen Klimaschutzprogramms

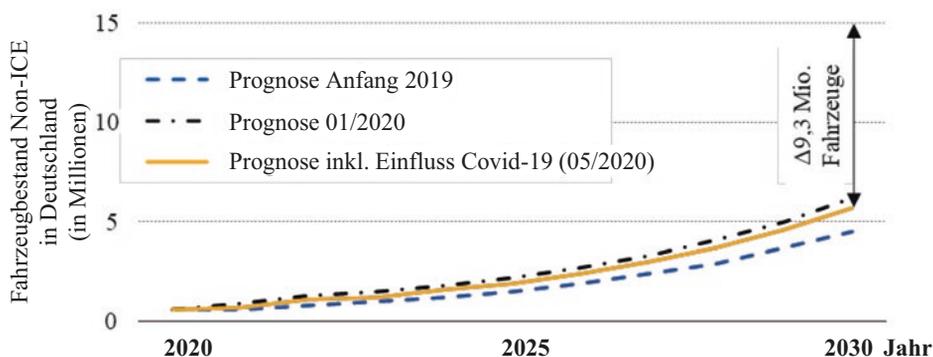


Abb. 3.1 Neuzulassungen von Non-ICE-Fahrzeugen in Deutschland bis 2030. (Vgl. Proff 2020)

⁴Vgl. Kraftfahrtbundesamt 2021.

⁵Vgl. Kraftfahrtbundesamt 2021.

⁶Vgl. Kraftfahrtbundesamt 2021.

⁷Vgl. McKinsey 2020.

⁸Vgl. Rudolph und Jochem 2021.

samt dessen Auswirkungen auf Bestimmungen im Verkehr sowie um die Corona-Pandemie. Der kumulierte Anteil der Fahrzeugzulassungen steigt im Szenario aus dem Jahr 2019 in Deutschland bis 2030 auf 5,7 Mio. Fahrzeuge. Einen erheblichen Einfluss auf die Prognose der Zulassungszahlen haben die Beschlüsse aus dem Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung und dem Autogipfel 2019. Im Zuge dessen wurde die Prognose in Abb. 3.1 von zunächst 4,5 Mio. Fahrzeugen auf 6,2 Mio. Fahrzeuge angehoben. Dies entspricht einem Marktanteil in Deutschland von 29 % beziehungsweise 38 % im Jahr 2030. Im Zuge der Corona-Pandemie und der damit einhergehenden wirtschaftlichen Einbußen wurde die Prognose für 2030 um 0,5 Mio. auf 5,7 Mio. Fahrzeuge gesenkt.⁹

Die Bundesregierung verfehlt damit scheinbar das im Jahr 2020 gesetzte Ziel von zehn Millionen Fahrzeugen mit alternativen Antrieben bis 2030 deutlich.¹⁰ Nach der Bundestagswahl im Jahr 2021 wurde das Ziel der zugelassenen Fahrzeuge mit vollelektrischem Antrieb auf mindestens 15 Mio. angehoben.¹¹ Gemäß aktuellen Prognosen wird das Ziel um etwa 9,3 Mio. Fahrzeuge verfehlt. Zu beachten ist jedoch der Einfluss künftig noch folgender Beschlüsse, die den Absatz von Elektrofahrzeugen weiter antreiben können.

Bis 2030 könnte der weltweite Anteil von BEV an der Neuzulassungsquote auf 14 % wachsen.¹² Ein optimistisches Szenario mit zunehmender Regulierung auch auf Städteebene, einem massiven Ausbau der Ladeinfrastruktur und einer höheren Kundenakzeptanz prognostiziert Neuzulassungsanteile von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb (BEV und PHEV) von 57 % für China, 51 % für Europa und 42 % für die USA.¹³

In China stagnierten die Pkw-Absatzzahlen seit mehreren Jahren: Wurden 2017 noch 24,72 Mio. Pkw neu zugelassen, sank die Anzahl der Neuzulassungen 2020 auf 20,18 Mio. Pkw. In der ersten Jahreshälfte 2021 jedoch wurden in China 11,56 Mio. Fahrzeuge zugelassen.¹⁴ Damit zeigt sich ein Ausbruch aus der Abwärtstendenz hin zu einem Aufwärtstrend der Absatzzahlen im chinesischen Markt: Noch nie wurden so viele Pkw in den ersten beiden Monaten eines Jahres zugelassen wie 2021.¹⁵

Die fokussierte Ausrichtung auf die Elektromobilität spiegelt sich auch in der langfristigen Strategie zahlreicher globaler Automobilhersteller wider, von denen bereits viele ihren „Ausstieg aus dem Verbrennungsmotor“ angekündigt haben. Abb. 3.2 liefert einen Überblick zum Ausstiegsdatum unterschiedlicher Automobilhersteller und zu deren Marktanteilen im Jahr 2020. Es wird deutlich, dass vor allem in den 2030er-Jahren zahlreiche Automobilhersteller dem Verbrennungsmotor ein Ende setzen. Ausgangs der 2030er-Jahre werden Automobilhersteller mit einem kumulierten Marktanteil von rund

⁹Vgl. Proff 2020.

¹⁰Vgl. Bundesregierung Deutschland 2021.

¹¹Vgl. SPD, FDP, Die Grünen 2021, S. 27.

¹²Vgl. Wilker 2017.

¹³Vgl. McKinsey 2019.

¹⁴Vgl. Kords 2021.

¹⁵Vgl. manager magazin 2021.

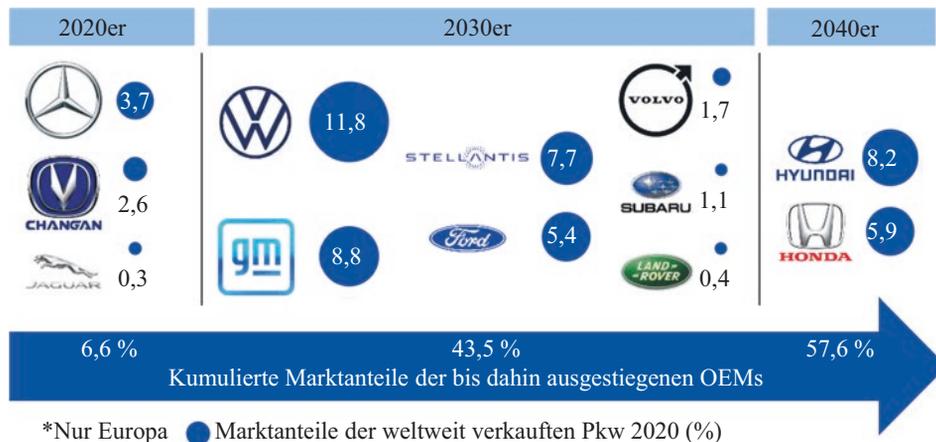


Abb. 3.2 Zeitpunkt des Ausstiegs aus dem Verkauf von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. (Vgl. Köllner 2021b)

43,5 % voraussichtlich keine Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor mehr produzieren. Bis 2040 steigt der Anteil auf etwa 57,6 %.^{16,17}

Ab 2025 wird die Produktion von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren bei Jaguar eingestellt, Ford und Volvo folgen ab 2030. Volkswagen und GM haben angekündigt, bis 2035 auszusteigen. Ab 2040 beenden auch Hyundai und Honda ihre Produktion von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Bis auf wenige Ausnahmen konzentrieren sich sämtliche Hersteller auf die Entwicklung batterieelektrischer Fahrzeuge und streben den „Ausstieg aus dem Verbrennungsmotor“ an. Eine Ausnahme bildet Porsche: Das Unternehmen forscht neben reinen Elektrofahrzeugen vermehrt auch an synthetischen Kraftstoffen.¹⁸

Der „Ausstieg aus dem Verbrennungsmotor“ stellt insbesondere Zulieferer vor Herausforderungen, die derzeit Kernkomponenten wie Motorblöcke, Zylinderköpfe oder Einspritzanlagen produzieren. Diese Unternehmen geraten durch künftig sinkende Absatzzahlen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor zunehmend unter Druck, neue Wertschöpfungspotenziale zu finden. Für Produzenten von Komponenten wie etwa Getrieben, Bremsen und Tanks ergibt sich durch die veränderte Antriebstopologie Handlungsbedarf, um sich auf die neuen Anforderungen des elektrischen Antriebsstrangs umzustellen. Große Chancen bieten sich für Hersteller von Batterien, Elektromotoren, Leistungselektronik und Thermomanagementsystemen, die vom stark wachsenden Markt profitieren.¹⁹

¹⁶Vgl. Kords 2021.

¹⁷Vgl. AUTOHAUS Spezial 2021.

¹⁸Vgl. Köllner 2021.

¹⁹Vgl. Strathmann 2019.

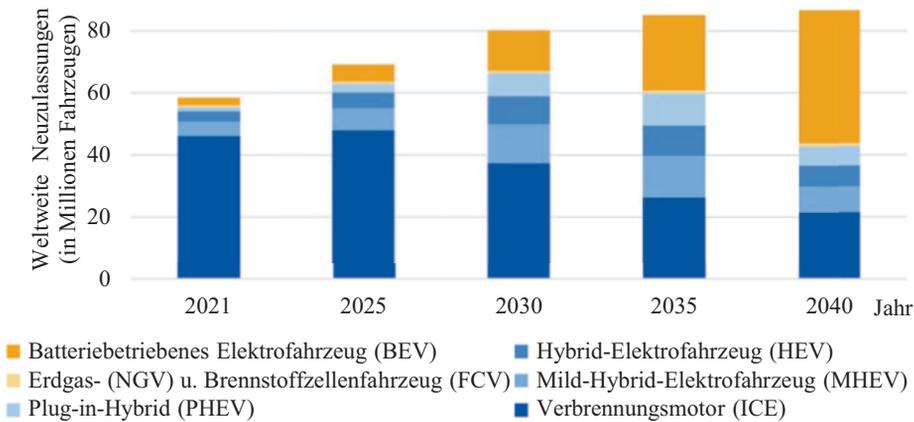


Abb. 3.3 Prognostizierter Pkw-Absatz weltweit nach Antriebsart von 2021 bis 2040. (Vgl. Harrison 2021)

In den vergangenen Jahren hat sich der OEM Tesla von einem Nischenanbieter unter den Autobauern zum größten Hoffnungsträger der Elektrofahrzeugindustrie am Markt entwickelt. Konnte Tesla im Jahr 2017 lediglich 103.000 BEV absetzen, waren es 2020 rund 500.000. Auch im Jahr 2021 steigerte das Unternehmen seinen Absatz deutlich: In den ersten drei Quartalen wurden insgesamt bereits 624.000 BEV der Marke Tesla zugelassen.²⁰ Die hohen Absatzsteigerungen sind vor allem auf die Markteinführung des „Model 3“ als das günstigste Fahrzeug der Marke zurückzuführen.²¹ Im Jahr 2020 war das Tesla-Modell das am dritthäufigsten verkaufte Elektroauto in Deutschland. Den ersten Platz belegte der Renault Zoe gefolgt vom VW Golf.²²

Die Prognose der Entwicklung der Neuzulassungszahlen nach Antriebsart ist in Abb. 3.3 dargestellt. Zunächst wird deutlich, dass der weltweite Pkw-Absatz bis ins Jahr 2040 stetig steigt, der Markt sich jedoch zunehmend in die Sättigung bewegt. Im Jahr 2040 werden voraussichtlich rund 87 Mio. Pkw zugelassen. Das entspricht einer Steigerung von 48 % im Vergleich mit den für das Jahr 2021 prognostizierten Absatzzahlen, in dem rund 58 Mio. Fahrzeuge zugelassen wurden.²³

Im Jahr 2025 wird voraussichtlich der Höchststand der Neuzulassungen von reinen Verbrennungsfahrzeugen erreicht und in absoluten Zahlen anschließend bis 2040 kontinuierlich sinken. Bis 2035 wachsen die Zulassungszahlen von Hybridfahrzeugen stetig an, verlieren jedoch nach 2035 zugunsten der reinen Elektrofahrzeuge an Bedeutung. Als do-

²⁰ Vgl. elektroauto-News 2021.

²¹ Vgl. Kords 2021.

²² Vgl. Kraftfahrtbundesamt 2021.

²³ Vgl. Harrison 2021.

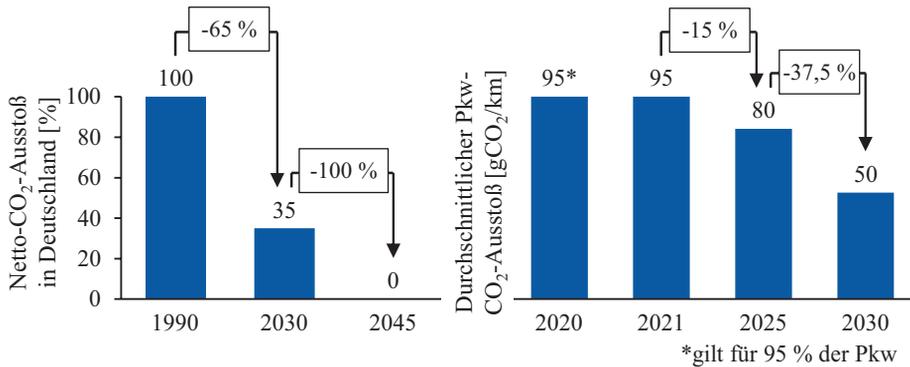


Abb. 3.4 Reduktion des CO₂-Ausstoßes bis 2045 in Deutschland (links: gesamt; rechts: Verkehr). (Vgl. Bundesministerium für Umwelt 2019; vgl. Bundesministerium für Umwelt 2020; vgl. Bundesregierung Deutschland 2021)

minierende Antriebsart wird sich langfristig der rein batteriebetriebene Pkw durchsetzen und einen Anteil von 50 % der Neuzulassungen bis 2040 haben.²⁴

Die deutsche Bundesregierung hat das im Klimaschutzplan 2050 anvisierte Ziel verschärft, bis 2030 insgesamt 55 % und bis 2050 zwischen 80 und 95 % weniger Treibhausgase gegenüber dem Referenzjahr 1990 auszustoßen. So sieht das Klimaschutzgesetz 2021 jetzt vor, bis 2030 die Treibhausgasemissionen um 65 % gegenüber dem Referenzjahr 1990 zu reduzieren und bis 2045 klimaneutral zu werden – dargestellt in Abb. 3.4.^{25,26} Dieses Ziel ist nur erreichbar, wenn neben dem Ausbau erneuerbarer Energie und der Umsetzung weiterer Maßnahmen zur Reduktion umweltschädlicher Emissionen auch eine weitestgehend CO₂-freie Mobilität ermöglicht wird. Für den Automobilsektor wurde eine Reduktion der Treibhausgase von zunächst 42 % bis 2030 beschlossen. Abb. 3.4 liefert einen Überblick zum konkreten CO₂-Ausstoß von Pkw in Deutschland. Zunächst bedeutet dies Grenzwerte von 95 gCO₂/km in 95 % der Fahrzeugflotte im Jahr 2020. Von 2021 bis 2024 gilt der Grenzwert von 95 gCO₂/km für die gesamte Fahrzeugflotte. Ab dem Jahr 2025 soll der CO₂-Ausstoß um 15 % und ab dem Jahr 2030 um 37,5 % verringert werden.²⁷ Diese Flottengrenzwerte sind technisch bedingt von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor nicht mehr einzuhalten. Die Notwendigkeit für treibhausgasneutrale Antriebe forciert die Entwicklung der Elektrifizierung und die Suche nach realistischen Lösungen für alternative Kraftstoffe.²⁸

²⁴ Vgl. Harrison 2021.

²⁵ Vgl. Bundesministerium für Umwelt 2019.

²⁶ Vgl. Bundesregierung Deutschland 2021.

²⁷ Vgl. Bundesministerium für Umwelt 2020.

²⁸ Vgl. Maus 2019.

3.2 Verbraucherperspektive

Nutzende stellen zahlreiche Anforderungen an ein Fahrzeug, das selbst wiederum eine zentrale Rolle für die individuelle Mobilität in Deutschland spielt. In einer Befragung von „PricewaterhouseCoopers“ gaben bundesweit 31 % der Teilnehmenden an, das eigene Auto in Zukunft häufiger für den Arbeitsweg nutzen zu wollen. Außerdem stieg der Motorisierungsgrad in Deutschland über die vergangenen Jahre hinweg stetig an und erreichte laut Umweltbundesamt Ende 2019 einen Wert von 574 Pkw pro 1000 Einwohner.²⁹ Laut einer Studie von Deloitte bevorzugen 49 % der Deutschen beim nächsten Autokauf ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, 31 % ein hybridelektrisches und 9 % ein vollelektrisches Auto.³⁰ Dieses Ergebnis offenbart, dass bei zahlreichen Verbrauchern noch Zweifel und somit generelle Hindernisse auf dem Weg zur Elektromobilität bestehen.

Die größte Hürde beim Kauf eines Elektroautos in der Bundesrepublik bilden einer Befragung des TÜV-Verbands zufolge zu hohe Anschaffungskosten.³¹ Deloitte führt außerdem an, dass in Deutschland 43 % und in den USA 34 % der Menschen nicht dazu bereit sind, mehr in ein Elektroauto zu investieren als in ein vergleichbares Fahrzeug mit Verbrennungsmotor.³² Fallende Preise für Batterien und die Entwicklung optimierter Plattformen werden laut einer Studie von „BloombergNEF“ allerdings dazu führen, dass Elektroautos zwischen 2025 und 2027 in Europa Preisparität mit Verbrennungsmotor-Autos in allen Leichtfahrzeugsegmenten erreichen werden.³³

Das zweitgrößte Hindernis beim Elektroautokauf stellt dem TÜV-Verband zufolge indes die zu geringe Reichweite von Elektrofahrzeugen dar.³⁴ Deloitte ermittelte zudem, dass 34 % der Deutschen und 19 % der US-Amerikaner von einem Elektroauto mindestens 300 Meilen (rund 483 km) und weitere 34 % der Deutschen beziehungsweise 22 % der US-Amerikaner sogar mindestens 400 Meilen (etwa 644 km) Reichweite erwarten.³⁵ Diese Ansprüche der Verbraucher decken sich allerdings nicht mit den tatsächlich benötigten Fahrleistungen. So geben 77 % der Autofahrer in Deutschland ihre durchschnittliche tägliche Fahrleistung mit maximal 49 Kilometern und weitere 15 % mit 50 bis 99 Kilometern an.³⁶

Zahlreiche Verbraucher entscheiden sich laut TÜV-Verband auch wegen der aktuellen Ladeinfrastruktur und der Dauer des Ladevorgangs gegen die Anschaffung eines Elektrofahrzeugs.³⁷ Eine Umfrage des ADAC e. V. mit generell an Elektroautos interessierten

²⁹ Vgl. Krings et al. 2020.

³⁰ Vgl. Vitale et al. 2020.

³¹ Vgl. Verband der TÜV e. V. 2020.

³² Vgl. Vitale et al. 2020.

³³ Vgl. Soulopoulos et al. 2021.

³⁴ Vgl. Verband der TÜV e. V. 2020.

³⁵ Vgl. Vitale et al. 2020.

³⁶ Vgl. Umweltbundesamt 2021.

³⁷ Vgl. Verband der TÜV e. V. 2020.

Verbraucherinnen und Verbrauchern ergab, dass sich 38 % der Teilnehmenden eine Ladedauer an der Autobahn von weniger als 30 min und weitere 30 % sogar von nur 15 min wünschen. An privaten Ladepunkten werden indes allerdings deutlich längere Zeiten akzeptiert. Entsprechende Ladepunkte wünschen sich die Befragten vor allem an privaten Stellplätzen und im öffentlichen Raum, aber auch am Arbeitsplatz, an der Autobahn und an Supermärkten.³⁸

Die Erwartungen der Nutzenden betreffen insgesamt hauptsächlich den Preis und die Reichweite sowie die Ladedauer und -infrastruktur. Darüber hinaus spielen aber auch Bedenken zur Umweltfreundlichkeit des Elektroautos eine Rolle. Besonders in der Auto-Nation Deutschland wird die Elektromobilität häufig eher emotional als rational diskutiert – mit der Folge, dass die Nachteile überhöht dargestellt werden. Bestimmte Erwartungen erzeugen Herausforderungen auf technischer Seite, allerdings müssen Nutzende auch über die Diskrepanz zwischen Anspruch und Realität – bestes Beispiel: die Reichweite von Elektroautos – aufgeklärt werden. Technologische Entwicklungstrends lassen unterdessen erahnen, dass diese Diskrepanzen in den nächsten zehn Jahren ohnehin überwunden werden können.

3.3 Politische Perspektive

Basierend auf der Erkenntnis, dass der Klimawandel eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts ist,³⁹ einigten sich in der Pariser UN-Klimakonferenz im Dezember 2015 insgesamt 197 Staaten auf ein globales Klimaschutzabkommen. Die Vereinbarung trat am 4. November 2016 mit dem Ziel in Kraft, die Erderwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter unter zwei Grad Celsius zu begrenzen.⁴⁰ Dieses „Klima-Regime“ bildet die Handlungsgrundlage für politische Entscheidungen im Themenfeld der Elektromobilität. Eine thematische Übersicht zu diesem Kapitel bietet Abb. 3.5.

3.3.1 Politische Anreize zur Etablierung Deutschlands als Leitmarkt für Elektromobilität

In dem im Jahr 2019 beschlossenen „Klimaschutzprogramm 2030“ definiert die Bundesregierung konkrete Maßnahmen, um die nationalen Klimaziele zu erreichen. Dazu gehört die CO₂-Bepreisung unterschiedlicher Sektoren sowie die Förderung der Elektromobilität.⁴¹ Vor diesem Hintergrund wurde der erstmals 2016 in Kraft getretene Umweltbonus für den Kauf von Elektroautos bis 2025 verlängert und durch eine „Innovationsprämie“

³⁸ Vgl. Hecht und Laberer 2021.

³⁹ Vgl. Auswärtiges Amt 2021.

⁴⁰ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2021.

⁴¹ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2019, S. 76ff.



Abb. 3.5 Übersicht kapitelspezifischer Themenstellungen (Auszug)

erweitert. Dadurch steigen die Fördersätze für neue BEV, die nach dem 8. Juli 2020 erworben werden, von 4000 € auf maximal 9000 €. Für PHEV erhöhen sich die Fördersätze von 3000 € auf 6750 €. ⁴²

Mit dem im November 2019 veröffentlichten „Masterplan Ladesäuleninfrastruktur“ fokussiert sich die Bundesregierung auf den Ausbau elektrischer Lademöglichkeiten. Inhaltlich umfasst dieser Jahresplan das Ziel, bis zum Jahr 2030 eine flächendeckende und nutzerfreundliche Ladeinfrastruktur für bis zu zehn Millionen E-Fahrzeuge aufzubauen. Dies entspricht etwa einer Million öffentlicher Ladestationen. ⁴³ Da die meisten Ladevorgänge jedoch zu Hause oder am Arbeitsplatz stattfinden, wird der Ausbau privater und gewerblicher Ladeinfrastruktur ebenfalls subventioniert. Die Bezuschussung für den Kauf und die Installation privater Ladeboxen am Wohngebäude beträgt pauschal 900 €. Der initiale Fördertopf von 200 Mio. € wurde aufgrund der hohen Nachfrage mehrfach aufgestockt. ⁴⁴ Zusätzlich wurden zum 1. Dezember 2020 die Vorschriften im Mietrecht und im Wohneigentumsgesetz (WEG) zur Errichtung von Ladeinfrastruktur geändert. Künftig sind Vermieter dazu verpflichtet, die Installation von Ladeinfrastruktur durch den Mieter zu dulden. ⁴⁵

Die bereits erwähnten Maßnahmen unterstreichen das Bestreben der Bundesregierung, den Verkehr zu elektrifizieren. Während einerseits monetäre Förderungen den Kauf von Elektrofahrzeugen wirtschaftlich attraktiver machen, werden andererseits Pkw mit konventionellen Antrieben durch die seit Januar 2021 für den Verkehrssektor geltende

⁴² Vgl. Bundesregierung 2021.

⁴³ Vgl. Bundesregierung 2019.

⁴⁴ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2019, S. 78.

⁴⁵ Vgl. Deutscher Bundestag 2020.

CO₂-Bepreisung im Unterhalt teurer. Grundsätzlich gilt die CO₂-Bepreisung für alle Kraftstoffe, die bei der Verbrennung CO₂ freisetzen. Der jeweilige Preis pro Tonne CO₂ wird politisch festgelegt.⁴⁶

Gleichzeitig wird seit Januar 2021 auch die Kfz-Steuer maßgeblich anhand der CO₂-Emissionen ausgerichtet. Dazu werden die CO₂-Emissionen pro Kilometer als Bemessungsgrundlage der Kfz-Steuer für Neuzulassungen herangezogen und ab einem Grenzwert von 95 gCO₂/km stufenweise erhöht.⁴⁷ Als Konsequenz werden Pkw mit fossilen Brennstoffen zunehmend teurer und letztlich unattraktiver für den Nutzenden. Im unmittelbaren Vergleich steigt die Rentabilität von Elektrofahrzeugen.

Wie dargestellt, werden diverse Fördermaßnahmen genutzt, um die Energie- und Mobilitätswende in Deutschland zu beschleunigen. Ein solches Vorantreiben ist deswegen wichtig, weil das 2020 beschlossene Klimaschutzgesetz der Bundesregierung aus Sicht des Bundesverfassungsgerichts zu kurzfristig und ungenau ausformuliert ist. Das Urteil vom 29. April 2021 verpflichtet den Gesetzgeber, bis zum Ende des Jahres 2022 die Reduktionsziele für Treibhausgasemissionen für die Zeit nach 2030 genauer zu regeln.⁴⁸

Als Reaktion legte die Bundesregierung am 12. Mai 2021 einen Entwurf für die Novelle des Klimaschutzgesetzes vor. Es sieht die Verschärfung und Konkretisierung der Klimashutzvorgaben bis zum Jahr 2030 vor. Der Kerninhalt der Gesetzesänderung umfasst eine Verminderung der deutschen Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 65 % gegenüber dem Jahr 1990 (10 % höher als das vorherige Klimashutzziel). Analog gilt ein neues Minderungsziel von 88 % für das Jahr 2040 sowie Klimaneutralität bis 2045. Dies hat direkte Auswirkungen auf die CO₂-Minderungsziele in den jeweiligen Sektoren der Energiewirtschaft, im Verkehrs- und im Gebäudebereich.⁴⁹ Um die Minderungsziele in den einzelnen Sektoren erreichen zu können, bereitet die Bundesregierung ein Sofortprogramm mit einem Fördervolumen von acht Milliarden Euro vor, das schwerpunktmäßig in den Feldern „Industrie“, „klimafreundliche Mobilität“ und „Landwirtschaft“ sowie im Gebäudebereich zur Verfügung stehen soll.⁵⁰

3.3.2 Politische Anreize zur Etablierung Deutschlands als Leitanbieter für Elektromobilität

Zwischen 2009 und 2020 hat die Bundesregierung insgesamt drei Milliarden Euro für die Forschung und Entwicklung der Elektromobilität zur Verfügung gestellt.⁵¹ Auch in Zukunft wird die Regierung Forschung und Innovation im Bereich der E-Mobilität durch Förderungen ermöglichen. Daher wurde im März 2021 in Zusammenarbeit zwischen Bun-

⁴⁶ Vgl. Bundesregierung 2021.

⁴⁷ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2019, S. 77.

⁴⁸ Vgl. Bundesverfassungsgericht 2021.

⁴⁹ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2021.

⁵⁰ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2021.

⁵¹ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2021.

deswirtschaftsministerium und Bundesumweltministerium beschlossen, dass weitere 400 Mio. € bis 2025 im Rahmen verschiedener Ausschreibungen im Bereich der Forschung und Entwicklung zur Elektromobilität freigesetzt werden.⁵² Förderfähig sind demnach vor allem Schwerpunkte im Bereich der Digitalisierung, Komponenten smarter Fahrzeugplattformen sowie systemübergreifende Innovationen. Gleichzeitig gibt es diverse weitere Förderprogramme, die künftig den Forschungs- und Entwicklungsprozess der Elektromobilität begünstigen. Aus der Vielzahl von Förderprogrammen werden im Folgenden „KoPa 35c“, „Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batterie zelle FFB“ und „IPCEI Batterie“ exemplarisch vorgestellt.

Mit der bevorstehenden Mobilitätswende erlebt die Automobilbranche einen umfangreichen Strukturwandel, der Herausforderungen in verschiedenen Bereichen entstehen lässt. Digitalisierung, neue Geschäftsmodelle und innovative Antriebsmöglichkeiten führen Fahrzeughersteller und Zulieferer in die Transformation. Das Konjunkturpaket „KoPa 35c“ fokussiert diese Problematik und begünstigt den Transformationsprozess deutscher Fahrzeughersteller sowie die Zuliefererindustrie. Das Förderpaket umfasst insgesamt 1,5 Mrd. € und verteilt sich auf drei Module:

- Modul A: *Modernisierung der Produktion als Schub für Produktivität und Resilienz*
- Modul B: *Neue, innovative Produkte als Schlüssel für Fahrzeuge und Mobilität der Zukunft*
- Modul C: *Gemeinsame Lösungen finden, regionale Innovationscluster aufbauen*⁵³

Insgesamt verfolgt das heutige Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz mit „KoPa 35c“ das Ziel, die Wettbewerbsfähigkeit der Automobilbranche über den Transformationsprozess hinweg nachhaltig zu stärken.⁵⁴

Ein weiterer Teil der politischen Förderlandschaft beschäftigt sich mit der Produktion des Herzstücks eines Elektroautos – mit der Batterie beziehungsweise der Batteriezelle. Im Rahmen des Forschungsprogramms „Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batterie zelle FFB“ in Münster werden Rahmenbedingungen für den Aufbau einer Batteriezellproduktion in Deutschland aufgezeigt und entwickelt.⁵⁵ Im Detail handelt es sich um die Produktion moderner, hochleistungsfähiger Speicher, die sowohl in der Elektromobilität als auch in der Industrie, der Logistik, der Energiewirtschaft und der Robotik sowie im Maschinen- und Anlagenbau Anwendung finden. Dazu stellt die Landesregierung NRW bis zu 200 Mio. € zur Verfügung. Für Anlagen und den Betrieb in der Aufbauphase werden vom Bund weitere 500 Mio. € mobilisiert. Zu den Projekt- und Kooperationspartnern gehört die Fraunhofer-Gesellschaft als wissenschaftliche Betreiberin des Projekts, das Batterieforschungszentrum „Münster Electrochemical Energy Technology“ (MEET)

⁵²Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2021.

⁵³Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020.

⁵⁴Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020.

⁵⁵Vgl. Landesregierung Nordrhein-Westfalen 2020.

unter Leitung des international renommierten Batterieforschers Professor Martin Winter, das Helmholtz-Institut Münster sowie der Lehrstuhl „Production Engineering of E-Mobility Components“ (PEM) der RWTH Aachen University unter Leitung von Professor Achim Kampker.⁵⁶

Um den Aufbau der Batteriezellfertigung in Europa weiter auf- und auszubauen, arbeitet Deutschland eng mit zwölf weiteren europäischen Mitgliedstaaten zusammen. Zwei „Important Projects of Common European Interest“ (IPCEI) fördern Batterie-Innovationen und -Investitionen. Begünstigt werden verschiedene Projekte entlang der gesamten Batterie-Wertschöpfungskette: von der Rohstoffgewinnung über die Batteriezellfertigung und -integration bis hin zur Zweitnutzung („Second-Life“-Anwendungen) und zum Batterie-Recycling. Im ersten Förderrahmen („IPCEI on Batteries“) wurden im Dezember 2019 von der EU-Kommission bereits 3,2 Mrd. € genehmigt, wovon 17 Unternehmen und Forschungseinrichtungen aus sieben Ländern profitieren. Die zweite Förderrunde („IPCEI on European Battery Innovation“ – EuBatIn) wurde im Januar 2021 genehmigt. Insgesamt sind dazu 46 Projekte entlang der Batterie-Wertschöpfungskette geplant, woran sich 46 Unternehmen und Forschungseinrichtungen aus zwölf EU-Staaten beteiligen. Die Koordination für das zweite europäische Gesamtvorhaben übernimmt das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Auf Basis der beiden im Rahmen der IPCEI geförderten Innovationen ist der Produktionsbeginn für Batteriezellen in Deutschland für 2022 geplant.⁵⁷

3.3.3 Internationale politische Rahmenbedingungen für die Elektromobilität

Auch auf internationaler Ebene besteht die Motivation, Initiative zu ergreifen und klimaschonende Maßnahmen umzusetzen. Ein bedeutender Schritt in eine nachhaltige Zukunft geht der „European Green Deal“: Seine Kernidee ist eine Wachstumsstrategie, mit der die EU zu einer fairen Gesellschaft mit moderner, ressourceneffizienter und wettbewerbsfähiger Wirtschaft heranreift.⁵⁸ Im Kontext der Elektromobilität betrachtet die Europäische Kommission nachhaltige Batterien als Schlüssel für die Ziele des europäischen „Green Deal“ und das darin genannte Nullverschmutzungsziel bis 2050.⁵⁹ Daher schlug die Europäische Kommission am 10. Dezember 2020 die Überarbeitung und Modernisierung der aktuellen EU-Gesetzgebung zu Batterien aus dem Jahr 2006 vor. Die Modernisierung des Rechtsrahmens schlägt verbindliche Anforderungen für alle Batterien vor – also Industrie-, Starter-, Traktions- und Gerätebatterien –, die in der EU in Verkehr gebracht werden. Zu diesen Anforderungen zählen die Verwendung verantwortungsvoll beschaffter Materi-

⁵⁶ Vgl. Landesregierung Nordrhein-Westfalen 2020.

⁵⁷ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2021.

⁵⁸ Vgl. Europäische Kommission 2019, S. 2.

⁵⁹ Vgl. Europäische Kommission 2019, S. 10.

alien mit begrenztem Einsatz gefährlicher Stoffe, ein Mindestgehalt recycelten Materials, die Kennzeichnung und Erfüllung der Sammel- und Recycling-Vorgaben sowie ein kleiner CO₂-Fußabdruck. Im Detail dürfen ab Juli 2024 ausschließlich wiederaufladbare Industrie- und Traktionsbatterien auf den Markt gebracht werden, für die eine detaillierte CO₂-Bilanz erstellt wurde. Außerdem ist für das Jahr 2027 eine Richtlinie geplant, die den Anteil recyclebarer Rohstoffe in Batterien offenlegt, gefolgt von Anforderungen, ab 2030 einen Mindestanteil recycelten Kobalts (12 %), Lithiums (4 %), Nickels (4 %) und Bleis (85 %) in Batterien zu verwenden. Dies stellt sicher, dass Rohstoffe aus Industrie-, Automobil- oder Elektrofahrzeugbatterien nach ihrer Nutzungsdauer für die europäische Wirtschaft erhalten bleiben.⁶⁰ Die Bedeutung und das Potenzial des Recyclings als Teil der Wertschöpfungskette eines Elektrofahrzeugs wird in Abschn. 33.2 näher beschrieben.

Neben den Bemühungen, Recycling-Prozesse in den Wertschöpfungskreislauf der Batterie zu integrieren, adressiert die Kommission weitere „End-of-Life“-Nutzungsmöglichkeiten. Dazu schafft der Verordnungsvorschlag einen Rahmen, die Wiederverwendung von Batterien aus Elektrofahrzeugen zu erleichtern, etwa als stationäre Energiespeicher oder durch die Integration in Stromnetze als Energieressourcen. Gleichzeitig forciert die Kommission den Einsatz neuer IT-Technologien und insbesondere des Batteriepasses, um den sicheren Datenaustausch, eine größere Transparenz des Batteriemarktes und die Rückverfolgbarkeit von Großbatterien zu fördern.⁶¹

Bei der Ankündigung des „European Green Deal“ schloss die Europäische Kommission zunächst eine entscheidende Frage aus: Wann würde der Verkauf von Verbrennerfahrzeugen zeitlich limitiert werden? Im Jahr 2021 haben einige Länder der Europäischen Union die EU-Kommission um das Festlegen eines Ausstiegsdatums für die Veräußerung von Benzin- und Dieselfahrzeugen gebeten, da ein offizielles EU-Ausstiegsdatum bis dato nicht bekannt ist.⁶² Dennoch gibt es europäische Regierungen, die inzwischen entsprechende nationale Zeitpläne festgelegt haben. So verpflichteten sich Dänemark, Island, Irland, Slowenien und Schweden, die Neuzulassung von Verbrennern bis zum Jahr 2030 einzustellen. Auf die strengsten Zeitpläne verständigten sich Norwegen und die Niederlande. Neuzugelassene Busse etwa müssen ab 2025 in den Niederlanden lokal emissionsfrei sein. Gleiches gilt für Personenfahrzeuge ab dem Jahr 2030. Im Umkehrschluss werden dort künftig ausschließlich batterie- oder wasserstoffelektrische Fahrzeuge zugelassen.⁶³ Vergleichbare Ambitionen wie die Niederlande verfolgt auch die norwegische Regierung: Die Skandinavier streben an, ab 2025 lediglich lokal emissionsfreie Pkw, Stadtbusse und leichte Nutzfahrzeuge zuzulassen.⁶⁴ Dabei ist zu beachten, dass Gebrauchtwagen, die erneut zugelassen werden, Bestandsschutz besitzen.⁶⁵

⁶⁰ Vgl. European Automobile Clubs 2021.

⁶¹ Vgl. Europäische Kommission 2020.

⁶² Vgl. Europäische Mitgliedstaaten 2021.

⁶³ Vgl. Niederländische Regierung 2017.

⁶⁴ Vgl. Ola Elvestuen 2018.

⁶⁵ Vgl. Wappelhorst und Cui 2020.

Auf der anderen Seite des Atlantiks lassen sich ähnliche Ambitionen beobachten. In den USA verpflichteten sich zu Beginn des Jahres 2021 insgesamt zehn US-Bundesstaaten dazu, ab 2050 ausschließlich lokal emissionsfreie Pkw zuzulassen. Spitzenreiter ist dabei Kalifornien. Dort sollen Verbrenner ab 2035 nicht mehr zulassungsfähig sein. Plante China 2020 noch das Jahr 2060 als Ausstiegsdatum, wären Kaliforniens Straßen bereits 25 Jahre früher weitestgehend lokal emissionsfrei.⁶⁶ Einschränkungen wie Fahrverbote für Verbrenner sind jedoch sowohl in China als auch in den USA bislang nicht geplant.

Um den Wechsel vom Verbrennungsmotor hin zu lokal emissionsfreien Fahrzeugen zu begünstigen, werden international diverse Fördermaßnahmen beschlossen. Dazu gehören Kaufprämien, Steuersubventionen oder Bevorteilungen für Elektroautos in der Stadt. Derartige Regelungen machen sich in Form von kostenlosen Parkplätzen oder als Erlaubnis bemerkbar, mit einem E-Kennzeichen auf entsprechend markierten Busspuren fahren zu dürfen. Im europäischen Vergleich sind jedoch Kaufprämien die am weitesten verbreiteten Fördermaßnahmen. Spitzenreiter hinsichtlich Prämienhöhe sind neben Deutschland die Länder Rumänien mit 10.000 € (BEV) beziehungsweise 4250 € (PHEV), Kroatien, Polen und die Slowakei. Außerdem sind Steuersubventionen in Europa sehr beliebt: Mit Stand von Mai 2021 bieten insgesamt 22 von 27 europäische Mitgliedstaaten beim Kauf eines Elektrofahrzeugs länderspezifische Steuervorteile an.⁶⁷

Unabhängig von den länderspezifischen Ambitionen gibt es international politische Maßnahmen, welche die Attraktivität des Verbrenners indirekt reduzieren. Dazu gehören Umweltzonen beziehungsweise Dieselfahrverbote sowie die geplante Abgasnorm Euro 7, die im Jahr 2025 eingeführt werden soll.⁶⁸ Mit dieser neuen Norm werden die zulässigen Abgasemissionen zunehmend eingeschränkt. Es ist absehbar, dass in der Folge das Pkw-Angebot auf Basis fossiler Brennstoffe sinkt und damit der „Ausstieg aus dem Verbrennungsmotor“ zusätzlich forciert wird. Die genannten Ambitionen der europäischen Länder sind in Abb. 3.6 zusammengefasst.

Die von der Bundesregierung und weiteren europäischen Staaten initiierten Anreize und Förderungen wirken. Mit einer Wachstumsrate von 134 % gegenüber dem Vorjahr erreichte Europa 2020 eine Zulassungszahl von 1,37 Mio. elektrischer Fahrzeuge. Dies entspricht rund 40 % der weltweiten Neuzulassungen elektrischer Pkw. Damit überholt Europa die zwei großen Märkte China (1,25 Mio. E-Auto-Neuzulassungen im Jahr 2020) sowie die USA (320.000 Elektrofahrzeug-Neuzulassungen 2020), auf die im Folgenden eingegangen wird.⁶⁹

US-Präsident Joe Biden reagierte auf die unter seinem Amtsvorgänger nur mäßig erfolgten E-Auto-Neuzulassungen, indem er im April 2021 einen Investitionsplan von 174 Mrd. US\$ für die US-Mobilitätswende vorstellte, der unter anderem Kaufprämien für

⁶⁶Vgl. California Environmental Protection Agency 2019.

⁶⁷Vgl. European Automobile Manufacturers Association 2020.

⁶⁸Vgl. Europäische Kommission 2020.

⁶⁹Vgl. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) 2021.

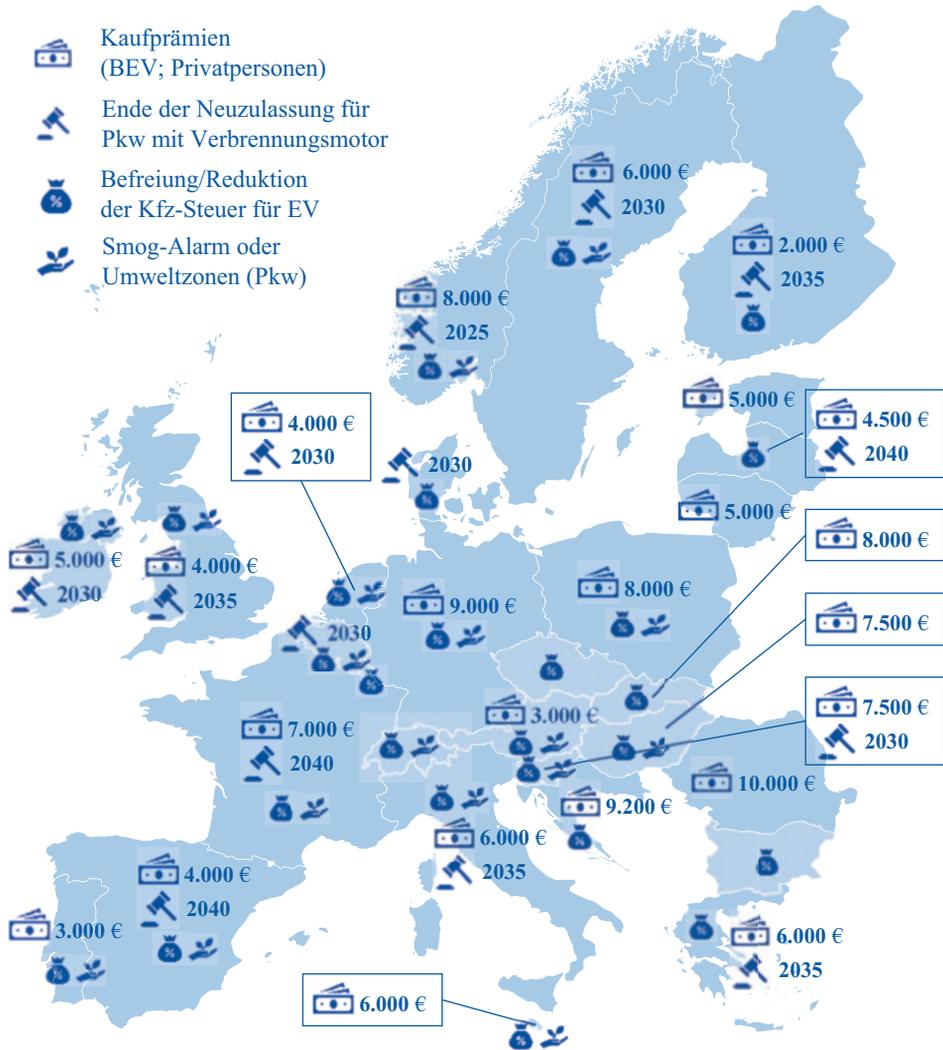


Abb. 3.6 Länderspezifische Ambitionen zur Förderung der Elektromobilität (Stand: Oktober 2021). (Vgl. Köllner 2021b; vgl. ADAC 2021; vgl. European Automobile Manufacturers Association 2020; vgl. Solisch 2021; vgl. European Automobile Manufacturers Association (ACEA) 2021)

Elektrofahrzeuge und den Ausbau der Ladeinfrastruktur vorsieht.⁷⁰ Zwei Monate zuvor präsentierten die Kongressabgeordneten den „CLEAN Future Act“ – eine US-amerikanische Version des deutschen „Klimaschutzprogramms 2030“. Der Gesetzesentwurf beschreibt umwelt- und klimapolitische Maßnahmen zur Realisierung einer emissi-

⁷⁰Vgl. US-Regierung 2021.

onsfreien Wirtschaft bis zum Jahr 2050. Dazu sollen im ersten Schritt die klimaschädlichen Emissionen bis 2030 um 50 % gegenüber dem Jahr 2005 gesenkt werden.⁷¹

Indes war mit rund fünf Millionen Elektroautos im Jahr 2020 weltweit jedes zweite Elektrofahrzeug in China zugelassen. Der Grund dafür waren die umfassenden Subventionen der chinesischen Regierung zwischen 2015 und 2018. Eine erste Reduktion der Förderhöhe erfolgte im Juni 2019, als die Zentralregierung die Zuschüsse für E-Autos mit einer Reichweite von weniger als 250 Kilometern entfallen ließ und für Elektrofahrzeuge mit Reichweiten von mehr als 250 Kilometern nahezu halbierte. Die Förderhöhe nimmt seitdem jährlich ab und soll im Jahr 2022 endgültig auslaufen.⁷² Dennoch wurden im ersten Quartal des Jahres 2021 maßgeblich höhere Verkaufszahlen gemeldet. Der Zuwachs verkaufter Elektroautos betrug im März 2021 rund 240 % gegenüber dem Vorjahresmonat.⁷³

In Anbetracht der dargestellten Maßnahmen und Aspekte ist ein deutlicher Fortschritt in der Förderung elektrisch betriebener Fahrzeuge aufgrund politischen Engagements festzustellen. Dabei adressiert die Förderlandschaft in der Bundesrepublik jegliche Themenstellungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette einer Batterie. Besonders große, nationale Förderprogramme wie „FFB“ oder „KoPa 35c“ überzeugen Industriepartner, an der Batterieentwicklung teilzunehmen. Gleichzeitig äußert sich das internationale politische Engagement in Form von grenzüberschreitenden Projekten innerhalb der EU wie dem „European Green Deal“ oder „IPCEI“. Im chinesischen Markt, wo die elektrische Mobilität bereits hohe Akzeptanz erfährt, ist ein Rückgang politischer Förderprogramme für die kommenden Jahre angekündigt. Zusammengefasst ist eine deutliche Weiterentwicklung politischer Fördergrundlagen für die Elektromobilität zu beobachten. Der aktuelle Trend verdeutlicht die sinnvolle Nutzung politischer Anreize zum Hochlauf der Elektromobilität. Nachdem die Technologie eine gewisse Akzeptanz am Markt erreicht, ist ein Rückgang politischer Ambitionen analog zum chinesischen Markt absehbar.

3.4 Perspektive der Automobilindustrie

Der wachsende Wille von Bürgern und Politik, die CO₂-Emissionen zu reduzieren, wirkt sich auch auf die Automobilindustrie aus. So werden beispielsweise in der EU durch Flottengrenzwerte immer mehr Anreize für die Automobilhersteller geschaffen, den Anteil elektrisch betriebener Fahrzeuge in ihren Flotten zu erhöhen. Daher bereiten sich viele Automobilhersteller darauf vor, die Produktion ausschließlich mit einem Verbrennungsmotor angetriebener Modelle auslaufen zu lassen. In diesem Zuge hat die Mehrheit der

⁷¹ Vgl. US-Regierung 2021.

⁷² Vgl. Barrett 2021.

⁷³ Vgl. Werwitzke 2021.

Fahrzeughersteller angekündigt, Mitte der 2020er-Jahre die letzten vollständig neuen Modelle mit Verbrennungsmotor auf den Markt zu bringen. Bei durchschnittlichen Fertigungszeiträumen von sieben bis acht Jahren kommt dies einem Produktionsende für Verbrennungsmotor-Fahrzeuge zwischen Anfang und Mitte der 2030er-Jahre gleich.

Laut einer Schätzung von J.P. Morgan wird der Anteil der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor an den weltweiten Autoverkäufen zugunsten von hybridelektrischen Fahrzeugen und reinen Elektroautos von 88 % im Jahr 2015 auf 41 % im Jahr 2030 sinken. Obwohl die Corona-Pandemie für die Automobilindustrie als Ganzes einen negativen Einfluss hatte, haben vor allem die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen staatlichen Konjunkturprogramme insbesondere in Europa den Trend zur Elektrifizierung verstärkt.⁷⁴

China ist weltweit führend in der Produktion elektrisch angetriebener Fahrzeuge sowie von Batteriezellen und baut den Vorsprung weiter aus. Deutsche OEMs verzeichnen in der Fahrzeugherstellung ebenfalls ein starkes Wachstum und rangieren im Produktionsvolumen auf dem zweiten Platz hinter China. Die Produktionskapazitäten für Batteriezellen sind in Deutschland aktuell jedoch noch gering. In Europa werden die Produktionskapazitäten für elektrische Fahrzeuge in den nächsten Jahren stark ausgebaut, sodass im Jahr 2025 jedes vierte produzierte Auto teil- oder vollelektrisch sein wird. Deutschland spielt bei dieser Entwicklung eine zentrale Rolle: Dort werden 2025 rund 50 % aller in Europa hergestellten vollelektrischen Pkw produziert. Dabei haben die deutschen Automobilhersteller einen großen Anteil an dieser Entwicklung – und die größten Werke zur Produktion elektrisch angetriebener Fahrzeuge entstehen ebenfalls in Deutschland.⁷⁵

Dieser Trend der Elektrifizierung bringt viele Herausforderungen für die Automobilhersteller und deren Zulieferer mit sich. Es kommt zu einer Verschiebung der Wertschöpfung im gesamten Antriebsbereich. Statt dem Verbrennungsmotor nehmen nun der Elektromotor und vor allem die Batterie einen gewichtigen Platz in der Wertschöpfungskette ein. Abb. 3.7 verdeutlicht die drastische Veränderung in der Kostenstruktur zwischen konventionellen Fahrzeugen und Elektrofahrzeugen. Bei einem rein batterieelektrisch angetriebenen Auto macht die Batterie alleine – je nach Fahrzeug – 33 % bis 44 % der Gesamtkosten aus. Davon entfallen wiederum etwa 60 % der Kosten auf die Batteriezellen. Das unterstreicht die Bedeutung der Batterie für das Elektrofahrzeug. Darüber hinaus erfolgt die Montage eines elektrifizierten Antriebsstrangs mit einer deutlich geringeren Komponentenzahl und ist somit günstiger. Auch die Kosten der Planung und Wartung sind geringer, was aus der geringeren Wertschöpfungstiefe resultiert.⁷⁶

Diesen Herausforderungen begegnen die Automobilhersteller mit unterschiedlichen Strategien. Eine Methode, der Verschiebung der Wertschöpfung und somit Wertschöpfungsverlusten entgegenzuwirken, ist der Aufbau eigener Kompetenzen der Automobilhersteller im Bereich der Komponentenfertigung des elektrifizierten Antriebsstrangs. Dieses strategische Ziel verfolgen sämtliche Automobilhersteller, allerdings mit unter-

⁷⁴Vgl. J.P. Morgan 2018.

⁷⁵Vgl. Bernhardt et al. 2021.

⁷⁶Vgl. Tschiesner et al. 2020.

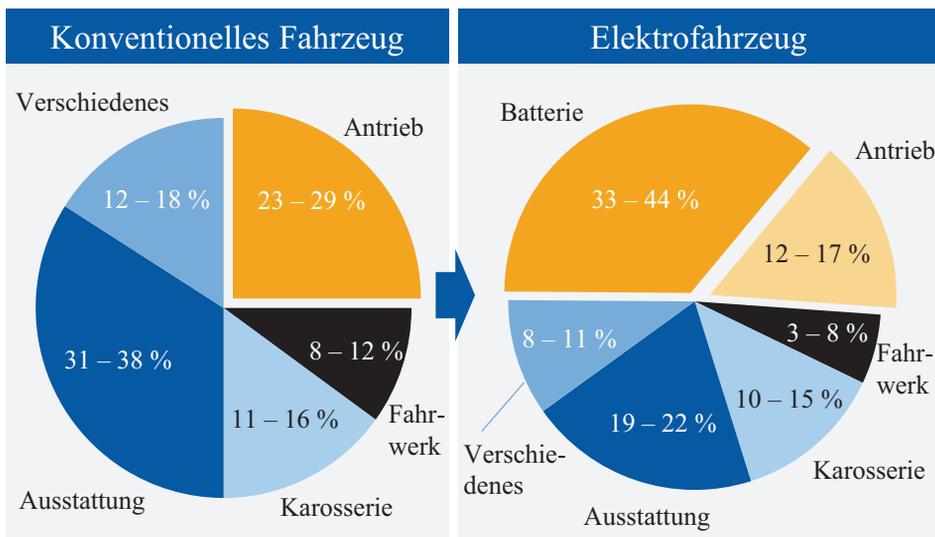


Abb. 3.7 Veränderung der Kostenstruktur zwischen konventionellen und elektrisch angetriebenen Fahrzeugen

schiedlichen Prioritäten.⁷⁷ Im Zuge dessen ist zu beobachten, dass zahlreiche Batterie-zellfabriken in Europa unter Federführung von Automobilherstellern entstehen, diese häufig aber auch Kooperationsprojekte mit entweder anderen Automobilherstellern und/oder etablierten Batteriezellproduzenten sind. Diese Kooperationen dienen dem Teilen der Kosten und der Risiken beim Aufbau derartiger Kompetenzen und deuten auf herstellerübergreifende Vereinheitlichungen hin, was auch in den nächsten Punkt der Plattformstrategien spielt.

Plattformstrategien gewinnen als zweite Strategie im Zuge der Elektromobilität weiter an Bedeutung. Dabei gibt es einerseits Automobilhersteller, die ihre Plattformen vollständig auf Elektroautos ausrichten, andererseits haben sich viele Produzenten für die Entwicklung flexibler Plattformen entschieden, die nicht auf einen rein batterieelektrischen Antriebsstrang fokussiert ist.⁷⁸ Innerhalb dieser flexiblen Strategien ist wiederum zu unterscheiden, ob die jeweilige Plattform zuerst auf den elektrischen Antriebsstrang ausgelegt wurde und den Einbau eines konventionellen Antriebsstrangs ermöglicht oder umgekehrt ein konventionelles Fahrzeug mit der Möglichkeit zum Einbau eines elektrischen Antriebsstrangs ist. Die Tendenzen in den jeweiligen Ankündigungen deuten jedoch verstärkt auf rein elektrische Plattformen beziehungsweise solche hin, die zuerst auf den elektrischen Antriebsstrang ausgelegt wurden.

⁷⁷Vgl. Olle et al. 2020.

⁷⁸Vgl. Olle et al. 2020.

Die Automobilindustrie befindet sich folglich in einem radikalen Umbruch, der sehr viele Veränderungen mit sich bringen wird. Bei diesem Umbruch spielt vor allem die Batterie eine zentrale Rolle. Weiterentwicklungen der Batterietechnologie versprechen in Zukunft geringere Kosten und fördern den Wettbewerb. Durch optimierte Plattformen und geringere Batteriekosten wird erwartet, dass Elektroautos zwischen 2025 und 2027 Preisparität mit Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren im Segment der Leichtfahrzeuge erreichen. Gleichzeitig werden die Automobilhersteller eigene Kompetenzen in der Batterieproduktion ausweiten. Allerdings bringt die steigende Batterie-Nachfrage für die Hersteller weitere Herausforderungen mit sich.

3.5 Energiewirtschaftliche Perspektive

Der durch die Elektromobilität herbeigeführte steigende Strombedarf und der Ausbau der Infrastruktur verlangen von den Energieunternehmen in den nächsten Jahren hohe Investitionen, bergen im Gegenzug aber ein Umsatzpotenzial von mehreren Milliarden Euro. Nur mit der Nutzung erneuerbarer Energiequellen ist es möglich, die Potenziale der Elektromobilität voll auszuschöpfen. Aus energiewirtschaftlicher Perspektive wird in Deutschland der zusätzliche jährliche Strombedarf von 90 TWh für die Ladung einer vollständig elektrifizierten deutschen Pkw-Flotte von 45 Mio. Fahrzeugen zusätzlich benötigt.⁷⁹ Diese Zahl entspricht einem Sechstel des im Jahr 2019 produzierten Nettostroms und stellt eine Herausforderung für Energiekonzerne dar.⁸⁰

Durch den Ausbau der erneuerbaren Energien (EE) und der entsprechenden Dezentralisierung der Energieerzeugung sind Systemumstellungen im Netz erforderlich. Die verschiedenen EE-Anlagen benötigen Netzzugang und somit eine Infrastruktur, um ins Netz integriert werden zu können. Häufig sind Standorte für eine effiziente und ertragreiche Erzeugung weit entfernt von den größten Verbrauchern. Diese Entfernung zwischen Produzenten und Konsumenten und die hohen Produktionsschwankungen der erneuerbaren Energien erfordern ein effizientes Netzmanagement. Durch die große Volatilität in der Produktion von Wind- und Solarstrom werden künftig bei einem großen Anteil dieser Technologien erhebliche Speicherkapazitäten benötigt, um die zuverlässige Energieversorgung zu jedem Zeitpunkt zu gewährleisten.⁸¹

Eine wichtige Rolle zur Etablierung der Elektromobilität spielt der Aufbau einer Ladeinfrastruktur, die einen erheblichen Einfluss auf die Verbreitung von Elektrofahrzeugen hat. Diverse Ladeinfrastrukturkonzepte werden derzeit diskutiert. Um nicht nur einzelne Gruppen von Nutzenden anzusprechen, sondern ein breites Spektrum an Verbraucherinnen und Verbrauchern zu gewinnen, müssen öffentliche Ladestationen entstehen. Dieser Ausbau ist allerdings mit langfristig hohen Investitionen verbunden. Am weitesten

⁷⁹Vgl. BMU 2018.

⁸⁰Vgl. Fraunhofer 2019.

⁸¹Vgl. Horenkamp et al. 2020.

voraus sind diesbezüglich bisher die Niederlande.⁸² Dort sind mit Bezug auf den Pkw-Gesamtbestand europaweit die meisten Ladesäulen installiert, sodass ein weit ausgeprägtes Ladenetz in Städten und Wohngebieten sowie bei Arbeitgebern existiert und weiterhin ausgebaut wird. In Deutschland weisen einzelne Regionen bereits eine gute Versorgung mit Ladestationen auf. So sind beispielsweise in Bayern und Hamburg mehr als 650 Normal- und über 90 Schnellladepunkte pro eine Million Einwohner installiert. Im Gegensatz dazu sind insbesondere in den neuen Bundesländern deutlich weniger Ladepunkte vorhanden. In Mecklenburg-Vorpommern sind es aktuell 273 Normal- und 52 Schnellladepunkte pro eine Million Einwohner.^{83,84}

Damit Elektromobilität in Deutschland für jede Bürgerin und jeden Bürger eine Alternative darstellen kann, ist also in möglichst naher Zukunft eine deutliche Weiterentwicklung der Netz- und Ladeinfrastruktur erforderlich.

Literatur

Teil I: Einführung in die Elektromobilität

ADAC *Zufahrtsbeschränkung in Europa*. <https://www.adac.de/verkehr/abgas-diesel-fahrverbote/fahrverbote/fahrverbote-ausland/>. Abruf 09.09.2021

Auswärtiges Amt: *Der Klimawandel – eine außenpolitische Herausforderung*. <https://www.auswaertiges-amt.de/de/aussenpolitik/themen/klima/aussenpolitische-herausforderung/205756>. Abruf 18.05.2021

AUTOHAUS Spezial: *Mobilität 2.0*. In: Autohaus, Jg. 2021, Nr. 19/2021Nr.

Barrett, E.: *China is rolling back the subsidies that fueled its electric-vehicle boom*. <https://fortune.com/2021/01/05/china-electric-vehicle-subsidies-sales-tesla/>. Abruf 19.05.2021

Bernhardt, W; Riederle, S; Hotz, T; Olschewski, I; Busse, A.: *E-Mobility Index 2021*, 03/2021

BMU: *Kurzinformation Elektromobilität bzgl. Strom- und Ressourcenbedarf. Strombedarf der Elektromobilität und Auswirkungen auf das Stromnetz*, 2018

Bundesministerium für Umwelt: *Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung* 2019.

Bundesministerium für Umwelt: *Das System der CO₂-Flottengrenzwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge* 2020.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU): *Klimaschutzprogramm 2030. Maßnahmen zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030*, Oktober 2019

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU): *Novelle des Klimaschutzgesetzes beschreibt verbindlichen Pfad zur Klimaneutralität 2045. Klimaziel für 2030 von 55 auf 65 Prozent Treibhausgasminde­rung gegenüber 1990 angehoben, Bundesregierung beschließt noch 2021 weitere Maßnahmen*, 12.05.2021. Pressemitteilung Nr. 098/21

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *Pariser Abkommen*. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-abkommen-von-paris.html>. Abruf 18.05.2021

⁸² Vgl. VDA 2020.

⁸³ Vgl. Bundesnetzagentur 2021.

⁸⁴ Vgl. Statistisches Bundesamt 2021.

- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie:** *Eckpunkte zur Umsetzung des Konjunkturpakets Ziffer 35c.* https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/eckpunkte-konjunkturpaket-35c.pdf?__blob=publicationFile&v=10. Abruf 21.05.2021
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie:** *Batterien „made in Germany“ – ein Beitrag zu nachhaltigem Wachstum und klimafreundlicher Mobilität.* <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/batteriezellfertigung.html>. Abruf 12.09.2021
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie:** *Elektromobilität in Deutschland.* <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/elektromobilitaet.html>. Abruf 18.05.2021
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie:** *Forschungsförderung für die E-Mobilität geht in die nächste Runde.* <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2021/03/20210326-forschungsoerderung-fuer-die-e-mobilitaet-geht-in-die-naechste-runde.html>. Abruf 18.05.2021
- Bundesnetzagentur:** *Ladesäulenkarte.* https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/E-Mobilitaet/Ladesaeulenkarte/start.html. Abruf 15.12.2021
- Bundesregierung:** *CO₂-Bepreisung.* <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/co2-bepreisung-1673008>. Abruf 18.05.2021
- Bundesregierung:** *Kaufprämie für Elektroautos erhöht.* <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/energie/wende/kaufpraemie-fuer-elektroautos-erhoeht-369482>. Abruf 18.05.2021
- Bundesregierung:** *Mehr Ladestationen für Elektroautos.* <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/ladeinfrastruktur-1692644>. Abruf 18.05.2021
- Bundesregierung:** *Verkehr.* <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/verkehr-1672896>. Abruf 28.03.2022
- Bundesregierung Deutschland:** *Klimaschutzgesetz 2021, 2021*
- Bundesregierung Deutschland:** *Verkehr. Umstieg auf Elektromobilität fördern, 2021*
- Bundesverfassungsgericht :** *Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise erfolgreich, 29.04.2021*
- California Environmental Protection Agency:** *Public hearing to consider the proposed advanced clean trucks regulation.* California Environmental Protection Agency, 2019
- Deutscher Bundestag:** *Wohnungseigentumsgesetz. WEG, 1.12.2020*
- elektroauto-News:** *Tesla: 241.300 Auslieferungen in Q3/2021 – neuer Absatzrekord.* In: elektroauto-News 2021.
- Europäische Kommission:** *Der europäische Grüne Deal.* https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/european-green-deal-communication_de.pdf. Abruf 27.05.2021
- Europäische Kommission:** *Gemeinsam für saubere Autos: EU-Kommission in engem Dialog mit Industrie und Politik zu neuer Abgasnorm, 22.11.2020*
- Europäische Kommission:** *Grüner Deal: Nachhaltige Batterien für eine kreislauforientierte und klimaneutrale Wirtschaft, 10.12.2020*
- Europäische Mitgliedsstaaten:** *Non-paper: Transition to zero-emission light-duty vehicles, 2021*
- European Automobile Clubs:** *Green Deal: Sustainable batteries.* <https://www.eaclubs.org/post/green-deal-sustainable-batteries>. Abruf 27.05.2021
- European Automobile Manufacturers Association:** *Overview – Electric vehicles: Tax benefits & purchase incentives in the European Union.* <https://www.acea.be/publications/article/overview-of-incentives-for-buying-electric-vehicles>. Abruf 19.05.2021
- European Automobile Manufacturers Association (ACEA):** *ACEA Tax Guide 2021.* https://www.acea.auto/files/ACEA_Tax_Guide_2021.pdf. Abruf 16.10.2021
- Fraunhofer, I. S.:** *Stromerzeugung|Energy Charts.* In: Verfügbar unter: https://www.energycharts.de/energy_pie_de.htm 2019.
- Harrison, D.:** *Electric Vehicle Batter Supply Chain Analysis. How Battery Demand and Production are Reshaping the Automotive Industry 2021.*

- Hecht, C; Laberer, C.:** *Herausforderungen für die Antriebswende. ADAC Befragungen zur kommunalen Infrastruktur für alternative Antriebe*, 02/2021
- Horenkamp, W; Hube, W; Jäger, J; Kleimaier, M; Kühn, W; Nestle, D; Pickhan, R; Pokojski, M; Raphael, T; Scheffler, J.:** *VDE-Studie Dezentrale Energieversorgung*, 2020
- J.P. Morgan:** *Driving into 2025: The Future of Electric Vehicles*. <https://www.jpmorgan.com/insights/research/electric-vehicles#:~:text=By%202025%2C%20J.P.%20Morgan%20estimates,-fuel%20engine%20with%20electric%20elements>. Abruf 08.12.2021
- Köllner, C.:** *Verbrenner-Ausstieg: Die Pläne der Autohersteller. Teil 2: Wer plant wann den Verbrennungsmotor-Ausstieg?* In: SpringerProfessional 2021.
- Köllner, C.:** *Verbrenner-Ausstieg: Die Pläne der Autohersteller*. In: springerprofessional.de, 13.07.2021b
- Kords, M.:** *Absatz von Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen in China von 2008 bis 2021*. In: Statista 2021.
- Kords, M.:** *Anzahl der weltweit ausgelieferten Fahrzeuge von Tesla im Zeitraum vom 1. Quartal 2017 bis 2. Quartal 2021*. In: Statista 2021.
- Kords, M.:** *Größte Automobilhersteller weltweit nach Fahrzeugabsatz im Jahr 2020*. In: Statista 2021.
- Kraftfahrbundesamt:** *Anzahl der Elektroautos in Deutschland von 2011 bis 2021*, 2021
- Kraftfahrbundesamt:** *Anzahl der Neuzulassungen von Elektroautos in Deutschland von 2003 bis 2021* 2021.
- Kraftfahrbundesamt:** *Anzahl der Neuzulassungen von Personenkraftwagen mit Elektroantrieb in Deutschland nach Modell im Jahr 2020* 2021.
- Kraftfahrbundesamt:** *Anzahl der Pkw-Neuzulassungen in Deutschland von 1955 bis 2020*, 2021
- Krings, J; Gissler, Andreas, Seyfferth, Jonas; Güthner, Hartmus, Neuhausen, Jörn; Gruber, C; Stürmer, C; Singh, A; Jiang, S.:** *Digital Auto Report 2020. Navigating through a post-pandemic world*, 2020
- Landesregierung Nordrhein-Westfalen:** *Forschungsfertigung Batteriezelle in Münster: Landesregierung ebnet den Weg für schnelleren Endausbau*. <https://www.land.nrw.de/pressemitteilung/forschungsfertigung-batteriezelle-muenster-landesregierung-ebnet-den-weg-fuer>. Abruf 26.05.2021
- manager magazin:** *China schlägt Europa mit Rekord-Zulassungszahlen 2021*.
- Maus, W.:** *Zukünftige Kraftstoffe*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019
- McKinsey:** *Wandel durch E-Mobilität: Markt für Antriebskomponenten wächst bis 2025 um ein Drittel* 2019.
- McKinsey:** *Electric Vehicle Index: Europa wird zum Hotspot der Elektromobilität*. In: McKinsey 2020.
- Niederländische Regierung:** *Confidence in the Future. 2017–2021 Coalition Agreement*, 2017
- Ola Elvestuen:** *Norway's low emissions policy*, 12.07.2018
- Olle, W; Plorin, D; Vogel, D; Wächtler, A; Chmelik, R.:** *Elektromobilität trotz der Automobilkrise. Entwicklungen in Europa 2020–2025*. In: Autoland Sachsen 2020, Nr. 2
- Proff, H.:** *elektromobilitaet-in-deutschland. Marktentwicklung bis 2030 und Handlungsempfehlungen* 2020.
- Rudolph, F; Jochem, P.:** *Die Rolle von Elektroautos in der Mobilität von morgen. Ambitionierte Flottenemissionsnormen und flankierende Politikinstrumente helfen, deutsche Klimaschutzziele zu erreichen* 2021.
- Solisch, M.:** *Umweltzonen im Ausland und weitere Fahrverbote*. <https://www.umweltplakette.org/umweltzonen-ausland/>. Abruf 16.10.2021
- Soulopoulos, N; Boers, M; Fisher, R; O'Donovan, A; Mckerracher, C.:** *Hitting the EV Inflection Point. Electric vehicle price parity and phasing out combustion vehicle sales in Europe*, 05/2021

- SPD, FDP, Die Grünen:** *MEHR FORTSCHRITT WAGEN. BÜNDNIS FÜR FREIHEIT, GERECHTIGKEIT UND NACHHALTIGKEIT*. Koalitionsvertrag zwischen SPD, FDP, und Die Grünen 2021.
- Statistisches Bundesamt:** *Bevölkerung nach Nationalität und Bundesländern*. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/Tabelle/bevoelkerung-nichtdeutsch-laender.html>. Abruf 15.12.2021
- Strathmann, T.:** *Elektromobilität als disruptive Innovation*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019
- Tschiesner, A; Heuss, R; Hensley, R; Wu, T; Schaufuss, P; Hertzke, P; Knupfer, S. M; Gersdorf, T.:** *The road ahead for e-mobility. How OEMs can win consumers and achieve mass-market EV adoption*, 01/2020
- Umweltbundesamt:** *Mobilität privater Haushalte*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/mobilitaet-privater-haushalte>. Abruf 07.12.2021
- US-Regierung:** *Reducing Greenhouse Gases in the United States: A 2030 Emissions Target*, 2021
- US-Regierung:** *Fact Sheet: The American Jobs Plan*, 31.03.2021
- VDA:** *Ladenetz-Ranking Europa*, 2020
- Verband der TÜV e. V.:** *Mobility Studie 2020*, 2020
- Vitale, J; Giffi, C; Schiller, T; Bowman, K; Hecker, M; Bae, J. H; Singh, R; Tanaka, Y; Robinson, R.:** *2020 Global Automotive Consumer Study. Is consumer interest in advanced automotive technologies on the move?*, 2020
- Wappelhorst, S; Cui, H.:** *Growing momentum: Global overview of government targets for phasing out sales of new internal combustion engine vehicles*. <https://theicct.org/blog/staff/global-ice-phaseout-nov2020>. Abruf 05.06.2021
- Werwitzke, C.:** *Q1: Starke Zuwächse beim E-Auto-Absatz in China*. <https://www.electrive.net/2021/04/08/q1-starke-zuwaechse-beim-e-auto-absatz-in-china/>. Abruf 28.05.2021
- Wilker, F.:** *Elektrofahrzeuge werden ab 2030 voraussichtlich die Hälfte des weltweiten Automobilmarktes ausmachen*, 2017
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW):** *Elektroautos: Bestand steigt weltweit auf 10,9 Millionen*, 09.03.2021

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Formen der Elektromobilität

4

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns,
Konstantin Sasse, Jonas Gorsch und Moritz Frieges

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

C. Offermanns

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: c.offermanns@pem.rwth-aachen.de

K. Sasse

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: k.sasse@pem.rwth-aachen.de

J. Gorsch

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: j.gorsch@pem.rwth-aachen.de; m.frieges@pem.rwth-aachen.de

M. Frieges (✉)

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: j.gorsch@pem.rwth-aachen.de; m.frieges@pem.rwth-aachen.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Kampker, H. H. Heimes (Hrsg.), *Elektromobilität*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-65812-3_4

Elektromobilität ist mehr als ein mittels Batterie angetriebenes Fahrzeug. Elektromobilität bedeutet im engeren Sinne zunächst eine elektrisch angetriebene Fortbewegung, unabhängig von der konkreten Wahl eines Verkehrsmittels und der gewählten Form der Energiespeicherung. Dementsprechend wird mit diesem Begriff die gesamte Bandbreite von „Last-Mile“-Unterstützungen im Individualverkehr etwa mit Elektrorollern (Scooter) bis hin zu großen Transportsystemen für Personen und Güter wie Lastkraftwagen oder Züge abgedeckt.

Elektromobilität geht indes über die bloße Art der Fortbewegung hinaus. Die zunehmende Verbreitung vor allem im Pkw-Bereich impliziert systemische Veränderungen. Beispielsweise bedarf es einer entsprechenden Infrastruktur zum Laden der Fahrzeuge, die errichtet und betrieben werden muss. Spätestens im Ausbau der Infrastruktur wird die Elektromobilität gesellschaftlich relevant. Motiviert über das Pariser Klimaabkommen aus dem Jahr 2015, wird Elektromobilität politisch als ein Baustein für die Klimaneutralität betrachtet. Tatsächlich kann Elektromobilität nachhaltig sein – vorausgesetzt, der eingesetzte Strom wird regenerativ erzeugt.

Der überwiegende Anteil der Verkehrsleistung – gemessen an der Gesamtdistanz – wird durch den motorisierten Individualverkehr erbracht. 2019 betraf dies 73,4 % der Verkehrsleistung im Personenverkehr.¹ Daher ist die Elektrifizierung dort von besonderem Interesse. Im Pkw-Bereich existieren verschiedene Konzepte und Reifegrade der Elektromobilität. Den Einstieg bilden hybride Fahrzeuge ab, in denen der klassische Verbrennungsmotor um einen kleinen Batteriespeicher und einen zusätzlichen Elektromotor ergänzt wird. Vor allem beim Bremsen kann in diesen Konzepten wertvolle Energie zurückgewonnen und zur Unterstützung des Verbrenners eingesetzt werden. Im Falle von Plug-in-Hybriden ist außerdem die Möglichkeit des externen Ladens der Batterie vorgesehen. Der Elektromotor ist leistungsstark genug, um das Fahrzeug auch ohne den Verbrennungsmotor anzutreiben. In dieser Kombination ist rein elektrisches Fahren von bis zu 100 km auch heute schon möglich. Rein elektrisch werden zwei wesentliche Fahrzeugkonfigurationen angeboten, die sich in der Form der Energiespeicherung unterscheiden. Dominant ist die batteriebetriebene Konfiguration. Dabei stellt eine Hochvoltbatterie die Energie für Traktion und sämtliche Nebenverbräuche bereit. Sie wird extern geladen und ermöglicht inzwischen Reichweiten von bis zu 780 km mit einer vollständigen Ladung.² Diesem Konzept stehen Fahrzeuge mit Brennstoffzelle gegenüber. In dieser Konfiguration wird der Strom zum Vortrieb im Fahrzeug mit Wasserstoff – und Sauerstoff aus der Umgebung – erzeugt. Vorteilhaft im direkten Vergleich mit den batterieelektrischen Fahrzeugen sind die Tankzeiten, die mit denen von Verbrennungsmotor-Fahrzeugen vergleichbar sind. Autos mit Brennstoffzelle sind derzeit jedoch noch deutlich teurer, und die Modellauswahl ist stark begrenzt.

Wasserstoff als Energieträger der Elektromobilität gewinnt jedoch im Nutzfahrzeugsegment zunehmend an Bedeutung. Insbesondere für den Schwerlast- und Langstreckenbereich ist der vergleichsweise geringe Bedarf an Volumen und Masse bei gleichzeitig kur-

¹ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 2021.

² Vgl. Rudschies 2020.

zen Tankvorgängen gegenüber der Batterie potenziell im Vorteil. Für den energieintensiven Nutzfahrzeugbereich wird derzeit außerdem das Konzept der Oberleitung zur Energieversorgung untersucht. Erste Teststrecken und -fahrzeuge existieren schon, eine Serienlösung ist jedoch noch nicht verfügbar. Batterien als Energiespeicher im Nutzfahrzeugsegment konnten sich im leichteren Bereich bis 7,5 t bereits bewähren. Zustell- und Verteilerverkehr sind aufgrund ihrer relativ geringen täglichen Distanzen bei gleichzeitig guter Planbarkeit prädestiniert für den batterieelektrischen Antrieb. Emissionen lassen sich mit Hilfe dieser Fahrzeuge vor allem im Stadtbereich vermeiden.

Neben der Mobilität auf der Straße werden derzeit Konzepte erarbeitet, die die Elektromobilität in die Luft bringen können. Im Fokus stehen „Vertical-Take-off-and-Landing“ (VTOL)-Luftfahrzeuge. Sie können senkrecht starten und landen sowie in einen Gleitflug übergehen. Dabei erfolgt der Antrieb rein batterieelektrisch. Die VTOL-Fahrzeuge konkurrieren mit Hubschraubern, sollen sich jedoch unter anderem durch deutlich niedrigere Betriebskosten und weniger Geräuschemissionen auszeichnen, wodurch eine Nutzung im urbanen Bereich möglich wird. Neben den flugtechnischen Herausforderungen ist insbesondere die aktuelle Energiedichte der Batterien zu verbessern. Mit einem flächigen Einsatz von VTOL-Fahrzeugen wird daher im Allgemeinen erst beim Erreichen höherer gespeicherter Energie gerechnet. Serienlösungen gibt es derzeit noch nicht.

Neben den bisher vorgestellten und vergleichsweise großen Mobilitätslösungen findet Elektromobilität auch in kleineren Maßstäben Anwendung. So machten E-Bikes im Jahr 2020 bereits 38,7 % der Fahrradverkäufe in Deutschland aus.³ Die Tendenz ist über die vergangenen Jahre hinweg deutlich steigend. Seit ihrer Zulassung stehen auch Elektroroller zur Bewältigung kurzer Distanzen bereit – primär im städtischen Bereich.

Die zuletzt beschriebenen Mobilitätsformen spielen jedoch nur eine geringe Rolle in der globalen Batterieproduktion. So wird der Anteil der Batterien für den Automotive-Bereich samt Hybrid- und Nutzfahrzeugen auf 76 % der Produktionskapazitäten im Jahr 2025 eingeschätzt.⁴ Damit dominiert in der Elektromobilität eindeutig die Batterie-Nachfrage von Pkw und Lkw.

Literatur

Teil I: Einführung in die Elektromobilität

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): *Verkehr in Zahlen 2020/2021*, 2021

Roland Berger: *Rising opportunities for battery equipment manufacturers*, 2020

Rudschies, W.: *Mercedes EQS: Bis 780 Kilometer Reichweite*. In: ADAC, 15.12.2020

Zweirad-Industrie-Verband (ZIV): *Zahlen – Daten – Fakten zum Fahrradmarkt in Deutschland 2020* (Wirtschaftspressekonferenz am 10. März 2021 in Berlin). Berlin, 10.03.2021

³Vgl. Zweirad-Industrie-Verband (ZIV) 2021.

⁴Vgl. Roland Berger 2020.

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.



Elektrofahrzeugspezifische Systeme

Lange Zeit dominierte der Verbrennungsmotor als Fahrzeugantrieb und beherrschte den globalen Automobilmarkt.¹ Die zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstrangs führt nun zu neuen Anforderungen im Bereich der Fahrzeugstruktur sowie zu einer Vielfalt von Antriebstopologien, die weitere Herausforderungen mit sich bringen.² Kap. 5 gibt einen Überblick zur Fahrzeugstruktur und beschreibt dafür zunächst die Vorzüge und Nachteile des „Conversion Design“ und des „Purpose Design“. Anschließend kommt das Packaging-Konzept zur Sprache, dessen Ziel in einer Gesamtfahrzeuiglösung liegt, die verschiedene Vorgaben und Herausforderungen identifiziert und miteinander kombiniert. In einer Gegenüberstellung konventioneller und elektrischer Fahrzeuge werden zudem Leichtbaupotenziale beleuchtet, die zu einer Energieeinsparung führen. Kap. 6 befasst sich mit der elektromobilspezifischen Veränderung des Antriebsstrangs und seinen einzelnen Komponenten, wonach Kap. 7 die Batteriesysteme und deren Steuerung in den Blick nimmt. Kap. 8 lenkt den Fokus dann auf Brennstoffzellensysteme, ihre Varianten für mobile Anwendungen und die Funktion der PEM-Brennstoffzelle. Elektrische Maschinen sind das Thema in Kap. 9, das sie in ihrer Vielfältigkeit, ihrem Aufbau und ihren zentralen Elementen betrachtet. Danach stellt Kap. 10 zunächst die Grundzüge der Leistungselektronik vor und geht dann auf ihre einzelnen Komponenten ein. Kap. 11 schließlich beleuchtet das Thermomanagement in Elektrofahrzeugen mit allen seinen Herausforderungen und Lösungsansätzen.

¹ Vgl. Tschöke et al. 2020, S. 3.

² Vgl. Burkert 2019, S. 16.

Literatur

- Burkert, A.:** *Die Elektromobilität krepelt Deutschland um.* In: ATZ Extra, 28.06.2019
- Tschöke, H; Gutzmer, P; Pfund, T.:** *Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Grundlagen-vom mikrohybrid zum.* [Place of publication not identified]: MORGAN KAUFMANN, 2020



Fahrzeugstruktur

5

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Mario Kehrer,
Simon Dünnwald, Lennart Heetfeld, Jens Polzenberg,
Lucas Budde, Maximilian Keusen, Rahul Pandey und Thilo Röth

Um sowohl Treibhausgas-Emissionen zu verringern als auch Kraftstoffressourcen zu schonen, wird zunehmend an einer Transformation konventionell angetriebener Kraftfahrzeuge hin zu elektrifizierten Antriebskonzepten gearbeitet. Basierend auf herkömmlichen

H. H. Heimes (✉)

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

M. Kehrer

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: m.kehrer@pem.rwth-aachen.de

S. Dünnwald

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: s.duennwald@pem.rwth-aachen.de

L. Heetfeld · J. Polzenberg · L. Budde · M. Keusen · R. Pandey

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: l.heetfeld@pem.rwth-aachen.de; j.polzenberg@pem.rwth-aachen.de; l.budde@pem.rwth-aachen.de; m.keusen@pem.rwth-aachen.de; r.pandey@pem.rwth-aachen.de

T. Röth

Geschäftsführer, ACA-Invest GmbH, Aachen, Deutschland
E-Mail: roeth@fh-aachen.de

Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor wurde eine Vielzahl neuer Antriebssysteme mit verschiedenem Elektrifizierungsgrad entwickelt. Mitte der 1990er-Jahre kamen erste Fahrzeuge mit einem Hybridantrieb auf den Markt. Die Kombination aus Verbrennungs- und Elektromotor erlaubt eine Verbrauchsreduktion und Bremsenergieerückgewinnung sowie lokal emissionsfreies Fahren.¹

Hybridfahrzeuge (Hybrid Electric Vehicle – HEV) werden, wie in Abb. 5.1 dargestellt, drei Kategorien zugeordnet. Bei einem parallelen Hybridantrieb sind Verbrennungsmotor und Antriebsachse mechanisch miteinander verbunden; der Elektromotor hat dabei eine unterstützende Funktion. Der Verbrennungsmotor bei einem seriellen hybridelektrischen Fahrzeug hingegen treibt das Fahrzeug nicht direkt über eine me-

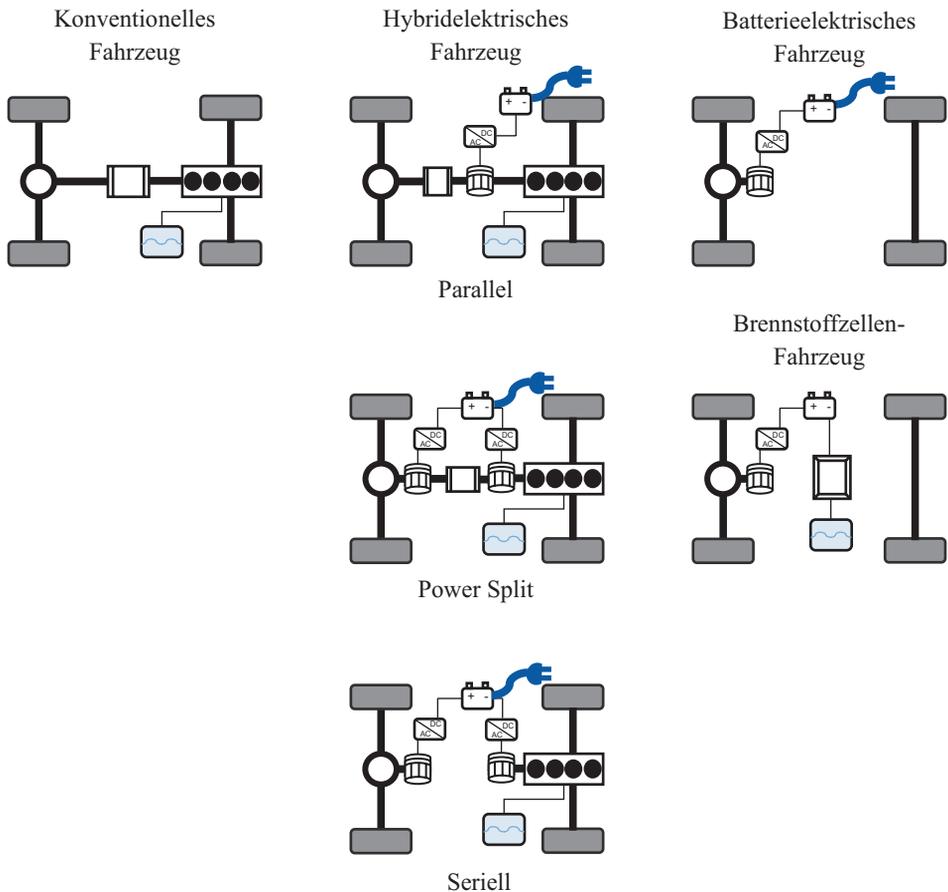


Abb. 5.1 Schematische Darstellung unterschiedlicher Antriebstechnologien. (Vgl. Pischinger 2020)

¹Vgl. Seiffert und Pischinger 2021.

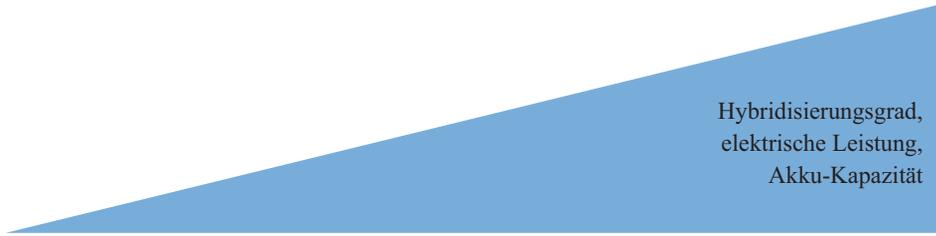
chanische Verbindung an: Stattdessen wird eine Batterie geladen, die einen Elektromotor versorgt. Eine Kombination beider Systeme wird als „Mischhybrid“ oder „Power Split“-Hybrid“ bezeichnet. Diese klassischen Hybridfahrzeuge erhalten elektrische Energie für den Betrieb des Elektromotors lediglich aus der mechanischen Energie des Verbrennungsmotors oder aus der Rekuperationsenergie. Um die Batterien unabhängig laden zu können, entstanden Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV), die sich mit einem Stecker extern laden lassen. Auch die Plug-in-Hybride können in die drei Gruppen „parallel“, „seriell“ und „Power Split“ eingeteilt werden. Hybridfahrzeuge mit kleinen Verbrennungsmotoren werden als „Elektrofahrzeuge mit Range Extender“ bezeichnet.²

Eine weitere Unterscheidungsform von Hybridfahrzeugen ist die Einteilung in Mikro-, Mild-, und Voll-Hybrid. Während Mikro-Hybride nur über eine geringe elektrische Leistung und Batteriekapazität verfügen, nimmt der Hybridisierungsgrad über den Mild-Hybrid bis zum Voll-Hybrid und Plug-in-Hybrid stetig zu, wie in Abb. 5.2 dargestellt.³

Darüber hinaus liegt ein weiteres wichtiges Unterscheidungsmerkmal elektrisch angetriebener Fahrzeuge in der Topologie des Antriebssystems. Ein zentral angeordneter Motor ermöglicht eine Integration in ein bestehendes Fahrzeug ohne große Veränderungen der Karosserie. Der konventionelle Verbrennungsmotor mit herkömmlichem Getriebe und Kraftstofftank kann durch den Elektromotor und dessen Getriebe sowie die Batterie ersetzt werden. Das senkt die Entwicklungskosten, da auf einem bestehenden Fahrzeug aufgebaut werden kann. Die Verluste, die zum Beispiel im Differenzialgetriebe auftreten, führen insgesamt zu einem um zwei bis drei Prozent niedrigeren Wirkungsgrad gegenüber Radnabenmotoren oder radnahen Motoren, die auf der Antriebswelle sitzen. Es kann ein einzelner Motor oder es können mehrere Motoren verbaut werden. Eine individuelle Ansteuerung bei mehreren Motoren ermöglicht das Weglassen eines Differenzialgetriebes und führt zu verbesserten Fahreigenschaften sowie gesteigerter Effizienz. Im Vergleich zu Radnabenmotoren erhöht sich bei größeren radnahen Motoren nicht die ungefederte Masse. Radnabenmotoren hingegen sind direkt in das Rad eingebaut und tragen die Radnabe. Auch bei Radnabenmotoren ist ein Differenzialgetriebe nicht notwendig und individuell angesteuerte Motoren verbessern die Fahreigenschaften sowie die Effizienz. Außerdem können Fahrassistenzsysteme wie ABS, ASR und ESP schneller und präziser arbeiten, was jedoch zu einem erhöhten Steuerungsaufwand führt. Die durch die Motoren erhöhte ungefederte Masse und der begrenzte Bauraum innerhalb des Rades stellen die erheblichen technischen Herausforde-

²Vgl. Pischinger 2020.

³Vgl. Karle 2021.



Hybridisierungsgrad,
elektrische Leistung,
Akku-Kapazität

Mikro-Hybrid	Mild-Hybrid	Voll-Hybrid	Plug-in-Hybrid
<u>Leistungsbereich</u> 2 bis 5 kW	<u>Leistungsbereich</u> 5 bis 15 kW	<u>Leistungsbereich</u> 15 bis 60 kW	<u>Leistungsbereich</u> ≥ 20 kW
<u>Zusatznutzungen</u>	<u>Zusatznutzungen</u>	<u>Zusatznutzungen</u>	<u>Zusatznutzungen</u>
<ul style="list-style-type: none"> ■ Start/Stopp-Automatik ■ Rekuperation 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Start/Stopp-Automatik ■ Rekuperation ■ Leistungssteigerung 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Start/Stopp-Automatik ■ Rekuperation ■ Leistungssteigerung ■ vollelektrisches Fahren ■ Lastpunktanhebung ■ Verbrennungsmotor 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Start/Stopp-Automatik ■ Rekuperation ■ Leistungssteigerung ■ vollelektrisches Fahren ■ Lastpunktanhebung ■ Verbrennungsmotor

Abb. 5.2 Hybridarten in Anlehnung an Karle (2021). (Vgl. Karle 2021)

rungen dieser Antriebsanordnung dar. Abb. 5.3 vergleicht die drei Antriebstopologien mit den beschriebenen Vorzügen und Nachteilen.⁴

Mit dem Komplexitätszuwachs des Antriebssystems geht auch eine deutlich erweiterte Fahrzeugperipherie einher. Das elektrische Antriebssystem benötigt Hochvoltleitungen, Umrichter und DC/DC-Wandler, um die Nebenaggregate mit niedrigeren Spannungen

⁴Vgl. Kampker et al. 2019.

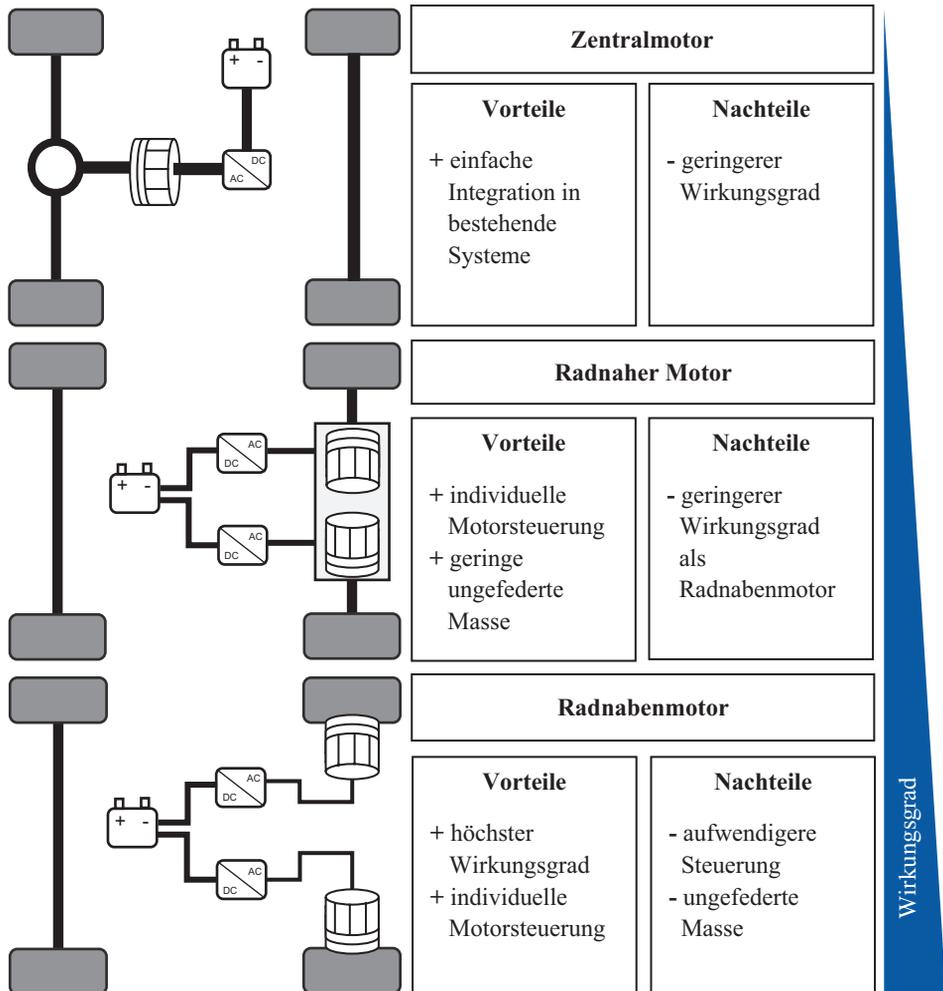


Abb. 5.3 Gegenüberstellung der Topologie des Antriebsstrangs von Elektrofahrzeugen

zu versorgen (vgl. Abb. 5.4). Eine große technische Herausforderung für elektrisch angetriebene Fahrzeuge ist das Thermomanagement. Es müssen verschiedene Temperaturniveaus erreicht und gehalten werden, um eine größtmögliche Effizienz und Sicherheit zu gewährleisten.⁵

⁵Vgl. Wawzyniak et al. 2017.

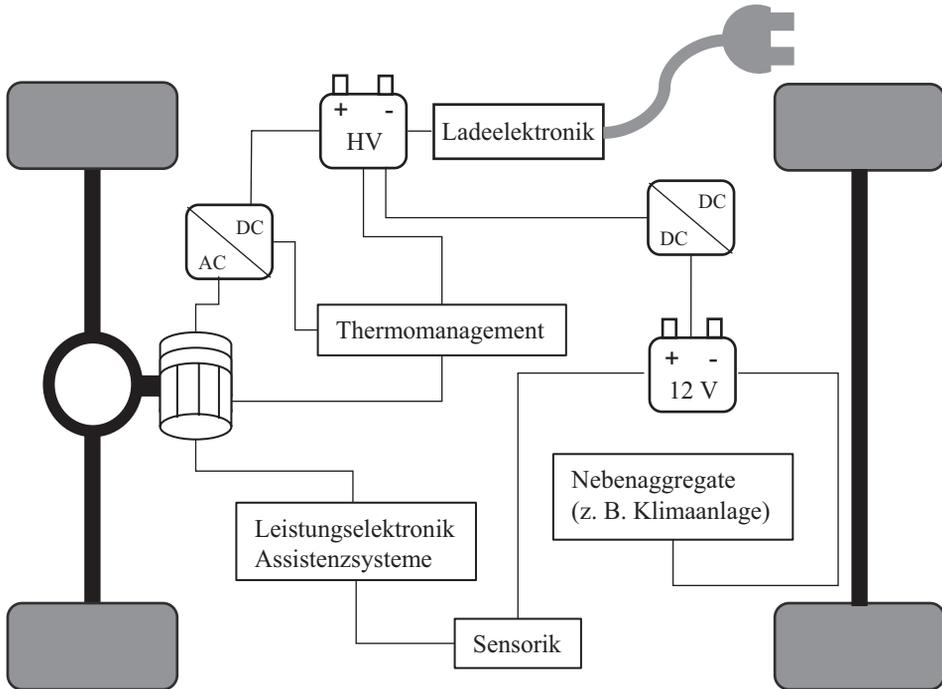


Abb. 5.4 Fahrzeugperipherie eines elektrischen Antriebssystems

5.1 „Conversion Design“ vs. „Purpose Design“ für Elektrofahrzeuge

Der Entwicklung elektrischer Fahrzeuge liegen zwei Design-Ansätze zugrunde. Das „Conversion Design“ integriert die elektrischen Antriebskomponenten in bereits bestehende, konventionell angetriebene Fahrzeuge. Beim „Purpose Design“ hingegen wird ein elektrisch angetriebenes Fahrzeug komplett neu entwickelt.⁶

Das „**Conversion Design**“ nutzt ein bestehendes Fahrzeugkonzept als Entwicklungsbasis für ein elektrisch angetriebenes Fahrzeug. Ziel dieses Ansatzes ist ein schneller Markteintritt. Ein wichtiger Vorteil besteht in den geringeren Entwicklungs- und Investmentkosten. Fahrzeuge im „Conversion Design“ lassen sich in bestehende Produktionslinien herkömmlich angetriebener Kraftfahrzeuge integrieren, so dass sie von Synergieeffekten profitieren. Außerdem können die Kundenbindungen an bestehende Fahrzeugmodelle genutzt werden. Nachteilig wirken sich hingegen potenziell auftretende zusätzliche Kosten durch Änderungen der Fahrzeugstruktur aus. Die Unterbringung der Batterie in einem konventionellen, zerklüfteten Unterboden führt zu wesentlichen Neukonzeptionen und

⁶Vgl. Karle 2021.

Neuplanungen. Wichtige Komponenten wie Kühlung, Bremsmodul und Lenkassistent müssen an ein elektrisches Fahrzeug angepasst werden und die Fertigung ist in eine bestehende Produktionslinie zu integrieren. Diese Anpassungen sind allerdings limitiert, ebenso wie die konstruktiven Möglichkeiten bei der Fahrzeugentwicklung. Daher werden neue Produktionslinien notwendig, um die erhöhte Elektrofahrzeug-Nachfrage bedienen zu können. Dies ist mit einem erheblichen finanziellen Aufwand verbunden.^{7,8,9}

Das „**Purpose Design**“ bietet einen anderen Entwicklungsweg. Dabei wird um den elektrischen Antriebsstrang herum ein neues Fahrzeug entwickelt. Dies ermöglicht Kosteninnovationen, da die Entwicklung auf die spezifischen Anforderungen und Vorteile des elektrischen Antriebsstrangs fokussiert werden kann. Es bietet den Entwicklern und Konstrukteuren größere Freiheiten, um Kosteninnovationen bei der Fahrzeugkonzept- und Package-Auslegung zu erzielen. Die besser den Anforderungen eines elektrischen Fahrzeugs entsprechende Konstruktion und Produktion führen zu optimierten Fahreigenschaften und effizienterem Leichtbau. Während das Fahrzeugkonzept den Entwurf einer Produktidee mit Fokus auf die Grundmerkmale darstellt – unter anderem Fahrzeuggrundform, Hauptabmessungen, Anzahl der Sitzplätze –, wird im Zuge der Package-Auslegung die Ausarbeitung des Konzepts während der Entwicklung sowie die Abstimmung kundenrelevanter, gesetzlicher und qualitätssichernder Aspekte umgesetzt. Neben Kunden- und Marktanforderungen üben die Wettbewerbsprodukte und die Positionierung des Herstellers im Markt einen großen Einfluss auf das Fahrzeugkonzept und das Package aus. Weitere beeinflussende Faktoren sind der Einsatzbereich und das Sicherheitskonzept des Fahrzeugs. Die konstruktiven Freiheitsgrade des „Purpose Design“ ermöglichen es, die Fahrzeugplattform und die Fertigung gezielt für eine Produktfamilie mit einer Vielzahl von Derivaten auszulegen. Dabei bietet die Elektromobilität mit den hinsichtlich Größe und Kontur geometrisch einfacheren Komponenten „Elektromotor“ und „Batterie“ die Chance, eine Fahrzeugplattform zu entwickeln, die – mit unterschiedlichen Aufbauvarianten versehen – vielfältige Fahrzeugkonzepte hervorbringen kann. Da im Fahrzeug weder Verbrennungsmotor noch Tank untergebracht werden müssen, sondern vergleichsweise kleine Elektromotoren im Achsbereich sowie Batterien im Unterboden eingesetzt werden, kann der Fahrzeugaum deutlich flexibler und effektiver genutzt werden als bei konventionellen Antriebskonzepten. Aufgrund des größeren Gewichts der Batterie im Unterboden im Vergleich zum Verbrennungsmotor liegt der Schwerpunkt niedriger und führt zu einer erhöhten Fahrstabilität.^{10,11,12}

Das „Purpose Design“ führt zu erhöhten Entwicklungs- und Investmentkosten. Daher sollte es vor allem bei großen angestrebten Stückzahlen als Design-Grundlage verwendet

⁷Vgl. Kampker et al. 2019.

⁸Vgl. Nicoletti et al. 2021.

⁹Vgl. Karle 2021.

¹⁰Vgl. Kampker et al. 2018.

¹¹Vgl. Karle 2021.

¹²Vgl. Nicoletti et al. 2021.

Tab. 5.1 Gegenüberstellung von „Conversion Design“ und „Purpose Design“

Conversion Design	
Vorteile	Nachteile
+ Kurze Entwicklungsdauer, schneller Markteintritt	- Produktionslinien starr, wenig Änderungsmöglichkeiten
+ Geringe Entwicklungs- und Investitionskosten	- Aufwendiges Ersetzen der Komponenten
+ Leichte Integration in bestehende Produktionslinien	- Designpotenziale bleiben ungenutzt
+ Synergieeffekte durch viele gleiche Komponenten	
+ Kundenbindung zu bestehenden Modellen	
Purpose Design	
Vorteile	Nachteile
+ Höhere Designfreiheit	- Hohe Entwicklungskosten
+ Bessere Raumnutzung und Flexibilität	- Hohe Investmentkosten
+ Verbesserte Fahreigenschaften	- Längere Entwicklungszeiten
+ Besser abgestimmte Fertigung	- Späterer Markteintritt

werden. Die besseren Fahrzeugeigenschaften müssen umfassend mit den entstehenden Kosten abgewogen werden. Außerdem führen unbekanntere Marktentwicklungen und längere Entwicklungsperioden zu Unsicherheiten beim „Purpose-Design“-Ansatz. Tab. 5.1 stellt die Unterschiede zwischen „Conversion Design“ und „Purpose Design“ dar.

5.2 Package für Elektrofahrzeuge

Das Fahrzeug-Package muss zahlreiche Anforderungen an Bauraum, Ergonomie, Gesamteigenschaften und Fahrzeugdesign miteinander in Einklang bringen. Es begleitet den gesamten Entwicklungsprozess von der Idee eines Fahrzeugs bis hin zur Serienfertigung. Das Packaging-Konzept wird während der Entwicklung schrittweise optimiert und dient der Überprüfung der technischen Machbarkeit sowie dem geometrischen Zusammenspiel aller Komponenten. Eine zentrale Aufgabe des Packages ist es, während jeder Entwicklungsphase exakte Bauraumgeometrien zu verwalten und einen reibungslosen Entwicklungsprozess zu gewährleisten.^{13,14}

Das Package ist immer eine Abwägung verschiedener Fahrzeugschwerpunkte. Eine hohe Sicherheit, insbesondere der HV-Komponenten, steht in Konflikt mit effizientem Leichtbau und den für die Konsumierenden tragbaren Kosten. Eine vereinfachte Herstellbarkeit eines zentralen Packages optimiert den Fertigungsprozess und die anfallenden Kosten, führt aber zu einem erhöhten Wartungsaufwand. Es müssen rechtliche Rahmenbe-

¹³Vgl. Kampker et al. 2018.

¹⁴Vgl. Seiffert und Pischinger 2021.

dingungen wie zum Beispiel die Einhaltung der Sichtfelder erfüllt sowie die Sicherheit innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs gewährleistet sein. Das Thermomanagement des Antriebssystems und der Hochvoltkomponenten sowie die elektromagnetische Verträglichkeit der Peripherie und Leistungselektronik müssen stets sichergestellt werden, um ein einwandfrei arbeitendes Produkt zu entwickeln. Komfort- und Akustikanforderungen des Nutzenden müssen mit einem attraktiven Design und ebensolchen Fahreigenschaften verknüpft werden. Das Ergebnis einer Design-Trendbestimmung muss allerdings stets mit den technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten abgeglichen werden. Die Herausforderung des Packages besteht darin, eine ideale Gesamtfahrzeuflösung innerhalb der technischen, finanziellen und dimensionalen Vorgaben umzusetzen.¹⁵

Die ersten CAD-Modelle des Package-Entwurfs werden grundlegend bestimmt von den Abmaßen, die durch die Marktpositionierung des Fahrzeugs vorgegeben sind, sowie von den rechtlichen Vorgaben, den Komfort- wie Sichtenanforderungen des Sitz-Packages, vom Strukturentwurf sowie von den Komponenten und der Topologie des Antriebsstrangs und des Fahrwerks. Der angestrebte Elektrifizierungsgrad des Kraftfahrzeugs ist entscheidend für ein geeignetes Package-Konzept. Ein hybridelektrisches Fahrzeug mit Heckantrieb benötigt beispielsweise eine Kardanwelle und ein Differenzialgetriebe. Bei voll-elektrischen Fahrzeugen entfallen diese Komponenten und bieten Platz für die Hochvoltbatterie im Fahrzeugunterboden. Die zunehmende Elektrifizierung führt zu einer Reihe neuer Komponenten, die in das Fahrzeug integriert werden müssen: Batteriesysteme, elektrische Motoren, Umrichter, DC/DC-Wandler zur Versorgung von Peripherie und Assistenzsystemen, Ladeinfrastruktur, Hochvolt-Bordnetz und ein ausgereiftes Thermomanagement machen ein neuartiges Package-Konzept notwendig.^{16,17}

5.2.1 Batterieelektrische Fahrzeuge

Die bestimmende Komponente für die Auslegung des Package-Entwurfs ist das Batteriesystem. Eine Positionierung unterhalb des Sitz-Packages wirkt sich wegen der Größe und des Gewichtes der Batteriezellen positiv auf den Fahrzeugschwerpunkt aus. Diese Anordnung ist aus sicherheitstechnischen Gründen sinnvoll, da eine Feuerschutzwand zwischen Batterie und Fahrerkabine eingebaut werden kann. In vollelektrischen Fahrzeugen existieren drei Integrationskonzepte für das Batteriesystem:

- Sandwichbodenintegration
- T-Shape-Anordnung
- Verteilte Anordnung

¹⁵Vgl. Kampker et al. 2018.

¹⁶Vgl. Kampker et al. 2018.

¹⁷Vgl. Porsche AG 2015.

Die **Sandwichbodenintegration** ermöglicht einen großen zusammenhängenden Bauraum zur sicheren Integration der Batterie in das Fahrzeug. Die einfache geometrische Form ermöglicht eine Modularisierung, welche die Wartbarkeit verbessert und eine produktspezifische Skalierbarkeit bietet. Dies erzeugt Synergieeffekte zwischen verschiedenen Fahrzeugmodellen und Produktionslinien. Allerdings führt diese Batterieanordnung zu einem leicht höheren Fahrzeuggewicht im Vergleich zu Batterieanordnungen in T-Shape oder zu verteilten Topologien. Die **T-Shape-Anordnung** nutzt den Getriebetunnel sowie den Bauraum unterhalb der Rücksitzbank für das Batteriesystem, so dass es eine T-Form annimmt. Die **verteilte Anordnung** nutzt den Bauraum unterhalb der Sitze sowie des Kraftstofftanks konventioneller Fahrzeuge. Diese Anordnung wird vor allem bei „Conversion-Design“-Entwicklungen genutzt. Alle drei Topologien werden auf den Seitencrash – besonders Pfahlaufprall – ausgelegt. Es muss dabei stets das Ziel sein, eine Beschädigung des Batteriesystems zu verhindern. Ein gutes Package-Konzept muss daher eine Deformationszone mit Crash-Elementen um das Batteriesystem vorsehen. Abb. 5.5 zeigt verschiedene Package-Entwürfe für Batteriesysteme unterschiedlicher Fahrzeugtypen.¹⁸

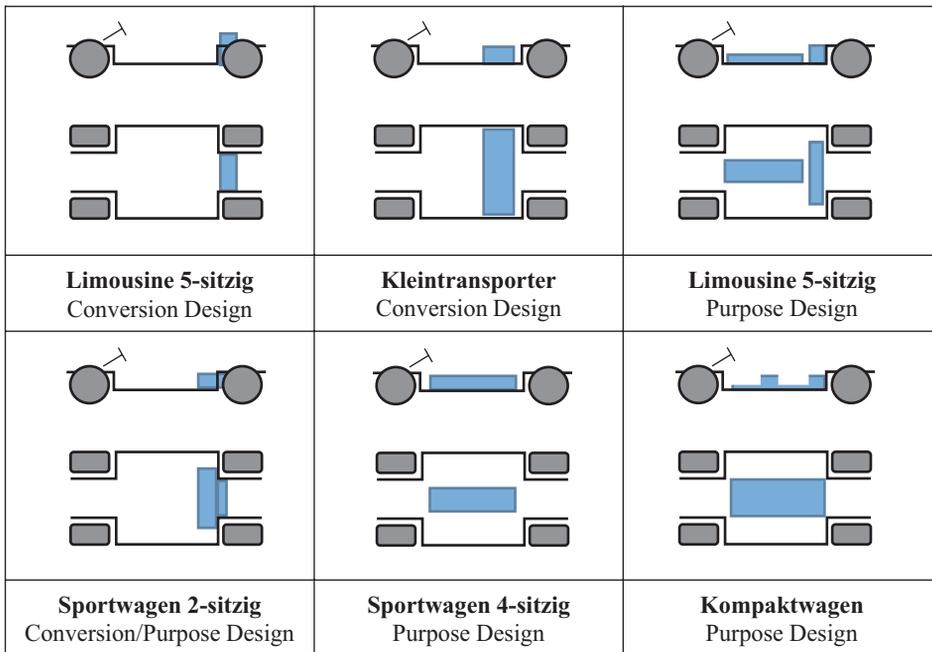


Abb. 5.5 Topologie der Karosseriebodengruppen in Abhängigkeit vom Batteriepack. (Vgl. Kampker et al. 2018)

¹⁸Vgl. Nicoletti et al. 2021.

Die Batteriezellen müssen für eine optimale Effizienz exakt am Betriebspunkt von bis zu 60 °C gehalten werden. Ein Überschreiten dieser optimalen Betriebstemperatur verringert die Lebensdauer der Zelle und führt im schlimmsten Fall zu ihrer Zerstörung. Motoren und Umrichter weisen deutlich höhere Temperaturniveaus von bis zu 100 °C auf. Folglich müssen beim Package separate Kühlkreisläufe eventuell mit eigenen Radiatoren vorgesehen werden. Pumpen und Steuerelektronik für den Kühlkreislauf erhöhen das Fahrzeuggewicht und reduzieren die elektrische Leistung des Gesamtfahrzeugs.²⁰

Ein Vorteil der zentralen Anordnung des Energiespeichers und der Hochvoltkomponenten ist die daraus resultierende Flexibilität der Antriebstopologie. Die derzeit häufigste Topologie stellt eine Zentralmaschine mit Reduktionsgetriebe und mechanischem Differenzial im Front- beziehungsweise Heckantrieb dar. Fahrdynamisch weist der Heckantrieb Vorteile gegenüber dem Frontantrieb auf, hat aber meistens einen kleineren Kofferraum zur Folge. Bei einer Zentralmaschine muss der erhöhte Bauraumbedarf durch das Differenzialgetriebe berücksichtigt werden. Radnahe Motoren und insbesondere Radnabenmotoren bieten durch ihre dezentrale Trennung mehr konstruktive Freiheiten als Zentralmotoren und vereinfachen dadurch das Package-Konzept. Eine vollständige Integration des Motors in das Rad als Radnabenantrieb maximiert die Packaging-Freiheiten.

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs bringt neben einer Vielzahl von Assistenzsystemen neue Steuer- und Leistungselektronik in das Fahrzeug. Diese Peripherie ist bei der Auslegung des Packages zu berücksichtigen. Steuergeräte, Sensorik, Aktorik und Thermomanagement müssen im Fahrzeug platziert und möglichst leicht, sicher, kostengünstig sowie produktions- und wartungsfreundlich angeordnet werden. Kurze Kabelwege verringern das Gewicht und erleichtern die Produktion. Elektromagnetische Verträglichkeit muss für jede Kommunikations- und Hochvoltleitung sichergestellt werden.

5.3 Body für Elektrofahrzeuge

Die Fahrzeugkarosserie bildet als größte funktionale und organisatorische Systemeinheit ein zentrales Kompetenzfeld der OEMs. Für den Fahrzeugproduzenten stellt der Karosserierohbau eine hohe Kernkompetenz sowohl in der Produktentwicklung als auch in der Fertigung dar. Innovative Karosseriebauweisen – etwa aufgrund eines neuen Fahrzeugkonzepts oder neuer Anforderungen – bedeuten für den OEM gleichzeitig auch die intensive Auseinandersetzung mit Kompetenzfokussierung und Wertschöpfungsverlagerungen. Für ein neues Großserienfahrzeugmodell sind teilgebundene Investitionen zur Fertigung der einzelnen Karosserieblechpressteile mit mehr als 300 Mio. € nicht unüblich. Selbst neue Fahrzeugkarosserien mit hohen Übernahmeanteilen aus bereits existierenden Fahrzeugmodellen fordern Werkzeuginvestitionen von mindestens 10 % einer kompletten Neuentwicklung. Auch für klassische Kleinserienkarosserien von bis zu 10.000 Fahrzeu-

²⁰Vgl. Wawzyniak et al. 2017.

gen pro Jahr in entsprechender profilastiger Aluminiumbauweise fallen teilgebundene Investitionen von fünf bis 20 Mio. € an.²¹ Für einen OEM bildet die Karosserie eines neuen Fahrzeugmodells somit eine wesentliche Säule der Kapitalbindung.

Eine konventionelle Karosserie interagiert maßgeblich mit dem Fahrzeug- und Kundennutzungskonzept, dem Fahrzeugdesign und der Produktionsstrategie. Das Karosseriekonzept reagiert mit seinen Funktionseigenschaften auf die Fahrzeughauptattribute und wird auf Basis einer Vielzahl von geometrischen, mechanischen und elektrischen Anforderungsprofilen entwickelt. Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs führt zu einer Reihe neuer Bedarfe an die Fahrzeugkarosserie elektrisch angetriebener Fahrzeuge, die teilweise in Konflikt zueinander stehen. Ein effizienter Leichtbau ist von großer Bedeutung, um die im Vergleich zu herkömmlichen Kraftstoffen geringere Energiedichte von Batterien auszugleichen. Ebenso muss die aktive und passive Sicherheit von Fahrzeuginsassen und elektrischem Antriebsstrang zu jedem Zeitpunkt gewährleistet sein. Insbesondere die Energiespeicher – etwa eine Lithium-Ionen-Batterie oder ein Wasserstoff-Druckgasspeicher – sind sicherheitskritische Bauteile und müssen mit einer ausreichenden Crash-Struktur mit Deformationselementen gesichert sein. Auslegungs-Crash ist dabei meist der Pfahlaufprall. Die Bedienung und Ergonomie sowie die Akustik, Vibrationen und die Klimatisierung tragen zu den Komfortmerkmalen einer Karosserie bei und sind wie das Fahrzeug- und Karosseriedesign ein wichtiges Kaufkriterium. Karosserien für elektrisch angetriebene Fahrzeuge müssen ausreichend Kühlmöglichkeiten für das komplexe Thermomanagement bieten. Außerdem müssen die Produktions- und Materialkosten gering gehalten werden und für größere Serien ist ein hoher Automatisierungsgrad anzustreben.

5.3.1 Eigenschaftsmanagement von Elektrofahrzeugkarosserien

Die ersten Automobilkarosserien wurden an einem Rahmengestell befestigt, da das Fahrgestell stabil, einfach zu fertigen und als Basis für weitere Karosseriebauteile verwendet werden konnte. Diese Bauweise ist heute hauptsächlich bei Lastkraftwagen üblich, da ein Fahrgestell mit verschiedenen Aufbauten versehen werden kann. Im Personenkraftfahrzeugbereich ist diese Rahmenbauweise in den 1950er-Jahren durch die selbsttragende Karosserie abgelöst worden. Die selbsttragende Karosserie, auch „Monocoque“ genannt, bildet die Aufnahme für die wichtigsten Aggregate im (Elektro-) Fahrzeug. Fahrzeugkarosserien müssen eine Vielzahl von teilweise in Konflikt zueinander stehenden Eigenschaften – etwa effizienten Leichtbau gegenüber effektivem Insassen- und Fußgängerschutz – miteinander in Einklang bringen.²²

Dies wird durch das sogenannte **Eigenschaftsmanagement** zu Beginn der Entwicklungsphase erreicht. Die Fahrzeugkarosserie interagiert in sehr hohem Maße mit einer

²¹ Vgl. Kampker et al. 2018.

²² Vgl. Bubb et al. 2016, S. 576.

Reihe von Komponenten, Produktions- und Design-Ansätzen sowie insbesondere den Kundenwünschen. Aus diesem Grund ist die Karosserieentwicklung neben der Fahrdynamikauslegung eine Kernkompetenz von Fahrzeugherstellern. Elektrisch angetriebene Fahrzeuge stellen einerseits zusätzliche (elektrische) Anforderungen an die Karosserieeigenschaften – beispielsweise jederzeit gewährleistete elektrische Sicherheit. Andererseits erhöhen sie das Konfliktpotenzial klassischer Eigenschaften wie hoher Crash-Sicherheit mit einer großen Deformationszone gegenüber notwendigem Leichtbau, um kundenge wünschte Effizienz und Reichweiten zu realisieren. Neue Materialien wie faserverstärkte Kunststoffe müssen verarbeitet werden, ohne die Herstellbarkeit, Wartbarkeit und Automatisierbarkeit zu reduzieren. Weitere kundenrelevante Anforderungen spiegeln sich in den Akustik- und Komforteigenschaften wider. Außerdem müssen produktionsspezifische Kriterien der Karosserie erfüllt werden – zum Beispiel eine einfache Zusammenbauweise, um Fehler zu vermeiden. Gute Zugänglichkeit und Automatisierbarkeit bei gleichzeitig hoher Prozessgüte stellen OEMs vor immer neue Herausforderungen. Synergieeffekte mit bestehenden Fertigungslinien durch eine geringe Teilevielfalt müssen genutzt werden, um die Gesamtkosten niedrig zu halten. Zentrale Aufgabe des Eigenschaftsmanagements ist es, diese Vielzahl teils komplementärer Anforderungen zu gewichten und ein optimales Verhältnis dieser Eigenschaften zu erzeugen.²³

Die technischen Eigenschaften werden in der Praxis oft mittels einer Fahrzeug(-karosserie)-Interaktionsmatrix visualisiert (vgl. Abb. 5.7). Dabei werden Fahrzeugeigenschaften gegenüber allen Kriterien aufgetragen und Haupt-, Neben- sowie geringe Einflüsse kenntlich gemacht. Das Management kundenspezifischer Eigenschaften wird häufig mit dem „Quality Function Deployment“ oder einem Morphologischen Kasten dargestellt und mit den technischen Eigenschaften der Karosserieinteraktionsmatrix abgestimmt.²⁴

Elektrisch angetriebene Fahrzeuge haben in ihren Leistungskriterien einen anderen Fokus als konventionelle Fahrzeuge. Leichtbau, hohe Sicherheit und verbesserte Brems- und Rekuperationssysteme werden im Zuge des höheren Fahrzeuggewichts zunehmend relevanter. Hohe Effizienz und Reichweiten können nur durch eine ausgewogene Kombination der Fahrzeugeigenschaften wie Leichtbau und Rekuperation erzielt werden. Ein genau abgestimmtes Management dieser Leistungsmerkmale ist von außerordentlicher Bedeutung, da das optimale Vorhandensein einer Eigenschaft unter Vernachlässigung anderer Kriterien nicht zum bestmöglichen Produkt führt. Rekuperation ersetzt keineswegs effizienten Leichtbau, da nur ein kleiner Teil der Bremsenergie rekuperiert werden kann. Thermische und mechanische Verluste limitieren die Rekuperationsrate. Je schwerer das Fahrzeug, desto mehr Energie muss für seine Beschleunigung aufgewendet werden. Im Gegensatz dazu liegt die Reichweitenerhöhung durch die Rekuperation bei 10 bis 15 %. Aufgrund zahlreicher Verluste beträgt der Kettenwirkungsgrad (Rad bis Batterie) in der Regel weniger als 50 %.²⁵ Sowohl Simulationen als auch Tests haben gezeigt, dass das Gewicht und die

²³ Vgl. Khuntia 2017; Vgl. Bubb et al. 2016, S. 576f.

²⁴ Vgl. Falah et al. 2020.

²⁵ Vgl. Doppelbauer 2020, S. 107.

		Mechanische Leistungskriterien					Geometrische Leistungskriterien			Elektrische Leistungskriterien			
		Deformationsverhalten	Schwingungsverhalten	Statische Steifigkeiten	Zeit- und Betriebsfestigkeit	Schallübertragung	Package	Anströmverhalten	Fahrzeugaufbauform	Elektromagnetische Verträglichkeit	Erdung & elektrische Sicherheit	Batteriegröße & Reichweite	Kapazität für Nebenaggregate
Fahrzeughaupteigenschaften													
Fahrverhalten													
Sicherheit	Passiv (crash)												
	aktiv												
Komfort	Bedienung/ Ergonomie												
	Akustik												
	Vibrationen												
	Sitzkomfort												
	Klimatisierung												
	Infotainment												
Haltbarkeit													
Wassermanagement													
Design													
Aerodynamik													
Qualität													

Haupt- einfluss	Neben- einfluss
--------------------	--------------------

Abb. 5.7 Fahrzeuginteraktionsmatrix (in Anlehnung an Kampker et al. (2018)). (Vgl. Kampker et al. 2018)

Batteriegröße den Haupteinfluss auf die Reichweite von Elektrofahrzeugen haben. Dem Fahrstil – und damit der Rekuperation – wird ebenfalls ein signifikanter Einfluss zugesprochen, obgleich Segeln hier einen größeren Effekt hat als Rekuperation.^{26,27}

Die Möglichkeiten des Eigenschaftsmanagements sind von dem gewählten Fahrzeugdesign-Ansatz und den damit verbundenen Freiheitsgraden abhängig. Bei im „Conversion Design“ umgewidmeten Fahrzeugen ist die Vielfalt teilweise konkurrierender Eigenschaften eher begrenzt und durch die starren Vorgaben eingeschränkt. Während das „Conversion Design“ zunehmend vom „Purpose Design“ oder „Inline Design“ abgelöst wird, wobei die Konstruktion eines Fahrzeugs sowohl einen Verbrennungsmotor als auch einen Elektromotor vorsieht, entwickeln sich auch der Karosseriebau und die damit verbundenen Leistungskriterien elektrisch angetriebener Fahrzeuge aus dem modernen Fahrzeugbau.²⁸

5.3.2 Evolution aus dem modernen Fahrzeugbau

In der Elektromobilproduktion stellen die Kosten einen noch wesentlicheren Faktor dar als bei klassisch angetriebenen Fahrzeugen. Maßgeblich für die Produktionskosten pro Fahrzeug ist die Größe der Produktionsserie. Diese wird wiederum massiv durch den erwarteten Absatz bestimmt. Genaue Absatzprognosen für elektrisch angetriebene Pkw-Modelle sind aktuell noch schwierig zu treffen. Der Grund liegt in zahlreichen Unsicherheitsfaktoren, unter anderem in der Kundenakzeptanz infolge von Strom- und Kraftstoffpreisen oder staatlichen Prämien.²⁹

Schwierige Absatzprognosen haben bisher dazu geführt, dass elektrisch angetriebene Pkw in kleineren Produktionsgrößen im „Conversion Design“ hergestellt wurden, um Entwicklungskosten zu sparen. Folglich orientierten sich „Conversion-Design“-Elektrofahrzeuge bislang an klassischen Karosseriebauweise- und Werkstoffen. Dadurch nutzen viele Fahrzeughersteller die vorhandene selbsttragende Stahlkarosserie oder die Aluminium-Space-Frame-Bauweise, die auch bei herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor zum Einsatz kommen. Darüber hinaus gewinnen Hybridbauweisen aus Stahl, Aluminium und faserverstärkten Kunststoffen eine immer größere Bedeutung im Karosseriebau. Faserverstärkte Kunststoffe haben sich in den vergangenen Jahren von einem exklusiven Material aus dem Motorsport und Flugzeugbau zu einem gängigen Material für elektrisch und konventionell angetriebene Pkw entwickelt, da die Eigenschaften der Stabilität und der Leichtigkeit sich in moderne Fahrzeuge gut integrieren lassen. Die hohen Kosten und die geringe Automatisierbarkeit der Fertigung bremsen indes den Durchbruch am Fahrzeugmarkt.³⁰

²⁶ Vgl. Mruzek et al. 2016.

²⁷ Vgl. Gennaro et al. 2014.

²⁸ Vgl. Röth und Kampker 2018, S. 281ff.

²⁹ Vgl. Hagedorn et al. 2019, S. 117.

³⁰ Vgl. Hagedorn et al. 2019, S. 117.

Neben neuen Materialien und Bauweisen hat sich mit dem Karosseriedesign-Ansatz auch die (Karosserie-) Produktion selbst verändert. Bei Fahrzeugen verschiedener OEMs lässt sich eine Evolution der Strategien zur Standardisierung und Nutzung von Synergieeffekten erkennen: Während Anfang der 1990er-Jahre ein Konzept mit einer Plattform pro Fahrzeugtyp genutzt wurde, entwickelte sich Anfang der 2000er eine Plattform- und Modulstrategie zur Synchronisierung wichtiger Basisfunktionen zwischen den Fahrzeugmodellen. Standardisierte Modulfamilien waren das Fahrwerk oder der Aufbau mit Karosserie und Ergonomie. An die Stelle der Plattform- und Modulfamilienstrategie trat 2012 der Modulare Querbaukasten (MQB) für Fahrzeuge mit quer positionierten Motoren. Neben „Purpose Design“-Modellen produzierten einige OEMs auch „Inline-Design“-Fahrzeuge nach dem modularen Baukastensystem. Mit Beginn der Serienfertigung von „Purpose-Design“-BEV wurde für diese Modelle aus dem MQB der „Modulare E-Antriebs-Baukasten“ (MEB).^{31,32}

Eine Evolution ist außer in der Modularisierungs- und Plattformstrategie auch in der Design-Strategie sichtbar. Wurden zu Beginn der Elektrifizierung Mitte der 2000er-Jahre Fahrzeuge vornehmlich im „Conversion Design“ umgewidmet, so werden aktuelle Modelle, dem Trend folgend, direkt mit elektrischem Antrieb ausgelegt. Abgasreduktionsvorgaben machen eine Konstruktion rein elektrischer Fahrzeuge („Purpose Design“) oder elektrischer Derivate („Inline Design“) von Pkw mit Verbrennungsmotor, Hybridantrieb oder „Range Extender“ unabdingbar und lösen das klassische „Conversion Design“ ab.

5.3.3 „Conversion Design“

Die Strategie des „Conversion Design“ besteht darin, eine bestehende Produktvariante mit wenigen Änderungen in eine andere Variante zu überführen. Diese Methode kommt bei der Umrüstung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor auf Fahrzeuge mit Elektroantrieb zum Einsatz. Dabei werden sämtliche Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs in eine bestehende Fahrzeugkarosserie integriert.

An der Position von Kraftstofftank und Verbrennungsmotor werden Batterien, Elektromotoren und Leistungselektronik verbaut. Die bestehende Karosserie ist nicht an die besonderen Anforderungen eines elektrischen Antriebssystems angepasst, so dass wichtige Freiheitsgrade ungenutzt bleiben und das Produkt großes Optimierungspotenzial birgt. Beispiele dafür bilden der Fahrzeugtunnel und das Batterie-Package, das den zur Verfügung stehenden Bauraum nicht optimal ausnutzt, da sich die Geometrie von Kraftstofftank und Abgasanlage von derjenigen einer Batterieanordnung stark unterscheidet. Dezentrale und verteilte Batterieanordnungen beeinflussen sowohl die Fahrzeugstruktur als auch die auf Energiedichte optimierte Batterieanordnung negativ, ebenso wie das geometrisch und

³¹ Vgl. VW 2017.

³² Vgl. VW 2020.

materialtechnisch ungenutzte Leichtbaupotenzial. Außerdem muss die Karosserie – wegen der Erhöhung des Fahrzeuggewichts durch die elektrischen Komponenten – teilweise strukturell verstärkt werden, um eine hohe Sicherheit zu gewährleisten. Der Wegfall von Verbrennungsmotor und Getriebe verringert ebenfalls die Karosseriefestigkeit, so dass hier Verstärkungen erforderlich werden.³³

Klassische Karosseriekonzepte des „Conversion Design“ bilden selbsttragende Stahlrahmen und Hybridstrukturen, die an sicherheitsrelevanten Stellen mit Stahl- oder Faserverbundgittern verstärkt wurden.³⁴

Die wesentlichen Vorteile des „Conversion Design“ liegen in der schnellen Markteinführung, den geringen Entwicklungskosten und einer besseren Einbindung in bestehende Produktionslinien. Durch „Conversion-Design“-Karosserien werden zudem Kundinnen und Kunden angesprochen, die sich eher für ein Fahrzeug mit herkömmlichem Antriebssystem entscheiden würden. Bei den Nutzenden sollen Assoziation mit Eigenschaften klassischer Verbrennungsmotoren geweckt werden, etwa eine hohe Leistung und Reichweite. Somit verzichtet das „Conversion Design“ gezielt auf Alleinstellungsmerkmale. Von verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen bekannte Merkmale werden übernommen und gegebenenfalls umfunktioniert, wie zum Beispiel die gleiche Position des Tankdeckels. Die Mobilitätswende erscheint weniger radikal, da bekannte (Karosserie-)Formen und Fahrzeugtypen weiterhin angeboten werden. Vor allem positive Effekte durch gleiche Teile führen dazu, dass immer mehr Fahrzeughersteller elektrisch angetriebene Derivate der herkömmlichen Fahrzeuge anbieten und den elektrifizierten Antriebsstrang direkt in der Konstruktionsphase mitberücksichtigen.³⁵

5.3.4 Karosserie von „Inline-Design“-Elektrofahrzeugen

Die Entwicklung von Fahrzeugen im „Purpose Design“ birgt aktuell noch große Risiken: Hohe Entwicklungskosten sowie schwierig vorhersehbare Kundenpräferenzen und Verkaufszahlen haben in der Vergangenheit zu zahlreichen Problemen verschiedener OEMs geführt. Fällt beispielsweise die Nachfrage eines im „Purpose Design“ entwickelten Fahrzeugs deutlich geringer aus als vom Hersteller erwartet, können vorerst keine direkten Nachfolgemodelle angekündigt werden. Stattdessen wird das Fahrzeug abgewandelt und umkonstruiert. Dieses Modell ist ein „Inline-Design“-Fahrzeug, das verschiedene Antriebstopologien ermöglicht.³⁶

Beim „Inline-Design“-Ansatz werden direkt bei der Konstruktion sowohl ein rein elektrisches Fahrzeug als auch ein Verbrenner- oder Brennstoffzellenderivat mitberücksichtigt. Die Karosserie wird dementsprechend flexibel auf alle Antriebstopologien ausgelegt, so

³³Vgl. Golombek et al. 2020, S. 37.

³⁴Vgl. Kampker et al. 2019.

³⁵Vgl. Steiner 2021, S. 387f.

³⁶Vgl. Golombek et al. 2020, S. 57.

dass sie für das jeweilige Derivat kostengünstig angepasst werden kann. Da alle Antriebsbaukästen berücksichtigt werden müssen, nutzt auch das „Inline Design“ nicht alle Freiheitsgrade eines Elektroantriebs optimal aus.³⁷

5.3.5 Karosserie von „Purpose-Design“-Elektrofahrzeugen

Das „Purpose Design“ beschreibt eine auf den Anwendungsfall angepasste Auslegung. Auf die Karosserie des Fahrzeugs bezogen, bedeutet das eine gänzlich neue Auslegung. Gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor unterscheidet sich der Bauraum des Antriebsstrangs enorm. Außerdem müssen wegen der geringen Energiedichten der Batterien deutlich mehr konstruktive Maßnahmen umgesetzt werden, um vergleichbare Reichweiten zu ermöglichen. Dies bedeutet starke Eingriffe in die Karosserie und entsprechende Anpassungen derselben. Insbesondere für höhere Reichweiten wird der Leichtbau fokussiert sowie der Luftwiderstand verringert. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wird im „Purpose-Design“-Karosseriebau auf Space Frame oder Monocoques aus Stahl oder Aluminium zurückgegriffen, während kritische Stellen durch einen Stoßgürtel oder Aluminiumrahmen verstärkt werden. Ein Vorteil dieser Aufbauform liegt in der optimalen Anpassung der Karosserie an die Erfordernisse einer elektrischen Antriebstopologie. „Purpose-Design“-Karosserien verwenden eine profil- und baukastenartige Bauweise, was vor allem die automatisierte Fertigung und Wartbarkeit unterstützt. Außerdem können bereits im Konstruktionsprozess notwendige Karosserieversteifungen infolge des höheren Fahrzeuggewichts und des Fehlens des Verbrennungsmotors berücksichtigt werden, der einen hohen Anteil der Energie im Frontalcrash aufnimmt.

Ein reines „Purpose-Design“-Konzept führt zu einer vereinfachten Produktion und zu einer besseren Organisation im Vergleich zu „Inline-Design“-Fahrzeugen. Geringerer Teileaufwand und vereinfachte Prozessschritte reduzieren bei elektrisch angetriebenen Pkw den Fertigungsaufwand. Ein „Purpose Design“ mit eigener Produktionslinie lohnt sich jedoch nur bei hohen Stückzahlen.^{38,39}

5.3.6 Karosseriestrukturkonzept in Abhängigkeit vom mechanischen Package

Der wesentliche Vorteil des „Purpose Design“ wird an kaum einer Fahrzeugkomponente so deutlich wie anhand der Karosserie. Das Konzept der Karosseriestruktur wird maßgeblich durch die Topologie des elektrischen Antriebsstrangs mitbestimmt. Je nach Fahrzeugtyp sowie benötigter Batteriekapazität und -größe haben sich verschiedene Packaging- und

³⁷Vgl. Röth und Kampker 2018, S. 285.

³⁸Vgl. Golombek et al. 2020, S. 58.

³⁹Vgl. Kampker et al. 2019, S. 2.

Karosseriestrukturkonzepte etabliert. Die Batterieposition korreliert in hohem Maße mit der Fahrzeugklasse, dem Fahrzeuglayout und der Ergonomie und bildet damit einen großen Einflussfaktor für die Karosserie. Die Anforderungen an die Fahrzeugsicherheit schränken das Batterie-Package ein. Gegenüber der verteilten Anordnung im „Conversion Design“ wird im „Purpose Design“ daher auf eine zentrale Anordnung in der Bodengruppe geachtet. Sie stellt das am stärksten von dieser Entwicklung betroffene Bauteil dar, weil dort die Hochvoltbatterie verbaut wird, um einen niedrigen Schwerpunkt zu erreichen. Anders als beim „Conversion Design“ können hier jedoch die Anforderungen an die Batteriegröße und die Position durch eine Anpassung der Karosseriestruktur sowie vieler anderer Fahrzeugelemente – beispielsweise eine höherliegende zweite Sitzreihe – umgesetzt werden. Während der Konzeptbildung der Fahrzeugkarosserie müssen folglich stets die Batterieposition und die Topologie berücksichtigt werden. Das Fehlen von Längsträgern und klassischen Fahrzeugkomponenten wie dem Verbrennungsmotor verringert die Karosseriesteifigkeit und muss durch Verstärkungen, steifere Materialien oder Sicherheitsstrukturen wie zusätzliche Rahmen aus hochfesten Stählen, Aluminium oder Faserverbundstrukturen ausgeglichen werden.^{40,41,42}

5.3.7 Karosseriebaukasten für Elektrofahrzeuge: Ein Blick in die Zukunft

Die Entwicklung neuartiger Karosserien erfolgt nach einem Drei-Disziplinen-System, das aus den Konzepten „Bauweise“, „Werkstoffe“ und „Produktion“ besteht. Innerhalb der jeweiligen Disziplin entwickeln sich verschiedene Grade der Modularisierung und Vereinheitlichung. Dies wird als „Baukastensystem“ bezeichnet.⁴³

Erhöhte Herstellungskosten für elektrisch angetriebene Fahrzeuge erfordern eine wirtschaftlichere Produktion, um dem Nutzenden ein erschwingliches und hochwertiges Produkt anbieten zu können. Aus diesem Grund verwenden viele Fahrzeughersteller ein teilweise markenübergreifendes Baukastenprinzip. Der Baukasten zeichnet sich durch ein hohes Maß an Gleichteilen und damit verbundenen Synergieeffekten aus, wodurch die Kosten für Entwicklung, Produktion und Einzelteile sinken.⁴⁴ Weitere wesentliche Eigenschaften sind die Skalierbarkeit auf verschiedene Fahrzeugklassen bei konstant hoher Design-Freiheit, vergleichsweise kurzen Entwicklungs- und Produktionszeiten, ein verstärkter Fokus auf Leichtbau und die Absicherung der Funktionalität, insbesondere der Fahrzeugsicherheit.⁴⁵

⁴⁰ Vgl. Wienkötter 2019b.

⁴¹ Vgl. Fuchs und Lienkamp 2013, S. 168.

⁴² Vgl. Seiffert und Pischinger 2021, 135ff.

⁴³ Vgl. Röth 2018, S. 198.

⁴⁴ Vgl. Wendekamm 2017, S. 65.

⁴⁵ Vgl. Röth und Kampker 2018, S. 292.

Flexibilität

Ein moderner Karosseriebau benötigt eine zunehmende Flexibilisierung der grundsätzlichen Fähigkeiten, ohne dabei Wirtschaftlichkeit, Qualität und Nutzungsgrad zu beeinträchtigen.⁴⁶

- Produktflexibilität
Herstellbarkeit verschiedener Derivate
- Wandlungsfähigkeit
Adaption von Prozessänderungen
- Integrationsfähigkeit
Kombinierbarkeit von Derivaten und Erweiterung einer bestehenden Anlage
- Nachfolgefähigkeit
Eingliederung von Nachfolgemodellen und -technologien
- Anpassungsfähigkeit
Skalierbarkeit der Stückzahlen

Kurze Modellwechselzyklen und zunehmende Modellvielfalt erfordern vielseitigere Anlagen und Plattformen, so dass Baukastenprinzipien an Bedeutung gewinnen. Zunehmend dynamische Marktanforderungen machen eine Flexibilisierung sowohl von Hardware als auch von Software notwendig. Im Zusammenhang mit Abläufen der „Industrie 4.0“ und ausgereiften Datenbanken wird es möglich, aus einem Baukasten verschiedene Derivate und Fahrzeugklassen auf einer Karosseriefertigungsanlage herzustellen. Die Einführung sowie Stückzahlskalierung neuer Modelle gelingt schneller und ermöglicht eine kostengünstigere Produktion und Entwicklung.⁴⁷

Boxenstopffertigung und Schwarmmontage

Zusätzlich zu Baukasten- und Plattformstrategien lässt sich eine verbesserte Integrationsfähigkeit verschiedener Modelle und Derivate durch die sogenannte Boxenstopffertigung realisieren. Eine modulare Boxenstopffertigung bricht mit der starren, eindimensionalen Linienfertigung. Die einzelnen Produktionsstationen werden nicht alle gleichsam durchlaufen, sondern nach Auslastung, technischer und logistischer Verfügbarkeit sowie technischer Notwendigkeit – zum Beispiel von Fügeverfahren – zugeordnet. Eine Kombination aus Linien- und Inselfertigung ermöglicht eine flächenoptimierte Anordnung und Ansteuerung der Modulzellen.^{48,49}

Auch bei der Fahrzeug- und Karosseriemontage haben sich kombinierte Ansätze aus Fließfertigung und Inselfertigung etabliert. Diese Schwarmmontage eignet sich insbeson-

⁴⁶Vgl. Cüppers 2018, S. 2.

⁴⁷Vgl. Schieck et al. 2016, S. 2; Vgl. Cüppers 2018.

⁴⁸Vgl. Cüppers 2018.

⁴⁹Vgl. Cüppers 2021.

dere für Elektrofahrzeuge, die sich durch eine hohe technische Diversifizierung und viele Derivate auszeichnen, weil die Flexibilität und Ausnutzung der Taktzeiten einer Fertigungsanlage besser realisiert werden.

Werkstoffe

Die Leichtbauanforderungen an moderne Fahrzeuge erfordern eine Diversifikation der verbauten Werkstoffe. Der Anteil höchst- und ultrahochfester Stähle nimmt bei modernen Fahrzeugen stetig zu bei geringer werdendem Gesamtanteil von Stahl im Fahrzeug.⁵⁰ Neben Stahl kommen vor allem Nichteisenmetalle wie Aluminium und Magnesium sowie Kunststoffe beziehungsweise Kunststoff-Verbunde zum Einsatz. Die Vielzahl von Materialien unterschiedlicher Eigenschaften muss von der Bauteil- und Komponentenentwicklung bis hin zur Prozess-, Füge- und Montagetechnik stets bedacht werden. Dies bildet zusätzlich zur Modularisierung durch Baukästenprinzipien und Plattformstrategien sowie zur Flexibilisierung der Fertigungskapazitäten eine wesentliche Herausforderung des modernen Karosseriebaus.⁵¹

Karosseriebaukasten „FlexBody“

In den Studien von Röth und Göer (2011)⁵² sowie von Kern et al. (2009)⁵³ wurde der Karosseriebaukasten „FlexBody“ für Kleinserienproduktionsgrößen vorgestellt. Zu den wesentlichen Merkmalen dieses Baukastens zählen die Anwendbarkeit auf verschiedene Fahrzeugklassen, ohne die Design-Freiheit einzuschränken, eine kurze Entwicklungs- und Produktionszeit, die Erfüllung moderner Leichtbauanforderungen sowie die funktionale Absicherung insbesondere von Sicherheitsanforderungen. Mit dem Baukasten können unterschiedliche Strukturverläufe in Rahmenbauweisen umgesetzt werden. Beim „FlexBody“ wird die Karosserietragstruktur mit Profilen und konzeptgleichen Knotenstrukturen abgebildet. Die Knoten werden in sogenannte Zwei-Arm-, Drei-Arm- oder Vier-Arm-Knoten unterteilt. Die Profile und Knoten werden, in Abhängigkeit von der Werkstoffkombination, abschließend mittels kalter oder warmer Fügeverfahren zur fertigen Karosserie assembliert (vgl. Abb. 5.8).⁵⁴

Die Querschnitte der Profile werden den jeweiligen Anforderungen entsprechend dimensioniert. Spezielle Verfahren zur Gestaltung komplexer Profilformen kommen in bestimmten Bereichen zum Einsatz. Die Knotenstrukturen sorgen für eine sichere Lastübertragung an den Verbindungsstellen und gleichen die unterschiedlichen Querschnittsabmessungen der Profile aus. Der modulare Aufbau des Karosseriebaukastens erlaubt eine

⁵⁰ Vgl. Stefan Pischinger 2016, S. 808.

⁵¹ Vgl. Schieck et al. 2016.

⁵² Vgl. Röth und Göer 2011.

⁵³ Vgl. Kern D. et al. 2009.

⁵⁴ Vgl. Röth 2018.



Abb. 5.8 Profile und Knotenstrukturen im „FlexBody“-Karosseriebaukasten

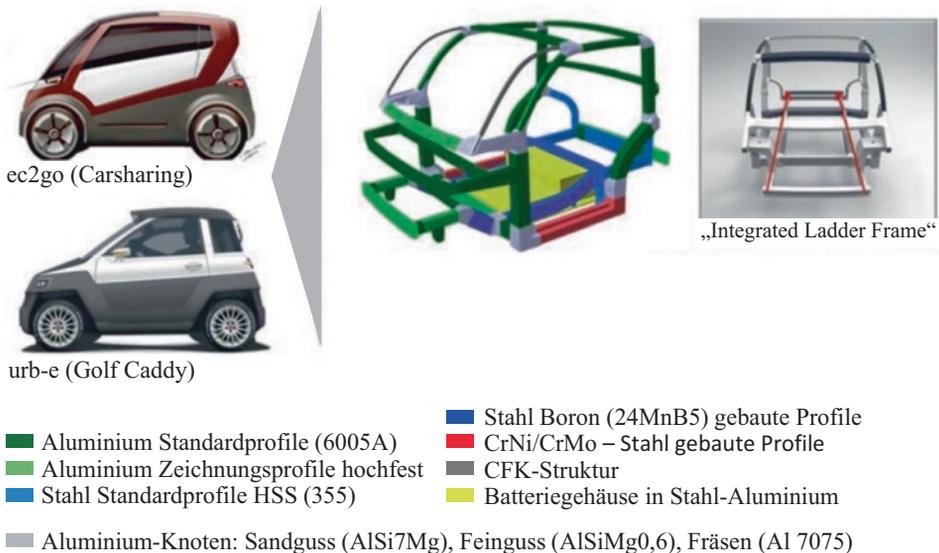


Abb. 5.9 Strukturlayout mit Karosseriebaukasten für die urbanen Stadtfahrzeuge „urb-e“ und „ec2go“

Kombination unterschiedlicher Materialien wie Stahl, Aluminium, GFK/CFK sowie Strukturschäume (vgl. Abb. 5.9 und 5.10).

Durch den Einsatz des „richtigen Materials an der richtigen Stelle“ ist gezielter, wirtschaftlicher Leichtbau möglich. Auf diese Weise wird das Fahrzeuggewicht insgesamt reduziert und durch gezielten Leichtbau Einfluss auf die Gewichtsverteilung genommen. Um einen solchen Materialmix für eine Kleinserie zu ermöglichen, werden nur solche Fertigungsverfahren im Karosseriebaukasten zugelassen, die in Abhängigkeit von der geplanten Stückzahl sehr geringe bis niedrige Werkzeuginvestitionen erfordern. Für eine sichere Verbindung von Bauteilen aus unterschiedlichen Materialien sorgt neben den klassischen Verbindungstechniken ein neues Fügeverfahren: das Injektionskleben. Damit

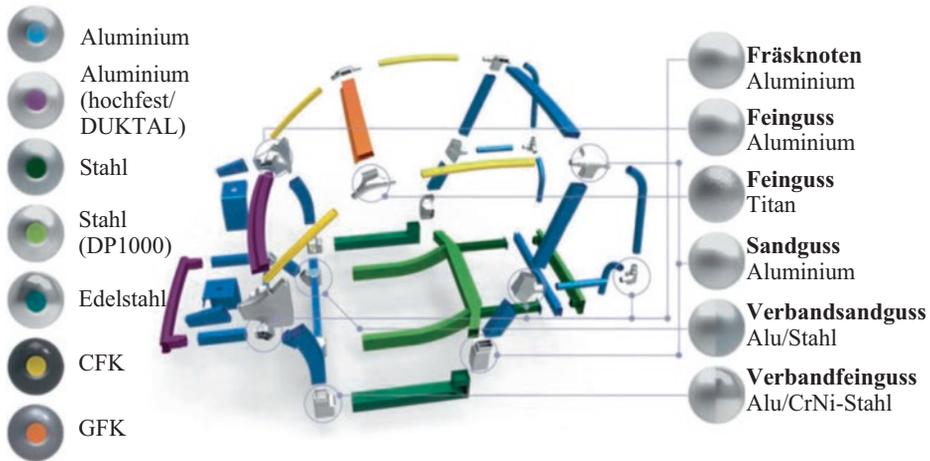


Abb. 5.10 Beispielhafte Material- und Fertigungsmischung beim „FlexBody“-Karosseriebaukasten

lassen sich über die verhältnismäßig dicke Klebeschicht die Bauteiltoleranzen bis zu zwei Millimeter ausgleichen.

Skalierbare Rahmenstruktur

Um ein hohes Maß an Skalierbarkeit zu gewährleisten, gehen die Entwicklungen hin zu Karosserieplattformen, die auf einer anpassbaren Rahmenstruktur basieren, wie beim „Benteler Electric Drive System“ (BEDS). Untersysteme werden – als Module zusammengefasst – in die Karosserierahmenplattform integriert. Das Werkstoffkonzept solcher Plattformensysteme besteht aus Aluminium für den Strukturrahmen (Flexframe), dem Batteriekasten und dem Crash-Management-System (CMS). Um eine an verschiedene Fahrzeugklassen angepasste Karosserie zu erreichen, bestehen wesentliche Komponenten aus Aluminium-Extrusionsprofilen. Dadurch kann eine individuelle Anpassung der gewünschten Karosseriebauform in Fahrzeuginnen- und -querrichtung vorgenommen werden. Hauptbestandteil dieser Karosserieplattform ist der Flexframe. Er setzt sich aus einem mehrteiligen Schweller, den Querträgern und Aluminium-Druckgussknoten zusammen. Der Schweller besteht aus einem duktilen äußeren, einem steifen inneren und einem weiteren Extrusionsprofil, das die Trennung zum Fahrzeugaufbau herstellt. Dies ermöglicht die Entwicklung des Designs und der Struktur des Karosserieaufbaus unabhängig vom Flexframe.⁵⁵

Innerhalb des Flexframes befindet sich der Batteriekasten, der die Zellmodule beherbergt und sie vor äußeren Einflüssen sowie mechanischer Beschädigung schützt. Er setzt sich aus einer äußeren und einer inneren Crash-Struktur sowie einem Aluminium-Blechschaalen-Unterboden mit integriertem Kühlsystem zusammen. Der Batteriekasten

⁵⁵Vgl. Kollmeier et al. 2019, S. 16ff.

wird mit Schrauben am Schweller und an den Querträgern des Flexframes befestigt. Diese Verbindung bildet eine steife Struktur für optimales Deformationsverhalten beim Seitencrash.⁵⁶

5.4 Leichtbau

Leichtbau gilt als Treiber von Innovationen und wird im Sprachgebrauch hauptsächlich auf die Masse – also das Gewicht – bezogen. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts unternahmen Ingenieure aus dem Automobilbausektor immer größere Anstrengungen bei der Umsetzung von Leichtbaumaßnahmen. Antrieb war damals das Streben nach immer höheren Geschwindigkeiten, die durch eine geringere Masse begünstigt werden. Die Gewichtsreduktion wurde zu dieser Zeit vornehmlich durch Stoffleichtbau erreicht. Dabei bediente man sich zur Gewichtsreduzierung beispielsweise einer leichteren Legierung aus Aluminium zur Substitution von Stahl.⁵⁷ Zum anfänglichen Stoffleichtbau sind in den folgenden Jahren Form-, Bedingungs-, Konzept- (auch „Systemleichtbau“ genannt) und Fertigungsleichtbau hinzugekommen. Im Bereich der Elektromobilität haben sich zu den Potenzialen bei konventionellen Fahrzeugen weitere Leichtbauoptionen aufgetan.⁵⁸

Steigerung der Fahrdynamik und Senkung des Energieverbrauchs bilden bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen bis heute die zentralen Aspekte des Leichtbaus. Von einer Reduzierung des Energieverbrauchs profitieren beide Seiten: der Nutzende durch geringere Betriebskosten und der Hersteller durch einen geringeren Flotten-CO₂-Ausstoß. Die Steigerung der Fahrdynamik hingegen hat weder für Kundinnen und Kunden noch für den Hersteller einen direkten wirtschaftlichen Mehrwert.⁵⁹

Der Energieverbrauch und die Effizienz des Fahrzeugs sind maßgeblich von seinen Widerständen abhängig. Dabei werden einzelne Widerstände wiederum durch die Masse des Fahrzeugs bedingt. Die Widerstände des Fahrzeugs setzen sich aus dem Luft-, dem Roll-, dem Steigungs-, dem Beschleunigungs- und einem fahrzeugspezifischen inneren Widerstand zusammen. Der Gesamtfahrwiderstand ist dabei die Summe der Einzelwiderstände, die in Gl. (5.1)⁶⁰ mathematisch dargestellt sind:

$$F_{FW} = \frac{\rho}{2} * v^2 * c_w * A + f_{Roll} * m * g * \cos(\alpha) + m * g * \sin(\alpha) + m * a + F_{innen} \quad (5.1)$$

$$\text{Luftwiderstand} = \frac{\rho}{2} * v^2 * c_w * A$$

⁵⁶ Vgl. Kollmeier et al. 2019, S. 18.

⁵⁷ Vgl. Friedrich 2017, 3–4.

⁵⁸ Vgl. Friedrich 2017, S. 48f.

⁵⁹ Vgl. Eckstein et al. 2010, S. 789.

⁶⁰ Vgl. Aristoteles und Friedrich 2017, S. 34f.

$$\text{Rollwiderstand} = f_{\text{Roll}} * m * g * \cos(\alpha)$$

$$\text{Steigungswiderstand} = m * g * \sin(\alpha)$$

$$\text{Beschleunigungswiderstand} = m * a$$

$$\text{Innerer Widerstand} = F_{\text{innen}}$$

Im Folgenden werden lediglich der Luft-, der Roll- und der Beschleunigungswiderstand sowie der innere Widerstand betrachtet. Die wesentlichen Merkmale in Gl. (5.1) sind, dass der Roll-, der Steigungs- und der Beschleunigungswiderstand von der Masse des Fahrzeuges abhängig sind und der Luftwiderstand von der Geschwindigkeit im Quadrat.

In Abb. 5.11 sind die wesentlichen Fahrwiderstände in Bezug auf unterschiedliche Fahrsituationen zusammengetragen. Die zugrundeliegenden Daten beziehen sich auf ein Fahrzeug der Kompaktklasse und wurden im Realbetrieb aufgenommen.

Zu erkennen ist, dass im Stadtbetrieb der Beschleunigungs- und der Rollwiderstand dominieren. Beide sind proportional zur Masse des Fahrzeugs und unabhängig von der Geschwindigkeit. Daraus lässt sich ableiten, dass Leichtbau in der Stadt und auf Landstraßen einen höheren Einfluss auf den Energieverbrauch hat. Je höher die Fahrgeschwindigkeiten werden, desto dominanter wird der Luftwiderstand gegenüber dem Rollwiderstand. Dies ist beispielhaft zusätzlich in Abb. 5.12 detailliert dargestellt. Der Verlauf zeigt die beiden Widerstände in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Zu erkennen ist, dass bei einer

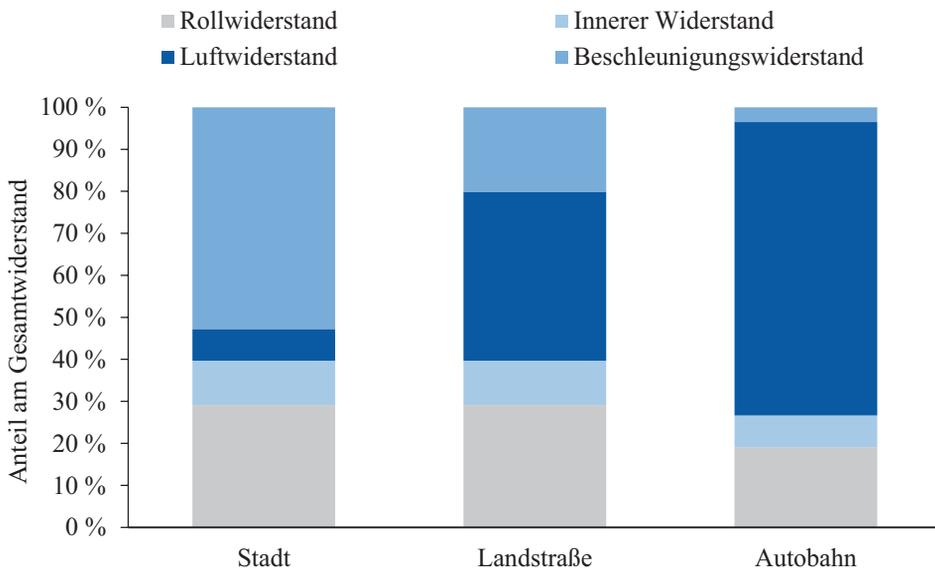


Abb. 5.11 Anteile am Gesamtwiderstand bei verschiedenen Fahrsituationen. (i. A. a. Aristoteles und Friedrich 2017, S. 36)

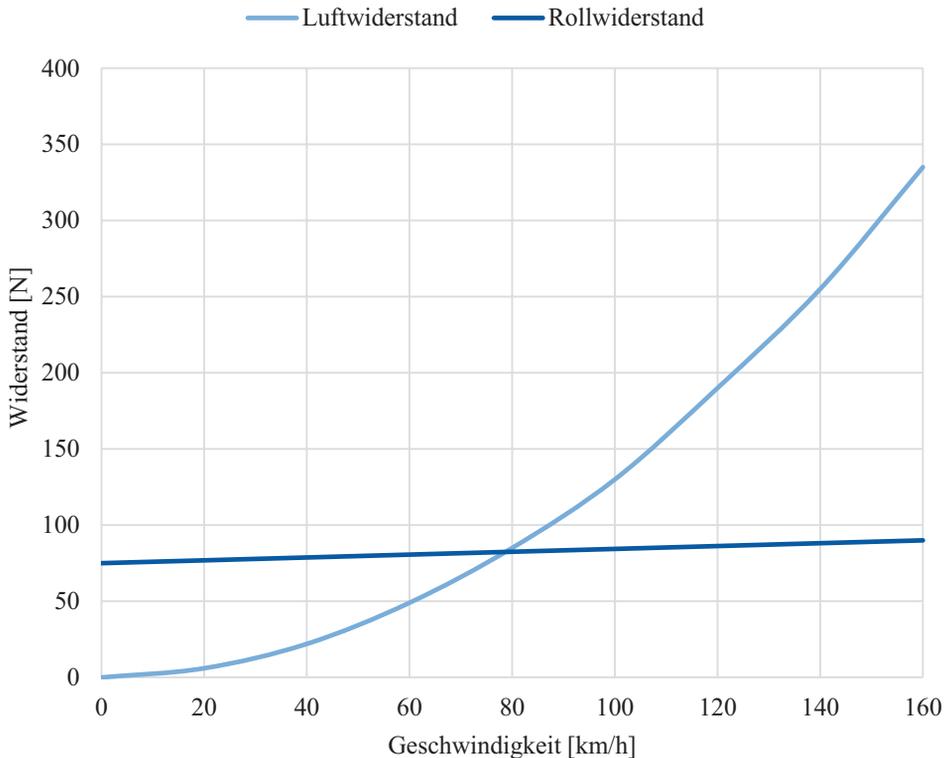


Abb. 5.12 Beispielhafte Darstellung des Luft- und Rollwiderstands. (i. A. a Aristoteles und Friedrich 2017, S. 35)

Geschwindigkeit von mehr als 80 km/h, wie es bei Autobahnfahrten der Fall ist, der Luftwiderstand überwiegt.

Eine Möglichkeit zur Reduktion des Luftwiderstands, der bei höheren Geschwindigkeiten bestimmend für den Energieverbrauch ist, stellen aerodynamische Maßnahmen dar. Die Dominanz des Luftwiderstands bei höheren Geschwindigkeiten ist hauptsächlich durch die Geschwindigkeit begründet, die quadratisch in den Widerstand eingeht. Weitere Einflüsse sind der Strömungswiderstandskoeffizient – auch als „ c_w -Wert“ bezeichnet – und die Stirnfläche A des Fahrzeugs (vgl. Gl. (5.1)). Als letzter Fahrwiderstand kommt der innere Widerstand der Mechanik hinzu. Dieser ist geschwindigkeitsunabhängig und macht nur einen geringeren Anteil am Gesamtwiderstand aus. Insgesamt kann eine Reduzierung der Masse und die Berücksichtigung der jeweiligen Fahrsituation zu einem geringeren Energiebedarf des Fahrzeugs führen.

Leichtbaumaßnahmen werden aufgrund der damit verbundenen Mehrkosten vorzugsweise zuerst in Oberklassefahrzeugen eingesetzt, da in diesem Segment die Zahlungsbereitschaft der Nutzenden höher ist. Durch einen hohen Verkaufspreis der Fahrzeuge lässt sich der Mehrpreis für den Leichtbau kompensieren.⁶¹ Abb. 5.13 zeigt beispielhaft die

⁶¹ Vgl. Eckstein et al. 2010, S. 790.

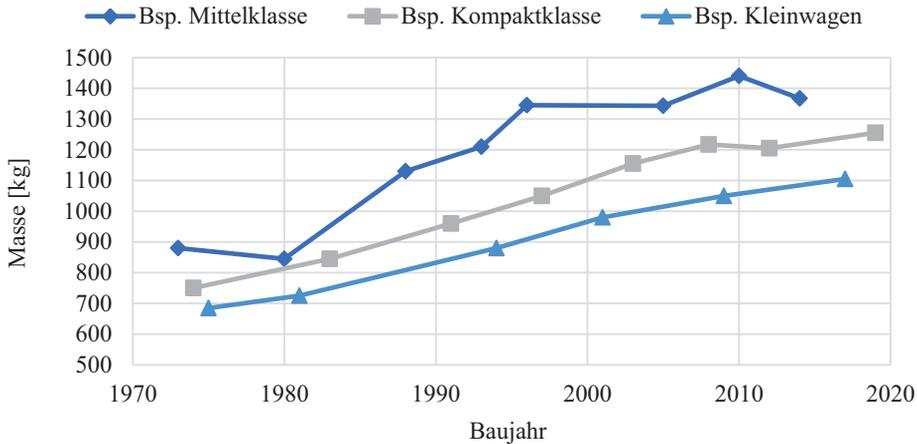


Abb. 5.13 Vergleich Leergewicht von Verbrennungsfahrzeugen unterschiedlicher Fahrzeugklassen. (i. A. a. Eckstein et al. 2010, S. 790)

Leergewichte von drei Verbrennungsfahrzeugen aus der Mittel-, der Kompakt- und der Kleinwagenklasse entlang der Generationen. Dass sich Leichtbaumaßnahmen und die damit zusammenhängende Zahlungsbereitschaft der Nutzenden in späteren Entwicklungsstadien auch in die Kompaktklasse ausgeweitet haben, zeigt der Verlauf aus Abb. 5.13. In der Kleinwagenklasse sind noch keine Leichtbaumaßnahmen im Verlauf der Generationen zu erkennen. Die Zunahme des Leergewichts ist den wachsenden Anforderungen an die Fahrzeuge geschuldet.

Dabei stieg das Gewicht durch Komfort- und Interieurfunktionen um 37 %, durch Qualität um 8 % und durch Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit um 30 %. Aufgrund legislativer Anforderungen stieg das Leergewicht in der Kompaktklasse um weitere 25 %.⁶² Durch die von gestiegenen Anforderungen verursachte Zunahme des Leergewichts der Fahrzeuge sind Leichtbaumaßnahmen erforderlich geworden, um den Energieverbrauch zu senken.

In Abb. 5.14 ist der Einfluss der gewachsenen Anforderungen und dessen Auswirkung auf das Leergewicht eines konventionell angetriebenen Fahrzeugs dargestellt.

Durch die gestiegenen Anforderungen an die Sicherheit, die Gesetzgebung und die dadurch bedingte Gewichtserhöhung muss die Motorleistung angepasst werden. Daraus folgt die Verstärkung von Fahrwerk und Antriebsstrang, was wiederum zu einer Gewichtszunahme führt. Dies hat dann Auswirkungen auf die Größe des Energiespeichers und dieser Umstand wiederum auf die Steifigkeit der Karosserie – aufgrund des gestiegenen Gesamtgewichts. Diese Gewichtsentwicklung wird auch als „Aufwärtsspirale“ bezeichnet.

In Abb. 5.15 sind die beiden Gewichtsspiralen dargestellt. In der Aufwärtsspirale bedingt eine schwerere Karosserie eine größere und somit schwerere Auslegung weiterer

⁶²Vgl. Goede et al. 2005, S. 3.

Abb. 5.14 Einfluss Gewichtserhöhung durch gewachsene Anforderungen (Aufwärtsspirale). (i. A. a. Eckstein et al. 2010, S. 789)

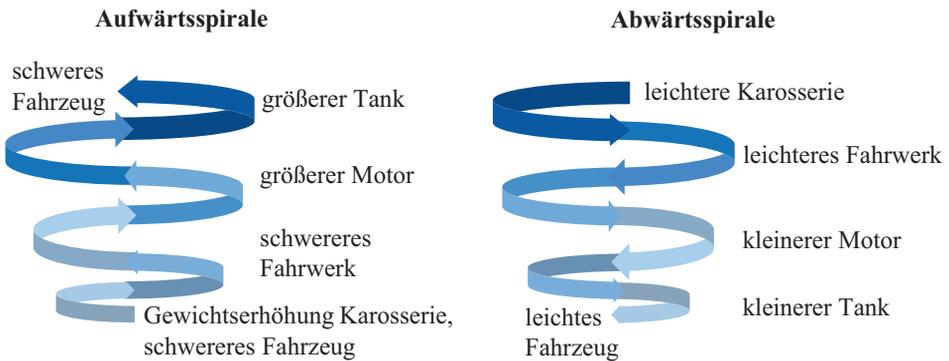
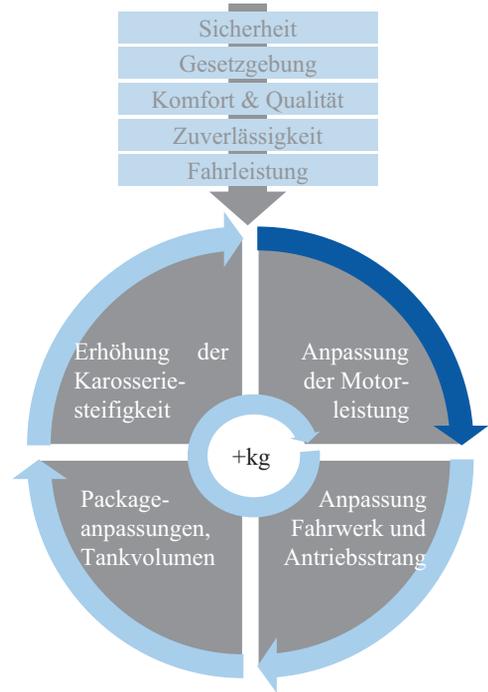


Abb. 5.15 Gewichtsspiralen. (i. A. a. Aristoteles und Friedrich 2017, S. 43)

Bauteile, die am Ende zwangsläufig zu einem höheren Fahrzeuggewicht führen, um die Bedürfnisse und Anforderungen der Nutzenden und der Gesetzgebung (vgl. Abb. 5.14) zu erfüllen.

Auf der rechten Seite in Abb. 5.15 bedingen eine leichtere Karosserie und kleinere Komponenten bei Motor und Fahrwerk ein insgesamt leichteres Fahrzeug.

Um das Fahrzeuggewicht zu reduzieren, wurden in den vergangenen Jahrzehnten zahlreiche Komponenten aus Materialien mit hohem spezifischem Gewicht durch leichtere

ersetzt. Beispielsweise wurde im Jahr 2016 der erste Vollaluminiummotor vorgestellt, der mit 35 kg Gesamtgewicht etwa 17 % weniger als sein Vorgänger wiegt.⁶³ Eine weitere, heute vielfach ergriffene Maßnahme zur Gewichtsreduktion stellt der Verbundleichtbau als eine Art des Stoffleichtbaus dar. Dabei werden mehrere unterschiedliche Materialien in einer Karosserie vereint. So besteht eine Karosserie aus mehreren verschiedenen Stahl-, Aluminium- oder Kunststoffsorten, die je nach Anforderungen eingesetzt werden.⁶⁴

Zu den antriebsunabhängigen Techniken des Leichtbaus eröffnen sich bei Elektrofahrzeugen durch die Verwendung unterschiedlicher Komponenten zusätzliche Potenziale zur Reduktion des Gewichts, zur Steigerung der Effizienz und zur Erhöhung der Dynamik. Zur Betrachtung der größten Unterschiede zu konventionellen Fahrzeugen und zur Identifizierung der Leichtbaupotenziale bei Elektrofahrzeugen ist in Abb. 5.16 die Gewichtsverteilung auf Baugruppenebene dargestellt. Dabei wird zwischen einem reinen Elektrofahrzeug mit einem Leergewicht von 1400 kg und einem Verbrennerfahrzeug mit rund 1450 kg unterschieden. Dabei handelt es sich lediglich um zwei beispielhafte Fahrzeuge, bei denen die prozentuale Verteilung von Bedeutung ist.

Am Beispiel der Fahrzeuge aus Abb. 5.16 sind die wesentlichen Unterschiede zwischen einem konventionellen Verbrennerfahrzeug und einem Elektrofahrzeug zu erkennen: Sie liegen im Antrieb, im Fahrwerk, in der Karosserie und in der Traktionsbatterie.

Mit diesem Exempel kann gezeigt werden, dass Motor und Antriebsstrang bei einem konventionellen Fahrzeug 27 % des Gesamtgewichts ausmachen – beim Elektrofahrzeug liegt der Wert bei lediglich 6 %. Das entspricht einer Ersparnis von rund 300 kg im Vergleich zum Verbrennerfahrzeug. Leichtbaumaßnahmen im Bereich der Karosserie des Elektrofahrzeugs haben eine weitere Gewichtsreduktion von etwa 170 kg (11 %) gegen-

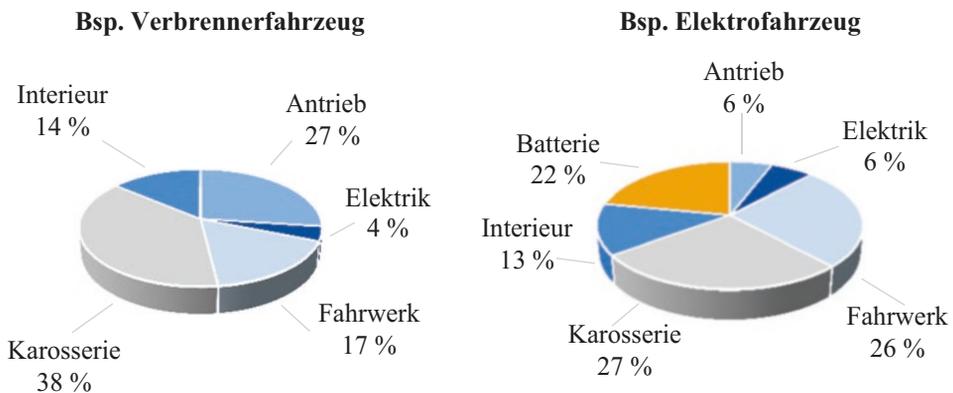


Abb. 5.16 Vergleich Gewichtsanteile Verbrenner-Fahrzeug und Elektrofahrzeug. (i. A. a. Aristoteles und Friedrich 2017, S. 776)

⁶³Vgl. Eder et al. 2016.

⁶⁴Vgl. Friedrich 2017, S. 17ff.

über dem Verbrennerfahrzeug zur Folge. Die Energiespeicherung wird in einem Elektrofahrzeug nicht in einem Tank, sondern in einer Traktionsbatterie realisiert. Sie macht im hier betrachteten Beispiel 22 % der Gesamtmasse aus und entspricht damit rund 310 kg. Aus dem hohen Gewicht der Traktionsbatterie ergibt sich, dass in diesem Bereich noch weitere Leichtbaupotenziale erforscht werden müssen.

Im Vergleich zu einem konventionellen Verbrennungsmotor ermöglicht der Einsatz eines Elektromotors eine massive Gewichtseinsparung. Die Gewichtsreduzierung durch die Technologieänderung liegt bei 100 kg und mehr und es wird weiter an gewichtsoptimierten Elektromotoren geforscht. So lässt sich etwa durch den Einsatz von Metall-3-D-Druck das Gewicht eines Elektromotors auf 20 kW pro kg Gewicht reduzieren. Durch den Einsatz der 3-D-Druck-Technologien wird einerseits Material gezielt nur an denjenigen Stellen verwendet, wo es tatsächlich benötigt wird, andererseits können sehr dünne Wandstärken in Kombination mit feinen Oberflächenstrukturen gefertigt werden.⁶⁵

Eine weitere Leichtbaumaßnahme besteht darin, die Menge des eingesetzten Materials zu reduzieren. Dazu werden die mechanischen Belastungen des Bauteils analysiert und ausgewertet. Anschließend werden die Bauteile materialoptimiert. Diese sogenannte Topologieoptimierung ist eine computergestützte und numerische Analyse. Weiterentwicklungen im Bereich der IT in Form von immer leistungsfähigeren Prozessoren ermöglichen dabei immer genauere Topologieoptimierungen. Der limitierende Faktor zur Herstellung topologieoptimierter Bauteile sind – aus Gründen ihres Aufbaus – die Fertigungsanlagen. Durch neue Verfahren wie dem Selektiven Lasersintern (SLS), dem Selektiven Laserschmelzen (SLM) oder dem Direkten Metall-Laser-Schmelzen (DMLS) können nahezu beliebige Formen aus Materialien wie hochfeste Aluminiumlegierungen hergestellt werden.⁶⁶ Nachteilig an diesen additiven Fertigungsverfahren sind die hohen Investitionskosten für die Produktionsanlagen und die langen Fertigungszeiten, weshalb sie nur bedingt für eine wirtschaftliche Serienproduktion geeignet sind.⁶⁷

Aus dem Umstand, dass der Gewichtsanteil der Traktionsbatterie am Referenz-Elektrofahrzeug bei 22 % liegt, ergibt sich in der E-Mobilität ein neues Feld der Gewichteinsparung. Durch die Steigerung der gravimetrischen Energiedichte der Batterie lässt sich bei gleichbleibender Kapazität des Akkus das Gewicht reduzieren. Dieser Ansatz der Gewichtsreduktion wird bereits seit einigen Jahren verfolgt, wie Abb. 5.17 verdeutlicht. Dort ist die Entwicklung der Energiedichte auf Zell-, Modul- und Pack-Ebene von 2010 bis 2019 aufgetragen.

Dank intensiver Forschungs- und Entwicklungsleistungen hat die Energiedichte sich verdoppelt.⁶⁸ Bei einer Batterie mit einer Energie von 40 kWh konnten somit von 2010 bis 2019 rund 300 kg auf Systemebene eingespart werden – oder es wurde bei gleichem Gewicht zur

⁶⁵ Vgl. N. N. 2020.

⁶⁶ Vgl. Richard 2019, S. 3ff.

⁶⁷ Vgl. Thomas und Gilbert 2014.

⁶⁸ Vgl. Löbbberding et al. 2020.

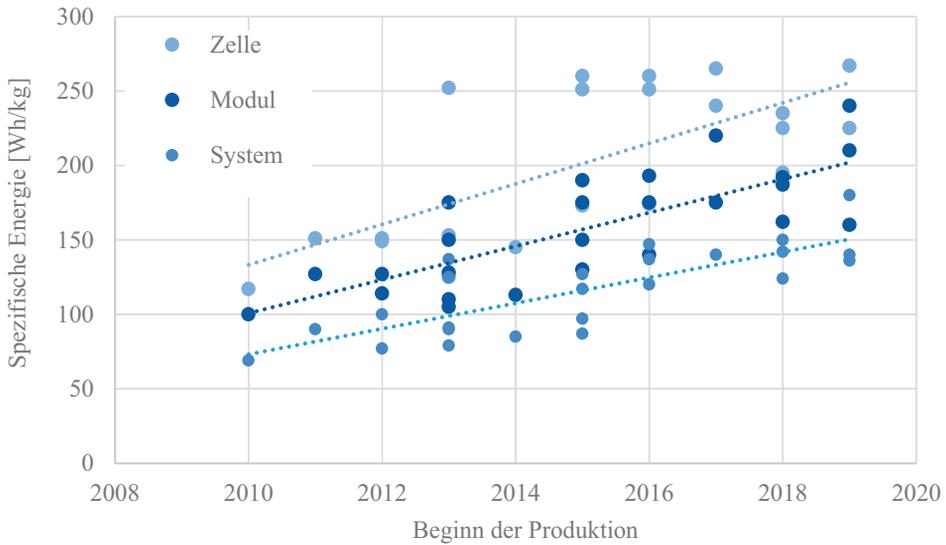


Abb. 5.17 Entwicklung der spezifischen Energie einer Batterie auf Zell-, Modul- und Pack-Ebene. (i. A. a. Löbberding et al. 2020)

Reichweitensteigerung die Energie verdoppelt. Das Ergebnis dieses Fortschritts sind heutige Energiedichten von bis zu 260 Wh/kg⁶⁹ für Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxide (NCA)-Traktionsbatterien. Für die kommenden Jahre sind weitere Steigerungen der Energiedichten auf 350 Wh/kg⁷⁰ und 460 Wh/kg⁷¹ bei „All-Solid-State“-Batterien möglich.

Ein alternativer Ansatz zur Reduktion des Mehrgewichts durch die Traktionsbatterie stellt die Nutzung des Batteriepacks als Strukturelement dar. Dadurch kann die Karosserie weniger steif und somit leichter ausgelegt werden. Erreicht wird das einerseits durch die sogenannte Strukturbatterie, die durch den Einsatz von verstärkten Kohlenstofffasern in den Batteriezellen an Steifigkeit gewinnt.⁷² Andererseits soll die „Cell-to-Chassis“-Technologie die Energiedichte im Fahrzeug erhöhen. Ziel dabei ist es, mehr Zellen auf das gleiche Volumen zu integrieren. Erreicht wird das durch den Verzicht auf Pack und Module sowie durch die direkte Integration der Zellen in die Karosserie.

Eine weitere Reduktion der Fahrzeuggesamtmasse lässt sich mittels Optimierung durch Rationalisierung erreichen. Ein Beispiel dafür ist die „By-Wire“-Technologie. Bei ihr werden mechanische Verbindungen durch Sensoren und Aktoren ersetzt, die lediglich über elektrische Leitungen miteinander verbunden sind. So wird etwa durch das elektronische Gaspedal das Zugseil zum Motor eingespart. Eine weitere Möglichkeit ist das „Steer-by-Wire“, bei dem die Lenksäule entfällt, was wiederum das Gewicht verringert.

⁶⁹Vgl. Deutscher Bundestag 2020, S. 5.

⁷⁰Vgl. Deutscher Bundestag 2020, S. 8.

⁷¹Vgl. Yu et al. o.J, S. 3892.

⁷²Vgl. Asp et al. 2021.

Zusammenfassend kann festgehalten werden: Durch Maßnahmen wie den Einsatz moderner Werkstoffe (Stoffleichtbau), der Topologieoptimierung (Formleichtbau) oder der Entwicklung moderner Batterie- und Speichersysteme (Systemleichtbau) konnte und kann künftig die Effizienz und somit die Reichweite von Fahrzeugen stetig verbessert werden. Neben der Reichweite sind auch die fahrdynamischen Aspekte zu berücksichtigen. Durch immer weiteres Streben nach Leichtbau ist insbesondere die Gewichtsverteilung im Fahrzeug zu beachten. Hohe Schwerpunkte im Fahrzeug können das Fahrverhalten negativ beeinflussen. Für einen tiefen Schwerpunkt zur Steigerung der Fahrdynamik ist Leichtbau im Dach-, Heck- und Frontbereich anzustreben.⁷³

Dem Leichtbau kommt eine besondere Bedeutung bei Elektrofahrzeugen der L7e-Kategorie zu, die als „Leichteletromobile“ (LEM) bezeichnet werden. Sie dürfen eine Leermasse des Fahrzeugs ohne Batterie von 450 kg nicht überschreiten. Das niedrige Gewicht wird durch die geringen Abmessungen, das stark reduzierte Interieur und die verminderte Sicherheits- und Komfortausstattung erreicht, was beispielsweise den Wegfall der Klimaanlage oder den Verzicht auf Seitenscheiben bedeutet. Eine Höchstgeschwindigkeit von 45 km/h und die bedingte Regen- sowie Wintertauglichkeit des Fahrzeugs führen zu einem geringen Marktanteil in Deutschland von 0,03 %.⁷⁴

Bei allen Bestrebungen zur Gewichtsreduzierung im Automobilbau oder anderen Maßnahmen zur Effizienzsteigerung ist zu berücksichtigen, dass Leichtbau bei Elektrofahrzeugen – wie auch bei konventionellen Verbrennerfahrzeugen – häufig mit zusätzlichen Kosten einhergeht, die am Ende Hersteller und Endkunde tragen müssen.

Bei batterieelektrischen Fahrzeugen besteht im Vergleich zu konventionellen Autos aktuell eine höhere Bereitschaft zu Mehrkosten bei der Anschaffung. Dies ist unter anderem durch die Nachhaltigkeit der E-Mobilität zu erklären – und durch Aspekte wie die niedrigeren Energiekosten pro Kilometer, einen geringeren Verschleiß und reduzierte Wartungskosten.⁷⁵ Bei konventionellen Antriebsmaschinen lag der akzeptierte Mehraufwand für Leichtbau in der Industrie bei bis zu 7 € pro Kilogramm Leichtbau. Bei der Elektromobilität liegt er bei bis zu 18 € pro eingesparten Kilogramm Gewicht.⁷⁶ Im Rohbau können mit 3 € pro Kilogramm für Stahl, 10 € für Aluminium und rund 50 € für CFK gerechnet werden.⁷⁷ Somit sind die Mehrkosten für Leichtbau durch Aluminium vertretbar. Zusätzlich lassen sich durch sinkende Kosten bei der Traktionsbatterie und dem Antrieb die Mehrkosten für Leichtbau in der Elektromobilität teilweise kompensieren.

Wie Abb. 5.18 zeigt, ist der Preis pro kWh für Traktionsbatterien in den vergangenen neun Jahren von anfänglich 688 US\$ auf 137 US\$ im Jahr 2020 gesunken. Das entspricht einer Kostenreduktion von 80 %. Bei einer Batteriekapazität von beispielsweise 42 kWh Bruttogehalt ergeben sich somit Ersparnisse von etwa 23.000 US\$ auf Pack-Ebene. Diese

⁷³Vgl. Aristoteles und Friedrich 2017, S. 41.

⁷⁴Vgl. e-mobil BW GmbH 2019, S. 87.

⁷⁵Vgl. N.N. 2021, S. 12ff.

⁷⁶Vgl. Klein und Gänsicke 2019, S. 12.

⁷⁷Vgl. Lienkamp 2016, S. 28.

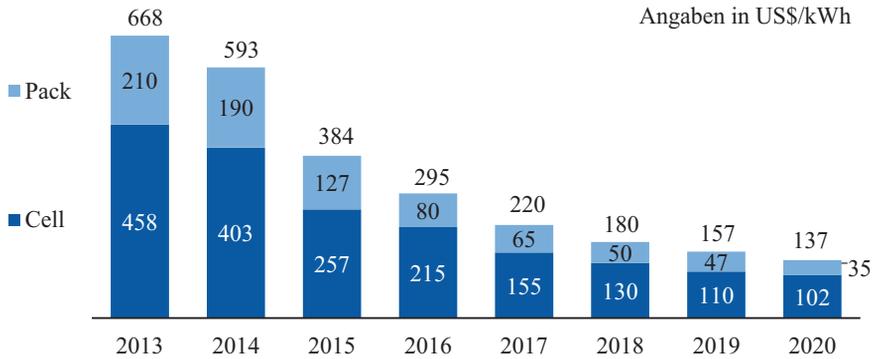


Abb. 5.18 Preisentwicklung der Traktionsbatterie in US\$/kWh. (i. A. a. Henze 2020)

können wiederum in höhere Batteriekapazitäten sowie Leichtbau zur Reichweitensteigerung investiert oder an den Kunden weitergegeben werden, um einen Kaufanreiz zu schaffen.

Im Vergleich zu Verbrennungsmotor-Fahrzeugen können Elektrofahrzeuge wegen ihres E-Motors als Generator kinetische Energie beim Bremsen in elektrische Energie umwandeln und zurück in den Speicher speisen. Die kinetische Energie ist wiederum proportional zur Masse des Fahrzeugs. Daraus ergibt sich ein Zusammenhang zwischen der Masse des Fahrzeugs und der möglichen Energierückgewinnung durch den Elektromotor. Diese Energierückgewinnung wird auch als „Rekupertion“ bezeichnet. Durch die Rekuperation nimmt das Energieeinsparpotenzial bei Elektrofahrzeugen durch Leichtbau im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug ab. Ein Teil der Energie zur Beschleunigung der Masse kann beim Bremsvorgang wieder in elektrische Energie umgewandelt werden. Bei diesem Vorgang wird der Elektromotor als Generator verwendet und somit Energie in die Batterie gespeist. Während beim Beschleunigen der Wirkungsgrad von der eingespeisten Energie bis zum Vortrieb bei 80 %⁷⁸ liegt, beträgt der Literaturwert beim Rekuperieren vom Antrieb zurück in die Traktionsbatterie etwa 56 %.⁷⁹ In der CAR (Center-Automotive-Research)-Studie der Universität Duisburg-Essen wurde bei einer Verbrauchsfahrt mit einem Elektrofahrzeug der Oberklasse aus den USA der Energieverbrauch ohne und mit einer Zuladung von 300 kg gemessen. Bei der Auswertung des Energieverbrauchs wurde ein Verbrauch von 17,77 kWh/100 km im unbeladenen Zustand und 17,87 kWh/100 km im beladenen Zustand ermittelt. Das entspricht einem Mehrverbrauch 0,6 %. Zu erklären ist diese geringe Verbrauchszunahme durch die hohe Rekuperation des Elektrofahrzeugs. Auch bei einer zweiten Versuchsreihe mit einem deutschen Elektrofahrzeug ergab sich ein Mehrverbrauch von lediglich 0,57 kWh/100 km.⁸⁰

Durch die Rekuperation des Elektrofahrzeugs ist der Einsatz von Leichtbau im E-Mobil gegenüber dem in einem konventionellen Fahrzeug in Abhängigkeit vom Fahrzyklus zu

⁷⁸ Vgl. Siebenpfeiffer 2021, S. 483.

⁷⁹ Vgl. Komarnicki et al. 2018, S. 52.

⁸⁰ Vgl. Siebenpfeiffer 2021, S. 399ff.

untersuchen. Eine allgemeine Aussage über die Wirtschaftlichkeit von Leichtbau kann somit nicht getroffen werden. Der Energiebedarf eines schweren Fahrzeugs ist höher als der eines leichteren, wobei er sich durch die Rekuperation teilweise kompensieren lässt. Im Stadtbetrieb kann durch die Rekuperation aufgrund der zahlreichen Bremsvorgänge ein Teil der Energie zurückgewonnen werden. Dabei kann Leichtbau in Abhängigkeit vom Preis sinnvoll sein. Bei Landstraßenfahrten mit konstanter Geschwindigkeit wird wenig rekuperiert. Somit ist der Einsatz von Leichtbau und aerodynamischen Maßnahmen zur Energieeinsparung sinnvoll. Bei Autobahnfahrten mit höheren Geschwindigkeiten ist die Bedeutung der Aerodynamik des Fahrzeugs höher als die des Leichtbaus.

Aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren auf den Energiebedarf des Fahrzeugs gilt es somit abzuwägen, ob und inwiefern Leichtbau ökonomisch und ökologisch sinnvoll ist.

Literatur

Teil II: Elektrofahrzeugspezifische Systeme

- Aristoteles; Friedrich, H. E. (Hrsg.):** *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Schriftenreihe des IWF. 2. Auflage Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017
- Asp, L. E.; Bouton, K.; Carlstedt, D.; Duan, S.; Harnden, R.; Johannisson, W.; Johansen, M.; Johansson, M. K. G.; Lindbergh, G.; Liu, F.; Peuvot, K.; Schneider, L. M.; Xu, J.; Zenkert, D.:** *A Structural Battery and its Multifunctional Performance*, 2021
- Bubb, H.; Goßmann, H.; Konorsa, R.; Pecho, W.; Plath, A.; Reichhold, J.; Stauber, R.; Teske, L.; Thomer, K. W.; Timm, H.; Vöger, H.-J.; Wawzyniak, M.:** *Aufbau*. In: Stefan Pischinger, U. S. (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* 8 Aufl.: Springer Vieweg, 2016, S. 576–727
- Cüppers, M.:** *Die Zukunft des Karosseriebaus: maximal flexibel*. Die „Boxenstoppfertigung“ als Antwort auf die aktuellen Herausforderungen in der Automobilproduktion. In: ZWF, Jg. 113, 2018, S. 475–478
- Cüppers, M.:** *Zukunft des Karosseriebaus: maximal flexibel und unabhängig*. <https://www.ingenics.com/de/planung-umsetzung/boxenstoppfertigung/>. Abruf 20.08.2021
- Deutscher Bundestag:** *Energiespeicher der Elektromobilität. Entwicklung der Energiedichten* (WD 8 – 3000 – 090/20), 2020
- Doppelbauer, M.:** *Grundlagen der Elektromobilität*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020
- Eckstein, L.; Schmitt, F.; Hartmann, B.:** *Leichtbau bei Elektrofahrzeugen*. In: ATZ, Jg. 11, 2010
- Eder, T.; Kemmer, M.; Lückert, P.; Sass, H.:** *Start einer neuen Motorenfamilie bei Mercedes-Benz*. In: MTZ, Jg. 77, 2016
- e-mobil BW GmbH:** *Elektrische Klein und Leichtfahrzeuge*, 2019
- Falah, F. N.; Adi, G. P.; Saraswati, C.; Prasetyo, H.; Djunaidi, M.; Fitriadi, R.:** *The Urban Car Body Design for Energy Efficient Car Contest 2019 using Quality Function Deployment*. In: *Jurnal Teknik Industri*, Jg. 22, 2020, Nr. 2
- Friedrich, H. E. (Hrsg.):** *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. ATZ/MTZ-Fachbuch. 2. Auflage Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017
- Fuchs, J.; Lienkamp, M.:** *Technologie und Architektur für elektrifizierte Fahrzeuge*. In: ATZ, Jg. 115, 2013, S. 164–170
- Gennaro, M. de; Scholz, H.; Matrini, G.; Lacher Hannes:** *Experimental Investigation of the Energy Efficiency of an Electric Vehicle in Different Driving Conditions*. In: *SAE Technical Papers* 2014.

- Goede, M; Ferkel, H; Stieg, J; Dröder, K.:** *Mischbauweisen Karosseriekonzepte. Innovationen durch bezahlbaren Leichtbau.* Aachen, 2005
- Golombek, D; Lemcke, P; Nevoigt, A; Pfaff, S; Ziegler, N.-H.:** *Studie zu den möglichen Auswirkungen auf die Automobilindustrie in Südwestfalen,* 2020
- Hagedorn, M; Hartmann, S; Heilert, D; Harter, C; Olschewski, I; Eckstein, L; Baum, M; Henzelmann, T; Schlick, T.:** *Automobile Wertschöpfung 2030/2050. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie* 2019.
- Horch, F; Busse, M.:** *Verbundprojekt Systemforschung Elektromobilität: Ressourceneffizienz* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 59–105
- Kampker, A; Bergweiler, G; Hollah, A; Bickendorf, P; Hoffmann, F.:** *Development of a framework for the flexibility assessment of automotive production concepts* 2019.
- Kampker, A; Pandey, R; Gomez, D; Guillermo, J; Wessel, S; Treichel, P.-E; Malatyali, I.:** *Cost Optimal Design Strategy of Electric Drivetrains for Medium Heavy-Duty Vehicles Based on Product Development and Production Costs.* In: 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC) 2019, S. 1–8
- Kampker, A; Vallée, D; Schnettler, A. (Hrsg.):** *Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie.* 2. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018
- Karle, A.:** *Elektromobilität. Grundlagen und Praxis.* 4 Aufl.: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2021
- Kern D. et al.:** *FlexBody©/FlexBody©– Entwicklung eines Baukastensystems für Karosseriestrukturen von kleineren Fahrzeuglosgrößen– Entwicklung eines Baukastensystems für Karosseriestrukturen von kleineren Fahrzeuglosgrößen.* In: *Mobiles* 2009, Nr. 35
- Khuntia, G. P.:** *Analysis and design of advanced hybrid electric vehicles using improved material and modified process.* In: *International journal for research and development in technology* 2017.
- Klein, B; Gänsicke, T.:** *Leichtbau-Konstruktion. Dimensionierung, Strukturen, Werkstoffe und Gestaltung.* 11 Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019
- Kollmeier, M; Kwast, T; Sedlmayr, M; Geringhoff, L.:** *Modulare Karosserieplattform für die Elektromobilität.* In: *ATZ*, Jg. 121, 2019, S. 16–23
- Komarnicki, P; Haubrock, J; Styczynski, Z. A.:** *Elektromobilität und Sektorenkopplung. Infrastruktur- und Systemkomponenten.* 1. Aufl. 2018 Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018
- Lienkamp, M.:** *STATUS ELEKTROMOBILITÄT 2016 ODER WIE TESLA NICHT GEWINNEN WIRD.* München, 2016
- Löbberding, H; Wessel, S; Offermanns, C; Kehler, M; Rother, J; Heimes, H; Kampker, A.:** *From Cell to Battery System in BEVs: Analysis of System Packing Efficiency and Cell Types.* In: *WEVJ*, Jg. 11, 2020, Nr. 4, S. 77
- Mruzek, M; Gajdác Igor; Kucera, L; Barta, D.:** *Analysis of Parameters Influencing Electric Vehicle Range.* In: *Procedia Engineering*, Jg. 134, 2016, S. 165–174
- N. N.:** *Equipmake Joins Forces With HiETA To Create World's Most Power Dense Electric Motor.* <https://equipmake.co.uk/equipmake-joins-forces-with-hieta-to-create-worlds-most-power-dense-electric-motor/>
- N.N.:** *Mobility Insights Report. Elektrofahrzeuge und Nachhaltigkeit,* 2021
- Nicoletti, L; Ostermann, F; Heinrich, M; Stauber, A; Lin, X; Lienkamp, M.:** *Topology analysis of electric vehicles, with a focus on the traction battery.* In: *Forsch Ingenieurwes*, Jg. 85, 2021, Nr. 2, S. 457–467
- Pischinger, S.:** *Grundlagen Mobiler Antriebe.* Aachen, 2020
- Porsche AG:** *Konzept und Package.* <https://www.porscheengineering.com/peg/de/services/serviceareas/completevehicle/package/>. Abruf 20.01.2022
- Richard, H. A.:** *Additive Fertigung Von Bauteilen und Strukturen. Neue Erkenntnisse und Praxisbeispiele.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2019

- Röth, T.:** *Karosseriebaukasten für Elektrofahrzeuge – Ein Blick in die Zukunft.* In: Kampker, A.; Vallée, D.; Schnettler, A. (Hrsg.): *Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie 2.* Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018
- Röth, T.:** *Personal Public Vehicle – ein urbanes Fahrzeugkonzept für die „Shared Mobility“ der Zukunft.* In: Piskun, A. (Hrsg.): *Karosseriebautage Hamburg 2018, 2018, S. 189–201*
- Röth, T.; Göer, P.:** *Smart application kit for lightweight multi-material body structures for EV (Future Car Body 2011).* Bad Nauheim, 22.–23.11.2011
- Röth, T.; Kampker, A.:** *Body für Elektrofahrzeuge.* In: Kampker, A.; Vallée, D.; Schnettler, A. (Hrsg.): *Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie 2.* Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018, S. 279–294
- Schieck, F.; Hülsemann, K.; Putz, M.:** *Karosserie.* https://www.automobil.fraunhofer.de/content/dam/automobil/de/documents/Geschaeftsfelder/Fraunhofer-Allianz_Auto_Karosserie.pdf. Abruf 12.12.2021
- Seiffert, U.; Pischinger, S.:** *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik.* 9 Aufl.: Springer Vieweg, 2021
- Siebenpfeiffer, W. (Hrsg.):** *Mobilität der Zukunft. Intermodale Verkehrskonzepte.* ATZ/MTZ-Fachbuch. 1st ed. 2021 Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer Vieweg, 2021
- Stefan Pischinger, U. S. (Hrsg.):** *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik.* 8 Aufl.: Springer Vieweg, 2016
- Steiner, M.:** *Konsequent auf die Mobilität der Zukunft ausgerichtet.* In: Siebenpfeiffer, W. (Hrsg.): *Mobilität der Zukunft: Intermodale Verkehrskonzepte,* 2021, S. 375–388
- Thomas, D. S.; Gilbert, S. W.:** *Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing:* National Institute of Standards and Technology, 2014
- VW:** *Mit dem Modularen E-Antriebs-Baukasten (MEB) baut Volkswagen ein Fundament für die Mobilität der Zukunft. Aber wie genau funktioniert der MEB – und wozu brauchen wir ihn? Wir beantworten die zehn wichtigsten Fragen.* <https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2017/02/the-e-mobility-module.html#>. Abruf 17.07.2021
- VW:** *Auslauf des e-Golf: Volkswagen bereitet Start des ID.3 in der Gläsernen Manufaktur Dresden vor.* <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/pressemitteilungen/auslauf-des-e-golf-volkswagen-bereitet-start-des-id3-in-der-glaesernen-manufaktur-dresden-vor-6739>. Abruf 19.07.2021
- Wawzyniak, M.; Art, L.; Jung, M.:** *Thermomanagement als Grundvoraussetzung für die elektrische Mobilität.* In: ATZ Automobiltech 2017, Nr. 119, S. 52–57
- Wendekamm, J.:** *Effiziente Absicherung der Derivatevielfalt durch Berechnung und Simulation – der neue Crafter von VW Nutzfahrzeuge.* In: Piskun, A. (Hrsg.): *Karosseriebautage Hamburg 2017: 15. ATZ Fachtagung* Springer Vieweg, 2017
- Wienkötter, M.:** *Die Batterie: Ausgeklügeltes Thermomanagement, 800 Volt Systemspannung,* 04.09.2019a
- Yu, S.; Schmohl, S.; Liu, Z.; Hoffmeyer, M.; Schön, N.; Hausen, F.; Tempel, H.; Kungl, H.; Wiemhöfer, H.-D.; Eichel, R.-A.:** *Insights into a layered hybrid solid electrolyte and its application in long lifespan high-voltage all-solid-state lithium batteries*

Teil VI: Geschäftsmodelle entlang der elektromobilen Wertschöpfungskette

- Henze, V.:** *Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh, 2020*

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Elektrischer Antriebsstrang

6

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns, Benjamin Dorn, Sebastian Hagedorn, Konstantin Sasse, Till Augustin Backes, Moritz Frieges, Jens Polzenberg, José Guillermo Dorantes Gómez, Christoph Deutskens, Kai Kreisköther, Ruben Förstmann und Carsten Nee

Das entscheidende Differenzierungsmerkmal eines Elektrofahrzeugs gegenüber einem konventionellen Fahrzeug ist der Antriebsstrang. Die folgenden Ausführungen befassen sich mit der elektromobilspezifischen Veränderung des Antriebsstrangs sowie den einzelnen Komponenten. Im Fokus stehen dabei der Hochvoltspeicher, die elektrische Maschine sowie die für den Betrieb notwendige Elektronik. Darüber hinaus werden Anordnungs-

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

C. Offermanns · B. Dorn

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: c.offermanns@pem.rwth-aachen.de; b.dorn@pem.rwth-aachen.de

S. Hagedorn · K. Sasse · M. Frieges

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: s.hagedorn@pem.rwth-aachen.de; k.sasse@pem.rwth-aachen.de; m.frieges@pem.rwth-aachen.de;

T. A. Backes (✉) · J. Polzenberg · J. G. D. Gómez

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: t.backes@pem.rwth-aachen.de; j.polzenberg@pem.rwth-aachen.de; j.dorantes@pem.rwth-aachen.de

strategien der Elektromobilitätskomponenten im Fahrzeug diskutiert, da sich durch die kompakte Bauweise der Komponenten neue Freiheitsgrade ergeben.

6.1 Veränderungen im Antriebsstrang

Das äußere Erscheinungsbild konventioneller und elektrischer Fahrzeuge erscheint auf den ersten Blick sehr ähnlich. Die Veränderungen des Antriebsstrangs bei einem Wechsel der Antriebsart sind jedoch erheblich. Im Folgenden werden diese Veränderungen im Antriebsstrang beschrieben. Dabei wird bei einem konventionellen Antriebsstrang stets von einem solchen mit Verbrennungsmotor ausgegangen.

Durch die gegenüber konventionell angetriebenen Fahrzeugen verschiedenen Prinzipien der Energiespeicherung und Energiewandlung ist der elektrische Antriebsstrang grundlegend anders aufgebaut als ein verbrennungsmotorischer Antriebsstrang. In Abb. 6.1 sind die Änderungen im Hinblick auf die Komponenten der beiden Varianten dargestellt. Mit dem Verbrennungsmotor und dem mehrstufigen Getriebe entfallen für den elektrischen Antriebsstrang zwei zentrale und hochkomplexe Komponenten des konventionellen Antriebsstrangs. Durch die mechanisch weniger komplexe Bauweise elektrischer Antriebsstränge reduziert sich die Zahl der Antriebsstrangkomponenten von rund 1400 beim konventionellen Antriebsstrang auf rund 210 Komponenten.¹

Neben den entfallenden Komponenten kommen im elektrischen Antriebsstrang im Vergleich mit dem konventionellen auch neue Komponenten hinzu. Am offensichtlichsten sind hier die Kernkomponenten des elektrischen Antriebsstrangs: Elektromotor, Leistungselektronik und Energiespeichersystem.² Das Energiespeichersystem kann einzig ein Akkumulator, aber auch die Kombination verschiedener Systeme sein, zum Beispiel Lithium-Ionen-Batterie und Brennstoffzellensystem.

¹Vgl. Thielmann et al. 2020, S. 19f.

²Vgl. Pischinger und Seiffert 2021, S. 661.

C. Deuskens
CEO & Partner, PEM Motion GmbH, Aachen, Deutschland
E-Mail: c.deuskens@pem-motion.com

K. Kreisköther
Co-Founder & CEO, Ducktrain, Aachen, Deutschland
E-Mail: Kai.kreiskoether@ducktrain.io

R. Förstmann
Projektleiter, TQ-Systems GmbH, Wetter (Ruhr), Deutschland
E-Mail: ruben.foerstmann@tq-group.com

C. Nee
Associate Partner, McKinsey & Company Inc., Hamburg, Deutschland
E-Mail: Carsten_Nee@mckinsey.com

Obsoletere Komponenten	Veränderte/Optionale Komponenten	Hinzukommende Komponenten
<ul style="list-style-type: none"> • Verbrennungsmotor (Motorblock, Kolben, Nockenwelle) • Kupplung • Einspritzsystem • Kraftstofftank • Abgasanlage • Nebenaggregate (Lichtmaschine, Turbolader) 	<ul style="list-style-type: none"> • Getriebe • Klimaanlage/Heizung • Pumpsysteme (Kühlung, Hydraulik) • Wärmedämmung • Kraftübertragung (Antriebswellen, Differenzial) 	<ul style="list-style-type: none"> • Elektromotor • Leistungselektronik • Energiespeichersystem (Batterie, Wasserstoff/Brennstoffzelle, Kondensator) • Energiemanagement • Thermomanagement • Ladegerät • „By-Wire“-Funktionen

Abb. 6.1 Veränderungen im Antriebsstrang

Über die neuen und die entfallenden Komponenten hinaus gibt es auch solche, die im elektrischen Antriebsstrang optional eingesetzt werden oder im Vergleich zum konventionellen Antrieb in ihrer Funktionsweise verändert werden müssen. Beispielsweise ist bei elektrischen Antriebssträngen aufgrund des hohen Gesamtwirkungsgrades die Abwärme der Komponenten zu gering, um sie für die Heizung des Fahrzeuginnenraums zu nutzen. Aus diesem Grund müssen Heizung und Klimaanlage im elektrischen Fahrzeug neu konzipiert werden. Nicht nur im Fahrzeuginnenraum muss die Temperatur stimmen: Im Winter muss die Batterie beheizt werden, um optimal zu arbeiten und auf längere Sicht keinen Schaden zu nehmen. Dafür und zur entsprechenden Kühlung, zum Beispiel im Sommer, wird in elektrischen Antriebssträngen ein spezielles Thermomanagement verbaut.

Eine weitere Modifikation im Antriebsstrang sind die geänderten Bauteilvolumen und die Bauteilanordnung.³ Demnach gibt es unterschiedliche Topologien, die die spezifische Anordnung von Elektromotor und zugehöriger Peripherie beschreiben. Der Elektromotor nimmt nur einen Teil des Volumens eines Verbrennungsmotors ein, was viele Möglichkeiten der Anordnung im Antriebsstrang zulässt. Darüber hinaus entfällt beim Elektromotor das Getriebe, das ebenfalls ein erhebliches Volumen im konventionellen Antriebsstrang einnimmt. Im elektrischen Antriebsstrang benötigt hingegen die Batterie viel Platz und muss dementsprechend so konzipiert werden, dass sie in das Fahrzeug integriert werden kann. Die anforderungsgerechte Anordnung der Baugruppen im Fahrzeug gehört zur mechanischen Integration und wird auch „Packaging“ genannt. Sie stellt vor allem beim Nachrüsten elektrische Antriebsstränge in konventionelle Fahrzeuge eine besondere Herausforderung dar.

Auch die elektrische Integration birgt gewisse Herausforderungen. Hierbei müssen die Spannungslevel aller Komponenten aufeinander abgestimmt werden und die elektrischen

³Vgl. Tschöke et al. 2020, S. 336ff.

Verbindungen müssen der maximalen elektrischen Last standhalten. Daraus entstehen zum einen besondere Anforderungen an die Sicherheit des elektrischen Antriebsstrangs, zum anderen müssen Aspekte wie die elektromagnetische Verträglichkeit und die elektrische Geräuschentwicklung der Bauteile (beispielsweise Spulenfielen) berücksichtigt werden.⁴

Wachsende Anforderungen an bestehende Antriebslösungen sind wesentliche Treiber für deren Weiterentwicklung. Die fortwährende Erschließung neuer Technologien deckt Chancen für elektrische Antriebe auf, Defizite gegenüber konventionellen Antrieben zu kompensieren oder gar zu beseitigen und dabei die Produkt- und Produktionskosten zu senken. Neben neuen Technologien sorgen auch die aufgrund erhöhter Nachfrage steigenden Stückzahlen für eine Kostensenkung der Komponenten für den elektrifizierten Antriebsstrang.⁵ Gleichzeitig treiben die zur Einhaltung von Emissionsgrenzen notwendigen Maßnahmen an Verbrennungskraftmaschinen deren Kosten nach oben.

So ergeben sich vielfältige Chancen für Unternehmen, die sich Kompetenzen für die jeweiligen Komponenten in anderen Geschäftsfeldern aufgebaut haben, ebenfalls in den Markt der Elektromobilität einzusteigen. Aufgrund der noch nicht weit fortgeschrittenen Technologiereife besteht keine ausgeprägte Marktmacht etablierter, hocheffizient produzierender Unternehmen. Vielmehr bestehen für kleine und mittelständische Unternehmen ähnliche Ausgangsvoraussetzungen.

6.2 Antriebsstrangkonzepete in Elektrofahrzeugen

Der elektrische Antriebsstrang ist das Bindeglied zwischen der Traktionsbatterie und der Antriebswelle. Er beinhaltet die Komponenten, die für eine Umwandlung der gespeicherten elektrochemischen Energie in der Batterie in mechanische Antriebsenergie notwendig sind. Der Pfad der Energiewandlung ist vereinfacht in Abb. 6.2 dargestellt. Die von der Batterie bereitgestellte elektrische Energie wird in Form einer Gleichspannung an den elektrischen Zwischenkreis abgegeben. An diesen Zwischenkreis sind alle Verbraucher im Fahrzeug angeschlossen. Um die elektrische Energie für den Antrieb nutzen zu können, wandelt ein Wechselrichter die Gleichspannung der Batterie in eine Wechselspannung um, wie sie beispielsweise von Drehfeldmaschinen benötigt wird.⁶ Die elektrische Maschine wandelt wiederum die elektrische Energie in mechanische Energie um. Es wird ein Drehmoment bei



Abb. 6.2 Schematischer Energiepfad im elektrischen Antriebsstrang

⁴Vgl. Marenbach et al. 2020, S. 217.

⁵Vgl. Ajanovic und Glatt 2020, S. 143.

⁶Vgl. Pischinger und Seiffert 2021, S. 674.

einer bestimmten Drehzahl an die Räder abgegeben und das Fahrzeug wird angetrieben. Dieses Prinzip der Energiewandlung lässt sich auch umkehren. Bei der elektrischen Bremsung (Rekuperation) wird die Verzögerungsenergie in elektrische Energie durch die Maschine als Generator umgewandelt und über den Wechselrichter in der Batterie gespeichert.

Es existiert eine Vielzahl von realisierbaren Möglichkeiten, die Komponenten „Umrichter“, „Elektromotor“ und „Getriebe“ anzuordnen. Vier grundlegende Möglichkeiten der Komponentenanzordnung sind in Abb. 6.3 dargestellt. Welches Konzept verwendet wird und ob ein Getriebe oder eine Kupplung notwendig ist, wird mit einer Analyse des Anforderungsprofils für das zu entwickelnde Fahrzeug ermittelt. Dabei stellt ein möglichst hoher Gesamtwirkungsgrad über einen für den Betrieb des Fahrzeugs charakteristischen Fahrzyklus eine der wesentlichen Variablen dar, nach denen das System optimiert wird. Ein hoher Gesamtwirkungsgrad bedeutet eine größere Reichweite des Fahrzeugs bei gleichem Energiespeicher. Weitere Entscheidungskriterien zur Konzeptauswahl können sich aus Randbedingungen des vorhandenen Platzes und dem Packaging der Antriebs-elemente „Batterie“, „Leistungselektronik“ und „Motor“ ergeben. Die Notwendigkeit eines Getriebes ergibt sich aus dem Anforderungsprofil für das Fahrzeug und den spezi-

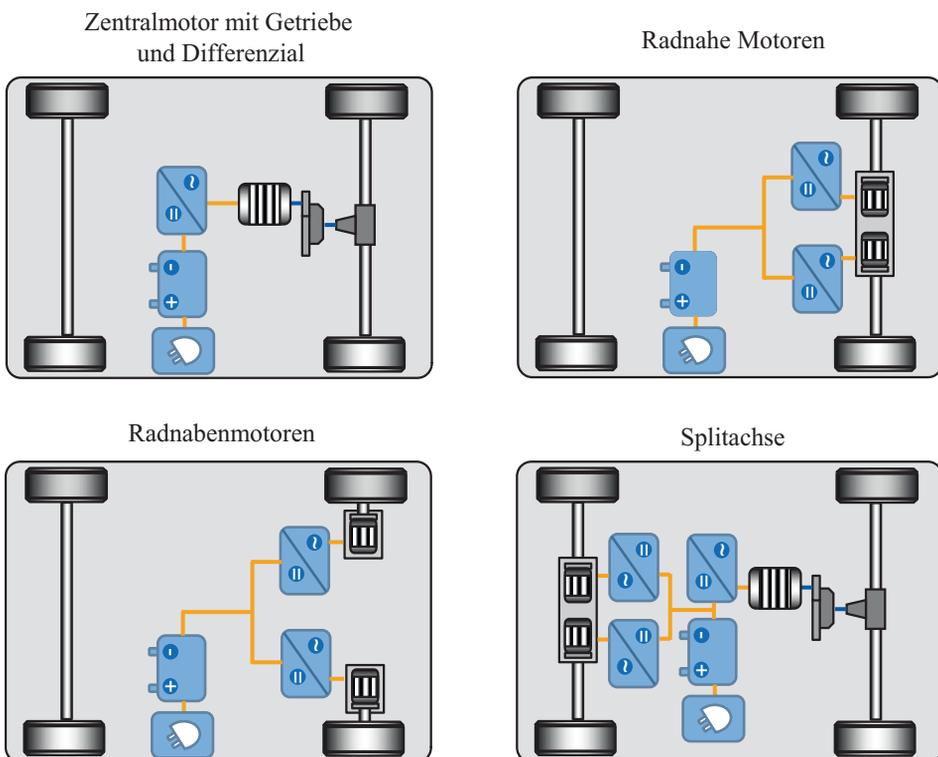


Abb. 6.3 Möglichkeiten für Antriebsstrangkonzepte in Elektrofahrzeugen. (Eigene Abbildung in Anlehnung an Tschöke et al. 2020, S. 193ff.)

fischen Leistungsdaten des verwendeten Motors. In jedem Fall kann ein Getriebe verwendet werden, um den Motor vor den dynamischen Lasten während der Fahrt zu isolieren und ihn so zu schonen. Unter anderem besteht die Möglichkeit, den Antrieb eines Fahrzeuges radnah zu realisieren.⁷ Radnah bedeutet in diesem Fall, dass der Antrieb mit dem Rad über eine Welle verbunden ist und das Differenzial in der mechanischen Leistungsübertragung wegfällt. Radnahe Antriebe treiben somit die Räder immer individuell an und die Funktion des Differenzials muss die elektronische Steuerung übernehmen. Eine weitere Möglichkeit der Anordnung sind Radnabenantriebe.⁸ In diesem Fall ist der Elektromotor im angetriebenen Rad selbst untergebracht. Radnabenantriebe sind aufwendig in der Konstruktion und der Konzeptionierung, da häufig auch ein Planetengetriebe im Rad integriert werden muss und der Bauraum dort beschränkt ist. Zusätzlich muss bei Radnabenkonzepten auf die Dynamik des gesamten Fahrzeugs geachtet werden. Wegen der ungefederten Massen wird der Antrieb im Rad erhöhten mechanischen Belastungen ausgesetzt. Ein Vorteil von Radnabenantrieben ist der gewonnene Bauraum im Fahrzeug, da die Maschine und das Getriebe dort keinen Platz in Anspruch nehmen.

Über die Vielzahl mechanischer Antriebskonzepte hinaus ergeben sich auch im elektrischen Teil des Antriebsstrangs unterschiedliche Möglichkeiten zur Realisierung der Energieversorgung. Am häufigsten wird die Energieversorgung des elektrischen Antriebsstrangs über eine Batterie realisiert.⁹ Zunehmend wird die Batterie jedoch durch weitere Energiespeichersysteme ergänzt, das heißt, sie stellt noch immer einen wesentlichen Teil des Gesamt-Energiespeichersystems eines Fahrzeugs dar, wird aber von weiteren Systemen unterstützt. Einen Teil der elektrischen Last über ein Brennstoffzellensystem abzudecken, ist eine dieser Möglichkeiten. Die Brennstoffzelle lässt sich dabei im Wesentlichen auf zwei Arten betreiben. Zum einen kann sie eine elektrische Grundlast während der gesamten Fahrt abdecken. Da Brennstoffzellen im Allgemeinen nicht dynamisch betrieben werden sollten, ist die Batterie für Leistungsspitzen zuständig, die während der Fahrt auftreten. Zum anderen kann die Brennstoffzelle als „Range Extender“ dienen. Sobald der Ladezustand der Batterie unter einen gewissen Schwellenwert sinkt, beginnt die Brennstoffzelle damit, die Batterie wieder aufzuladen. Andere Konzepte, die aber nur zur kurzzeitigen Energiespeicherung geeignet sind, beinhalten Schwungräder oder Superkondensatoren.

Die zahlreichen möglichen Topologien mit individuellen Vorzügen und Nachteilen je nach Anwendungsfall rufen eine Variantenvielfalt im automobilen Sektor hervor, die für konventionelle Antriebsstränge nicht möglich war. Die Komplexität der Implementierung elektrischer Antriebsstränge – vor allem in bestehende Fahrzeugstrukturen – stellt eine Herausforderung dar.¹⁰ Letztlich wird neben den sicherheitstechnischen und zuverlässigkeitsrelevanten Aspekten die Käuferakzeptanz, insbesondere, welcher Funktionsumfang

⁷Vgl. Tschöke et al. 2020, S. 210.

⁸Vgl. Trzesniowski 2019, S. 189.

⁹Vgl. Adib et al. 2019, S. 2.

¹⁰Vgl. Adib et al. 2019, S. 2.

zu welchem Preis erhältlich ist, die Topologien der aktuellen Generation von Elektrofahrzeugen prägen. Es ist daher nicht verwunderlich, dass zunächst auf simple, zuverlässige und günstige Konzepte gesetzt wird, um auf einem von konventionellen Antriebskonzepten dominierten Markt konkurrenzfähig zu sein.

6.3 Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs

Der elementare Aufbau eines elektrischen Antriebsstrangs umfasst einen Energiespeicher, einen Elektromotor mit mechanischem Getriebe sowie die erforderlichen Energiewandler und Wechselrichter, die die Komponenten mit dem erforderlichen Maß an elektrischer Energie versorgen. Mit einem Wirkungsgrad des Antriebsstrangs von 80 % übertreffen Elektrofahrzeuge die 17 bis 20 % ihrer traditionellen ICE-Pendants bei Weitem.¹¹ Dieser Wirkungsgrad entspricht jedoch der lokalen Nutzung der Energie im Fahrzeug; der „Well-to-Wheel“-Wirkungsgrad und die Emissionen für Elektrofahrzeuge sind weitgehend vom Energiemix abhängig, der zur Erzeugung der elektrischen Energie verwendet wird, und sie sind dort besser, wo erneuerbare Energiequellen einen größeren Anteil der Netzenergie erzeugen.¹² Abb. 6.4 zeigt ein repräsentatives Layout eines elektrischen Antriebsstrangs für ein batterieelektrisches Fahrzeug.

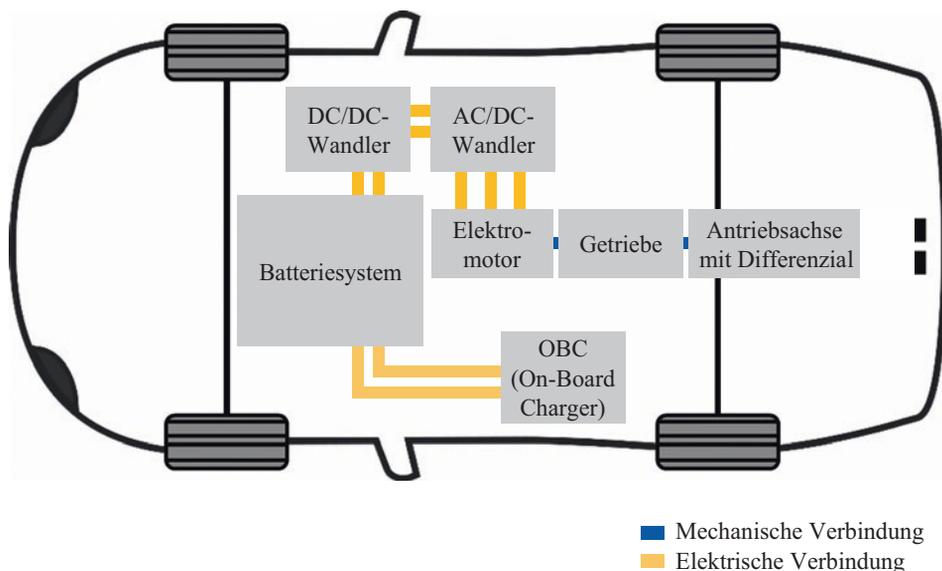


Abb. 6.4 Schematische Darstellung eines elektrischen Antriebsstrangs

¹¹Vgl. Tschöke et al. 2020, S. 34.

¹²Vgl. L. Athanassopoulou, H. Bikas, P. Stavropoulos 2018.

Batterie/Energiequelle

Genau wie bei ICE-Fahrzeugen muss die Energie für das Fahrzeug in einem Energiespeicher vorgehalten werden, von wo aus sie zu den Komponenten, Systemen und Subsystemen transportiert wird, die sie benötigen. Lithium-Ionen-Batterien sind heute die am häufigsten verwendete Methode zur Speicherung und Bereitstellung von Energie für Elektrofahrzeuge und sie können auch wieder aufgeladen werden, wenn ihre Energie verbraucht ist. Batterien sind nicht das einzige Mittel, um Energie in einem Elektrofahrzeug zu speichern; dies kann auch durch den Einsatz von Brennstoffzellensystemen geschehen. Dabei wird Kraftstoff – beispielsweise in Form von Wasserstoff – in einem Tank gespeichert und über ein Pumpelement der Brennstoffzelle zugeführt, die die chemisch gespeicherte Energie des Kraftstoffs in elektrische Energie umwandelt, die wiederum später in der Batterie gespeichert oder direkt zu Verbrauchern (Komponenten) geleitet wird. Brennstoffzellen- und Batteriesysteme werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Elektrische Maschine

Die elektrische Maschine ersetzt den Verbrennungsmotor im Antriebsstrang und ist ein Element, das die elektrische Energie aus der Batterie in mechanische Energie umwandelt. Diese Energie wird dem Motor durch einen Wechselrichter zugeführt, der die erforderliche Ausgangsleistung des Motors durch Änderung des Eingangsstroms und der Eingangsspannung regelt. Die Energieumwandlung im Motor erfolgt durch die Wechselwirkung der Magnetfelder der beiden Hauptkomponenten des Motors: Stator und Rotor. Im Allgemeinen liefert der Stator ein rotierendes Magnetfeld, dem das Magnetfeld des Rotors folgt, wodurch dieses Element in Rotation versetzt wird und eine mechanische Kraft erzeugt, die zum Antrieb des Fahrzeugs verwendet wird. Darüber hinaus können elektrische Maschinen vorwärts und rückwärts rotieren und dabei entweder eine Zugkraft (Motorbetrieb) oder Energie (Generatorbetrieb) erzeugen. Diese Eigenschaft wird genutzt, um das Fahrzeug im Motorbetrieb vorwärts und rückwärts anzutreiben und im Generatorbetrieb Energie zu erzeugen, die beim Bremsen in der Batterie gespeichert wird. Es ist möglich, einen einzelnen Motor für das gesamte Fahrzeug zu verwenden oder einzelne Motoren für zwei oder mehr Räder.

Getriebe (Differenzial)

Elektrische Maschinen können ein breites Spektrum von Drehmoment-Drehzahl-Kombinationen erzeugen, was es ihnen vor allem ermöglicht, bei sehr niedrigen Drehzahlen ein hohes Drehmoment zu generieren. Allerdings sind sie in ihrem gesamten Spektrum gleich effizient und bei höheren Drehzahlen nimmt das verfügbare Drehmoment ab. Ein (ein- oder mehrstufiges) Untersetzungsgetriebe wird daher zwischen dem Elektromotor und dem Rad eingesetzt, um das Ausgangsdrehmoment und die Drehzahl des Motors so zu transformieren, wie es der Anwendungsfall des Antriebs erfordert – und zwar mit dem bestmöglichen Wirkungsgrad des Motors. Darüber hinaus wird bei Verwendung einer einzelnen Motoreinheit ein Differenzialgetriebe eingesetzt, um die Traktionsenergie zu verteilen und die Fahrzeuglenkung zu ermöglichen. Je nach Topologie des Antriebs-

strangs gibt es zahlreiche verschiedene Kombinationsmöglichkeiten von Getrieben – die Funktion bleibt indes die gleiche.

Ladegerät an Bord

Ein „On-Board Charger“ (OBC) bietet die Möglichkeit, die Batterie von einer externen Energiequelle – in der Regel dem Stromnetz – aufzuladen. Im Allgemeinen werden für den Ladevorgang zwei Subsysteme benötigt: eines, das die externe Energie in ein mit der Batterie kompatibles Niveau umwandelt – etwa AC/DC-Wechselrichter –, und ein Subsystem, das dafür sorgt, dass die einzelnen Zellen vor Überladung geschützt werden. Das ist notwendig, weil verschiedene Zellen im Akku-Pack unterschiedliche Ladezustände aufweisen. Diese letzte Funktion wird durch das Batterie-Management-System übernommen.¹³ Weitere Details zum Ladevorgang sind in den späteren Abschnitten dieses Buches zu finden.

DC/DC-Wandler

Beim Betrieb des elektrischen Antriebsstrangs ist es notwendig, Spannung aus verschiedenen Systemen, Subsystemen und Komponenten zu entnehmen und in andere einzuspeisen, die unterschiedliche Leistungs- und Spannungsanforderungen haben können. Ein Gleichspannungswandler ist eine leistungselektronische Schaltung, die eine Gleichspannung in ein anderes Gleichspannungsniveau umwandelt. In einem elektrischen Antriebsstrang werden verschiedene solcher Wandler benötigt. Abb. 6.4 zeigt eine Anwendung, bei der ein Gleichspannungswandler vor dem Wechselrichter platziert wird, um die Eingangsspannung zu regeln, die dem Wechselrichter zugeführt wird, und die Spannung, die der Wechselrichter im Falle einer Rekuperation in die Batterie speist. In beiden Fällen wird der Gleichspannungswandler verwendet, um die Spannung und die Frequenz auf den vom jeweiligen System benötigten Wert einzustellen. Eine weitere Anwendung findet sich in brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen, wo der Gleichspannungswandler die Brennstoffzellenspannung zur Versorgung von Komponenten verstärkt.

Wechselrichter

Die Batterie des Elektrofahrzeugs liefert eine Gleichspannung, die in eine Wechselspannung umgewandelt werden muss, welche die elektrische(n) Maschine(n) versorgt. Dies ist Aufgabe des Wechselrichters, ebenso wie die Versorgung mit variabler Spannung, Strom und Frequenz sowohl von der Batterie zur elektrischen Maschine im Motorbetrieb als auch von der elektrischen Maschine zur Batterie im Generatorbetrieb.

Dies sind die Basiselemente eines elektrischen Antriebsstrangs. Weitere, hier nicht dargestellte Komponenten sind erforderlich – etwa die Elemente des Thermomanagementsystems, Verbindungen zum Fahrwerk oder Komponenten wie das Lenksystem, die andere für den Fahrzeugbetrieb notwendige Funktionen übernehmen. In den folgenden Ab-

¹³Vgl. Karle 2015, S. 93f.

schnitten werden die Eigenschaften der Basiskomponenten und die verschiedenen realisierbaren Antriebsstrang-Topologien näher erläutert.

6.3.1 Elektromotoren für den Traktionsantrieb

Gegenüber dem Verbrennungsmotor ergeben sich für den Elektromotor Vorteile durch eine kompaktere Bauweise und eine geringere Anzahl von Bauteilen.¹⁴ Dies ist vor allem auf das Motorprinzip zurückzuführen, das für die gängigen Maschinentypen auf einem feststehenden Stator und einem innerhalb oder außerhalb drehenden Rotor basiert. Innerhalb des Motors befinden sich keine oszillierenden Bauteile und vergleichsweise wesentlich weniger rotierende Bauteile, was zum Beispiel Auswirkungen auf die Anzahl verbauter Gleit- und Kugellager hat. Dies hat auch zur Folge, dass Elektromotoren nie oder nur selten gewartet werden müssen. Darüber hinaus weist ein Elektromotor mit einem Wirkungsgrad von 87 bis 97 % eine wesentlich höhere Effizienz auf als ein Verbrennungsmotor (30 bis 45 %).¹⁵ Ein weiterer Vorteil des Elektromotors im Vergleich zum Verbrennungsmotor ist der Wegfall von Kupplung und gegebenenfalls auch Getriebe im Antriebsstrang. Da Elektromotoren charakteristischerweise ab einer Drehzahl von null ihr maximales Moment liefern können, ist keine Kupplung notwendig, um die Drehzahl von Rad und Motor zu synchronisieren (vgl. Abb. 6.5). Hinzu kommt, dass Elektromotoren ihr Drehmoment über ein breites Drehzahlband abgeben können und somit auf ein schaltbares Getriebe verzichtet werden kann. Unter dem Gesichtspunkt optimaler Effizienz ist der Einsatz eines schaltbaren Getriebes allerdings durchaus zu bewerten.

Elektromotoren lassen sich anhand ihrer Funktionsprinzipien in verschiedene Typen einteilen.¹⁶ In der automobilen Anwendung werden hauptsächlich Radialflussmaschinen eingesetzt, die sich wiederum in weitere Typen einteilen lassen. Die individuellen Vorzüge und Nachteile der Typen sorgen dafür, dass sie sich je nach Anwendung verschieden gut eignen. Permanentmagneterregte Synchronmaschinen (PMSM) weisen den höchsten Wirkungsgrad und die höchste Leistungsdichte der gängigen Radialflussmaschinen auf. Allerdings werden für diesen Maschinentyp Permanentmagnete benötigt, die mit hohen Kosten verbunden sind. PMSM finden hauptsächlich in Fahrzeugen der Mittel- und Oberklasse sowie in Performance-Modellen Anwendung. Aufgrund ihrer Kompaktheit eignen sie sich auch für den Einsatz in Hybridfahrzeugen.

Fremderregte Synchronmaschinen (FSM) werden häufig in Fahrzeugen aus kostenempfindlichen Marktsegmenten eingesetzt, etwa in Kleinfahrzeugen. Durch den Entfall von Permanentmagneten und die einfache Konstruktion entstehen geringe Kosten für das Produkt. Aufgrund des höheren mechanischen Verschleißes elektrischer Kontaktstellen sind sie jedoch fehleranfällig und wartungsaufwendiger als andere Maschinentypen.

¹⁴Vgl. Tschöke et al. 2020, S. 196.

¹⁵Vgl. Marenbach et al. 2020, S. 132ff.

¹⁶Vgl. Stan 2021, S. 284ff.

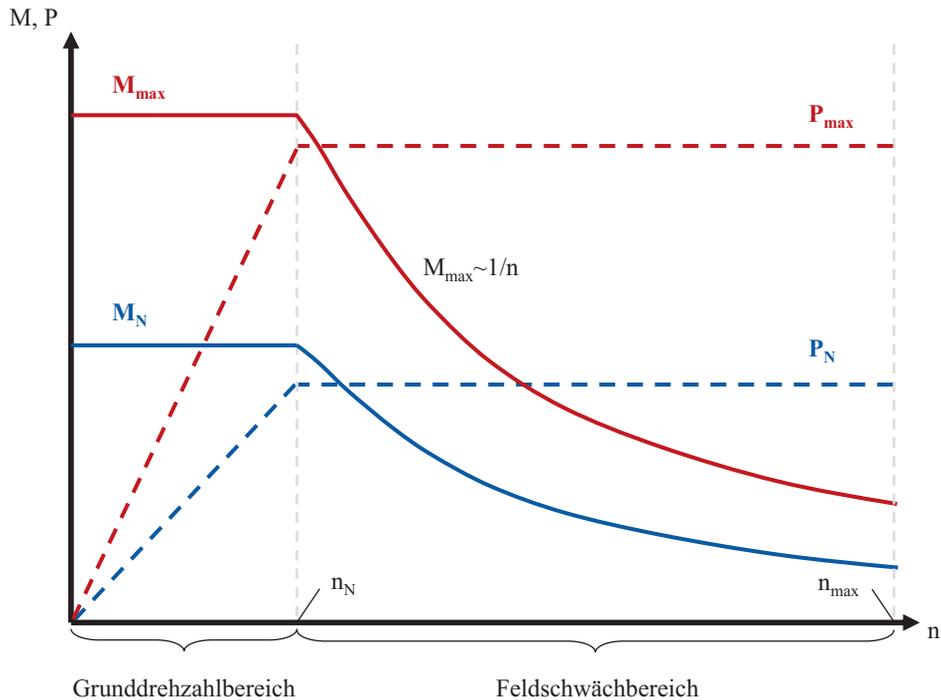


Abb. 6.5 Idealisiertes Betriebsdiagramm eines Elektromotors

Asynchronmaschinen (ASM) benötigen ebenfalls keine Magnete und sind daher kostengünstiger als PMSM. Darüber hinaus verfügen sie über eine besondere Drehmomentcharakteristik und spezielle Eigenschaften im Segelbetrieb, was sie für einige Anwendungen attraktiv macht. Insgesamt verfügen ASM allerdings über eine geringere Leistungsdichte und einen niedrigeren Wirkungsgrad als PMSM. Sie eignen sich besonders für Langstreckenfahrzeuge und Sonderfahrzeuge, zum Beispiel Bagger.

Im Antriebsstrang ist auch die Kombination verschiedener Motortypen möglich, um ihre jeweiligen Vorteile ausnutzen zu können. In der Praxis werden beispielsweise PMSM- und ASM-Motoren miteinander kombiniert, um für den Stadt- und Autobahnverkehr die jeweils optimale Antriebslösung zu erhalten.

Zum einen wird die Leistung von Elektromotoren durch die maximale Drehzahl begrenzt, bis zu der der Rotor ausgelegt ist. Zum anderen stellt die thermische Belastung des Elektromotors eine Leistungsbegrenzung dar.¹⁷ Schließlich darf der Motor nur eine gewisse Temperatur erreichen, da sonst die Isolation der Drahtwicklung beschädigt wird oder die Magnete in einer PMSM entmagnetisiert werden. Aus diesem Grund tendieren die Entwicklungen im Bereich des Elektromotors derzeit zu leistungssteigernden Kühlkonzepten und zur Design-Optimierung mit Blick auf die Minimierung der Verluste im Motor.

¹⁷Vgl. Stan 2021, S. 80.

6.3.2 Hochvolt-Traktionsbatterien für Elektrofahrzeuge

Traktionsbatterien versorgen das Elektrofahrzeug im Betrieb mit der notwendigen elektrischen Energie, die sowohl die E-Motoren zur Gewährleistung des Vortriebs als auch sämtliche Hochvolt-Nebenverbraucher benötigen. Während die Traktionsbatterie im Fahrzustand Energie abgibt, kann sie durch Rekuperation (kurzfristig) und Laden an externen Energiequellen wieder mit Energie versorgt werden.

Traktionsbatterien liegen in einem Hochspannungsbereich, also nach ISO 6469-3 im Spannungsbereich B über 60 V.¹⁸ Lediglich bei Fahrzeugen der Klasse „Mild-Hybrid“ liegt die Spannung üblicherweise unterhalb der 60 V. Derzeit haben sich im Allgemeinen zwei typische Spannungslagen etabliert. Am weitesten verbreitet sind 400-Volt-Systeme, bei denen die maximale Systemspannung im Bereich um 400 V liegt. Darüber hinaus gibt es vereinzelt Fahrzeuge, die auf ein 800-Volt-System setzen. Durch die Verdoppelung der Systemspannung ergibt sich insbesondere der Vorteil von erhöhten abrufbaren elektrischen Leistungen. Dies ist weniger für das Fahrerlebnis relevant, sondern primär für das Schnellladen von Interesse. Der Vorteil der erhöhten Leistungsfähigkeit wird jedoch durch eine komplexere Leistungselektronik erkauft. Während für 400-Volt-Systeme bereits zahlreiche Zulieferkomponenten verfügbar sind, ist die Auswahl an Komponenten für 800-Volt-Systeme derzeit noch eingeschränkt. Vor allem in Anbetracht der zunehmenden Elektrifizierung von (schweren) Nutzfahrzeugen ist eine Besserung in den nächsten Jahren zu erwarten, da aufgrund des im Vergleich zu Pkw hohen Leistungsbedarfs von Nutzfahrzeugen Traktionsbatterien mit einem höheren Energiegehalt zum Einsatz kommen. Um diese in kurzer Zeit aufladen zu können, wächst die Bedeutung des Schnellladens und damit die Relevanz der 800-Volt-Systemarchitektur.

Eine Traktionsbatterie ist ein in sich abgeschlossenes System, das geeignete Schnittstellen zum Fahrzeug bieten muss. Diese Schnittstellen sind mechanischer, thermischer und elektrischer Natur. Mechanisch muss das Batteriesystem in das Fahrzeug integriert werden. Dabei übernimmt das Batteriesystem zunehmend auch strukturelle Aufgaben und unterstützt die Karosserie. Thermisch muss die Batterie an das Thermomanagement im Fahrzeug angeschlossen werden. Das externe Thermomanagement stellt ein temperiertes Medium bereit, mit dem im Regelfall eine Kühlung der Batterie angestrebt wird; bei Bedarf kann durch dieses Medium jedoch auch ein Heizen der Batterie erfolgen. Bei den elektrischen Schnittstellen lassen sich zwei Varianten unterscheiden. Erstens existiert eine Hochspannungsschnittstelle zum Fahrzeug, die üblicherweise in Form von Steckern ausgeführt wird. Über diesen Anschluss erfolgt die Leistungsversorgung des Fahrzeugs. Zweitens bestehen Niederspannungsanbindungen an das Fahrzeug: Über diese Schnittstelle wird einerseits die interne Batteriesteuerung mit Energie versorgt und andererseits mittels diverser Kommunikationsprotokolle ein Informationsaustausch ermöglicht.

Das Herzstück der Traktionsbatterie sind die Batteriezellen. In ihnen wird die Energie elektrochemisch gespeichert und bei Bedarf abgegeben. In der Fahrzeugtechnik hat sich

¹⁸Vgl. ISO 2021.

die Verwendung von Lithium-Ionen-Batteriezellen als Energiespeicher etabliert. Die Batteriezellen werden in Elektrofahrzeugen derzeit zunächst in einzelne Module geschaltet. Die Verschaltung der einzelnen Zellen kann seriell oder parallel beziehungsweise in einer Kombination aus beidem erfolgen. Die serielle Verschaltung erwirkt eine gesteigerte Spannung, die parallele Verschaltung eine gesteigerte Kapazität der Module. Die Spannung auf Modulebene bleibt typischerweise unter 60 V, um eine erhöhte Komplexität der Produktion aufgrund von Vorgaben zur Arbeit unter Hochspannung zu vermeiden. Die Batteriemodule müssen eine Schnittstelle zum Thermomanagementsystem gewährleisten, um die Batteriezellen im gewünschten Temperaturfenster zu halten. Sensorik überwacht die Module beziehungsweise einzelne Zellen. Die Batteriemodule werden in einem Batteriepack zu einem Gesamtsystem verbunden. Dort werden die Ergebnisse der Sensorik im Batteriemanagementsystem (BMS) aggregiert. Zusätzlich werden elektrische Bauteile wie beispielsweise Schütze und Sicherungen auf Systemebene integriert. Die Schütze schalten das Batteriesystem nach außen spannungsfrei. Gesteuert werden sie durch das Batteriemanagementsystem. Die Sicherungen unterbrechen zu hohe Ströme, die beispielsweise im Kurzschlussfall auftreten können. Das Hochspannungsniveau (400 V oder 800 V) wird in der Regel erst auf der Ebene des Gesamtsystems erreicht.

In Bezug auf die Topologie von Batteriesystemen sind verschiedene Entwicklungen erkennbar, um die Energiedichte auf Systemebene weiter zu erhöhen. Auf Zellebene ist in allen drei Formaten ein Trend zu Batteriezellen mit höheren Kapazitäten erkennbar. Durch größere Zellen wird die volumetrische Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Bau- raums auf Batteriezellebene verbessert. In der Folge sind weniger Zellen für die Batterie- module und das Batteriesystem notwendig, die Anzahl zusätzlicher peripherer Kompo- nenten wird reduziert und die Energiedichte auf Systemebene verbessert sich.¹⁹

Neben der geometrischen Vergrößerung der Batteriezellen gibt es Bestrebungen, den einzelnen Zellen strukturelle Aufgaben des Batteriesystems zu übergeben. Die mechani- sche Stabilität des Gesamtsystems wird dann nicht mehr nur durch die Packstruktur oder die einzelnen Module gewährleistet, auch einzelne Batteriezellen tragen aktiv zur struktu- rellen Stabilität bei. Somit können Zwischenebenen aus der Produktstruktur klassischer Systeme entfallen. In diesem Zusammenhang wird von „Cell-to-X“-Systemen gesprochen. Im „Cell-to-Pack“-Ansatz wird die Modulebene übersprungen. Die einzelnen Batterie- zellen werden direkt derart seriell und parallel verschaltet, dass die Kombination aller Zellen das Batteriepack ergeben. Durch den Entfall der Modulebene lässt sich eine signifi- kante Steigerung in der gravimetrischen Energiedichte auf Systemebene um bis zu 15 % erreichen.²⁰ Aufgrund der starren Gehäuse sind die Formate der zylindrischen sowie der prismatischen Zellen prädestiniert für solche funktionsintegrierten Systeme. Doch auch für Pouch-Zellen sind grundsätzlich Ansätze in Richtung eines „Cell-to-Pack“-Aufbaus denkbar. Hier ist jedoch verstärkt auf den konkreten Lastpfad der Kräfte in der Batterie zu achten.

¹⁹Vgl. Löbbberding et al. 2020.

²⁰Vgl. Gerlitz et al. 2021.

In einer weiteren Iteration sind „Cell-to-Vehicle“-Systeme denkbar. In diesem Fall tragen die einzelnen Batteriezellen nicht zu einem Gesamtbatteriesystem bei, sondern werden direkt in die Fahrzeugstruktur integriert. Es handelt sich also um einen Ansatz, der maximale Funktionsintegration erfordert und ermöglicht. Aufgrund ebendieser notwendigen Integrationstiefe sind „Cell-to-Vehicle“-Systeme derzeit noch nicht erhältlich.

Der Wegfall beispielsweise der Modulebene im Falle des „Cell-to-Pack“-Systems erfordert neue Ansätze im Gesamtsystemaufbau. Während Batteriemodule verhältnismäßig kleine Einheiten bilden, die sich in der Produktion gut manipulieren und verarbeiten lassen, müssen bei den neuen Konzepten die Zellen direkt im Gesamtsystem verschaltet und integriert werden. Die elektrische und thermische Kontaktierung erfolgt auf Systemebene. Dementsprechend müssen auch Kontaktierungseinheiten für Überwachungssysteme wie beispielsweise für Zellspannungen und Temperaturen angepasst werden.

6.3.3 Brennstoffzelle

Die Brennstoffzelle als Kernkomponente des Brennstoffzellenantriebs wird durch die Möglichkeit charakterisiert, elektrische Energie über Wasserstoff als alternative Energiequelle bereitzustellen. Dabei gilt es, die Komponenten eines Brennstoffzellenantriebs als Erweiterung der gegebenen Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs – etwa Elektromotor und Traktionsbatterie – zu verstehen, die bedarfsgerecht anhand von Bau-, Gewichts- und Reichweitenanforderungen für die jeweilige Anwendung ausgelegt werden können. Da der Brennstoffzellenantrieb Vorteile eines rein batterieelektrischen Antriebs hinsichtlich einer mit dem Wasserstoffspeicher skalierbaren Reichweite sowie einer geringen Betankungszeit aufweist, bieten sich vor allem Potenziale in der Elektrifizierung von Nutzfahrzeuganwendungen. Mit Blick auf die Auslegung gibt es Ansätze, die einen brennstoffzellendominanten Antriebsstrang forcieren, und solche, die auf ein Brennstoffzellensystem mit geringerer Leistung abzielen – den „Range-Extender“-Ansatz.²¹

Im Bereich der mobilen Anwendung und somit der Elektromobilität ist eine Proton-Exchange-Membrane die bevorzugte Brennstoffzellentechnologie. Begründet liegt dies vor allem im vergleichsweise dynamischen Betriebsverhalten, in der begrenzten Betriebstemperatur und in der lokalen Emissionsfreiheit. Andere Brennstoffzellentechnologien wie etwa die alkalische oder die Hochtemperatur-Brennstoffzelle eignen sich daher gemäß dem aktuellen Stand der Technik nicht für die Anwendung im Transportsektor (siehe Abschn. 8.1).²²

Ein Brennstoffzellensystem besteht aus einem Brennstoffzellen-Stack sowie den Peripherie-Komponenten, zu denen neben den Wasserstofftanks als Speicher auch die Komponenten des Luft- und Wasserstoffmoduls sowie der Steuerung und des Thermalmanagements gehören. Ein Stack als Kern des Brennstoffzellensystems übernimmt die

²¹ Vgl. Töpler und Lehmann 2017.

²² Vgl. Lipman und Weber 2019.

Funktion der Energieumwandlung von im Wasserstoff gebundener chemischer Energie in elektrische (siehe Abschn. 8.2).

Die Energieumwandlung geschieht in der einzelnen Brennstoffzelle, in welche über die Bipolarplatten Wasserstoff auf Anodenseite und Sauerstoff auf Kathodenseite geleitet wird. Beide Seiten sind über eine Polymermembran voneinander getrennt, die lediglich den inneren Ladungstransport der Wasserstoffprotonen ermöglicht. Auf der Kathodenseite oxidieren jeweils zwei Wasserstoffatome mit einem Sauerstoffatom und bilden Wasser als Produkt. Die freien Elektronen werden dabei über Stromabnehmer von der Kathoden- auf die Anodenseite geleitet, wodurch ein elektrischer Fluss entsteht. Durch das Stapeln und Verschalten zahlreicher Brennstoffzellen lässt sich die benötigte Traktionsleistung erzielen. Der Zusammenbau der einzelnen Brennstoffzellen mitsamt nachgelagertem Stacking – ebenjenem „Stapeln“ – und die weitere Stack- und Systemmontage bilden die Prozessroute zur Herstellung eines Brennstoffzellensystems.²³

Der Markthochlauf von brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen läuft derzeit an. Erste Anbieter wie etwa Toyota und Hyundai vertreiben bereits Pkw, die die Technologie im Markt demonstriert. Hinsichtlich eines antizipierten Anlaufs werden allerdings Nutzfahrzeuge als priorisierte Anwendung betrachtet. Dabei bieten Hyundai und weitere, weniger große OEM bereits Kleinserien zum Verkauf an. In Szenarien für die Zeit ab 2030 wird der Absatz brennstoffzellenbetriebener Lkw auf über 50.000 Stück pro Jahr prognostiziert.²⁴ Der parallel notwendige Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur hat ebenso begonnen und bezieht sich gemäß aktuellem Stand auf mehr als 100 öffentlich zugängliche Wasserstofftankstellen in Europa.²⁵

Der Markthochlauf von Brennstoffzellenfahrzeugen ist unweigerlich mit den zugrundeliegenden Kosten verbunden. Studien, die eine Kostenreduktion in US-Dollar pro Kilowatt von bis zu 15 % im Jahr 2025 vorhersagen, sind bisher nicht mit der Realität vereinbar.²⁶ Trotzdem existieren geeignete produktionstechnische Trends zur Prozessskalierung und Ressourceneffizienz, die erfolgversprechende Kostensenkungen ermöglichen.

6.3.4 Optimale Spannungsniveau für Antriebssysteme

Ein zentrales Thema bei der Auslegung von Antriebssystemen ist die Wahl des für die Anwendung sinnvollsten Spannungsniveaus. Gegensätzliche Eigenschaften und Anforderungen bilden die größten Herausforderungen für die Entwicklung.

Der Energiespeicher stellt die elektrische Energie in Form von Gleichstrom (Direct Current – DC) bereit. Dabei wird das Spannungsniveau in zwei Arten unterteilt:²⁷

²³ Vgl. Töpler und Lehmann 2017.

²⁴ Vgl. Ruf et al. 2020, S. 105.

²⁵ Vgl. ACEA European Automobile Manufacturers Association 2020.

²⁶ Vgl. James et al. 2018.

²⁷ Vgl. Doppelbauer 2020, S. 269.

- Hochvolt: bis 1500 V DC
- Niedervolt: bis 120 V DC

Niedervoltssysteme

Beide Spannungslevel haben ihre Vor- und Nachteile. Im Niedervoltbereich bis 60 V DC ist ein Schutz gegen Berühren nicht zwingend notwendig, was sich positiv auf die Sicherheit sowie die Kosten der Entwicklung und Produktion auswirkt. Die niedrige Bordspannung verhindert einen elektrischen Schlag selbst bei schweren Crash-Situationen. Produktion und Wartung können ohne hochvoltgeschulte Mitarbeiter vorgenommen werden.²⁸

Nachteilig wirken sich im Vergleich zu Hochvoltssystemen vor allem die bei gleicher Motorleistung proportional höheren elektrischen Ströme aus. Diese erfordern größere Leitungsquerschnitte und führen zu Wärmeverlusten sowie insbesondere bei verteilten Topologien zu einer massiven Gewichtszunahme. Dadurch erhöhen sich ebenfalls die Materialkosten und die Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit. Besonderes Augenmerk muss der Strombelastbarkeit der Leistungselektronik gelten, die bei Niedervoltssystemen durch zusätzliche Parallelschaltungen kompensiert werden muss. Es existiert ein Break-even-Wert, jenseits dessen ein Hochvoltfahrzeug kostengünstiger herzustellen ist. Untersuchungen ergaben, dass Leistungen bis 40 kW für Spannungsniveaus unter 60 V Kostenverteile mit sich bringen. Für höhere Leistungen sollten Hochspannungssysteme genutzt werden.²⁹

Ein geringes Spannungsniveau wird vor allem bei Hybridfahrzeugen mit geringem Elektrifizierungsgrad genutzt. Sogenannte Mikro-Hybride bis zu 5 kW können mit 12 V DC und Mild-Hybride bis zu 20 kW bei 48 V DC betrieben werden. Die Verwendung niedriger Spannungsniveaus ist somit nur für geringe Antriebsleistungen eine sinnvolle Lösung.³⁰

Hochvoltssysteme

Wird das elektrische System zum reinelektrischen Fahren genutzt, wie es etwa bei Full-Hybriden, Plug-in-Hybriden, batterieelektrischen oder 0Brennstoffzellenfahrzeugen der Fall ist, werden Leistungen über 50 kW benötigt. Plug-in-Hybride und batterieelektrische Fahrzeuge verwenden aus diesem Grund eine Spannungslage von 300 V bis 800 V DC. Sind bei Kfz aktuell noch 400-Volt-Systeme Stand der Technik, so zeichnet sich mit steigenden Leistungen in der Anwendung im Nutzfahrzeugbereich ein Trend zu 800-Volt-Systemen ab. Deutlich höhere Spannungen kommen aufgrund des Isolationsaufwands und mangels preisgünstiger Bauteile nicht zum Einsatz. Mit hohen Spannungen sinken die elektrischen Ströme proportional, so dass Kupferleitungen, elektrische Kon-

²⁸ Vgl. Gerling et al. 2017, S. 3.

²⁹ Vgl. Fritsch et al. 2018, S. 33.

³⁰ Vgl. Doppelbauer 2020, S. 269f.

takte und Stecker sowie die Leistungselektronik leichter und kostengünstiger verbaut werden können. Im Crash-Fall muss trotz der Beschädigung zahlreicher Komponenten durch aufwendige Isolations- und Schnellentladensysteme eine Gefährdung von Insassen und Rettungskräften ausgeschlossen sein.³¹

6.4 Modularisierung des elektrischen Antriebsstrangs

Der sich beschleunigende Trend der Elektrifizierung der Mobilität wird durch die Notwendigkeit begrenzt, ein Produkt anzubieten, das nicht nur über die Lebensdauer des Fahrzeugs in Form der „Total Cost of Ownership“ einen wirtschaftlichen Vorteil bietet, sondern zumindest für Privatnutzende auch über den Anschaffungspreis. Da die Batterien den größten Kostentreiber bei Elektrofahrzeugen darstellen und es auch in absehbarer Zukunft sein werden, müssen verschiedene Strategien bei der Entwicklung kostenoptimierter elektrischer Antriebsstränge umgesetzt werden, die den Nutzenden funktionale Vorteile und den Herstellern die Möglichkeit zur Steigerung der Gewinnmargen bieten. Eine dieser Strategien ist die Verwendung modularer Konstruktionsprinzipien.

Modulares Design lässt sich definieren als die Zerlegung eines komplexen Systems in vereinfachte Module³² aus gekoppelten Komponenten, die einzelne Funktionen oder Funktionscluster ausführen. Die fünf Hauptmerkmale des modularen Designs sind in Abb. 6.6 dargestellt. Diese verschiedenen Merkmale haben direkten Einfluss auf die Konstruktion des Antriebsstrangs:

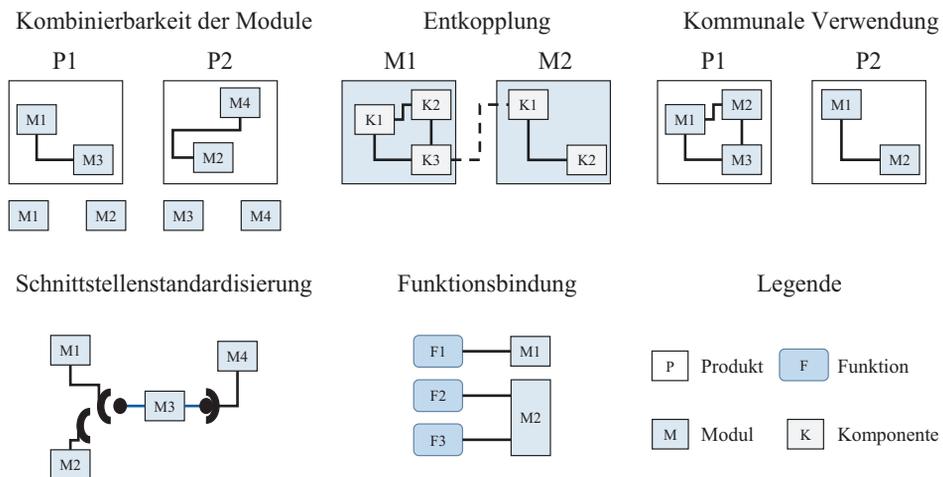


Abb. 6.6 Entwurfseigenschaften modularer Produkte. (Vgl. Krause und Gebhardt 2018)

³¹Vgl. Doppelbauer 2020, S. 270f.

³²Vgl. Tseng et al. o. J.

- **Entkopplung:** Der Grad, in dem Module miteinander verbunden sind und/oder getrennt werden können, wobei innerhalb eines Moduls zwischen den Komponenten geringere Entkopplungsgrade vorhanden sind. Ein Beispiel sind Batterie-Swap-Konzepte, bei denen die Batterie vom Antriebsstrang entkoppelt und durch eine ähnliche Batterie ersetzt werden kann, ohne die anderen Module zu beeinflussen.
- **Verwendung von Gemeinsamkeiten:** Verwendung von gleichen Modulen in verschiedenen Produktvarianten innerhalb der Produktfamilie. In einem Antriebsstrang kann eine Kommunalität ein Elektromotor sein, der sich je nach eingespeister Spannungsebene für den Antriebsstrang von zwei verschiedenen Fahrzeugklassen verwenden lässt.
- **Kombinierbarkeit:** Erstellung von Produktvarianten durch Kombination oder Weglassen verschiedener Module. Unterstützt durch den Entkopplungsgrad, kann ein leistungsstärkerer Antriebsstrang durch Erhöhung der Motorenanzahl realisiert oder die Reichweite durch sukzessive Hinzunahme von Batteriemodulen erhöht werden.
- **Standardisierung von Schnittstellen:** Ausgehend von der hauptsächlichen Interaktion von Modulen durch den Austausch von Energie, Material oder Informationen können gängige Schnittstellen standardisiert werden, um die Kopplung von Modulen zu erleichtern. Bei einer mechanischen Kopplung zwischen einem Motor und einem Untersetzungsgetriebe werden zum Beispiel genormte (ISO/DIN) Flansche verwendet.
- **Funktionsbindung:** Module können eine Funktion oder eine Reihe von Funktionen zugewiesen bekommen. Das ermöglicht Varianten zur Realisierung unterschiedlicher Funktionen in einer Produktfamilie. So kann ein Schaltmodul dem gleichen Basis-Antriebsstrang eine höhere Steigfähigkeit für Heavy-Duty-Anwendungen ermöglichen.

Die Kombination von Modularitätsmerkmalen schlägt sich in höherer Design-Flexibilität – der Möglichkeit, das Design problemlos zu aktualisieren oder zu ändern – und in reduzierten Design- sowie Produktionskosten nieder. Während also die internen Varianten reduziert werden, kann sich der Hersteller auf die Entwicklung seiner Kernkapazitäten konzentrieren. Das Konzept der Modularität ist in der Automobilindustrie nicht neu, auch nicht im Antriebsstrangdesign. Allerdings hat die Elektrifizierung des Antriebsstrangs die OEMs dazu gezwungen, modifizierte und neue modulare Antriebsstrangplattformen zu schaffen, um die für die Elektrifizierung notwendigen Komponenten zu integrieren.

Es existieren verschiedene Design-Methoden, die für modulare Produkte verwendet werden können: genetische Algorithmen, axiomatisches Design, DSM-Matrix und andere.³³ Gemeinsame Schritte bei diesen Methoden sind die Definition von Modulen und das konzeptionelle Design der Plattform. Als Ergebnis umfangreicher Forschung und Entwicklung in der Antriebsstrangtechnologie sowie der Natur des Systems sind einige grundlegende Module in den meisten, wenn nicht sogar allen Plattformen vorhanden. Durch die Modularisierung wurde die Komplexität des Antriebsstrangs in der gesamten Branche auf einige Grundmodule reduziert.

³³Vgl. Paes et al. 2018.

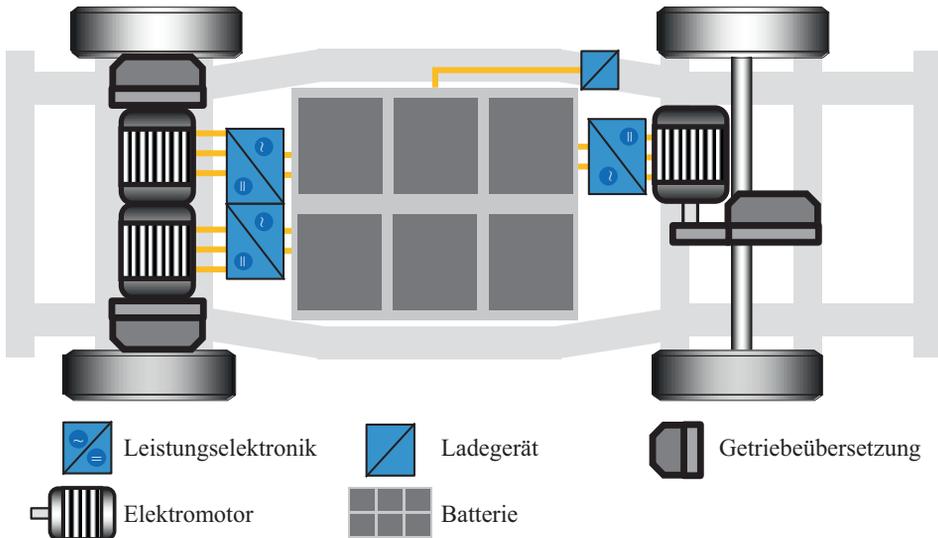


Abb. 6.7 Beispiel für die Architektur einer Elektrofahrzeugplattform

Dies führt dazu, dass die derzeitigen Plattformen für Elektrofahrzeuge eine ähnliche Architektur aufweisen. Bei dieser Architektur, die oft als „Skateboard-Konzept“ bezeichnet wird, wird auf einen Verbrennungsmotor, ein Getriebe und eine Kardanwelle verzichtet. Die Batterie ist Teil des Fahrgestells und die Elektromotoren sowie die Leistungselektronik können in der Nähe der Räder untergebracht werden, wie in Abb. 6.7 dargestellt. Die Unterschiede ergeben sich in den genauen Komponenten, aus denen sich die Module zusammensetzen, das heißt: im Preis-Leistungs-Verhältnis. Die gängigsten Module sind die Batterie, die Antriebseinheit, das Ladegerät, die Karosserie und das Thermomanagement.

Gemeinsam mit der Zusammensetzung der Module ist die Varianz des Systems für Hersteller und Nutzende von großer Bedeutung. Dies ergibt sich aus der Analyse der externen Anforderungen des Endanwenders, geclustert in den Anwendungsfällen und der internen Varianz des Unternehmens auf der Suche nach einem wirtschaftlichen Produktangebot in Abhängigkeit von der Lieferkette und den Produktionsprozessen.³⁴ Daraus werden die Dimensionen der Varianz abgeleitet. Für die Elektromobilität bilden das Gewicht (Klasse) und die Reichweite die beiden wesentlichen von den Herstellern adressierten Design-Dimensionen.

Über die Elektrifizierung des Straßenverkehrs hinaus können Modularisierungskonzepte die Elektrifizierung anderer Mobilitätssektoren vor allem durch die Nutzung von Gemeinsamkeiten, Kombinierbarkeit und Funktionsbindung ermöglichen. Stand der Technik ist es, die Modularisierung des Antriebsstrangs auf Anwendungen zu übertragen, die sich in Reichweite und Gewichtsklasse unterscheiden. Wie in Abb. 6.8 dargestellt,

³⁴Vgl. Schuh 2015.

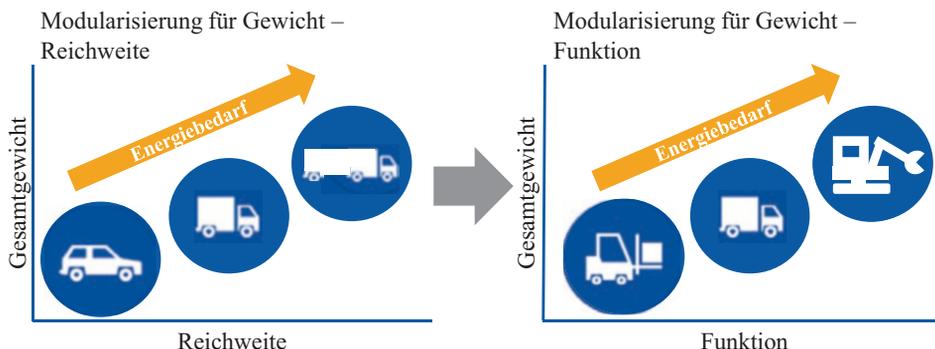


Abb. 6.8 Potenzial des modularen Antriebsstrangs für Gewicht (Klasse), Energie und Funktion

können die von der Modularisierung dominierten Dimensionen allerdings um eine dritte Dimension erweitert werden, in der die Funktionalität integriert wird. Das bedeutet, die Module und Komponenten nicht nur in Abhängigkeit von gewünschter Reichweite (Energie) und Fahrzeugklasse (Gewicht) zu dimensionieren, sondern die Elemente des Antriebsstrangs miteinander zu kombinieren, um weitere Funktionen zu ermöglichen, wie sie für spezifische Bereiche wie etwa Straßenreinigung, Beladung oder diverse Tätigkeiten im Bauwesen benötigt werden.

Literatur

Teil II: Elektrofahrzeugspezifische Systeme

ACEA European Automobile Manufacturers Association: *Making the transition to zero-emission mobility. 2020 Progress Report*, October 2020. Enabling factors for alternatively-powered cars and vans in the european union

Adib, A; Shadmand, M. B; Shamsi, P; Afridi, K. K; Amirabadi, M; Fateh, F; Ferdowsi, M; Lehman, B; Lewis, L. H; Mirafzal, B; Saeedifard, M.: *E-Mobility – Advancements and Challenges*. In: IEEE Access, Jg. 7, 2019, S. 165226–165240

Ajanovic, A; Glatt, A.: *Wirtschaftliche und ökologische Aspekte der Elektromobilität*. In: Elektrotech. Inftech., Jg. 137, 2020, Nr. 4–5Nr., S. 136–146

Doppelbauer, M.: *Grundlagen der Elektromobilität*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020

Fritsch, K.-M; Rieger, D; Warth, M; Scharrer, O.: *48-V-Antriebsmodul für Elektrofahrzeuge*: MTZ 79, 2018

Gerling, D; Patzak, A; Baumgardt, A; Bachheibl, F.: *48-V-Traktion Volle Leistung bei sicherer Spannung*: ATZ extra, 2017

Gerlitz, E; Botzem, D; Weinmann, H; Ruhland, J; Fleischer, J.: *Cell-to-Pack-Technologie für Li-Ionen-Batterien*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2021

- ISO:** ISO 6469-3:2021 Electrically propelled road vehicles – Safety specifications, 2021
- James, B. D; Huya-Kouadio, J. M; Houchins, C; Desantis, D. A.:** *Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2017 Update*. Arlington, VA, 2018
- Karle, A.:** *Elektromobilität Grundlagen und Praxis*. München: Carl Hanser Verlag, 2015
- Krause, D; Gebhardt, N. (Hrsg.):** *Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien*, Hamburg: Springer Vieweg, 2018
- L. Athanasopoulou, H. Bikas, P. Stavropoulos:** *Comparative Well-to-Wheel Emissions Assessment of Internal Combustion engine and battery electric vehicles: 6th CIRP Global Web Conference 2018*
- Lipman, T. E; Weber, A. Z. (Hrsg.):** *Fuel Cells and Hydrogen Production. A Volume in the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Second Edition*. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Series, New York, NY: Springer New York, 2019
- Löbberding, H; Wessel, S; Offermanns, C; Kehrer, M; Rother, J; Heimes, H; Kampker, A.:** *From Cell to Battery System in BEVs: Analysis of System Packing Efficiency and Cell Types*. In: WEVJ, Jg. 11, 2020, Nr. 4, S. 77
- Marenbach, R; Jäger, J; Nelles, D.:** *Elektrische Energietechnik. Grundlagen, Energieversorgung, Antriebe und Leistungselektronik* (Springer eBook Collection). 3., aktualisierte Auflage Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020
- Paes, I; Sabioni, R; Daaboul, J; Le Duigou, J.:** *Product and process modular design: a review*. In: Bellemare, J., Carrier, S., Nielsen, K., Piller, F.T. (Hrsg.): *Managing Complexity: Proceedings of the 8th World Conference on Mass Customization, Personalization, and Co-Creation (MCPC 2015)*. 8th International Conference on Mass Customization & Personalization, October 20th-22th, 2015. Montreal, Canada: Springer Vieweg 2018.
- Pischinger, S; Seiffert, U.:** *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (Springer eBook Collection). 9., erweiterte und ergänzte Auflage Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021
- Ruf, Y; Baum, M; Zorn, T; Menzel, A; Rehberger, J.:** *Fuel Cells Hydrogen Trucks. Heavy-Duty's High Performance Green Solution*, 2020
- Schuh, G.:** *Leitfaden zur Baukastengestaltung*. Frankfurt am Main: VDMA Verlag GmbH, 2015
- Stan, C.:** *Automobile der Zukunft. Mehr als nur elektrisch, digital, autonom*. 1. Aufl. 2021 Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021
- Thielmann, A; Wietschel, M; Funke, S; Grimm, A.:** *Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf*. Karlsruhe, 2020
- Töpler, J; Lehmann, J. (Hrsg.):** *Wasserstoff und Brennstoffzelle. Technologien und Marktperspektiven*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017
- Trzesniowski, M.:** *Antrieb* (Handbuch Rennwagenteknik Ser, v.3). 2nd ed. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2019
- Tschöke, H; Gutzmer, P; Pfund, T.:** *Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Grundlagen -vom mikro-hybrid zum*. [Place of publication not identified]: MORGAN KAUFMANN, 2020
- Tseng, M. M; Yue Wang; Roger J. Jiao.:** *Modular Design: CIRP Encyclopedia of Production Engineering*

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Batteriesysteme und deren Steuerung

7

Dirk Uwe Sauer und Florian Ringbeck

Lithium-Ionen-Batterien sind der Schlüssel für eine weitreichende Hybridisierung und Elektrifizierung von Antrieben in sehr unterschiedlichen Anwendungsbereichen. Um das von der Bundesregierung gesetzte Ziel der Reduktion der CO₂-Emissionen im Mobilitätsbereichs bis 2030 um mehr als 40 % gegenüber 2020 zu erreichen, rechnet die „Nationale Plattform Mobilität“ für Deutschland mit einem Anteil von 80 % elektrisch angetriebener Fahrzeuge am Neuwagenmarkt im Jahr 2030. Dabei werden die verbleibenden Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren wohl ab spätestens 2025 nahezu vollständig über ein zusätzliches 48-Volt-Bordnetz für eine Mild-Hybridisierung verfügen. Ein kleinerer Teil der Neuwagen wird dann Plug-in-Hybride und der Großteil batterieelektrische Fahrzeuge sein. Nach aktuellem Kenntnisstand werden Brennstoffzellenfahrzeuge bis 2030 keinen signifikanten Anteil erreichen. Abgesehen von Bleistarterbatterien für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren und für die Zwölf-Volt-Bordnetze von Fahrzeugen mit Hochvoltbatterien spielen andere Speichertechnologien aktuell keine Rolle mehr. Die Bleibatterien werden sich noch eine Weile lang halten, weil sie inhärent eine geringere Ausfallwahrscheinlichkeit aufweisen und damit für die Erreichung des ASIL-D-Levels unverzichtbar sind. Da die Bleibatterien aber in modernen Straßenfahrzeugen nicht mehr als Antriebsbatterien eingesetzt werden, fallen sie hier ebenso aus der Betrachtung wie

D. U. Sauer (✉)

Universitätsprofessor, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: dirkuwe.sauer@isea.rwth-aachen.de

F. Ringbeck

Geschäftsführender Oberingenieur, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: florian.ringbeck@isea.rwth-aachen.de

Nickel-Metallhydrid (NiMH)-Akkus, die nur noch in wenigen Hybridfahrzeugen vor allem eines Fahrzeugherstellers zum Einsatz kommen.

Während bis 2030 voraussichtlich der Großteil der Batterien der Lithium-Ionen-Technologie zuzuordnen sind, so gibt es innerhalb der Technologie inzwischen doch ein hohes Maß an Ausdifferenzierung von Eigenschaften, so dass für jede Anwendung eine darauf zugeschnittene Zelltechnologie bereitsteht.

In diesem Kapitel wird die Lithium-Ionen-Batterietechnologie mit ihren unterschiedlichen Ausprägungen und deren Leistungseigenschaften vorgestellt und ein Ausblick auf Weiterentwicklungen gegeben, die in den kommenden Jahren eine Rolle spielen könnten. Für verschiedene Anwendungsbereiche werden Belastungsprofile samt Lebensdaueranforderungen diskutiert und darauf aufbauend Fragestellungen des Batteriesystemdesigns inklusive der Batteriemanagementsysteme betrachtet.

7.1 Lithium-Ionen-Batterien

„Lithium-Ionen“ ist zunächst einmal ein Sammelbegriff für eine Vielzahl von Materialkombinationen, denen gemeinsam ist, dass sie rund 3 %_{gew} Lithium enthalten und dieses Material die eigentliche Ladungsspeicherung und den Ladungstransport zwischen den beiden Elektroden übernimmt. Durch die Wahl unterschiedlicher Elektrodenmaterialien, Zelldesigns und Herstellungsverfahren können sehr unterschiedliche Eigenschaften erzielt werden. Daher ist es in aller Regel nicht korrekt, von Eigenschaften „der“ Lithium-Ionen-Batterie zu sprechen. Dennoch werden aufgrund der gebotenen Kompaktheit immer wieder Verallgemeinerungen vorgenommen. Aber auch für eine gegebene Materialkombination existieren meist Produkte mit einer sehr großen Bandbreite von Eigenschaften. Daher sind Aussagen wie „Material X bringt längere Lebensdauern als Material Y“ in der Absolutheit selten richtig. Immer wieder zu findende Spinnendiagramme, die generell Eigenschaften verschiedener Lithium-Technologien vergleichen, haben kaum einen Wert und werden daher an dieser Stelle auch nicht gezeigt. Es ist notwendig, sich die Eigenschaften jedes einzelnen Produkts in Bezug auf Kapazität, Lade- und Entladeleistungsfähigkeit, kalendarische und zyklische Lebensdauer, Sicherheit, Temperaturbetriebsbereiche und Kosten sehr genau anzuschauen.

7.1.1 Technologie

Lithium ist Element Nr. 3 des Periodensystems und damit das leichteste Element, das bei Raumtemperatur fest ist. Da das Atom gleichzeitig leicht ist und ein hohes elektrochemisches Reaktionspotenzial besitzt, ist es für Batteriekonzepte von Natur aus sehr attraktiv.

Unterschieden werden Lithium-Ionen-Batterien, bei denen das Lithium im regulären Betrieb nie metallisch vorliegt, von den Lithium-Metall-Batterien. Letztere lagern Li-

thium im geladenen Zustand auf der Anode metallisch ab. Diese Technologie spielt in Anwendungen noch fast keine Rolle, wird aber in der „Festkörperbatterie“ Bedeutung erlangen. Derartige „All-Solid-State“-Batterien werden im Abschn. 7.2 „Beyond-Lithium-Ionen-Technologie“ diskutiert.

Lithium-Ionen-Batterien sind reine Interkalationsbatterien. Das bedeutet, dass das Lithium in die bestehenden Kristallstrukturen der positiven Elektrode (Kathode) und der negativen Elektrode (Anode) hinein- beziehungsweise hinausdiffundiert. Während das Lithium bei der Bewegung im Elektrolyt als positives Ion vorliegt, wird es nach Einlagerung auf Zwischengitterplätzen in den Elektroden durch den äußeren Elektronenfluss wieder neutralisiert. Als Kathodenmaterial wird in Lithium-Ionen-Batterien heute überwiegend ein Metalloxid verwendet, bei dem Nickel, Kobalt, Mangan und Aluminium in verschiedenen stöchiometrischen Verhältnissen zum Einsatz kommen. Die Stöchiometrie bestimmt wesentlich sämtliche technologischen Eigenschaften und die Kosten. Hohe Priorität hat das Bestreben, den Kobaltanteil so weit wie möglich zu reduzieren, weil es das teuerste und knappste der Materialien ist. Aktuell werden zum Beispiel vermehrt Kathodenmaterialien mit acht Teilen Nickel und je einem Teil Kobalt und Mangan eingesetzt (NMC 811). Daneben spielt noch Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) als Kathodenmaterial eine Rolle, mit dem deutlich geringere Energiedichten erzielt werden. Weil aber Eisen deutlich günstiger als Kobalt und Nickel ist, lassen sich günstigere Kosten pro kWh erzielen. Außerdem handelt es sich bei LFP um ein Material mit anderen elektrochemischen Eigenschaften, die es zu einem inhärent sichereren Material machen. Mehr dazu im Abschn. 7.4 „Batteriesystemdesign“.

Die Anode besteht bei kommerziellen Lithium-Ionen-Batterien heute aus verschiedenen Modifikationen von Graphit, wobei einige Produkte mit besonders hohen Energiedichten einen Teil des Graphits durch Silizium ersetzen. Dadurch lässt sich die Energiedichte steigern, weil pro Siliziummasse mehr Lithium eingelagert werden kann. Während Graphit bei Einlagerung von Lithium eine Volumenzunahme von rund 10 % aufweist, sind dies bei Silizium allerdings bis zu 300 %, was einen enormen mechanischen Stress und damit Probleme mit der Zyklenlebensdauer verursacht. Daher werden bislang nur Teile des Graphits durch Silizium ersetzt. Ein weiteres Anodenmaterial ist das Lithium-Titanat (LTO). Zellen mit diesem Material haben eine deutlich geringere Zellspannung und damit auch eine erheblich geringere Energiedichte. Gleichzeitig können mit diesem Material, das praktisch keine Volumenänderung bei der Zyklisierung und Deckschichtbildung aufweist, Lebensdauern im Bereich von 100.000 Zyklen oder sehr hohe Ladeleistungen von bis zu 100 C erreicht werden. Die C-Rate drückt aus, welche Stromstärke im Verhältnis zur Kapazität erreicht werden kann. Dabei gibt das Inverse des Zahlenwerts die Dauer in Stunden an, die theoretisch für eine vollständige Ladung oder Entladung benötigt wird. Eine typische Stromstärke von 1 C entspricht also einer Dauer von einer Stunde, während 100 C einer Dauer von einem Hundertstel einer Stunde entsprechen, also 36 s. Abb. 7.1 zeigt Beispiele für verschiedene Elektrodenmaterialien und eine grobe Angabe zu den sich damit ergebenden Eigenschaften.

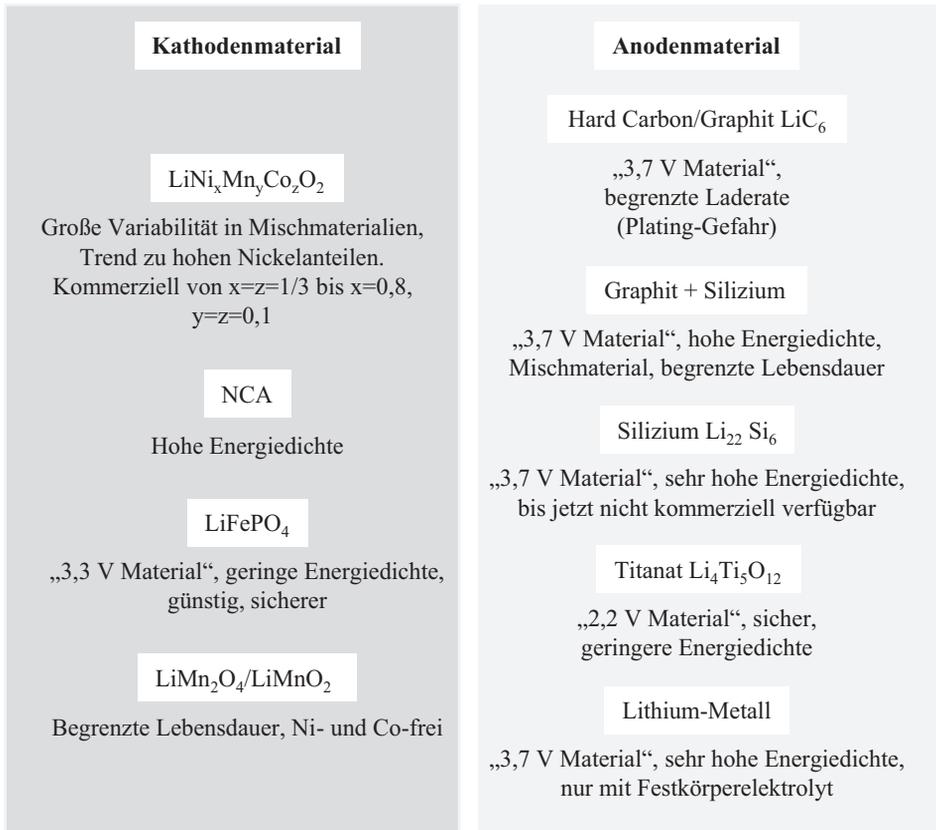


Abb. 7.1 Auswahl populärer Materialkombinationen für Lithium-Ionen-Batterien aus der heutigen Fertigung und Entwicklung

Zwischen den beiden Elektroden befindet sich ein poröser Separator, der für elektronischen Strom isolierend ist und einen Kurzschluss zwischen den beiden Elektroden zuverlässig unterbinden muss.

Heutige kommerzielle Lithium-Ionen-Batterien enthalten einen organischen, wasserfreien Elektrolyten („Lösungsmittel“) mit einem Leitsalz, das ausreichend Lithium-Ionen für eine gute Leitfähigkeit bereitstellt. Der Elektrolyt füllt neben dem Porenvolumen der beiden Elektroden von etwa 30 % – so dass Ionen über den Elektrolyten auch in die tieferen Schichten des Aktivmaterials ohne großen Widerstand vordringen können – ebenso die Poren des Separators sowie alle anderen Freiräume zwischen den beiden Elektrolyten. Ist die Befeuchtung mit Elektrolyt aufgrund mangelhafter Befüllung oder wegen Verbrauchs des Lösungsmittels durch Alterungsprozesse unvollständig, hat das die Zunahme des Innenwiderstands und eine Abnahme der Kapazität zur Folge. Dem Elektrolyten ist meist eine Vielzahl von Additiven zugesetzt, die wesentlichen Einfluss etwa auf die Lebensdauer und die Sicherheit der Batteriezelle haben. Art, Zusammensetzung und Menge dieser

Additive gehören zu den bestgeschützten Geheimnissen der Batteriezellhersteller und lassen sich mit Standardanalyseverfahren kaum aufschlüsseln.

7.1.2 Elektrische Leistungsfähigkeit

Lithium-Ionen-Batterien werden heute in zahlreichen Modifikationen der Elektrodenmaterialien, der Bauform und des inneren Aufbaus angeboten, der die Leistungsfähigkeit bestimmt. Darüber hinaus spielen Faktoren wie Elektrolytzusammensetzung und -zusätze eine wichtige Rolle zum Beispiel für die maximalen Ladeströme, das Tieftemperaturverhalten, die Sicherheit oder die Zyklen- und kalendarische Lebensdauer. Generalisierte Aussagen dazu, welche Materialkombinationen nun besonders gut in Bezug auf einzelne Eigenschaften sind, werden in der Literatur und in Publikationen von Unternehmen zwar oftmals suggeriert, de facto lässt sich im Markt jedoch feststellen, dass es zu fast jeder Materialkombination eine sehr große Breite von Produkteigenschaften gibt. Die Herstellerangaben vermitteln zudem oftmals nur ein unvollständiges Bild der wahren Zusammensetzung der Batterie, wie Laboranalysen immer wieder zeigen. Daher lohnt es sich, die am Markt verfügbaren Produkte systematisch auf ihre Eigenschaften zu untersuchen und sie nicht aufgrund bestimmter Herstellerangaben zu den verwendeten Materialien automatisch auszuschließen.

Aktuell zeigt sich im Mobilitätsbereich immer mehr eine Ausdifferenzierung der Eigenschaften. In den 2010er-Jahren waren die Fahrzeughersteller darauf bedacht, möglichst mit einer Zelle eine große Bandbreite verschiedener Fahrzeuganforderungen abzudecken, um dadurch einen Skaleneffekt zu erzielen. Inzwischen liegen die für die kommenden Jahre anvisierten Stückzahlen so hoch, dass eine Optimierung auf Kosten, Energiedichte oder andere Eigenschaften für das jeweilige Produktsegment erfolgen kann. Dabei wird mittlerweile eine wesentlich kürzere Zyklenlebensdauer in Kauf genommen: Stellten die traditionellen Fahrzeugproduzenten in den 2010er-Jahren noch Anforderungen im Bereich von 2000 bis 4000 Vollzyklen, sind heute meist 500 bis 800 Vollzyklen ausreichend. Zum einen ist dies die Folge des Wöhlereffekts, der bei einer Teilzyklisierung der Batterie zu wesentlich höheren Energieumsätzen und damit zu einer höheren Gesamtleistung führt, zum anderen sind die Batterien sehr viel größer geworden und weisen heute typischerweise Reichweiten zwischen 300 und 500 km auf. 800 Zyklen bei 300 km Reichweite sind dabei schon 240.000 Fahrkilometer (ohne Wöhlereffekt) und für fast alle Pkw ausreichend. Für Lkw oder typische stationäre Anwendungen werden hingegen Batteriezellen mit einer Lebensdauer von 3000 Zyklen und mehr benötigt, da in diesen Anwendungen praktisch täglich die Batteriekapazität einmal oder sogar zweimal vollständig umgesetzt wird.

Das Ragone-Diagramm in Abb. 7.2 vergleicht die spezifische Leistungsdichte und die spezifische Energiedichte jeweils bezogen auf das Gewicht verschiedener kommerzieller Batterietechnologien. Die volumetrische Energiedichte liegt bei Lithium-Ionen-Batterien rund zwei- bis zweieinhalbmal höher als die gravimetrische Energiedichte. Dabei wird

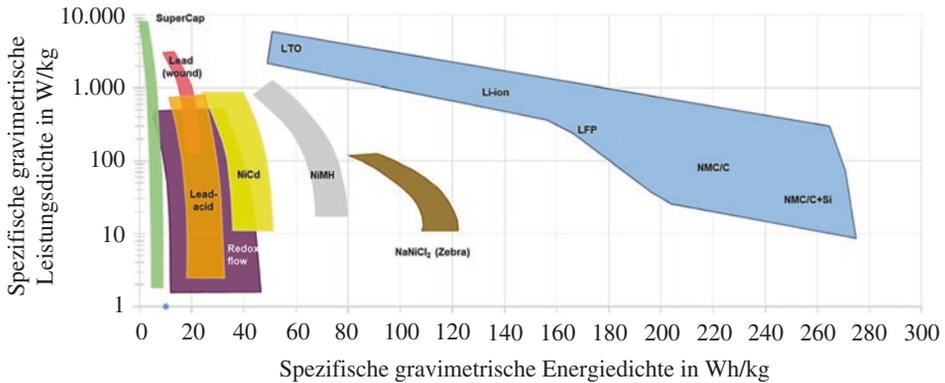


Abb. 7.2 Spezifische Leistung und spezifische Energie für verschiedene Speichertechnologien. (Leistungsdaten aus verschiedenen Datenblättern oder eigenen Messungen)

deutlich, dass Lithium-Ionen-Batterien in der Gesamtheit ihrer Eigenschaften allen anderen Technologien überlegen oder mindestens gleichwertig sind. Es können sehr hohe Leistungsdichten erreicht werden, die in den Bereich der „SuperCap“ kommen. Die höchsten Leistungen werden derzeit mit LTO-Batterien erzielt. Die höchsten Energiedichten unter den kommerziell etablierten Technologien werden aktuell mit NMC-Kathoden bei hohen Nickelanteilen in Kombination mit Graphitanoden mit einer Beimischung von etwa 5 bis 15 % Silizium erzielt.

Das Ragone-Diagramm macht aber auch deutlich, dass höchste Leistungs- und Energiedichten gleichzeitig mit keiner Batterietechnologie erzielt werden. Für eine hohe Leistungsfähigkeit muss der Innenwiderstand besonders klein sein, was aber nur erreicht wird, wenn der ionische Widerstand so klein wie möglich ist. Dafür müssen die Elektroden sehr dünn sein, um den Ionen kurze Wege zu ermöglichen. Bei dünnen Elektroden ist jedoch das Verhältnis zwischen Gewicht und Volumen der Aktivmassen, die für die Energiespeicherung benötigt werden, und den passiven Anteilen der Zelle, wie Stromableiter, Gehäuse und Separatoren, deutlich geringer als bei dicken Elektroden. Daher gilt vereinfacht: a) dicke Elektroden → hohe Energiedichte → hoher Innenwiderstand, b) dünne Elektroden → geringer Innenwiderstand → geringere Energiedichte.

Für Hybridfahrzeuge werden vor allem Batteriezellen mit sehr hohen Leistungsdichten eingesetzt, da aus kleinen Batterien hohe Leistungen abgerufen werden müssen. Zellen mit hoher Leistungsfähigkeit können sehr schnell ge- und entladen werden. Dementsprechend lassen sich hohe Zyklenzahlen pro Tag erreichen. Aus diesem Grund werden Hochleistungszellen meist als Batterie mit hoher Zyklenlebensdauer angeboten.

Auch im Fall hoher Stromraten lässt sich bei Lithium-Ionen-Batterien ein hoher Anteil der bei kleinen Strömen verfügbaren Kapazität nutzen. Damit eignen sich Lithium-Batterien sehr gut für Hochstrombelastungen, wie sie außer bei Hybridfahrzeugen beispielsweise in Elektrowerkzeugen oder unterbrechungsfreien Stromversorgungen auftreten.

Für vollelektrische Fahrzeuge werden hingegen hohe Energiemengen für entsprechende Reichweiten benötigt und daher Zellen mit hohen Energiedichten verwendet. Die Leistungen für den Antrieb werden trotz der geringeren Energiedichten erreicht, da die Batterien groß sind. Bei 60 kWh Batteriekapazität können mit einer 3C-Entladeleistung, die praktisch alle Automotive-Batterien erreichen, bereits 180 kW Antriebsleistung bedient werden.

Die Wirkungsgrade von Lithium-Ionen-Batterien liegen bei 90 bis 95 % und sind damit sehr hoch im Vergleich mit allen anderen Batterietechnologien. Ursachen dafür sind der geringe Innenwiderstand und die hohen Zellspannungen von 3,3 bis 3,7 V für LFP- und NMC-Typen, die damit beispielsweise im Verhältnis zu Bleibatterien mit 2,0 V fast zweimal und zu NiCd- und NiMH-Batterien mit 1,2 V rund dreimal so hoch liegen. Die hohe Spannungslage reduziert auch den Verschaltungsaufwand bei einer gegebenen Systemspannung und hat positive Auswirkungen auf den Innenwiderstand des Batteriesystems. Im Betrieb kann der Wirkungsgrad bei tiefen Temperaturen geringer ausfallen, was dann aber zu einer beschleunigten Aufwärmung der Batterie führt.

Eine Vielzahl unterschiedlicher Prozesse an beiden Elektroden und den Grenzschichten zwischen Elektrolyt und Elektrodenmaterialien führen zur Alterung von Lithium-Ionen-Batterien. Der wichtigste Effekt ist bei allen NMC- und LFP-Varianten unterdessen die Bildung einer Grenzschicht zwischen Graphit und Elektrolyt auf der negativen Elektrode („Solid Electrolyte Interphase“ – SEI). Beim negativen Elektrodenpotenzial ist der Elektrolyt nicht stabil und reagiert daher spontan mit Graphit und Lithium. Gestoppt wird der Prozess nur, weil das Reaktionsprodukt selbst eine trennende Grenzschicht bildet. Diese Grenzschicht ist sehr dicht und reduziert die Reaktionsraten erheblich. Damit ist sie zum Beispiel vergleichbar mit dem Grünspan auf Kupfer. Kupferdächer können daher sehr alt werden. Auch in Lithium-Ionen-Batterien erlaubt die Grenzschicht lange Lebensdauern. Gleichzeitig muss die Grenzschicht aber weiter durchlässig für die Lithium-Ionen beim Laden und Entladen sein. Daher wächst sie prinzipiell in Abhängigkeit von der Spannungslage beziehungsweise dem Ladezustand, der Temperatur und der Zyklentiefe immer weiter. Da sie nicht wiederauflösbare Lithium-Verbindungen enthält, entzieht das Wachstum der Grenzschicht der Batterie freies, für die Ladungsspeicherung notwendiges Lithium. Dementsprechend sinkt die verfügbare Kapazität. Gleichzeitig wächst der Innenwiderstand mit zunehmender Schichtdicke. Das Wachstum der Grenzschicht reduziert also die Kapazität und erhöht den Innenwiderstand.

Grundsätzlich nimmt die Leistungsfähigkeit im Fall niedrigerer Temperaturen deutlich ab. Bei welcher Temperatur dies genau kritisch wird, ist von der Batteriezelle abhängig. Zellproduzenten können den „Wohlfühltemperaturbereich“ von Lithium-Ionen-Batterien in relativ großen Bereichen einstellen. Wichtig ist vor allem die Verhinderung des sogenannten Lithium-Platings. Dies bedeutet eine Ablagerung von metallischem Lithium auf der Anode beim Aufladen. Zu jeder Temperatur gibt es eine maximale Ladestromrate, bei der den Ionen ausreichend Zeit bleibt, in die Graphitstruktur hineinzudiffundieren. Wird es kälter oder wird der Strom höher, bildet sich ein „Stau“ der Ionen, die dann an der Oberfläche zu metallischem Lithium reduziert werden. Dieses metallische Lithium hat dann

noch keine Schutzschicht und ist der direkten Reaktion mit dem Elektrolyten ausgesetzt. Dabei entstehen unauflösliche Reaktionsprodukte, die den weiteren Ionentransport behindern, was wiederum zu einer Erhöhung des Innenwiderstands führt. Darüber hinaus wird aktives Lithium dauerhaft gebunden und damit der Ladungsspeicherung entzogen. Deshalb führt das Lithium-Plating zu einer stark beschleunigten Alterung. Moderne Lademanagementsysteme müssen diesen Effekt, der zusätzlich vom jeweiligen Ladezustand und vom Alterungszustand abhängig ist, besonders beobachten und verhindern. Dies ist auch ein wesentlicher Grund dafür, dass die reale Ladegeschwindigkeit oftmals unter dem Wert liegt, den die Ladeleistung der Ladestation ermöglicht.

7.1.3 Alterung und Lebensdauer

Die Lebensdauer von Batterien wird über zwei Eigenschaften definiert:

- Kalendarische Lebensdauer: Sie gibt an, wie lange die Batterie auch ohne Belastung leben würde.
- Zyklenlebensdauer: Sie beschreibt, welchen Ladungsdurchsatz die Batterie relativ zu ihrer Größe liefern kann.

Das Ende der Lebensdauer wird einerseits über die Zunahme des Innenwiderstands und andererseits über die Abnahme der nutzbaren Kapazität definiert. Typischerweise gilt das Lebensdauerende bei einer Zunahme des Innenwiderstands um 100 % oder bei der Abnahme der Kapazität auf 70 respektive 80 % der Nennkapazität als erreicht. In Hybridfahrzeugen mit ihren Hochleistungsbatterien ist typischerweise der Innenwiderstand die begrenzendende Größe, während in Elektrofahrzeugen die Kapazität und damit die Reichweite aus Sicht des Nutzens das Lebensdauerende beziehungsweise entsprechende Nutzungseinschränkungen definiert.

Die Zyklenlebensdauer ist primär von der Zyklientiefe (Depth of Discharge – DOD) und dem Ladestrom abhängig, sofern es zum beschriebenen Lithium-Plating kommt. Ursache für die Abhängigkeit von der Zyklientiefe ist primär die Ausdehnung der Aktivmaterialien bei der Einlagerung von Lithium. Je stärker diese Ausdehnung ist, desto eher reißen Schutzschichten auf, werden Kristallstrukturen zerstört oder elektrisch leitende Verbindungen zwischen den Kristallen und hin zum Stromableiter abgerissen. Daher wird umso mehr Ladungsumsatz erreicht, je kleiner die Zyklientiefe ist („Wöhlerkurve“).

Die kalendarische Lebensdauer wird hingegen vor allem von der Temperatur und dem Ladezustand bestimmt. Dabei gilt in der Regel, dass sich die Lebensdauer bei einer Temperaturzunahme von 10 K etwa halbiert.

Ziel ist es, kalendarische Lebensdauern im Bereich der Fahrzeuglebensdauer zu erreichen, also rund 15 Jahre. Während das bei mitteleuropäischem Klima mit einer Jahresmitteltemperatur von etwa 10 °C wie in Deutschland durchaus realistisch ist, wird dies in wärmeren Gegenden mit Mitteltemperaturen von beispielsweise 20 °C eine erhebliche

Herausforderung. Hier stellt sich insbesondere die Frage, ob eine Universalzelle für alle Klimazonen sinnvoll ist oder ob für wärmere Gegenden Zellen mit besseren Lebensdauern bei hohen Temperaturen zu Lasten der Leistungsfähigkeit bei tiefen Temperaturen zum Einsatz kommen sollten.

Die Zyklenlebensdauer in Elektrofahrzeugen soll Laufleistungen von mindestens 100.000 Meilen oder rund 160.000 km ermöglichen. Bei den heutzutage typischen Reichweiten der Batterien von 300 bis 500 km würden dafür also weniger als 600 beziehungsweise 350 Vollzyklen bereits ausreichen. Bei teilzyklischer Belastung werden sich dann aber noch viel größere Reichweiten ergeben. So weist zum Beispiel eine Batteriezelle, die der von Tesla in der ersten Generation verwendeten Zelle sehr ähnlich ist, bei vollständiger Ladung und Entladung eine Lebensdauer von rund 500 Vollzyklen auf. Bei 400 km Reichweite mit einer Batterieladung entspricht dies einer Laufleistung von 200.000 km. Wird die Batterie aber jeweils nur um 20 % entladen, also nach 80 km, was einer typischen täglichen Belastung für den Weg zur Arbeit entsprechen könnte, wurden mit derselben Zelle mehr als 15.000 Zyklen von 20 % DOD entsprechend 3000 äquivalenten Vollzyklen erreicht. Dies entspräche dann einer Laufleistung von 1,2 Mio. km. Bei einer täglichen Nutzung von 80 km würde das zu einer Nutzungsdauer von mehr als 40 Jahren führen. Das ist allerdings unrealistisch, weil dann – und abhängig davon, ob die Karosserie sowie die anderen Komponenten des Antriebsstrangs so alt werden würden – die kalendarische Lebensdauer begrenzend wäre.

7.1.4 Sicherheit

Anders als die Batterien mit wässrigen Elektrolyten, zu denen etwa Blei-, Nickel-Cadmium- oder Nickel-Metall-Hydrid-Akkus zählen, verfügen Lithium-Ionen-Batterien über keinen definierten Mechanismus, der bei Überladung Strom aufnehmen könnte, ohne dabei die Batterie zu schädigen. Dies führt zwar zu einem sehr hohen Coulomb'schen Wirkungsgrad von nahezu 100 %, andererseits ruft eine Überladung in der Regel irreversible Reaktionen hervor, die zur direkten Alterung und im Extremfall zu einem thermischen Event führen.

Bei NMC-Lithium-Ionen-Batterien mit ihren Schichtmaterialien führt eine Überladung einer Batteriezelle zu einer übermäßigen Entnahme von Lithium aus dem Kathodenmaterial. Wird eine Schwelle überschritten, erfolgt eine exotherme Zersetzung des Kathodenmaterials unter Freisetzung hoher Energiemengen und molekularen Sauerstoffs. In der Folge werden aus dem Elektrolyten und dem Anodenmaterial weitere, zum Teil brennbare Gase wie CH_4 , CO oder CO_2 gebildet. Dies führt mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Brand der Batteriezelle, wenn durch den Gasdruck das ansonsten dichte Gehäuse gesprengt wird. Der organische Elektrolyt, das Graphit der negativen Elektrode und der Separator tragen dann weiter zur Brandlast bei. Um die Überladung der Zellen zu verhindern, werden in Lithium-Ionen-Batterien – im Gegensatz zu anderen kommerziellen Batterietypen mit wässrigen Elektrolyten – Einzelzellspannungsüberwachungen

verwendet. Dabei begrenzt in einer Serienschaltung aus Zellen immer diejenige Zelle mit der höchsten Spannung die Ladegeschwindigkeit beziehungsweise die maximale Ladungsaufnahme. Ebenso endet die Entladung eines Batteriesystems, wenn die erste Zelle die Entladeschlussspannung erreicht, auch wenn die anderen Zellen noch weitere Energie liefern könnten. Daraus ergeben sich besonders hohe Anforderungen an die Gleichmäßigkeit der Zellen in der Produktion und eine möglichst hohe Temperaturhomogenität im Batteriepack, damit nicht einzelne Zellen durch höhere Temperaturen erheblich schneller altern und damit die Gesamtleistung des Packs limitieren.

Eine Zersetzung des NMC-Kathodenmaterials kann jedoch auch durch hohe Temperaturen im Bereich von 200 °C ausgelöst werden. Diese können entweder durch Wärmeübertragung von außen oder durch innere und äußere Kurzschlüsse verursacht werden. Ein mechanischer Einschlag („Crash“) auf eine Lithium-Ionen-Zelle kann einen solchen Kurzschluss ebenso auslösen wie Herstellfehler beim Separator oder beim Aufbau des Zellstapels sowie die Ausbildung von metallischen Dendriten durch Lithium-Plating. Besonders kritisch ist es, wenn infolge des Durchgehens einer einzelnen Zelle die Nachbarzellen durch die freigesetzte Wärme so weit aufgeheizt werden, dass die kritische Temperaturschwelle überschritten wird. Dann kann es zu einer Kettenreaktion kommen, die auch als „Thermal Propagation“ bezeichnet wird. Während der Druck, die Gasmenge und die Wärme einer einzelnen Zelle in gut konstruierten Batteriepacks aufgefangen werden können, wird das bei einer vielfachen Freisetzung durch eine große Zahl von Zellen nahezu unmöglich. Entsprechend ist bei der Konstruktion des Batteriepacks ein besonderes Augenmerk darauf zu legen, dass der Wärmeübertrag von Zelle zu Zelle möglichst stark unterdrückt oder zumindest verlangsamt wird.

Lithium-Eisen-Phosphat (LFP)-Batterien wird eine höhere Sicherheit zugeschrieben. Der Grund dafür ist, dass das Kathodenmaterial eine Olivinstruktur hat, die keine Instabilität mit exothermer Reaktion aufweist. Dementsprechend fällt eine wesentliche Energiequelle und damit das Risiko eines Brands bei moderater Überladung einer Zelle weg. Allerdings bleiben mit dem organischen Elektrolyten und dem Graphit der negativen Elektrode weitere Brandlasten, die zum Beispiel durch starke Erwärmung von außen oder innere Kurzschlüsse zum Brand führen können.

Grundsätzlich kann bei allen heute verwendeten Lithium-Ionen-Batterien bei hohen Temperaturen der Elektrolyt verdampfen. Der dabei entstehende hohe Druck kann die Zelle zum Bersten bringen und beim Austritt der brennbaren Gase kommt es schnell zu deren Entzündung.

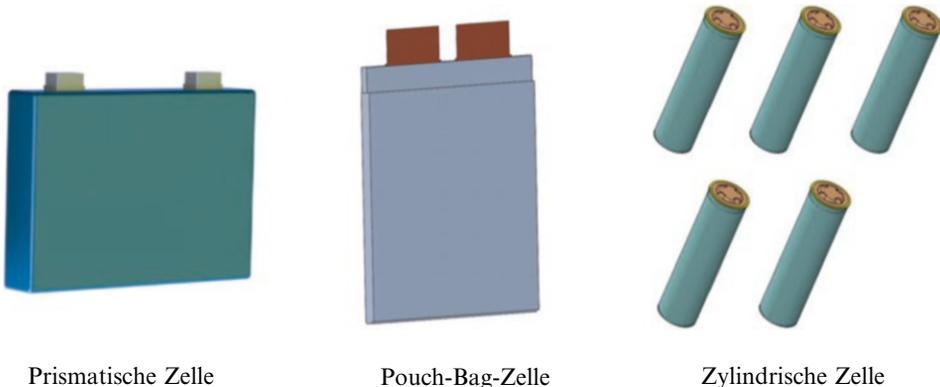
Das Unterschreiten der Entladeschlussspannung führt nicht unmittelbar zu einem Gefährdungspotenzial. Kurzfristige Unterschreitungen etwa während Beschleunigungsphasen sind insgesamt als unkritisch zu betrachten. Wenn Lithium-Ionen-Batterien mit Kupferableiter aber längere Zeit bei zu tiefen Spannungen lagern, kann es zu Korrosionsprozessen an den Elektroden kommen, was später Kurzschlussbrücken verursachen kann. Daher sind Batterien, die eine unbekannte Zeit lang unterhalb der vom Hersteller angegebenen Entladeschlussspannung gelagert gewesen sind, in der Regel für den weiteren Betrieb nicht mehr als sicher einzustufen.

Für einen sicheren Betrieb ist ein ordnungsgemäßes Batteriemangement absolut notwendig. Insbesondere eine gute Temperaturüberwachung der Batterie kann zumindest Personenschäden durch eine rechtzeitige Warnung sehr zuverlässig verhindern.

Insgesamt gibt es bislang jedoch keine Daten, die bei Elektrofahrzeugen auf eine höhere Brandgefahr hinweisen, als dies bei konventionellen Fahrzeugen der Fall ist. Tesla berichtet, dass zwischen 2012 und 2020 ein Fahrzeugbrand pro 205 Mio. gefahrene Meilen aufgetreten ist. Daten der „National Fire Protection Association“ (NFPA) und des „U.S. Department of Transportation“ zufolge trat im selben Zeitraum bei konventionellen Fahrzeugen ein Brand pro 19 Mio. gefahrene Meilen auf – mehr als zehnmals häufiger.¹ Dies ist letztlich auch auf die hohe Qualität und das insgesamt hohe Verantwortungsbewusstsein der Fahrzeughersteller zurückzuführen. Vor allem in billigen Consumer-Produkten sind die Risiken für Batterieschäden ungleich höher.

7.1.5 Zelldesigns

Heutzutage werden drei verschiedene Zelldesigns hergestellt und verwendet (vgl. Abb. 7.3). Für Rundzellen werden die Elektroden und die Separatoren von Endlosrollen aus aufgewickelt und in ein zylindrisches Gehäuse eingebracht. Diese Zellen werden traditionell in Consumer-Produkten und von Tesla zunächst in der Größe „18650“ (18 mm Durchmesser, 65 mm Höhe) für ihre Fahrzeuge verwendet. Aktuell wird im Fahrzeugbereich vermehrt das 21700er-Format eingesetzt und für die nächste Generation ist ein 46800er-Format angekündigt. Dies weist gegenüber der 18650er-Zelle ein rund achtmal größeres Volumen und eine dementsprechend höhere Kapazität auf.



Prismatische Zelle

Pouch-Bag-Zelle

Zylindrische Zelle

Abb. 7.3 Prismatisches Zelldesign, Flachzelle und Rundzelle

¹Green Car Reports: „Fires are less frequent in Teslas and other EV’s vs. gas vehicles“, veröffentlicht auf www.greencarreports.com am 17.08.2021 durch Bengt Halvorson, letzter Zugriff am 20.11.2021.

Bei den Flach- oder Pouch-Bag-Zellen werden die Elektroden aufgeschichtet und in einer Folie verschweißt (siehe Kap. 15). Dabei sind sehr unterschiedliche Designs bezüglich Höhe, Breite und Dicke und somit auch Kapazitäten von weniger als einer bis weit über hundert Amperestunden bekannt. Die Kontakte können an einer Seite, aber auch an gegenüberliegenden Seiten der Zelle angebracht sein.

In prismatischen Zellen werden quaderförmige Gehäuse verwendet, die für Fahrzeuge fast immer aus Metall sind. Die Elektroden sind entweder oval gewickelte Zell-Stacks oder auch geschichtete Designs wie in den Pouch-Bag-Zellen („Z-Folding“). Dabei ist aktuell ein Trend in Richtung geschichtete Stacks zu erkennen, die eine höhere volumetrische Ausnutzung des Zellvolumens und wesentlich gleichmäßigere Druckverhältnisse sowie mechanische Belastungen ermöglichen.

Für die Unterbringung der Batterien werden teilweise extreme Zelldesigns verwendet, bei denen die Zellen kaum zehn Zentimeter hoch und dafür aber bis zu einem Meter breit sind.

Aufgrund der Volumenveränderung der Materialien beim Laden und Entladen sowie möglicher Gasbildungen werden prismatische und Pouch-Bag-Zellen in Fahrzeugen heute meist verspannt. Damit lassen sich höhere Lebensdauern erreichen. Für zylindrische Zellen ist dies nicht notwendig, da das Gehäuse durch die Geometrie bedingt diesen Druck selbst aufbaut.

Die Zelldesigns haben unterschiedliche Eigenschaften bezüglich der Kühlung im Batteriepack. Grundsätzlich können aber sämtliche Elektrodenmaterialien auch in allen drei Zelldesigns eingesetzt werden. Bislang ist nicht eindeutig zu erkennen, dass sich im Automobilbereich eines der drei Zelldesigns zu Lasten der anderen durchsetzen oder dass eines von ihnen in absehbarer Zeit ausscheiden würde.

7.1.6 Kosten

Die Gesamtkosten von Lithium-Ionen-Batterien werden immer mehr durch die Materialkosten bestimmt. Bei ihrer Markteinführung 1991 lagen die Preise für Lithium-Ionen-Batterien bei rund 3000 US\$/kWh. Inzwischen werden die Batteriezellen für Großkunden wie Hersteller von mobilen Endgeräten und Fahrzeugherstellern zu Preisen unter 100 US\$/kWh gehandelt. Die Roadmap von Tesla sieht durch eine Vielzahl von Maßnahmen im Zelldesign, die Zusammensetzung von Anoden- und Kathodenmaterial, die Produktionstechnik und die Fahrzeugintegration eine weitere Reduktion der Batteriesystempreise auf weniger als die Hälfte innerhalb von fünf Jahren vor. Da die einzelnen Maßnahmen plausibel erscheinen, ist die Erreichung des Ziels nicht unrealistisch. Das Packaging der Batterie wird mit einem Aufschlag von etwa 25 bis 30 % abgeschätzt. Dabei steigt dieser Anteil mit kleiner werdender Stückzahl. In Spezialanwendungen können die Packaging-Kosten höher als diejenigen für die Zellen liegen.

7.1.7 Materialverfügbarkeiten & Recycling

Sämtliche für die Batterie notwendigen Rohmaterialien – auch bei einer nahezu vollständigen Umstellung der Fahrzeuge – sind prinzipiell vorhanden. Das zeigen die bekannten Ressourcen² der wichtigsten Metalle Lithium, Nickel, Kobalt, Eisen, Mangan, Aluminium und Kupfer. Seltene Erdmetalle werden in den Batteriezellen selbst nicht verbaut. Der Anteil von Kobalt wird immer weiter reduziert und verschiedene Hersteller haben für die zweite Hälfte der 2020er-Jahre kobaltfreie Zellen auf ihrer Roadmap, die dann mit Nickel und Mangan auskommen sollen. Hinzu kommen die Lithium-Eisenphosphatzellen (LFP), die weder Nickel noch Kobalt benötigen.

Eine Herausforderung stellt aber die ausreichende Bereitstellung der Rohmaterialien bei der sehr starken Ausweitung der Produktionszahlen batterieelektrischer Fahrzeuge in den kommenden Jahren dar. Die Nationale Plattform „Zukunft der Mobilität“ (NPM) geht derzeit davon aus, dass bis 2030 rund 14 Mio. Elektrofahrzeuge auf der Straße sein werden und der Marktanteil bei Neuzulassungen rund 80 % betragen muss. Bei einem weltweiten Marktanteil von 25 %, der etwa 2026 erreicht werden könnte, würde eine Jahresproduktion von 20 Mio. Pkw mit Batterien ausgestattet. Bei einer angenommenen mittleren Batteriegröße von 50 kWh je Fahrzeug ergibt sich ein Bedarf von 1000 GWh Batteriekapazität pro Jahr. Abb. 7.4 zeigt auf, zu welchem Bedarf an Metallen es führt, wenn ein

Material	Bedarf für 100 kWh Batterie (kg)	Bedarf für 700 GWh Batterien (Tonnen)	Bedarf für 1.000 GWh Batterien (Tonnen)	Bedarf für 1.200 GWh Batterien (Tonnen)	Heutige Produktion pro Jahr (Tonnen) (Quelle: US Geological Survey 2017)	Anteil bei 1.000 GWh/Jahr an der Jahresproduktion von 2017
Nickel	85,5	598.500	855.000	1.026.000	2.100.000	41 %
Mangan	9,7	67.900	97.000	116.400	16.000.000	1 %
Kobalt	11,1	77.700	111.000	133.200	110.000	101 %
Lithium	9,2	64.400	92.000	110.400	43.000	214 %
Aluminium	37,9	265.300	379.000	454.800	60.000.000	1 %
Kupfer	73,9	517.300	739.000	886.800	19.700.000	4 %

Abb. 7.4 Materialbedarf für eine moderne NMC-811-Lithium-Ionen-Batterie und Hochrechnung des weltweiten Materialbedarfs

²United States Geological Survey, MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2021, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf>, letzter Zugriff 23.10.2021.

NMC-811-Kathodenmaterial zugrunde gelegt wird. Wird dieser Bedarf ins Verhältnis zur aktuellen Weltproduktion der benötigten Metalle gesetzt, ergeben sich Erkenntnisse über die notwendige Steigerung der Weltproduktion. Demnach steigt der Nickelbedarf um 41 %, der Kobaltbedarf verdoppelt sich, und die Lithiumförderung muss verdreifacht werden. Dabei ist ein steigender Bedarf etwa auch in den Bereichen „stationäre Batteriespeicher“, „Bahn“, „Schiff“ oder „Logistik“ noch nicht berücksichtigt. Das bedeutet enorme Herausforderungen für die gesamte Wertschöpfungskette – vom Bergbau über die Logistik bis hin zur Herstellung der Elektrodenmaterialien.

Umso wichtiger ist es, sich frühzeitig mit dem Recycling der Materialien zu beschäftigen. Dafür gibt es sowohl in der Forschung als auch in der Industrie erhebliche Anstrengungen. Es steht außer Frage, dass die technischen Möglichkeiten gegeben sind, alle Metalle aus Lithium-Ionen-Batterien mit hoher Effizienz zurückzugewinnen. Die Frage ist, zu welchen Kosten dies erfolgen kann. So ist das Recycling des Lithiums selbst heute nicht wirtschaftlich gegenüber der Gewinnung aus Primärquellen. Allerdings dürften die Recycling-Quoten zumindest in Europa wohl weniger durch die Wirtschaftlichkeit als durch entsprechende Verordnungen festgesetzt werden. Die in Vorbereitung befindliche EU-Batterieverordnung, die seitens der EU-Kommission im Rahmen des „Europäischen Green Deals“ vorgelegt worden ist, sieht für Traktionsbatterien eine 100-prozentige Sammelquote und ab 2026 eine Recycling-Quote von 90 % für Kobalt, Nickel und Kupfer sowie 35 % für Lithium vor. Im Jahr 2030 steigen diese Quoten dann auf 95 % beziehungsweise 70 %.

Allerdings müssen neue Batterien auch auf längere Zeit weitgehend aus Primärmaterial hergestellt werden. Heute produzierte Batterien sollten nicht vor Ablauf von acht Jahren – besser erst in zehn Jahren oder später – einen Zustand aufweisen, der als letzte Stufe der Kreislaufwirtschaft das Recycling bedingt. Abb. 7.5 zeigt für eine angenommene Markthochlaufkurve für Deutschland, mit welchen Anteilen von Recycling-Material aus Altfahrzeugen in neuen Elektroautos bei angenommenen Lebensdauern von acht bis zehn Jahren im Idealfall zu rechnen ist. Dabei sind sowohl eine 100-prozentige Sammelquote als auch eine 100-prozentige Recycling-Quote angesetzt. Daraus ist zu sehen, dass im Jahr 2035 maximal 40 % (bei nur acht Jahren Lebensdauer) der neuen Batterien aus Recycling-Material hergestellt werden könnten und lediglich 20 %, wenn die Batterien zehn Jahre bis zum Recycling in Gebrauch sind. Sämtliche Zahlen basieren auf der Annahme, dass die chemische Zusammensetzung der Lithium-Ionen-Batterien in wesentlichen Teilen unverändert bleibt. Ein Umstieg auf Festkörperelektrolyt-Akkus zum Beispiel hätte indes nur sehr geringe Auswirkungen auf die Metallanteile in der Batterie. Ausbau und Zugang zu Primärquellen sind also in den kommenden 15 und mehr Jahren weiter von zentraler Bedeutung.

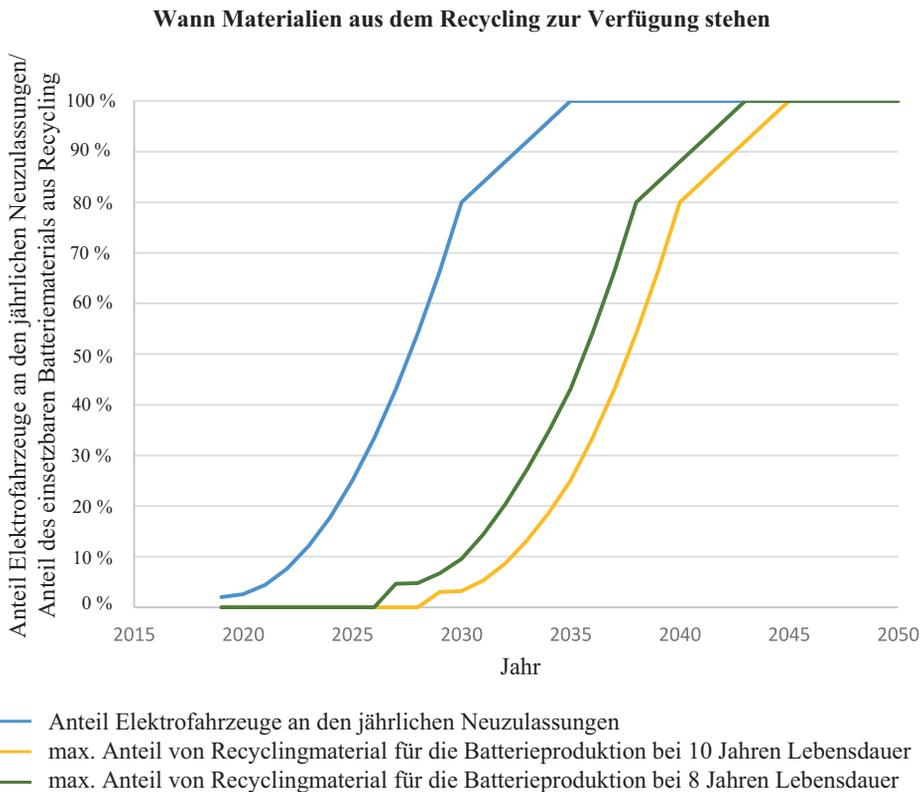


Abb. 7.5 Angenommene Hochlaufkurve für den Anteil von Elektrofahrzeugen am Gesamtmarkt und Anteil des Batteriematerials, das aus Recycling von Batterien aus Elektrofahrzeugen bei einer angenommenen Lebensdauer von acht bzw. zehn Jahren zur Verfügung steht

7.2 Beyond-Lithium-Ionen-Technologie

Es vergeht kaum eine Woche ohne Meldungen über große Durchbrüche in der Batterietechnik, die vorgeblich eine Revolution bedeuten. Fakt ist, dass alle Entwicklungen, die in den vergangenen Jahren auf den Markt gedrungen sind, evolutionäre konsequente Weiterentwicklungen der bestehenden Technologie darstellen. Bei der Ankündigung von Neuentwicklungen ist einerseits zu fragen, ob neben einer meist besonderen Eigenschaft – etwa Ladegeschwindigkeit, Energiedichte oder Lebensdauer – auch alle anderen für einen erfolgreichen Produkteinsatz notwendigen Parameter ausreichend sind. Dies ist oftmals nicht der Fall, da eine positive Eigenschaft meist durch Kompromisse in anderen Eigenschaften „erkaufte“ werden muss.

Um die zahlreichen Produktankündigungen zu bewerten, ist es stets sinnvoll zu schauen, welcher für den Anwendenden spürbare Zusatznutzen gegenüber den im Markt bereits

verfügbaren Produkten geschaffen werden kann. Nachstehend werden vier immer wieder diskutierte Technologievarianten auch unter diesem Gesichtspunkt kurz betrachtet.

7.2.1 Festkörperbatterien

Viele Hoffnungen verbinden sich mit den sogenannten Festkörperbatterien. Sie basieren zunächst auf dem klassischen Aufbau der NMC-Lithium-Ionen-Batterie, allerdings wird der sonst verwendete flüssige organische und damit auch brennbare Elektrolyt durch einen polymeren oder keramischen Feststoffelektrolyten ersetzt. Dies soll sich positiv auf die Sicherheit und die Energiedichte der Zellen auswirken. Ein wesentlicher Effekt bezüglich der Energiedichte wird erst erzielt, wenn die höhere elektrochemische Stabilität der Festkörperelektrolyte an der Grenzfläche zur negativen Elektrode durch den Ersatz des Graphits durch metallisches Lithium genutzt wird. Da in Lithium-Ionen-Batterien das Graphit rund 90 % des aktiven Materials der negativen Elektrode ausmacht, kann diese Maßnahme zu einer deutlichen Steigerung der Energiedichte genutzt werden. Wird bei der Herstellung der Batteriezelle Lithium nur als Teil des Kathodenmaterials eingebracht, wird auch von „anodenfreien Batterien“ gesprochen, weil sich im entladenen Zustand und beim Bau der Zelle auf dem Stromableiter der negativen Elektrode kein Aktivmaterial befindet. Beim Aufladen wird dann metallisches Lithium aus dem negativen Stromableiter abgeschieden. Bislang führt dies insbesondere bei höheren Strömen jedoch zu einer dendritischen Anlagerung des Lithiums und insgesamt führen die Volumenänderungen in der Zelle durch den Aufbau und die Auflösung der Anode zu erheblichem mechanischem Stress. Auch ist unklar, wie die hohen Laderaten im Bereich von 3 bis 5 C mit den metallischen Anoden bei gleichzeitig hohen Lebensdauern erreicht werden können.

Während Festkörperbatterien mit Polymerelektrolyt seit vielen Jahren von mindestens einem Hersteller kommerziell angeboten und im Pkw- sowie Busbereich eingesetzt werden oder wurden, sind Festkörperbatterien mit keramischen Elektrolyten zwar angekündigt, aber als kommerzielle Zellen in für Pkw interessanten Formaten bislang nicht verfügbar. Dabei benötigen die kommerziellen Polymerelektrolyt-Batterien eine Betriebstemperatur von 60 bis 80 °C und müssen durch ein thermisches Management entsprechend stets auf Temperatur gehalten werden. Eine Markteinführung bis Ende des laufenden Jahrzehnts ist durchaus möglich, doch ist dabei nicht mit einer Revolution der Elektromobilität zu rechnen. Die Markteinführung wird sich für die Fahrzeugnutzenden zunächst – abgesehen von entsprechenden Marketing-Kampagnen – eher unbemerkt abspielen. So zeigen etwa die angekündigten Leistungsdaten eines Entwicklers von Festkörperbatterien, der auch eng mit großen Fahrzeugherstellern zusammenarbeitet, kaum eine Verbesserung gegenüber den in wenigen Jahren realistisch mit NMC-Lithium-Ionen-Batterien zu erwartenden Performance-Daten.

7.2.2 Lithium-Schwefel-Batterien

Lithium-Schwefel-Batterien zeichnen sich sowohl durch die Verwendung von insgesamt sehr günstigen Rohmaterialien als auch durch eine grundsätzlich hohe gewichtsbezogene Energiedichte aus. Allerdings bleiben die erzielbaren volumenbezogenen Energiedichten sowie die Zyklenlebensdauern deutlich hinter denen der heutigen Lithium-Ionen-Batterien zurück. Dadurch ist das derzeitige Interesse der Automobilhersteller an der Technologie nicht übermäßig hoch. Es scheint so, als wenn Lithium-Schwefel-Batterien zunächst eine Zukunft in der Nische der Anwendungen haben, in denen das Gewicht der Batterie die bedeutsamste Eigenschaft darstellt und größeres Volumen sowie kürzere Zyklenlebensdauern akzeptabel sind. Dies trifft vor allem auf Fluganwendungen wie Drohnen, Lufttaxi oder elektrische Kleinflugzeuge zu. Eine zuverlässige Prognose dazu, wann Lithium-Schwefel-Batterien die NMC-Lithium-Ionen-Batterien in diesem Segment verdrängen könnten, ist aktuell nur schwer zu treffen. Ein großflächiger Einsatz von Lithium-Schwefel-Batterien in Pkw erscheint zumindest in diesem Jahrzehnt als unwahrscheinlich.

7.2.3 Lithium-Luft- und Metall-Luft-Batterien

Die Metall-Luft- und dabei vor allem Lithium-Luft-Batterien sind so etwas wie der heilige Gral der Batterietechnik. Dabei sind die Reaktanten nur Sauerstoff und ein passendes Metall. Wenn in einem offenen System Luftsauerstoff verwendet wird, ist die Batterie im geladenen Zustand leichter als im entladenen Zustand nach Einlagerung des Sauerstoffs in die Metalloxide. Die theoretische gravimetrische Energiedichte von Lithium-Luft-Batterien liegt rund fünfmal so hoch wie die von Lithium-Ionen-Batterien.

Die intensiven Forschungsarbeiten der vergangenen Jahre haben jedoch gezeigt, dass keine ganz kurzfristigen Durchbrüche zu erwarten sind. Ein Problem stellt insbesondere der sehr reaktive Singulett-Sauerstoff dar, der in bestimmten Betriebsbereichen der Lithium-Luft-Batterien gebildet wird und das Kathodenmaterial durch Korrosion zerstört. Durch Beschränkung des Betriebsbereichs lässt sich die Bildung des Singulett-Sauerstoffs vermeiden, doch dann ist die verfügbare Kapazität und damit auch die erreichbare Energiedichte relativ gering. Hinzu kommt, dass die volumetrische Energiedichte nach heutigen Abschätzungen kaum diejenige der klassischen NMC-Lithium-Ionen-Batterien erreichen wird. Dementsprechend ist das Interesse der Automobilindustrie zumindest für den Bereich der Pkw oder Lkw derzeit nicht besonders hoch und ein Markteintritt in Serienprodukten ist mindestens für das laufende Jahrzehnt nicht zu erwarten. Aktuelle Abschätzungen haben zudem ergeben, dass die Laderaten relativ klein sein werden, so dass die heute angepeilten hohen Laderaten kaum zu erreichen sind.

Interessant sind unterdessen aktuelle Trends in der Grundlagenforschung zu diesem Batterietyp, die sich Natrium oder Kalium anstelle von Lithium als Metall zuwenden. Da hierbei weniger beziehungsweise gar kein Singulett-Sauerstoff entsteht, scheinen stabile

Batteriesysteme im Bereich des Möglichen zu liegen. Diese Materialwahl geht indes zu Lasten der Energiedichte. Ob aus der Technologie für den Pkw-Bereich Batteriesysteme entstehen können, die aus Sicht der Nutzenden einen spürbaren Mehrwert bringen, lässt sich derzeit nicht seriös voraussagen.

7.2.4 Natrium-Ionen-Batterien

Vordergründig wird bei Natrium-Ionen-Batterien das Lithium durch das in der Erdkruste mehr als 400-mal häufiger vorkommende und damit äußerst günstige Natrium ersetzt. Aufgrund des schwereren Natriums und der eingesetzten Kathodenmaterialien liegt die Energiedichte bei etwa zwei Dritteln dessen, was die heute beste NMC-Lithium-Ionen-Batterie aufweist – und damit im Bereich der LFP-Batterien. Da die Natrium-Ionen-Batterien jedoch weder Nickel noch Kobalt beinhalten müssen – und dazu günstiges Natrium anstelle von Lithium –, bewegen sich Kostenschätzungen für diese Batterien im Bereich von 25 bis 40 €/kWh. Da das auf der Anode eingesetzte „Hard Carbon“ keine Potentialschwellen durch verschiedene Lithiierungs-Stages aufweist, entfallen einige charakteristische Potenzialpunkte, die heute intensiv für die Alterungs- und Performance-Diagnostik verwendet werden.

Allerdings sind Natrium-Ionen-Batterien für den Automotive-Sektor derzeit nur angekündigt und bislang nicht auf dem Markt. Unter anderem plant immerhin der weltweit größte, chinesische Zellhersteller CATL für 2023 eine Natrium-Ionen-Batterie. Die Technologie scheint also das Potenzial einer weiteren Kostenreduktion und eine Verminderung des knappen Lithiums zu haben – jedoch zu Lasten der maximalen Energiedichten und daher eher für das Kompakwagen- und das Mittelklassewagensegment. Da die Natrium-Ionen-Batterien wahrscheinlich zu einem großen Teil auf denselben Fertigungsanlagen wie die Lithium-Ionen-Batterien produziert werden können, würde eine Markteinführung relativ schnell vonstattengehen. Fahrzeugnutzende werden, wenn es soweit ist, die neue Technologie vor allem in Form von geringen Kosten spüren. Aus technischer Sicht werden die Fahrzeuge indes kaum mit neuen Eigenschaften aufwarten.

7.3 Typische Batteriebelastung und Lebensdaueranforderung

Die Belastung von Batterien wird immer relativ zu ihrer Größe angegeben. Dabei wird entweder das Verhältnis zwischen der Leistung [W] und der Energiekapazität [kWh] oder zwischen Strom [A] und Ladungskapazität [Ah] gebildet. Da sich Strom und Leistung ebenso wie Ladungs- und Energiekapazität nur durch die Multiplikation mit der Nennspannung unterscheiden, ist die Verhältniszahl, die „C-Rate“ genannt wird und die Einheit [h⁻¹] besitzt, in beiden Fällen die gleiche.

Dementsprechend müssen für die Betrachtung der elektrischen Belastung der Batterie jeweils die maximalen und mittleren Ladeleistungen (bestimmen die Ladegeschwindig-

keit) und Entladeleistungen (wird durch den Leistungsbedarf des Antriebsstrangs bestimmt) sowie die installierte Batteriekapazität ermittelt werden. Gerade in Bezug auf die mittlere Belastung sind hier die im Durchschnitt deutlich kleineren Batterien in Kompakt- und Mittelklassewagen unter Umständen stärker belastet als die Akkus in Oberklassewagen mit großen Batteriekapazitäten. Typische mittlere Belastungen im Fahrbetrieb liegen heute zwischen 0,05 C (25 km/h mittlere Geschwindigkeit in der Stadt bei einer Batteriereichweite von 500 km) und 0,5 C (mittlere Geschwindigkeit von 120 km/h auf der Autobahn bei 240 km Batteriereichweite). Die Spitzenleistungen im Entladebereich sind bestimmt durch die installierten Antriebsmotoren und bewegen sich im Bereich von etwa 2 bis 2,5 C (vergleiche etwa Renault ZOE mit 41 kWh Batterie und 80 kW Motorleistung sowie Mercedes EQE mit 90 kWh Batterie und 210 kW Motorleistung). Freilich gibt es auch Sportwagen, bei denen wesentlich extremere Belastungen auftreten. So wird zum Beispiel für den Rimac Nevera bei einer Batteriekapazität von 120 kWh eine Antriebsleistung von mehr als 1400 kW und damit eine C-Rate von nahezu 12 angegeben. Dies zeigt, was prinzipiell möglich ist, jedoch beziehen sich die hier geäußerten verallgemeinernden Angaben auf Serienfahrzeuge für den Massenmarkt.

Abgesehen von einer verstärkten Erwärmung und deren negativer Auswirkung auf die Lebensdauer sind keine beschleunigten Schädigungen von Lithium-Ionen-Batterien bei höheren Entladeleistungen bekannt. Die Belastung bei der Aufladung ist von der Stärke der Ladegeräte abhängig, die von der einphasigen Haushaltssteckdose mit 3,7 kW bis hin zum „Ultra-Fast Charging“ mit 350 kW gehen kann. Dementsprechend reicht die Rate von knapp 0,1 C beim Laden eines Fahrzeugs mit 40 kWh Batteriekapazität an der Haushaltssteckdose bis hin zu 3,5 C beim Laden eines Oberklassewagens mit 100 kWh Batteriekapazität an einer „Ultra-Fast-Charging“-Station. Die Supercharger von Tesla der ersten Generation mit 120 kW ergeben bei 90 kWh Batteriekapazität entsprechend 1,3 C. Damit wird deutlich, dass die Option auf schnelles Laden in allen Fällen eine deutlich höhere Belastung für die Batterien bedeutet als der eigentliche Fahrbetrieb. Dies gilt vor allem auch deswegen, weil das Laden einer Dauerleistung entspricht und daher mit der mittleren Entladeleistung verglichen werden muss.

Die Zyklenbelastungen der Fahrzeuge sind von der Nutzung der Fahrzeuge abhängig. Daher basieren die folgenden Betrachtungen zum einen auf statistisch ermittelten durchschnittlichen Nutzungsprofilen und zum anderen auf einem häufig verwendeten Garantiewert von 100.000 Meilen beziehungsweise 160.000 km. Pkw fahren in Deutschland im Mittel etwa 37 km pro Tag, Oberklassewagen 42 km je Tag. Daraus ergeben sich bei aktuellen Energieverbräuchen von 15 bis 25 kWh/100 km tägliche Energieverbräuche zwischen 5 und 10 kWh.³ Bei Batteriegrößen zwischen 40 kWh (Kompaktklasse) und 100 kWh (Oberklasse) ergibt sich entsprechend eine mittlere tägliche Nutzung von 10 bis 12 % der Batteriekapazität oder 36 bis 44 äquivalenten Vollzyklen („Ladungsumsätze“)

³Zum Vergleich: Der mittlere Stromverbrauch eines Vier-Personen-Haushalts liegt in Deutschland auch bei etwa 10 kWh/Tag. Diese Betrachtungen sind für die Bewertung der Verfügbarkeit ausreichender Ladeleistungen von Bedeutung.

pro Jahr. Daraus ergeben sich in acht Jahren etwa 300 bis 350 und in 15 Jahren entsprechend 550 bis 650 Ladungsumsätze.

Ähnliche Resultate bringt die Garantieleistung hervor. Bei einem Verbrauch von 15 kWh/100 km und 40 kWh Batteriekapazität ergeben sich 600 Ladungsumsätze, bei 25 kWh/100 km und 100 kWh Batteriekapazität entsprechend 400 Ladungsumsätze. Die Zyklenanforderungen sind also sehr moderat und erheblich geringer, als sie noch vor vielen Jahren von zahlreichen Fahrzeugherstellern spezifiziert worden sind. Sie entsprechen damit ungefähr auch den Zyklenbelastungen, die in Consumer-Geräten wie Smartphones, Tablets oder Laptops benötigt werden. Intensive Anstrengungen der Fahrzeughersteller zur Senkung des Verbrauchs werden indes zu einer weiteren Reduktion der Zyklenbelastung führen. So hat Mercedes zum Beispiel ein Konzeptfahrzeug in der Größe der S-Klasse mit einem Verbrauch von nur noch 10 kWh/100 km vorgestellt.

Zum Vergleich: In stationären Anwendungen wie PV-Heimspeichersystemen oder in Anlagen zur Primärregelleistung im Stromnetz werden rund 250 Ladungsumsätze pro Jahr gefahren. Für Pkw optimierte Batteriezellen eignen sich daher nicht mehr für den Einsatz in stationären Anwendungen, was auch ein großes Fragezeichen hinter verschiedene „Second-Life“-Konzepte setzt.

Bei Lkw sind die Strombelastungen auch eher moderat, weil die Batterien aufgrund der Reichweitenanforderung groß ausgelegt werden müssen. Bei Lkw für den Ferntransport muss die Batterie knapp 4,5 h lang reichen. Das entspricht der maximalen ununterbrochenen Lenkzeit von Berufskraftfahrenden. Anschließend bleiben 45 min gesetzlich vorgeschriebene Lenkpause, um die Batterien wieder aufzuladen. Damit entspricht die mittlere Entladeleistung etwa 0,2 C und die Ladeleistung 1,3 C. Die Zyklenbelastung ist dafür hoch, denn es muss mit zwei vollen Ladungsumsätzen pro Tag gerechnet werden. Dementsprechend werden optimierte Batteriezellen benötigt, die ähnliche Eigenschaften wie diejenigen für viele stationäre Speicheranwendungen aufweisen müssen. In der Regel bedeutet das eine etwas geringere Energiedichte.

7.4 Batteriesystemdesign

Einzig im Bereich kleiner Geräte – etwa Smartphones – und bei Consumer-Produkten werden mitunter Batteriesysteme eingesetzt, die aus einer einzelnen Zelle bestehen. In allen anderen Fällen wird eine Vielzahl gleicher Batteriezellen in einem Pack verschaltet. Diese Zellen müssen so ausgewählt werden, dass sie die zuvor genannten Anforderungen erfüllen. Dabei ist vor allem darauf zu achten, dass bei gegebener BatteriegroÙe auch die erlaubten mittleren oder maximalen Leistungen ausreichen.

Den Batteriepacks kommen zahlreiche Aufgaben zu. Das Pack ist die mechanische Struktur für die Aufnahme der Zellen und die Integration ins Fahrzeug, der Schutz gegen den direkten Impact auf die Zellen bei einem Crash und der Träger des thermischen Managements zur Erzielung einer gleichmäßigen Temperatur innerhalb der sicheren Temperaturgrenzen. Bei drohender Überhitzung kühlt das thermische Management und bei tiefen

Temperaturen kann es auch zum Aufheizen des Batteriepacks insbesondere vor Ladevorgängen kommen. In Kap. 11 wird das thermische Management ausführlicher diskutiert. Im Folgenden sollen Aspekte der Verschaltung der Zellen im Pack und die Aufgaben des Batteriemanagementsystems diskutiert werden.

7.4.1 Verschaltung

Lithium-Ionen-Batterien können sehr flexibel sowohl seriell als auch parallel verschaltet werden. Dadurch lassen sich aus relativ kleinen Zellen durch geeignete Verschaltung auch sehr große Batteriesysteme aufbauen. Grundsätzlich ähneln Batteriesysteme sich in ihrer Struktur: Zellen werden meist zu Modulen, Module zu Packs und Packs zu Systemen verschaltet. Eine Obergrenze für die Größe eines Batteriesystems zu benennen, ergibt demnach keinen Sinn. Begrenzungen resultieren gegebenenfalls aus verfügbarem Volumen oder Gewichtsobergrenzen, in stationären Anwendungen jedoch, in denen typischerweise Containerlösungen verwendet werden, gibt es keine Begrenzung der Containerzahl und damit auch nicht der Größe der Speicheranlage.

Für die Verschaltung werden zunächst die Systemspannung und damit die Anzahl der in Serie geschalteten Elemente festgelegt. Elemente können einzelne Zellen oder auch untereinander parallel verschaltete Zellverbände sein. Typische Systemspannungen in Fahrzeugen sind heute 12 V für das konventionelle Bordnetz, 48 bis 150 V für Mild-Hybride, 400 V für Voll- und Plug-in-Hybride sowie für vollelektrische Batteriefahrzeuge mit Ladeleistungen bis etwa 150 kW sowie 800 V für batterieelektrische Fahrzeuge für Ladeleistungen bis 350 kW. Für noch größere Batterien oder Ladeleistungen wird außerdem über Systemspannungen bis zu maximal 1500 V bei vollgeladenem Akku diskutiert. Überschreitet die Batteriespannung im Betrieb nicht 60 V, kann auf Berührungsschutz verzichtet werden. Zwischen 60 und 1500 V gilt das Batteriesystem als Hochvoltbatterie. Für die Einhaltung der durch Normen definierten Spannungsbereiche gilt die maximal im Betrieb erreichbare Spannung. Bei Lithium-Ionen-Batterien sind das je nach Zellchemie heute zwischen 3,6 V je LFP- und bis zu 4,3 V je NMC-Zelle. Bei Systemspannungen, die weit genug von den Grenzwerten entfernt liegen, wird die Zahl der Zellen meist durch die Division der Systemspannung durch die Nennspannung der Zellen bestimmt, die zwischen 3,3 V pro LFP-Zelle und 3,7 V je NMC-Zelle liegen.

Für Arbeiten an Hochvoltbatterien sind Spezialschulungen zur Arbeitssicherheit notwendig. Es ist stets zu berücksichtigen, dass Batteriezellen extrem leistungsfähige Stromquellen sind und Zellen im Automotive-Bereich in der Regel keine Sicherungen enthalten. So können zum Beispiel in einer 12-Volt-Bleistarerbatterie bei Kurzschluss mit einem Schraubenschlüssel kurzzeitig Ströme von bis zu 2000 A fließen. Metall wird dadurch rotglühend.

Ein 800-Volt-System bedeutet auch mindestens 200 in Serie verschaltete Zellen. Grundsätzlich gilt: Je mehr Zellen in Serie verschaltet werden, desto kürzer wird die Pack-Lebensdauer. In der Praxis sind oftmals mehrere Zellen parallelgeschaltet, und diese

Einheiten werden dann wiederum in Serie verschaltet. In Parallelschaltungen von Zellen teilt sich der Strom des Gesamtstrangs auf die Zellen entsprechend ihres Innenwiderstands und der Ruhespannung auf. Daher werden schwache Zellen in einer Parallelschaltung entlastet und durch stärkere Zellen gestützt. In einer Parallelschaltung lässt sich daher im Prinzip immer die Summe der Leistungen und der Kapazitäten der Zellen nutzen. In der Serienschaltung bestimmt hingegen stets die schwächste Zelle beziehungsweise die schwächste Einheit auch parallelgeschalteter Zellen die Performance des gesamten Batteriestrangs.

Aus Sicht der Batterie bleibt die spezifische Belastung („C-Rate“) auf den Zellen bei gegebener Gesamtenergiekapazität der Batterie unabhängig von der Systemspannung immer gleich. Auch der Wirkungsgrad ändert sich in erster Näherung nicht, wenn die Batterie aus gleichen Zellen und gleicher Anzahl von Zellen unterschiedlich konfiguriert wird. Da Lebensdauer und Zuverlässigkeit mit zunehmender Systemspannung und somit zunehmender Anzahl in Serie verschalteter Zellen abnehmen, liegt das Optimum aus Sicht des Batteriesystems bei sehr kleinen Spannungen. Dies führt jedoch zu sehr hohen Strömen, die eine Herausforderung für Ladekabel, Stecker, Sicherungen oder Schütze darstellen. Dementsprechend können diese Komponenten bei hohen Spannungen kleiner und günstiger ausgelegt werden. Auch die Leistungselektronik bringt grundsätzlich bessere Wirkungsgrade und wird günstiger bei höheren Spannungen sowie entsprechend geringeren Strömen. Es muss also nach einem systemischen Optimum unter Berücksichtigung sämtlicher Komponenten und Aspekte bis hin zum Gewicht von Ladekabel und -stecker gesucht werden. Daher werden zum Beispiel bei 350 kW Ladeleistungen Batteriesysteme um 800 V verwendet, in denen beim Laden zwischen 400 und 500 A auftreten. Es ist aber noch einmal zu betonen, dass bei der Batterie selbst mit steigender Spannung sowohl die Lebensdauer als auch die Zuverlässigkeit zurückgehen. Alle Vorteile hoher Spannungen müssen sich also aus den anderen Systemkomponenten ergeben.

7.4.2 Batteriemanagementsystem

Das Batteriemanagementsystem (BMS) besteht aus verschiedenen funktionalen Teilen, die für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb des Batteriesystems benötigt werden:

- Batteriemonitoring: Messung von Strömen, Strang- und Zellspannungen, Temperaturen und Impedanzen
- Thermisches Management: Passives oder aktives Thermomanagement im Batteriepack für gleichmäßige Zelltemperaturen und Betrieb innerhalb eines sicheren und für die Leistungsfähigkeit sowie die Alterung möglichst idealen Temperaturbereichs
- Batteriediagnostik: Auswertung aller Informationen aus dem Batteriepack zur Bestimmung des Ladezustands (State of Charge – SoC), der Leistungsfähigkeit (State of Power – SoP), der Funktionsfähigkeit (State of Function – SoF) oder des Alterungszustands (State of Health – SoH) durch Diagnose-Algorithmen auf dem BMS und

gegebenenfalls auch in der Cloud als Grundlage für Informationen an die Fahrzeugnutzenden sowie das Energiemanagementsystem des Fahrzeugs

- Ladungsausgleichssystem: Symmetrierung des Ladezustands der Zellen durch heute meist passiv gesteuerte Ladungsausgleichssysteme, da die jeweils vollste und leerste Zelle die Gesamtnutzung des Batteriepacks beim Laden beziehungsweise Entladen bestimmen. Nur aktive Ladungsausgleichssysteme können auch unterschiedliche Alterungszustände ausgleichen.
- Steuerung der Switchbox: Ansteuerung der Schütze zum Ein- und Ausschalten des Batteriepacks für eine sichere Verbindung mit der Leistungselektronik ohne zerstörerische Einschaltströme sowie Notabschaltung im Fall von Crash oder sicherheitskritischer Batterieüberlastung

Für Batteriemanagementsysteme existieren verschiedene Topologien. Häufig werden sogenannte Master-Slave-Topologien verwendet, bei denen Slave-Platinen im Batteriepack – oftmals jeweils eines pro Modul – verteilt sind, die lokal Spannungen und Temperaturen messen und auch die Ladungsausgleichsfunktion bereitstellen. Die Slaves melden die Messdaten dann über einen Bus an den Master, der auch die Daten der Strommessung zur Verfügung hat. Der Master beinhaltet zudem die Diagnose-Algorithmen und steuert die Schützbox. Sicherheitskritische und zeitlich sehr schnell auszuführende Funktionen müssen auf dem BMS selbst implementiert sein. Die Bestimmung des aktuellen Alterungszustands oder auch Updates zu Betriebskennlinien wie dem maximalen Ladestrom zur Vermeidung des Lithium-Platings können hingegen auf einem zentralen Cloud-Rechner erfolgen. Dort können für die Zustandsbestimmung auch Vergleichsdaten einer großen Zahl gleicher oder ähnlicher Systeme verwendet werden.

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Brennstoffzellensysteme

8

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Mario Kehrer,
Christoph Schön, Sebastian Hagedorn, Sebastian Biegler
und Philipp Reims

Bereits im Jahr 1839 wurde das Prinzip der Brennstoffzelle durch Christian Friedrich Schönbein und Sir William Grove entdeckt. Obwohl diese Form der elektrochemischen Energiewandlung demnach schon länger bekannt ist als beispielsweise der heutige Verbrennungsmotor, konnte die Brennstoffzelle über viele Jahrzehnte hinweg keine wirtschaft-

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

M. Kehrer

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: m.kehrer@pem.rwth-aachen.de

C. Schön

E-Mobility Innovation Manager, LKQ Europe, Zug, Schweiz

E-Mail: Christoph.Schoen@lkqeuropa.com

S. Hagedorn (✉)

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: s.hagedorn@pem.rwth-aachen.de

S. Biegler · P. Reims

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: s.biegler@pem.rwth-aachen.de; p.reims@pem.rwth-aachen.de

liche Relevanz erzielen. Kommerziell kam die Brennstoffzelle erstmals in den 1960er-Jahren im Raumfahrtprogramm der NASA zum Einsatz. In den folgenden Jahrzehnten wurden verschiedene Typen für zahlreiche Anwendungen entwickelt. Diese Typen mit einem Fokus auf mobile Anwendungen werden in Abschn. 8.1 beschrieben. Heute ist die PEM-Brennstoffzelle der für mobile Anwendungen relevanteste Typ, so dass dessen Funktionsprinzip in Abschn. 8.2 erläutert wird. Der Aufbau von vollständigen Brennstoffzellensystemen wird abschließend in Abschn. 8.3 beleuchtet.

8.1 Typen von Brennstoffzellen für mobile Anwendungen

Grundsätzlich existieren verschiedene Varianten von Brennstoffzellen, die sich vorwiegend in der Zusammensetzung der ein- und ausgehenden Stoffströme sowie der Betriebstemperatur des Stacks unterscheiden. Bauart- und temperaturbedingt weisen die unterschiedlichen Varianten verschiedene Elektrolyte auf, die sich wiederum in der Materialbeschaffenheit, der Leitfähigkeit und der Art der Ladungsträger unterscheiden. Abb. 8.1 fasst den aktuellen Stand der Technik der Brennstoffzellentypen zusammen. SOFC (Solide Oxide Fuel Cell)- und MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)-Systeme stellen die Hochtemperaturanwendungen dar und zeichnen sich durch eine hohe Kohlenstoffverträglichkeit aus, wodurch sie mit Erdgas betrieben werden können. Aufgrund dieser Eigenschaften sowie der thermischen Anforderungen eignen sich ebensolche Systeme darüber hinaus für stationäre Anwendungsbereiche.¹ Sowohl die PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)- als auch die Hochtemperatur (HT)-PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell) verwenden einen Elektrolyten aus einem mit Phosphorsäure durchtränkten Film

Brennstoffzellen-Typ		Anode ein/aus	Ionen-Transport	Kathode ein/aus	Temp.°C
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell (FC)	H_2 (aus) / CO (ein) CO_2 (aus) / H_2O (ein)	O^{2-} (links)	O_2 (aus) / CO_2 (ein)	800
MCFC	Molten Carbonate FC	H_2 (aus) / CO (ein) CO_2 (aus) / H_2O (ein)	CO_3^{2-} (links)	O_2 (aus) / CO_2 (ein)	650
PAFC	Phosphoric Acid FC	H_2 (aus)	H^+ (rechts)	H_2O gasförmig / O_2 (aus)	220
HT-PEMFC	High Temperature Polymer Electrolyte Membrane FC	H_2 (aus)	H^+ (rechts)	H_2O gasförmig / O_2 (aus)	160
DMFC	Direct Methanol FC	CH_3OH (aus) / CO_2 (ein)	H^+ (rechts)	H_2O flüssig / O_2 (aus)	90
LT-PEMFC	Low Temperature Polymer Electrolyte Membrane FC	H_2 (aus)	H^+ (rechts)	H_2O flüssig / O_2 (aus)	80
AFC	Alkaline FC	H_2 (aus) / H_2O (ein)	OH^- (links)	O_2 (aus)	80

Abb. 8.1 Arten von Brennstoffzellen nach Einsatzgebiet und Leistungsklasse

¹Vgl. Péra et al. 2002.

aus Polybenzimidazol. Gegenwärtig erreichen diese Brennstoffzellen jedoch geringere Stromdichten als die Niedertemperatur (Low Temperature – LT)-PEMFC, die wie auch die DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) einen festen Elektrolyten aus einer protonenleitenden Polymermembran beinhalten, deren Leitfähigkeit durch eine hinreichende Befeuchtung sichergestellt wird.² Die mit reinem Wasserstoff betriebene LT-PEM weist gegenüber der DMFC eine bessere Leistungsdichte und höhere Wirkungsgrade auf, die aus dem Umstand resultieren, dass die DMFC das deutlich größere Methanolkörmöl spaltet. Dieser Umstand bedeutet zugleich allerdings einen Hauptvorteil der DMFC, da mit Methanol ein flüssiger und somit leicht zu transportierender Energieträger zur Anwendung kommt.³ Wegen der Vorzüge eines festen Elektrolyten, des angepassten Temperaturniveaus und einer guten Leistungsdichte werden diese beiden Brennstoffzellentypen derzeit für mobile Anwendungen präferiert. Aufgrund einer vergleichsweise geringen Leistungsdichte und des Nachteils eines flüssigen Elektrolyten, der aus einer wässrigen Kaliumhydroxid-Lösung besteht, kommt AFC (Alkaline-Fuel-Cell)-Systemen im Bereich der mobilen Anwendungen trotz eines hohen Produktreifegrades aktuell keine Bedeutung zu.⁴

8.2 Funktionsprinzip der PEM-Brennstoffzelle

PEM-Brennstoffzellen-Stacks bestehen aus einer Vielzahl einzelner Brennstoffzellen, in denen die Oxidation und Reduktion des zugeführten Wasserstoffs unter Zuhilfenahme des in der Luft enthaltenen Sauerstoffs abläuft. Diese exotherme Reaktion vollzieht sich innerhalb der Brennstoffzelle in zwei kontinuierlichen und synchron verlaufenden Prozessen an der Anode sowie der Kathode. Der entsprechende Ionen- und Elektronenfluss ist in Abb. 8.2 schematisch dargestellt. Der Brennstoff wird über die Kanalstruktur der anodenseitigen Bipolar-Halbplatte zugeführt und gelangt über die Gas-Diffusionslage zur Katalysatorschicht. Dort stehen die Platin-Katalysatorpartikel, das Graphit als elektrisch leitfähiges Trägermaterial für den Katalysator und die Ionenaustauschmembran als sogenannte Dreiphasengrenze im Kontakt zueinander. An dieser Stelle wird nun das Wasserstoffmolekül unter Wärmefreigabe oxidiert und in seine Bestandteile zersetzt. Während das H^+ -Ion über die Ionenaustauschmembran zur Kathode gelangt, wird das Elektron über die elektrische Last außerhalb der Brennstoffzelle, etwa den Elektromotor eines Fahrzeugs, zur Kathode geleitet. Hier wird der im Oxidationsmittel „Luft“ enthaltene Sauerstoff an der kathodenseitigen Dreiphasengrenze mit den Wasserstoffprotonen zu flüssigem Wasser reduziert. Das Produktwasser verlässt zusammen mit einem Restanteil Luft die Kathode, während anodenseitig ein je nach Betriebsart unterschiedlich hoher Wasserstoff-Überschuss die Brennstoffzelle verlässt.

²Vgl. Jafri und Gupta 2016.

³Vgl. Theenhaus und Bonhoff 1999–2000.

⁴Vgl. Lipman und Weber 2019.

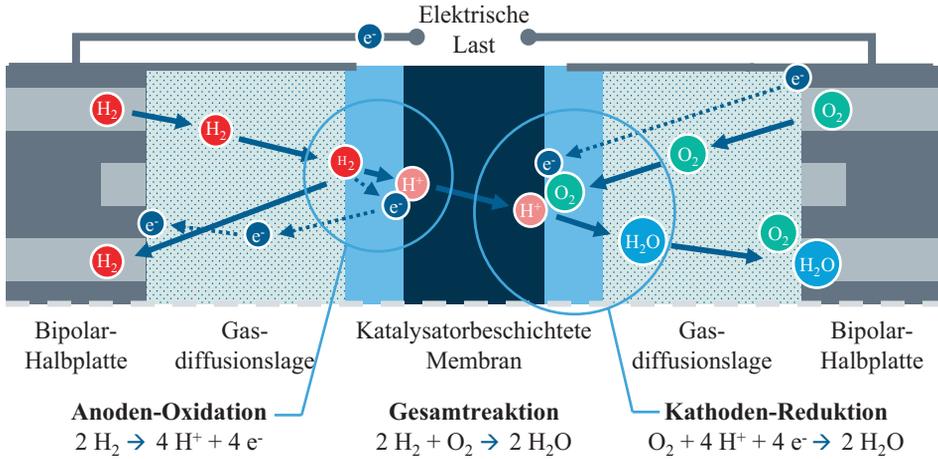


Abb. 8.2 Grundlegende Funktionsweise der PEM-Brennstoffzelle

Generell existieren mindestens drei für den Betrieb der Brennstoffzelle relevante Verlustmechanismen mit direktem Einfluss auf die Leistungskennlinie. Speziell im Bereich niedriger Stromdichten treten die sogenannten Aktivierungsverluste auf, die sich aus irreversiblen Einbußen und der endlich schnellen Reaktionsrate ergeben.⁵ Diese Verluste lassen sich sowohl durch die Betriebsparameter als auch durch die Materialeigenschaften beeinflussen. Ebenfalls stark von den Materialeigenschaften sind die ohmschen Verluste abhängig, die als Spannungsabfall aufgrund der elektrischen Widerstände der einzelnen Schichten zu verstehen sind.⁶ Auch die ionische Leitfähigkeit der Ionenaustauschmembran muss als ein Verlustbeiwert berücksichtigt werden. Wiederum von den Betriebsbedingungen und von der Gaszusammensetzung abhängige Verluste werden als „Konzentrationsüberspannungsverluste“ oder „Transportverluste“ bezeichnet. Besonders die entlang des Fluidkanals abnehmende Wasserstoffkonzentration im Brenngasstrom führt zu einem Abfall der erzielbaren Spannung, der auch durch einen trägen Abtransport der Produkte hervorgerufen werden kann.⁷

8.3 Aufbau von Brennstoffzellensystemen

In den vorherigen Kapiteln wurden das Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle und der darin stattfindende chemische Ablauf beschrieben. Im Folgenden wird das Brennstoffzellensystem von der Einzelzelle bis zum vollständigen und funktionsfähigen System inklusive der Peripheriekomponenten erläutert. Kernstück des Brennstoffzellensystems

⁵Vgl. Lipman und Weber 2019.

⁶Vgl. Lipman und Weber 2019.

⁷Vgl. Lipman und Weber 2019.

bilden die gestapelten Zellen, die miteinander verbunden den sogenannten Brennstoffzellen-Stack ergeben und für die Bereitstellung der elektrischen Leistung sorgen. Die Peripheriekomponenten werden als „Balance-of-Plant“ (BoP) bezeichnet und versorgen den Brennstoffzellen-Stack mit den benötigten Reaktionsmedien „Wasserstoff“ und „Luft“ sowie mit Kühlmittel. Zusammen sind sie für einen je nach Lastanforderung optimalen Betriebszustand des Stacks verantwortlich.

Dem genauen Aufbau des Brennstoffzellen-Stacks sowie der Balance-of-Plant widmen sich die folgenden Unterkapitel.

8.3.1 Komponenten des Brennstoffzellen-Stacks

Ein Brennstoffzellen-Stack setzt sich aus mehreren in Reihe angeordneten Einzelzellen sowie abschließenden Strukturbauteilen zusammen. Eine Einzelzelle besteht aus mehreren Einzelschichten, wobei jede Schicht mehrere Funktionen erfüllt. Der Aufbau eines Brennstoffzellen-Stacks ist in Abb. 8.3 dargestellt.

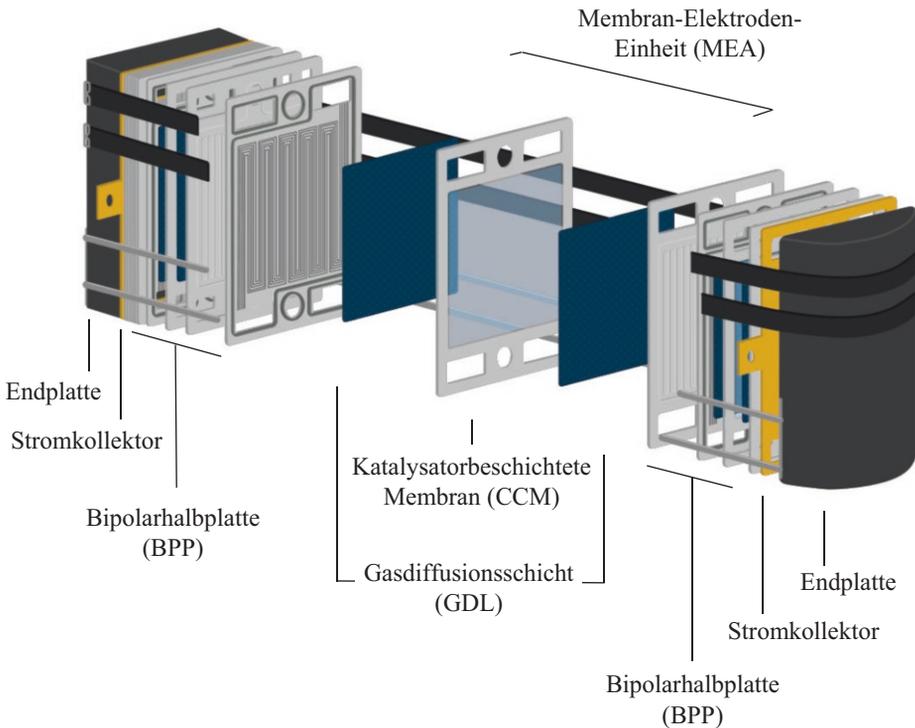


Abb. 8.3 Aufbau eines Brennstoffzellen-Stacks

Den Kern einer Zelle bildet die zwischen 15 und 180 μm dicke Polymer-Elektrolyt-Membran.⁸ Dort findet – wie in Abschn. 8.2 beschrieben – die chemische Redoxreaktion statt. Die Membran trennt die anoden- und kathodenseitigen Gasräume voneinander und ermöglicht gleichzeitig einen Protonenaustausch zwischen ihnen, weshalb sie gasdicht und protonenleitend sein muss. Neben der Gasdichtigkeit und der Protonenleitfähigkeit bilden eine hohe mechanische, chemische und thermische Langzeitstabilität weitere wichtige Anforderungen. Auf dem Markt hat sich ein PFSA-Polymer durchgesetzt, das eine unterschiedliche Protonenleitfähigkeit bei verschiedenen Feuchtigkeitsgraden aufweist.⁹ Bei zu niedrigem Feuchtigkeitsgehalt lässt die Protonenleitfähigkeit der Membran nach, und es besteht die Gefahr des Gasdurchbruchs, wodurch die Membran beschädigt wird. Ein zu hoher Feuchtigkeitsgehalt hat die Flutung der Diffusionsschicht und der Gaskanäle zur Folge, was den Zu- und Abtransport der Reaktanten und somit die Reaktion hemmt.

Um die Reaktion zu beschleunigen, befindet sich sowohl auf der Anodenseite als auch auf der Kathodenseite eine Katalysatorbeschichtung. Die katalysatorbeschichtete Membran wird als „Catalyst Coated Membrane“ (CCM) bezeichnet. Der Katalysator muss aufgrund der stark sauren Umgebung korrosionsresistent sein. Außerdem sind ein gutes Langzeitverhalten sowie eine hohe katalytische Aktivität und eine hohe Konvertierungsrate notwendig. Edelmetalle und ihre Legierungen eignen sich aus diesen Gründen besonders als Katalysator. Bei der Kathodenseite kommt als Katalysator häufig Platin zum Einsatz, während auf der Anodenseite Platin, versetzt mit Ruthenium, verwendet wird. Durch das Ruthenium wird die CO-Bindungsstärke verringert, was die Gefahr einer Vergiftung des Platins mit CO senkt. Die Katalysatorbeschichtung weist eine Dicke von 5 bis 15 μm auf.¹⁰

Beidseitig zu der CCM befindet sich jeweils eine Gasdiffusionslage (Gas Diffusion Layer – GDL). Diese sorgt für eine gleichmäßige Reaktantenverteilung sowie für einen kontinuierlichen Strom- und Wärmetransport zwischen der CCM und den angrenzenden Bipolarplatten. Übliche Dicken liegen im Bereich von 40 bis 120 μm .¹¹ Der Verbund aus CCM und einer GDL je Seite wird auch als „Membran-Elektroden-Einheit“ bezeichnet.

Die abschließende Schicht einer Zelle bilden die Bipolarplatten (BPP), die nicht nur die einzelnen Zellen voneinander abgrenzen, sondern auch für die mechanische Stabilität, die Reaktantenverteilung und die elektrische Verbindung der einzelnen Zellen sorgen. Eine Bipolarplatte besteht aus zwei Bipolarhalbplatten, die miteinander verschweißt oder verklebt werden. Auf der Innenseite der Halbplatte befinden sich Strömungskanäle für das Kühlmedium, auf der Außenseite die Strömungsfelder für die Reaktanten „Wasserstoff“ und „Luft“. Aufgrund der wässrig-sauren Umgebung, in der sich die BPP befinden, müssen sie korrosionsbeständig sein. Sie müssen außerdem elektrisch leitfähig sein und einen möglichst niedrigen Kontaktwiderstand zur Vermeidung elektrischer Verluste besitzen. In

⁸Vgl. Töpler und Lehmann 2017.

⁹Vgl. Kim et al. 2010.

¹⁰Vgl. Töpler und Lehmann 2017.

¹¹Vgl. Töpler und Lehmann 2017.

der Praxis haben sich mehrere Materialien durchgesetzt, die diese Anforderungen erfüllen. Zum einen werden BPP aus Metall verwendet – wobei sich die geforderten Eigenschaften durch eine Beschichtung mit Gold oder Titan zusätzlich verbessern lassen –, zum anderen werden BPP aus Graphit und Graphit-Polymer-Komposits verwendet. Wichtigster Vorteil gegenüber den BPP aus Metall ist die flexible Gestaltbarkeit der gegenüberliegenden Verteilfelder. In Bezug auf Gewicht und Volumen sind die metallischen BPP jedoch im Vorteil: Zwar besitzt Metall eine höhere Dichte im Vergleich zu den anderen Materialien, doch lassen sich mit Metall geringere Wandstärken realisieren, wodurch das Gewicht pro BPP bei Metallen geringer ausfällt. Die Dicke einer geformten BPP beträgt meist 0,8 bis 1 mm. Übliche Zelldicken mit metallischen BPP liegen zwischen 1,2 bis 1,5 mm.¹²

Die nutzbare Spannung einer Zelle ist unabhängig von ihrer Größe durch die chemische Reaktion und unvermeidbare Verlusteffekte auf ca. 0,7 V begrenzt. Aus diesem Grund werden mehrere Zellen in Reihe geschaltet, um technisch nutzbare Spannungsniveaus erreichen zu können. So sind, je nach Anwendung, Brennstoffzellen-Stacks mit bis zu 400 Zellen üblich. Die erreichbare Stromstärke einer Zelle korreliert mit ihrer Zellfläche, wird jedoch durch die benötigte homogene Verteilung der Reaktanten sowie eine gleichmäßige Temperaturverteilung begrenzt.¹³ Im Automotive-Bereich haben sich daher rechteckige Zellen mit einer Fläche von etwa 200 cm² durchgesetzt.

An den Enden der aneinandergereihten Zellen befindet sich jeweils eine Stromabnehmerplatte. Diese Platten sind an den Verbraucherstromkreis angeschlossen, wodurch die im Brennstoffzellen-Stack freigesetzte elektrische Leistung an die Verbraucher weitergeleitet werden kann. Die Stromabnehmerplatten bestehen aus einem elektrisch gut leitfähigen Material, beispielsweise Kupfer. An den Stromabnehmerplatten befindet sich jeweils eine Isolationsschicht, um eine unkontrollierte Spannungsausbreitung auf umliegende Komponenten zu verhindern. Je nach Auslegung des Brennstoffzellen-Stacks können Endzellheizter zwischen Stromabnehmerplatte und Isolationsschicht verbaut werden. Diese sorgen für eine homogene Temperaturverteilung über alle Zellen hinweg, da ansonsten in der Mitte des Brennstoffzellen-Stacks eine höhere Temperatur herrschen würde als an den Randbereichen.

Den Abschluss eines Brennstoffzellen-Stacks bilden die beiden Endplatten, über welche die Zellen zusammengedrückt werden und die interne sowie externe Dichtheit des Systems gewährleistet wird. Als Werkstoffe kommen in der Regel Metalle wie Aluminium, Titan oder rostfreier Stahl zum Einsatz.¹⁴ Die Anpresskräfte von rund 120 N/cm² werden mittels Zuganker oder Spannbänder zwischen den Endplatten aufgebracht.

¹²Vgl. Töpler und Lehmann 2017.

¹³Vgl. Wind et al. 2019.

¹⁴Vgl. Kim et al. 2008.

8.3.2 Komponenten der Balance-of-Plant

Die Balance-of-Plant besteht aus den drei Subsystemen zur Medienversorgung sowie der Leistungselektronik. Zu den Subsystemen der Medienversorgung zählen das Wasserstoff-, das Luft- und das Kühlmittelsystem. Der Gesamtsystemaufbau eines Brennstoffzellensystems ist in Abb. 8.4 dargestellt.

Das Wasserstoffsystem sorgt für die Bereitstellung des Kraftstoffs der Brennstoffzelle. Der Wasserstoff wird üblicherweise in einem Drucktank mit einem Druck von 350 oder 700 bar gespeichert. Ein solch hoher Druck ist notwendig, damit trotz der geringen volumetrischen Energiedichte von etwa 5 MJ/l (Benzin/Diesel rund 30 und 35 MJ/l) eine ausreichende Menge Kraftstoff mitgeführt werden kann.¹⁵

Im Pkw-Bereich werden derzeit Reichweiten von mehr als 500 km erzielt, wobei für eine 100-Kilometer-Strecke etwa 1 kg Wasserstoff benötigt wird. Weitere Wasserstoffspeichertechniken befassen sich mit der Kryogentechnik oder auch mit Absorptionsspeichern. Bei der Kryogentechnik wird der Wasserstoff bei einer Temperatur von etwa -253 °C und einem Druck von 4 bar flüssig gespeichert. Dadurch sind zwar hohe volumetrische Speicherdichten möglich, jedoch erschwert die äußerst niedrige Temperatur die Handhabung, und es werden hohe Kühlleistungen benötigt. Bei unzureichender Isolierung muss Wasserstoff an die Atmosphäre abgelassen werden. In Absorptionsspeichern wird der Wasserstoff in einem Feststoff oder einer Flüssigkeit eingelagert. Die gravimetrische Speicherdichte ist aufgrund des Absorptionsmaterials gering. Die letztgenannten Speichertechniken sind bisher unzureichend erforscht, weshalb der Druckspeicher den aktuellen Stand der Technik darstellt.^{16,17}

Vom Tankdruck wird zuerst auf einen Mitteldruck von etwa 30 bar und anschließend auf den Betriebsdruck von 1,5 bis 4 bar entspannt. Der Wasserstoff wird dem Brennstoffzellen-Stack überstöchiometrisch zugeführt, damit stets ausreichend davon für die Reaktion zur Verfügung steht. Dies führt dazu, dass nach dem Austritt aus dem Brennstoffzellen-Stack noch große Mengen unverbrauchten Wasserstoffs im Gasgemisch enthalten sind. Bei „Dead-End-Anode“-Systemen wird das Gasgemisch mit Restwasserstoff direkt aus dem System abgelassen, das aufgrund der Ineffizienz in der Praxis jedoch selten Anwendung findet. Meistens wird das Gasgemisch – zusammen mit frischem Wasserstoff aus dem Tank – dem Brennstoffzellen-Stack erneut zugeführt. Dieser Vorgang, der aktiv oder passiv erfolgen kann, wird als „Rezirkulation“ bezeichnet. Bei einer aktiven Rezirkulation wird ein elektrisches Gebläse zur Förderung des Gasgemisches mit dem Vorteil eingesetzt, dass eine einfache Regelung des Volumenstroms möglich ist und sich auch bei geringen Volumenströmen eine ausreichende Rezirkulation erreichen lässt. Bei passiven Systemen wird das Gasgemisch mittels des „Injector-Ejector“-Prinzips

¹⁵Vgl. Adolf et al. 2017.

¹⁶Vgl. Wind et al. 2019.

¹⁷Vgl. Töpler und Lehmann 2017.

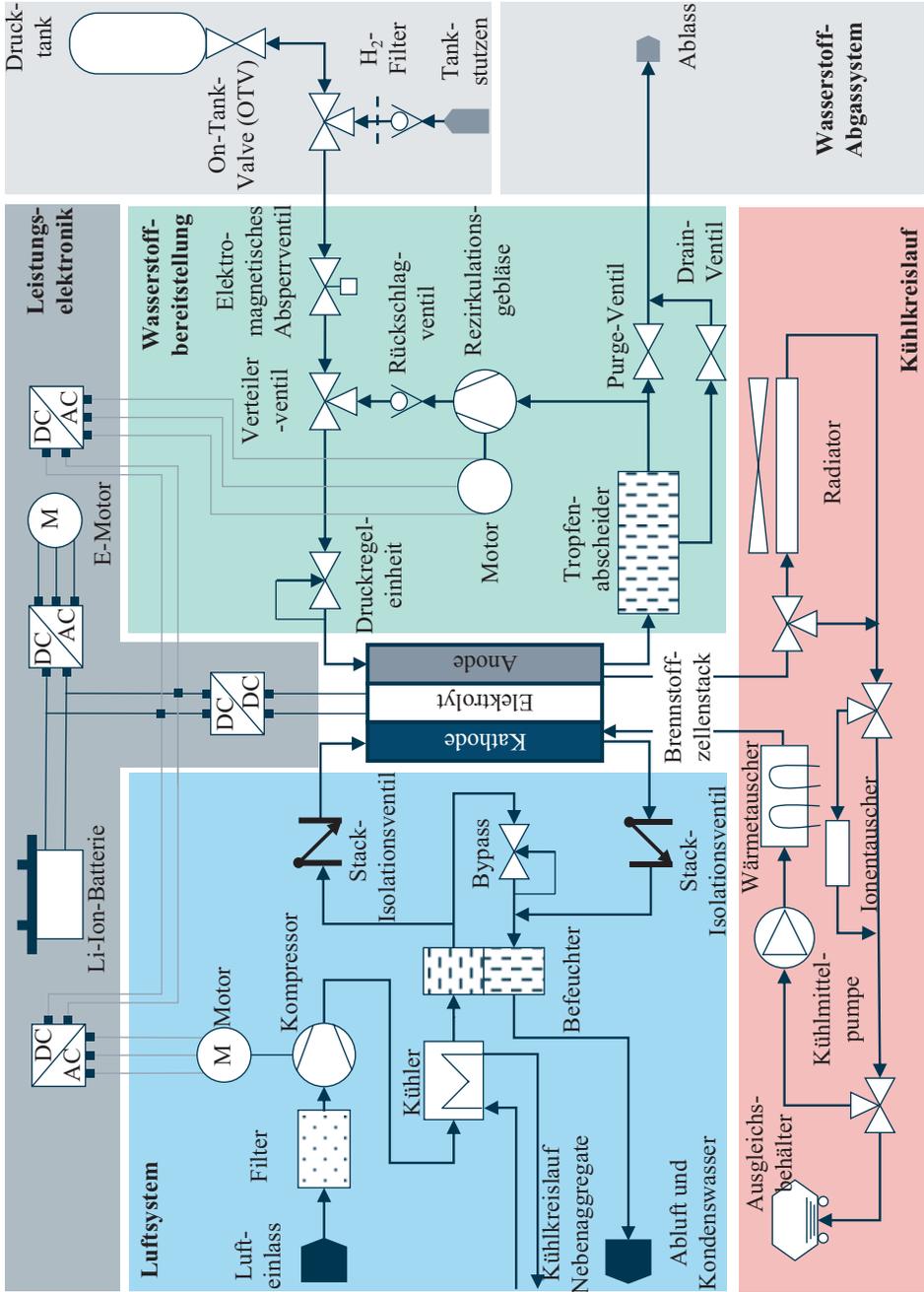


Abb. 8.4 Aufbau eines Brennstoffzellensystems

gefördert. In einer sogenannten Strahlpumpe wird frischer Wasserstoff durch eine Düse eingespritzt und mit Hilfe eines speziell geformten Diffusors ein Unterdruck erzeugt, wodurch das Gasgemisch angesaugt und gefördert wird. Vorteilhaft ist dabei, dass kein weiterer Energieverbraucher benötigt wird und Bauraum sowie Gewicht eingespart werden kann.¹⁸

Durch die Rezirkulation wird nicht nur Wasserstoff im Kreis gefördert, sondern auch Wasser und Inertgas wie Stickstoff, das von der Kathodenseite auf die Anodenseite durch die Membran diffundiert. Das Inertgas ist nicht an der Reaktion im Brennstoffzellen-Stack beteiligt und senkt dadurch den Wirkungsgrad. Aus diesem Grund ist ein regelmäßiges Ablassen des Gasgemisches notwendig, um eine ausreichend hohe Wasserstoffkonzentration auf der Anodenseite sicherzustellen. Dieser Vorgang wird „Purge“ genannt. Auch ein zu hoher Wasseranteil im Gasgemisch wirkt sich negativ auf die Effizienz aus, weshalb das überschüssige Wasser in regelmäßigen Abständen ebenfalls aus dem System entfernt werden muss. Dieser Schritt wird „Drain“ genannt. Die beiden Vorgänge „Purge“ und „Drain“ lassen sich auch gleichzeitig vornehmen.

Das Luftsystem lässt sich in die Luftfilterung und -komprimierung sowie die Luftbefeuchtung aufteilen. Da in der Umgebungsluft für den Brennstoffzellen-Stack schädliche Stoffe wie Staub und Schmutzpartikel enthalten sein können, muss die Luft im ersten Schritt gefiltert werden. Anschließend wird sie durch einen Kompressor gefördert und auf den Betriebsdruck verdichtet. Durch erhöhte Betriebsdrücke steigt die Leistung des Brennstoffzellen-Stacks. Übliche Drücke liegen im Bereich von 1,5 bis 4 bar. Aufgrund der Verdichtung muss die erwärmte Luft abgekühlt werden, bevor sie dem Brennstoffzellen-Stack zugeführt werden kann. Wie in Abschn. 8.3.1 beschrieben, spielt der Wassergehalt des Brennstoffzellen-Stacks eine zentrale Rolle, weshalb ein Luftbefeuchter zum Einsatz kommt. Das dafür notwendige Wasser entsteht bei der Reaktion im Brennstoffzellen-Stack und wird dem Luft-Abgasstrom entnommen.

Ähnlich wie bei der Wasserstoffzufuhr, wird auch die Luft überstöchiometrisch zugeführt. Dadurch wird sichergestellt, dass am Ende des Gaskanals noch eine ausreichend hohe Edukt-Konzentration vorhanden ist, was Spannungsverluste reduziert und somit die Effizienz des Brennstoffzellen-Stacks steigert.

Für die Regulierung der Temperatur im Brennstoffzellen-Stack ist das Kühlmittelsystem zuständig. Die Temperatur sollte idealerweise im Bereich zwischen 60 und 85 °C liegen. Der Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle liegt – abhängig vom Betriebspunkt – zwischen 40 % und 65 %. Die restliche Energie fällt als Verlustwärme an, die durch das Kühlmittelsystem abgeführt werden muss. Anders als beim Verbrennungsmotor, entweicht nur wenig Wärme durch das Abgas, weshalb ein leistungsstarkes Kühlmittelsystem erforderlich ist. Dabei wird zwischen einem Hochtemperatur-Kreislauf und einem Niedertemperatur-Kreislauf unterschieden. Im Hochtemperatur-Kreislauf werden der Brennstoffzellen-Stack sowie seine Komponenten gekühlt. Die Kühlung der Leistungs-

¹⁸Vgl. Klell et al. 2018.

elektronik, der Batterie und weiterer Komponenten geschieht durch den Niedertemperatur-Kreislauf.¹⁹

Der Kühlkreislauf ist dabei ähnlich dem eines Verbrennungsmotors aufgebaut. Neben den Standardkomponenten „Pumpe“ und „Radiator“ wird ebenfalls ein Wärmetauscher verbaut, der für ein schnelles Aufheizen des Brennstoffzellen-Stacks beim Start sorgt. Da das Kühlmittel in direktem Kontakt mit den Bipolarplatten steht, ist es zur Vermeidung eines Kurzschlusses äußerst wichtig, dass es ursprünglich nicht leitfähig ist. Durch den Betrieb wird das Kühlmittel mit der Zeit stetig leitfähiger, weshalb mittels eines Ionentauschers sichergestellt wird, dass die Leitfähigkeit keinen kritischen Wert erreicht.

Zwischen den einzelnen Drücken der Medien besteht ein direkter Zusammenhang. Um die bereits erwähnte Diffusion von Inertgas von der Kathodenseite zur Anodenseite zu verringern, ist der Druck auf der Anodenseite stets höher als derjenige auf der Kathodenseite. Die Druckdifferenz darf jedoch nicht zu groß sein, damit die Membran nicht beschädigt wird. Der Druck im Kühlmittelsystem liegt über den Drücken der Anoden- und Kathodenseite, um eine Leckage von Wasserstoff oder Luft ins Kühlmittelsystem zu vermeiden.

Die Leistungselektronik leitet die elektrische Leistung vom Brennstoffzellen-Stack zum elektrischen Antriebsmotor. Ein Brennstoffzellensystem besitzt zusätzlich eine Batterie, die kurzfristig Leistung bereitstellt und Bremsenergie rekuperiert. Aufgrund verschiedener Spannungsniveaus und Spannungsarten kommen DC/DC-Wandler sowie DC/AC-Wandler zum Einsatz.

Literatur

Teil II: Elektrofahrzeugspezifische Systeme

Adolf, J; Balzer, C. H; Louis, J; Schabla, U; Fishedick, M; Arnold, K; Pastowski, A; Schüwer, D.: *Shell Wasserstoff-Studie. Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂*. In: Hamburg: Shell Deutschland Oil GmbH 2017.

Jafri, N. H; Gupta, S.: *An overview of Fuel Cells Application in Transportation*. Piscataway, NJ: IEEE, 2016. 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific) June 1–4, 2016, BEXCO, Busan, Korea

Kim, J.-S; Park, J.-B; Kim, Y.-M; Ahn, S.-H; Sun, H.-Y; Kim, K.-H; Song, T.-W.: *Fuel Cell End Plates: A review*. In: International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Jg. 9, 2008, Nr. 1, S. 39–46

Kim, K.-H; Lee, K.-Y; Lee, S.-Y; Cho, E; Lim, T.-H; Kim, H.-J; Yoon, S. P; Kim, S. H; Lim, T. W; Jang, J. H.: *The effects of relative humidity on the performances of PEMFC MEAs with various Nafion® ionomer contents*. In: International Journal of Hydrogen Energy, Jg. 35, 2010, Nr. 23, S. 13104–13110

Klell, M; Eichsleder, H; Trattner, A. (Hrsg.): *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung*. 4. Auflage Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018

¹⁹Vgl. Klell et al. 2018.

- Lipman, T. E; Weber, A. Z. (Hrsg.):** *Fuel Cells and Hydrogen Production. A Volume in the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Second Edition.* Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Series, New York, NY: Springer New York, 2019
- Péra, M.-C; Hissel, D; Kauffmann, J.-M.:** *Fuel Cell Systems for Electrical Vehicle.* Piscataway, NJ: IEEE, 2002. IEEE 55th Vehicular Technology Conference
- Theenhaus, R; Bonhoff, K.:** *ZUKUNFTS- TECHNOLOGIE BRENNSTOFFZELLE. Brennstoffzellensysteme – ein Überblick.* <https://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th1999/th1999.pdf>. Abruf 04.04.2022
- Töpler, J; Lehmann, J. (Hrsg.):** *Wasserstoff und Brennstoffzelle. Technologien und Marktperspektiven.* 2., aktualisierte und erweiterte Auflage Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017
- Wind, J; Tschöke, H; Gutzmer, P; Pfund, T. (Hrsg.):** *Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Grundlagen – vom Mikro-Hybrid zum vollelektrischen Antrieb.* 1. Auflage Aufl., Berlin: Springer Vieweg, 2019

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Elektrische Maschinen

9

Kay Hameyer, Daniel Butterweck, Niklas Driendl, Marius Franck,
Benedikt Groschup, Kevin Jansen, Nora Leuning,
Sebastian Mönninghoff, Martin Nell und Michael Schröder

Die elektrische Maschine repräsentiert physikalisch einen Energiewandler. Dabei wird zwischen nicht rotierenden elektrischen Maschinen und rotierenden elektrischen Maschinen mit bewegenden Hauptelementen unterschieden. Allen elektrischen Maschinen ist gemeinsam, dass sie in ihrem Aufbau über einen magnetischen Kreis verfügen, der für die Funktionsweise wesentlich ist.¹

Zu der Gruppe der nicht rotierenden elektrischen Maschinen zählen die Transformatoren. Bei ihnen spielt die magnetische Kraftwirkung eine untergeordnete beziehungsweise unerwünschte Rolle, die in Fehlerfällen relevant werden kann.

¹ Vgl. Fischer 2009.

K. Hameyer (✉)

Universitätsprofessor, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: kay.hameyer@iem.rwth-aachen.de

D. Butterweck

Oberingenieur, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: daniel.butterweck@iem.rwth-aachen.de

M. Franck · K. Jansen · S. Mönninghoff

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: marius.franck@iem.rwth-aachen.de; kevin.jansen@iem.rwth-aachen.de;
sebastian.moeninghoff@iem.rwth-aachen.de

N. Leuning

Juniorprofessorin, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: nora.leuning@iem.rwth-aachen.de

Bei dem wesentlich größeren und im Folgenden ausschließlich dargestellten Gebiet der elektrischen Maschinen mit bewegenden Hauptelementen sind die magnetischen Kraftwirkungen von zentraler Bedeutung. Bewegungen können dabei translatorisch oder rotierend erfolgen. Rotierende elektrische Maschinen sind durch eine Vielzahl verschiedener Bauformen und Einsatzbereiche geprägt. Sie dienen der Umsetzung elektrischer Energie in mechanische Energie oder umgekehrt. Wird elektrische Energie in mechanische Energie umgesetzt, wird von einem „Elektromotor“ gesprochen. Bei der Energiewandlung in Gegenrichtung – von mechanischer Energie in elektrische Energie – ist von einem „elektrischen Generator“ die Rede. Elektrische Maschinen können als Motor sowie als Generator betrieben werden. Die konkrete Funktion wird durch den Betriebsbereich der Maschine bestimmt.

Bei rotierenden elektrischen Maschinen, in denen der magnetische Fluss im Luftspalt radial in der Drehebene und damit senkrecht zur Drehachse verläuft, handelt es sich um **Radialflussmaschinen**. Die magnetische Flussführung ist der formgebende Aspekt des Aufbaus. Magnetisch aktive Elemente der elektrischen Maschine, sowohl ruhend als auch rotierend, bestehen meist aus Paketen geschichteten Elektroblechs zur Flussführung. In den dort in axialer Richtung verlaufenden Nuten sind zur Flussverzweigung oder -verstärkung Wicklungssysteme eingebracht. Je nach Topologie kann eines dieser Systeme durch eine Anordnung aus Permanentmagneten (PM) ersetzt werden. An den beiden axialen Enden der Maschine sind Verbindungen der in den Nuten liegenden elektrischen Leiter notwendig – die sogenannten Wickelköpfe, die nicht zur Drehmomentbildung beitragen und die elektrische Maschine axial verlängern. Die Anzahl der magnetischen Pole der elektrischen Maschine wird durch die Anordnung der Wicklung bestimmt. Der Aktivteil der Maschine ist fast vollständig mit Stahl und Kupfer gefüllt, mit einem kleinen Anteil von Isolierstoffen. Die vorhandene Querschnittsfläche muss auf kupfergefüllte stromführende Nuten sowie dazwischenliegende, den magnetischen Fluss führende Zähne sinnvoll verteilt werden. Eine Vergrößerung der Nutbreite vermindert die Zahnbreite und umgekehrt. Im ruhenden oder rotierenden Teil können die Nuten geschrägt zur Maschinenachse ausgeführt werden, um ein Ausrichten und damit Rasten aufgrund magnetischer Kräfte zu vermeiden.

Einen anderen Ansatz verfolgen die Konzepte der Transversalflussmaschine (TFM) und der Axialflussmaschine (AFM). Bei diesen elektrischen Maschinen verläuft der magnetische Fluss nicht mehr nur in einer Ebene, sondern auf dreidimensionalen Pfaden durch die Maschinenhauptelemente. Bei **Transversalflussmaschinen**, die wie in Abb. 9.1a als rotierende elektrische Maschine ausgeführt sind, wird das Wicklungssystem durch

M. Nell · N. Driendl · B. Groschup

Gruppenleiter, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: martin.nell@iem.rwth-aachen.de; niklas.driendl@iem.rwth-aachen.de;

benedikt.groschup@iem.rwth-aachen.de;

M. Schröder

Technical Specialist, FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

E-Mail: michael.schroeder@iem.rwth-aachen.de

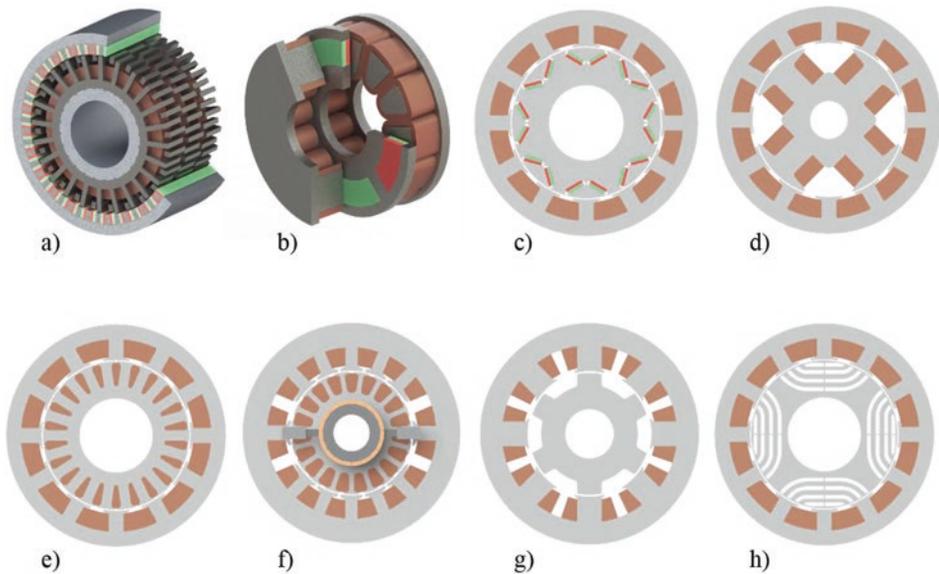


Abb. 9.1 Verschiedene Topologien elektrischer Maschinen: (a) Transversalflussmaschine, (b) Axialflussmaschine, (c) permanentmagneterregte Synchronmaschine, (d) fremderregte Synchronmaschine, (e) Asynchronmaschine, (f) Gleichstrommaschine, (g) geschaltete Reluktanzmaschine sowie (h) Synchronreluktanzmaschine

einfache Ringwicklungen gebildet. Die Ausrichtung der Windungen entspricht der Bewegungsrichtung. Diskret aufgebaute U-förmige Flussleitstücke führen den Fluss und bilden die magnetischen Pole der Maschine. Diese Anordnung führt zu einer geometrischen Entkopplung der stromführenden und der magnetisch flussführenden Kreise, die dadurch unabhängig voneinander dimensioniert werden können. Der Rotor ist typischerweise mit Permanentmagneten bestückt, Reluktanzrotoren sind möglich. Ein Vorteil der TFM ist der Wegfall der Wickelköpfe. Dadurch sind kleine Polteilungen am Umfang der Maschine realisierbar. Dies führt zu kleinen Drehzahlen und einem großen Drehmoment. Transversalflussmaschinen weisen daher einen großen Durchmesser auf und sind axial kürzer als Radialflussmaschinen gebaut. In der Elektromobilität können sie als Direktantrieb eingesetzt werden und erlauben den Wegfall von Getrieben. Nachteile von Transversalflussmaschinen ergeben sich durch die aufwendige dreidimensionale Flussführung, die mechanische Lagerkonstruktion und die hohe Drehmomentwelligkeit.

Bei der in Abb. 9.1b dargestellten **Axialflussmaschine** werden die Wicklungen üblicherweise als Einzelspulen ausgeführt. Der Rotor lässt sich mit Permanentmagneten oder wie bei einer Asynchronmaschine als Käfig ausführen. Ein zweiteiliger Rotor ist vorteilhaft, um Axialkräfte auszugleichen. Die Maschine kann mit mehreren axial gestaffelten Statorn und Rotorscheiben aufgebaut werden. Die Flussführung erfolgt im Bereich des Stators axial. Im Joch des Rotors werden die Feldlinien tangential geschlossen.

Grundsätzlich können elektrische Maschinen als Synchronmaschine (SM) oder als Asynchronmaschine (ASM) ausgeführt werden. Bei den in der Elektromobilität überwiegend anzutreffenden Radialflussmaschinen ist der Unterschied im Rotor zu finden. Bei der Synchronmaschine erzeugt der Rotor ein zeitlich konstantes Magnetfeld, das synchron mit dem vom Stator erzeugten Drehfeld rotiert. Bei der **permanentmagneterregten Synchronmaschine** (PMSM) wird – wie in Abb. 9.1c dargestellt – das Rotorfeld von Permanentmagneten erzeugt, während dies bei der in Abb. 9.1d gezeigten **fremderregten Synchronmaschine** (FSM) durch eine im Rotor eingebrachte Erregerwicklung geschieht, die über Schleifringe oder kontaktlos mit einem Gleichstrom gespeist wird. Bei der Asynchronmaschine kreist der Rotor etwas langsamer und damit asynchron zum umlaufenden Drehfeld des Stators. Die Differenz der beiden Drehgeschwindigkeiten wird über den Schlupf ausgedrückt. Kreist der Rotor langsamer als das Drehfeld, so ändert sich der magnetische Fluss zeitlich – was eine Spannung induziert, die wiederum einen Strom in den Rotorwicklungen hervorruft.

Permanentmagneterregte elektrische Maschinen besitzen in weiten Betriebsbereichen die höchsten Wirkungsgrade und ermöglichen die größten Leistungsdichten. Bedingt durch moderne Hochenergiepermanentmagnete, wie Seltenerd-magnete mit einer Legierung aus Neodym-Eisen-Bor (NdFeB), sind sehr kompakte Konstruktionen möglich. Trotz der hohen Werkstoffpreise für diese Magnete gibt es keine Alternative, wenn Leistungsdichte das Hauptkriterium bildet. Falls aus Kostengründen vom Einsatz der NdFeB-Magneten abgesehen werden soll, können Kompromisse bei Leistungsdichte und Wirkungsgrad eingegangen werden. Wird die elektrische Maschine mit blockförmigen anstelle von sinusförmigen Strömen gespeist, so handelt es sich um eine **permanentmagneterregte bürstenlose Gleichstrommaschine** (BLDC). Die Magnetkreistopologie aus Abb. 9.1c ist in beiden Fällen identisch. Details in der Gestaltung des Magnetkreises sorgen für die effiziente Funktion beider Maschinen. Teilweise werden auch beide Betriebsarten verwendet. So wird im Sinusbetrieb der Antrieb bei kleinen Drehzahlen geführt und dann bei höheren Drehzahlen in den Blockbetrieb gewechselt. Dies hat die Vorteile des ruckfreien Anfahrens beziehungsweise Fahrens ohne Drehmomentschwankungen bei kleinen Fahrgeschwindigkeiten und eines hohen Wirkungsgrads der Leistungselektronik bei höheren Geschwindigkeiten. Ein etwas schlechterer Wirkungsgrad der Maschine muss bei dieser Betriebsart in Kauf genommen werden. Permanentmagneterregte Maschinen lassen sich für einen großen Drehzahlbereich mit hohen Wirkungsgraden und hohen Drehmomentdichten dimensionieren. Sie sind damit gut als Direktantrieb ohne mechanisches Getriebe geeignet, aber auch für Hochdrehzahlkonzepte mit Getriebe. In der Elektromobilität kommen größtenteils permanentmagneterregte elektrische Maschinen zum Einsatz, da sie gute Wirkungsgrade und durch die Verwendung der Hochenergiepermanentmagnete eine sehr große Leistungsdichte aufweisen. Als Hauptantrieb werden meist Innenrotorkonstruktionen verwendet. Außenläufer bilden die Ausnahme. Bei Radnabenmotoren kann diese Konstruktionsvariante vorteilhaft sein. In der Regel befinden sich die Permanentmagnetsysteme im Rotor des Motors, wie in Abb. 9.2 dargestellt. Von links

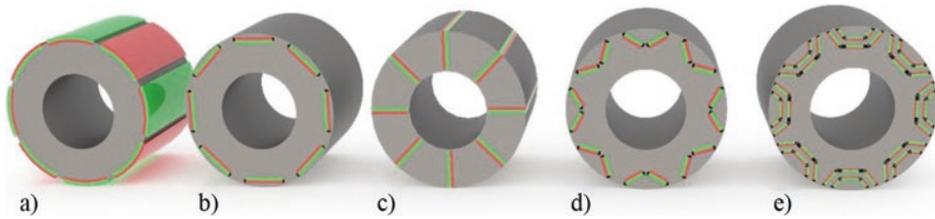


Abb. 9.2 Verschiedene Rotorvarianten für permanentmagneterregte elektrische Maschinen (a) auf der Oberfläche des Rotors aufgebrachte Magnete, (b) im Rotoreisen eingebettete Magnete, (c) Magnetsysteme in Sammleranordnung, um den Luftspaltfluss zu vergrößern, (d) V-förmig eingelassene Magnete sowie (e) Blechschnitt mit Flussperren zur Erhöhung des Reluktanzanteils und Permanentmagneten

begonnen, zeigt die Abb. 9.2a auf der Oberfläche des Rotors aufgebrachte Magnete, Abb. 9.2b im Rotoreisen eingebettete Magnete, Abb. 9.2c Magnetsysteme in Sammleranordnung mit Flusskonzentrator, um den Luftspaltfluss zu vergrößern, Abb. 9.2d V-förmig eingelassene Magnete sowie Abb. 9.2e Blechschnitt mit Flussperren zur Erhöhung des Reluktanzanteils und Permanentmagneten. Mit allen diesen Varianten lässt sich das Luftspaltfeld der elektrischen Maschine anpassen, so dass der Flussverlauf beziehungsweise die induzierte Spannung genau zum speisenden Strom passen, um ein großes und zeitlich konstantes Drehmoment zu erzeugen.

Durch die Permanentmagnete wird ein magnetisches Feld im Rotor erzeugt. Um höhere Drehzahlen zu erreichen, muss dieses Feld im sogenannten Feldschwächbereich aktiv durch zusätzliche Ströme geschwächt werden. Beim Einsatz als Traktionsantrieb dreht sich der Rotor auch weiter, wenn das Fahrzeug rollt und die Maschine nicht aktiv über eine Kupplung vom restlichen Antriebsstrang getrennt wird. Durch die Bewegung der Magnete entlang der Statornuten, in denen die Leiter der Wicklung eingebracht sind, werden durch im Rotoreisen induzierte Wirbelströme Schlepptomente und damit sogenannte Schleppverluste erzeugt. Im Fehlerfall kann das Feld des Magnetrotors weiterhin eine Spannung in den Wicklungen induzieren. Diese möglicherweise große Spannung kann zu Schäden der Leistungselektronik führen. Bei der FSM lässt sich die Bildung von Schlepptomomenten und hohen induzierten Spannungen im Fehlerfall durch die Abschaltung der Rotorspeisung verhindern.

Die Asynchronmaschine (ASM) verfügt, wie in Abb. 9.1e dargestellt, prinzipiell über den gleichen Statoraufbau wie die SM, unterscheidet sich jedoch im Rotor. Im Gegensatz zur SM haben ASM keine Permanentmagnete und keine mit Gleichstrom gespeiste Erregerwicklung zur Erzeugung des Rotorfeldes. Der Rotor einer ASM kann als Schleifringläufer oder als Käfigläufer beziehungsweise Kurzschlussläufer ausgeführt werden. Der Schleifringläufer trägt ebenso wie der Stator eine Drehstromwicklung. Die Enden der Rotorwicklung werden über Schleifringe herausgeführt und mittels Bürsten kontaktiert. Die Rotorwicklung lässt sich entweder über die Bürsten – gegebenenfalls über einen zusätzlichen Vorwiderstand – kurzschließen oder mit Zusatzspannungen spei-

sen. Dadurch lässt sich die Drehzahl verstellen. Im Bereich der Traktionsmaschinen dominieren die Käfigläufer-ASM. Der Käfigläufer hat in den Nuten einzelne Stäbe, die an den Stirnseiten über Kurzschlussringe leitend verbunden werden. Es besteht kein Zugang mehr zur Rotorwicklung und damit keine Möglichkeit zur direkten Beeinflussung der Drehzahl. Der Rotorkäfig wird häufig aus Aluminium im Druckgussverfahren hergestellt, was verglichen mit der PMSM zu geringeren Material- und Produktionskosten der Maschine führt. Alternativ kann zur Verringerung der Stromwärmeverluste im Rotorkäfig ebendieser aus Kupfer hergestellt werden. Kupferdruckgussverfahren sind im Leistungsbereich bis etwa 150 kW möglich.

Die Erzeugung des Rotorfeldes der ASM unterscheidet sich im Vergleich zur SM. Das grundlegende physikalische Prinzip der ASM ist die elektromagnetische Induktion, die ihr auch den Namen „Induktionsmaschine“ verleiht. Wird eine Drehstromwicklung des Stators einer ASM mit einem Strom der Frequenz f_1 gespeist, ergeben sich symmetrische Ströme, die im Luftspalt der Maschine ein Drehfeld mit Synchrondrehzahl n_1 erzeugen. Dieses Drehfeld induziert aufgrund der elektromagnetischen Induktion in den Leitern der Rotorwicklung Spannungen und Ströme mit der Frequenz f_2 . Es entsteht ein Rotordrehfeld, das sich relativ zum Rotor mit der Differenzdrehzahl n_2 und relativ zum Stator mit der Drehzahl $n_1 = n + n_2$ bewegt. Das vom Rotor erzeugte Drehfeld hat somit bezüglich des Stators wieder die Synchrondrehzahl. Gemäß der Lenz'schen Regel versuchen die Rotorströme, ihrer Entstehungsursache – nämlich der Relativbewegung zwischen Stator und Rotor – entgegenzuwirken. Die Rotorströme bilden mit dem Statorfeld, das mit synchroner Drehzahl umläuft, deshalb Drehmomente, die den Rotor in Richtung des Statorfeldes antreiben und seine Drehzahl derjenigen des Statorfeldes anzunähern suchen. Der Rotor kann die Synchrondrehzahl jedoch nie ganz erreichen, da in diesem Fall die Induktionswirkung aufgrund der fehlenden Relativbewegung des Rotors gegen das Statorfeld nicht mehr gegeben wäre. Der Rotor zeigt also einen gewissen Schlupf s gegen das Statorfeld – er läuft asynchron. Je größer das vom Rotor verlangte Drehmoment ist, desto größer wird der Schlupf. Im Generatorbetrieb der Maschine ist die Drehzahl n des Rotors größer als die Synchrondrehzahl des umlaufenden Statorfeldes. Auch hier versuchen die durch die Relativbewegung induzierten Rotorströme der Lenz'schen Regel entsprechend ihrer Entstehungsursache entgegenzuwirken – wodurch sie zu einem negativen Drehmoment führen.

Der Statorstrom in der ASM hat demnach neben der Erzeugung des Statorfeldes auch die Aufgabe, den Rotor in jedem Betriebspunkt der Maschine zu magnetisieren. Der daraus in jedem Betriebspunkt resultierende Blindleistungsbedarf der Maschine führt, verglichen mit der SM, zu niedrigeren Wirkungsgraden. Die Diskrepanz des Wirkungsgrades wächst beim Vergleich der ASM mit der PMSM aufgrund der in der PMSM nicht auftretenden Stromwärmeverluste im Rotor. Größere Einbauvolumen und damit schlechtere Leistungsdichten, vor allem im Teillastbereich der Maschine, sind daher zu berücksichtigen. Erst für höhere Drehzahlen lassen sich ähnliche oder sogar höhere Wirkungsgrade im Vergleich zu PMSM erzielen, da bei der ASM kein aktiver Feldschwächestrom benötigt wird.

Ein Vorteil der von der Statorwicklung abhängigen Erregung der ASM ist die Vermeidung von Verlustmomenten beim Mitschleppen der Maschine im Zuge hoher Drehzahlen. In einem solchen Betriebsfall können Schleppmomente und auch hohe induzierte Spannungen durch das Abschalten der Drehstromversorgung des Stators verhindert werden. Weitere Vorteile der ASM im Vergleich zur PMSM sind die in der Serienfertigung niedrigeren Produktions- und Materialkosten sowie ihre hohe Überlastfähigkeit. Letztergenannte ist dabei den hohen zulässigen Temperaturen im Rotor von mehr als 200 °C geschuldet.

Weitere Arten elektrischer Maschinen spielen in der Elektromobilität aktuell nur eine untergeordnete Rolle. Die in Abb. 9.1f gezeigte **Gleichstrommaschine** (GM) mit mechanischem Kommutator besitzt heutzutage für den Einsatz als Hauptantrieb keine Bedeutung mehr. Sie findet sich vereinzelt noch in fahrbaren Arbeitsmaschinen kleinerer Leistungen wieder. Die **geschaltete Reluktanzmaschine** (GRM) aus Abb. 9.1g zeichnet sich durch einen einfachen und robusten Aufbau ohne Magnete und Rotorwicklung aus. Sowohl Stator als auch Rotor besitzen ausgeprägte Zähne. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten elektrischen Maschinen entsteht das Drehmoment nicht zu wesentlichen Anteilen durch die Lorentzkraft, sondern durch die Reluktanzkraft. Wegen des vergleichsweise einfachen Aufbaus werden für den Rotor weder Wicklungssystem oder spezielle Werkstoffe für Dauermagnete noch Materialien wie seltene Erden benötigt. Nachteilig ist vor allem das pulsierende Drehmoment, das sich insbesondere bei kleiner Statorpolzahl auswirkt. Weitere Nachteile sind pulsierende radiale Kräfte zwischen Rotor und Stator, die die Lager belasten und für eine vergleichsweise hohe Geräuschentwicklung verantwortlich sind. Außerdem ist für den Aufbau des Drehfeldes, wie bei der Asynchronmaschine, ein Magnetisierungsblindstrom erforderlich, wodurch der Scheinleistungsbedarf des Umrichters steigt. Für die Praxis interessanter ist die sogenannte **Synchronreluktanzmaschine** (SynRM), die in Abb. 9.1h dargestellt ist. Ihr Rotor weist eine besondere Blechschnittgeometrie mit Flussleit- und Flussperrabschnitten auf. Durch die Anordnung der wannenförmigen Flussperrungen entstehen entlang des Rotorumfanges Vorzugsrichtungen aufgrund unterschiedlicher magnetischer Leitfähigkeit. Um die Leistungsdichte zu erhöhen, können einzelne Wannen mit Permanentmagneten gefüllt werden. Teilweise werden anstelle von Hochenergiemagneten kostengünstigere Ferritmagnete eingesetzt. Der Statoraufbau und die Statorbestromung ist identisch mit denen der SM und ASM.

An die Traktionsmaschine eines elektrischen Antriebsstrangs werden umfangreiche Anforderungen gestellt.² Um eine hohe Reichweite des Fahrzeugs zu ermöglichen, muss die Antriebsmaschine leicht sein und möglichst kompakte Abmessungen besitzen. Zudem ist der im Fahrzeug zur Verfügung stehende Bauraum limitiert. Insgesamt führt das

²Vgl. Hombitzer et al. 2014.

zur Forderung einer hohen Leistungsdichte. Jedoch lässt sich die Leistungsdichte einer elektrischen Maschine nicht beliebig steigern, da mit ihrer Zunahme auch die Verlustleistungsdichte steigt. Damit führt die maximal abführbare Verlustleistung zu einer thermischen Auslegungsgrenze. Zur Reduzierung der Verlustleistung und zur effizienten Verwendung der im Fahrzeug gespeicherten elektrischen Energie muss die Maschine einen sehr hohen Wirkungsgrad besitzen. Elektrische Maschinen in Traktionsantrieben werden im Vergleich zu zahlreichen industriellen Einsätzen nicht nur in einem Arbeitspunkt betrieben. Daher ist für die Traktionsmaschine nicht der maximal erreichbare Wirkungsgrad entscheidend, sondern der gemittelte Wirkungsgrad im Verlauf einer typischen Fahrt.³ Die Antriebsstrangkomponenten „Energiespeicher“, „Leistungselektronik“, „elektrische Maschine“ und „Getriebe“ bilden ein System mit gegenseitigen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen. Dadurch entstehen zusätzliche Randbedingungen für die Entwicklung jener einzelnen Bestandteile. Eine separate Auslegung und Optimierung der Einzelkomponenten ist dementsprechend nicht zielführend. Durch eine ganzheitliche Betrachtung und Berücksichtigung von Wechselwirkungen dieser Komponenten ist es möglich, die Leistungsfähigkeit des gesamten Triebstrangs zu verbessern.⁴ Einzelne Aspekte lassen sich im Rahmen der Auslegung nicht getrennt voneinander betrachten, da sie in gegenseitiger Abhängigkeit voneinander stehen und die Optimierung eines dieser Kriterien zwangsläufig zu Nachteilen eines anderen Kriteriums führt. Somit ist ein Vergleich der oben beschriebenen Topologien der elektrischen Maschinen oder eine Bewertung verschiedener Maschinentopologien nicht allgemein möglich – und auch nicht zielführend. Vielmehr ist die elektrische Maschine in ihrer Anwendung zu bewerten sowie entsprechend der konkreten Anforderungen auszuwählen und auszulegen.

Der in elektrischen Maschinen auftretende magnetische Fluss wird – wie zuvor beschrieben – in einem magnetischen Kreis gezielt geführt. Dies erfolgt durch Materialien, die den magnetischen Fluss gut führen (etwa Elektrobänder, das in Abschn. 9.1 detailliert beschrieben wird) oder verstärken können (beispielsweise Permanentmagnete, die in Abschn. 9.2 betrachtet werden). Elemente dieses magnetischen Kreises stellen den Stator und den Rotor dar. Außerdem bestehen elektrische Maschinen aus verschiedenartig angeordneten Wicklungen, die von einem elektrischen Strom durchflossen werden und mit denen sich Abschn. 9.3 befasst. Zur elektrischen Abschirmung der stromdurchflossenen Elemente gegeneinander und gegenüber der äußeren Umgebung weisen elektrische Maschinen Isolationsbereiche auf, wie sie in Abschn. 9.4 beschrieben werden. Verschiedenen Kühlmöglichkeiten und -systemen widmet sich indes Abschn. 9.5. Zur mechanischen Stabilisierung der Maschine sowie eventuell zur Führung von beweglichen Elementen existieren unterschiedliche mechanische Konstruktionselemente. Derartige Lager erläutert Abschn. 9.6.

³Vgl. Ruf et al. 2016.

⁴Vgl. Hombitzer et al. 2017.

9.1 Elektroblechpaket

Das Stator- und Rotorblechpaket stellt zusammen mit dem Wicklungssystem und gegebenenfalls Permanentmagneten die zentralen Elemente eines elektromagnetischen Energiewandlers dar. Das weichmagnetische Kernmaterial des Stator- und Rotorpakets dient der gezielten Führung des magnetischen Flusses und der Verstärkung des durch die Wicklungen erzeugten magnetischen Feldes.

Sowohl Stator als auch Rotor von rotierenden Radialflussmaschinen sind aus weichmagnetischen Werkstoffen aufgebaut – im Fall von Elektroblech aus gestapelten, voneinander elektrisch isolierten Elektroblechlamellen, wie Abb. 9.3a zeigt. Um die Energieübertragung möglichst effizient zu gestalten, kommt den magnetischen Eigenschaften des Elektroblechs große Bedeutung zu. Eine einfache Magnetisierung, wodurch sich eine hohe Flussdichte im Blech durch einen geringen Einsatz von Strom in den Wicklungen erzielen lässt, sowie geringe Ummagnetisierungsverluste spielen eine zentrale Rolle. Die Flussdichte im Luftspalt zwischen Stator und Rotor ist drehmomentbildend, während sich die Drehzahl proportional zur Ummagnetisierungsfrequenz verhält. Die magnetischen Eigenschaften des weichmagnetischen Kernmaterials stehen im Fokus seiner Anwendung. Das stark nichtlineare magnetische Verhalten in Abhängigkeit von der Frequenz sowie die hohe Sensitivität gegenüber Bearbeitungseinflüssen bilden eine Herausforderung in der gezielten Materialauswahl für definierte Anwendungen sowie in der Materialmodellbildung – und damit in der Berechnung elektrischer Maschinen.⁵

In rotierenden elektrischen Maschinen aus dem Bereich der Elektromobilität werden in der Regel sogenannte nichtkornorientierte Elektrobleche verwendet. Sie verfügen über eine möglichst isotrope Mikrostruktur und kristallografische Textur, um aufgrund der zylindrischen Geometrien und auftretender rotierender magnetischer Felder homogene magnetische Eigenschaften in allen Richtungen der Blechebene zu ermöglichen. Neben

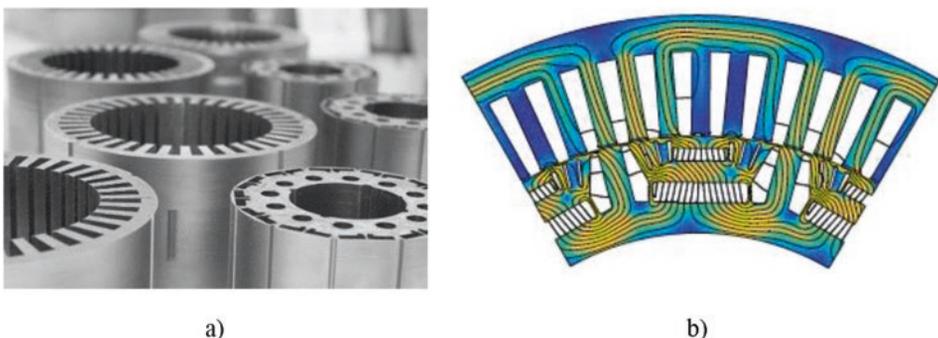


Abb. 9.3 (a) Ansicht von Blechpaketen und (b) Darstellung eines simulativ ermittelten Flussverlaufs im weichmagnetischen Material einer PMSM

⁵Vgl. Leuning et al. 2018.

Elektroblech stehen weichmagnetische Kompositmaterialien sowie amorphe oder nanokristalline Weichmagnete zur Verfügung.⁶ Mit Abstand am häufigsten werden jedoch Elektrobänder aus Eisen-Silizium (FeSi) verwendet.⁷ Der Vorteil dieser Werkstoffgruppe sind ihre in weiten Bereichen variierbaren technologischen Eigenschaften. Gütekategorien können dabei von „hochfest“ über „hochpermeabel“ bis hin zu „frequenzoptimiert“ reichen. Außerdem finden FeSi-Elektrobleche mit Blick auf wirtschaftliche Aspekte im Kontext des Gesamtsystems Anwendung.

Übliche Elektrobänder sind Eisenbasislegierungen mit einem Siliziumgehalt von bis zu 3,5 Gewichtsprozent. Sondergüten können einen Siliziumgehalt von bis zu 6,5 Gewichtsprozent aufweisen. Durch das Legieren mit Silizium wird der spezifische elektrische Widerstand des Materials gezielt erhöht, um den Beitrag der klassischen Wirbelstromverluste während der Ummagnetisierung im Wechselfeld zu verringern. Eine weitere Maßnahme zur Verringerung der klassischen Wirbelstromverluste bildet die Verwendung von Elektroblechlamellen anstelle des Vollmaterials. Je höher die Grundfrequenz ist, desto geringer sollte die Blechdicke sein. Übliche Blechdicken für Traktionsantriebe liegen heutzutage im Bereich von 0,2 bis 0,35 Millimetern. Durch die Verringerung der Blechdicke ergeben sich jedoch Herausforderungen an die Prozesstechnik bei der Verarbeitung sowie eine zwangsläufige Verringerung des Eisenfüllfaktors, bedingt durch den steigenden Anteil von Isolationsmaterial zwischen den Blechen. Wie auch bei der Suche nach der optimalen Mikrostruktur – speziell der Korngröße – und bei der optimalen Blechdicke sowie dem Siliziumgehalt muss stets eine Abwägung zwischen verschiedenen Zielgrößen erfolgen.⁸

Die Bestimmung der magnetischen Eigenschaften erfolgt mit standardisierten Messsystemen anhand verschiedener rechteckiger Probengeometrien oder Ringkernen. Die dabei ermittelten Eigenschaften geben zwar diejenigen des Materials wieder, jedoch stellen sie nicht die zu erwartenden Eigenschaften des Bauteils in der späteren Anwendung dar. Darin liegt eine große Herausforderung, die bei der Weiterentwicklung technisch anspruchsvoller elektrischer Maschinen von zunehmender Bedeutung ist. Die Bearbeitung vom Blech zum gefertigten, bewickelten Blechpaket übt einen negativen Effekt auf die magnetischen Eigenschaften aus, der nicht zu vernachlässigen ist. Vom Bandmaterial ausgehend wird das Material üblicherweise geschnitten und anschließend paketiert, es werden Wicklungen oder Permanentmagnete eingebracht und der Magnetkern wird in ein Gehäuse gepresst. Diese verarbeitenden Verfahrensschritte beeinflussen die magnetischen Eigenschaften des Elektrobandes signifikant.⁹ Durch die Verarbeitung werden zum einen mechanische Spannungen in das Blech induziert, zum anderen kann es zu einer elektrischen Kontaktierung der eigentlich voneinander isolierten Blechlamellen kommen, was die magnetischen Eigenschaften negativ beeinflusst.¹⁰

⁶Vgl. Krings et al. 2017.

⁷Vgl. Moses 2012.

⁸Vgl. Landgraf et al. 2000; Vgl. Leuning et al. 2021.

⁹Vgl. Weiss et al. 2017.

¹⁰Vgl. Karthaus et al. 2019.

Auch wenn die magnetischen Eigenschaften der Elektrobleche im Fokus ihrer Anwendung stehen, müssen die Materialien weitere Anforderungen erfüllen. Eine hohe Leistungsdichte – und damit in der Regel einhergehend hohe Drehzahlen – beanspruchen das Rotormaterial durch die auftretenden Fliehkräfte mechanisch. Das Material muss fest und formstabil sein. Auch die thermischen Eigenschaften spielen eine große Rolle, um die Verlustwärme effizient abführen zu können. Die Eigenschaften des Elektroblechpakets müssen in Wechselwirkung zur Geometrie und Anwendung im Design-Prozess der elektrischen Maschinen berücksichtigt werden, um den großen Anforderungen im Bereich der Elektromobilität gerecht zu werden.¹¹

9.2 Hartmagnete

Wesentliche Anforderungen an den Traktionsmotor in Elektrofahrzeugen bilden eine hohe Leistungs- sowie Drehmomentdichte. Auf dem gegenwärtigen Stand der Technik werden dazu permanentmagneterregte Synchronmaschinen mit anforderungsgerechten Hartmagneten verwendet. Neben dem möglichst hochpermeablen, verlustarm flussführenden weichmagnetischen Blechpaket erregen hartmagnetische Werkstoffe den magnetischen Fluss im Luftspalt der Maschine, der mit dem resultierenden Drehmoment verknüpft ist. Charakteristische Kenngrößen von Hartmagneten für den Einsatz in elektrischen Maschinen sind dabei

- der Wert $(B \cdot H)_{\max}$, das maximale Energieprodukt aus Flussdichte B und Feldstärke H ,
- die Remanenzflussdichte B_R ,
- die deutlich höhere Koerzitivfeldstärke H_C im Vergleich zu Weichmagneten sowie
- die Temperaturstabilität.

Da Verbindungen mit Seltenerdmetallen, wie Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) und Samarium-Cobalt (SmCo), ein deutlich höheres Energieprodukt als Ferrite oder Aluminium-Nickel-Cobalt (AlNiCo) aufweisen, werden sie vorzugsweise in Traktionsmotoren eingesetzt. Insbesondere NdFeB-Magnete weisen gegenwärtig das größte Energieprodukt auf, sind aber wegen ihrer geringen Temperaturfestigkeit nur bedingt einsetzbar. Durch die Zugabe von schweren Seltenerdmetallen wie Dysprosium lässt sich die Temperaturfestigkeit signifikant erhöhen – allerdings bei gleichzeitiger Verringerung der Remanenz.¹² Entscheidende Nachteile liegen in der geopolitischen Verfügbarkeit und dem hohen Preis von Seltenerdmetallen. Im Fokus der Forschung steht daher unter anderem die Entwicklung von seltenerdfreien Verbindungen (Abb. 9.4).¹³

¹¹ Vgl. Nell et al. 2020.

¹² Vgl. Glöser-Chahoud et al. 2016.

¹³ Vgl. Kuz'min et al. 2014; Vgl. Putri et al. 2018.

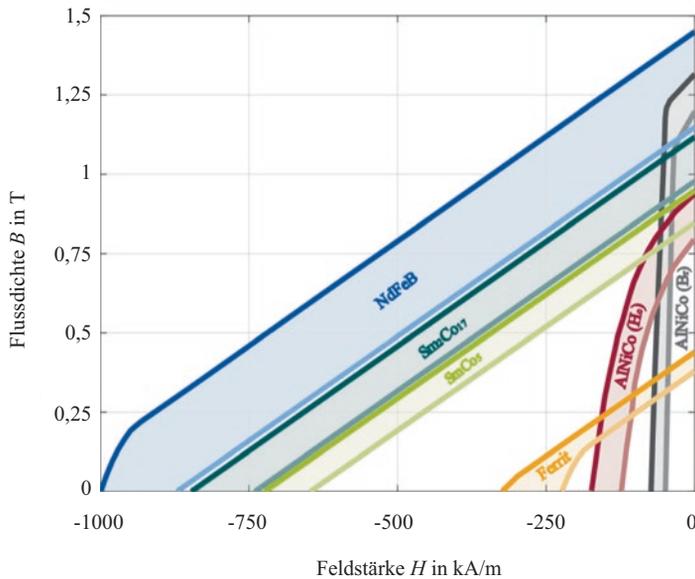


Abb. 9.4 Typische Entmagnetisierungskennlinien verschiedener Werkstoffe bei 20 °C

9.3 Wicklungen elektrischer Maschinen

Die Aufgabe des Wicklungssystems in rotierenden elektrischen Maschinen ist die Erzeugung eines im Luftspalt umlaufenden Feldes. Aufgrund des gegenseitigen Wechselwirkens des Feldes, das durch das im Stator befindliche Wicklungssystem erzeugt wird, und dem Rotorfeld findet die elektromagnetische Wandlung im Luftspalt der Maschine statt – ein Drehmoment bildet sich aus. Das Wicklungssystem spielt somit eine zentrale Rolle im Energiewandlungsprozess.

Den Ausgangspunkt eines Drehfeldes bildet ein symmetrisches, meist dreisträngiges Drehstromsystem. Aus Redundanzgründen können auch mehr als drei Stränge konstruiert werden. Die einzelnen Stränge unterscheiden sich dabei lediglich in ihrer Phasenlage – Amplitude und Frequenz sind identisch. Die drei Stränge des Drehstromsystems sind, wie in Abb. 9.5 dargestellt, jeweils mit um 120 Grad räumlich verteilten Statorspulen (Strängen) kontaktiert. Die Anfänge der Stränge werden mit U, V und W (Wicklungsbeginn) und ihre Enden mit X, Y und Z (Wicklungsende) bezeichnet. Werden die Spulen von einem Drehstromsystem wie in Abb. 9.5 gespeist, wird dadurch ein Feld hervorgerufen, das sich um die Rotationsachse des Rotors dreht. Bei kontinuierlicher Betrachtung resultiert daraus ein betragsmäßig konstanter Feldvektor, der mit synchroner Drehzahl n_1 zum Drehstromsystem des Stators mit der Frequenz f_1 rotiert – das Drehfeld. Da das Drehfeld im vorliegenden Fall zwei diskrete Statorpole ausbildet, handelt es sich um ein zweipoliges Drehfeld; folglich ist die Polpaarzahl $p = 1$. Durch symmetrische Vervielfältigung derarti-

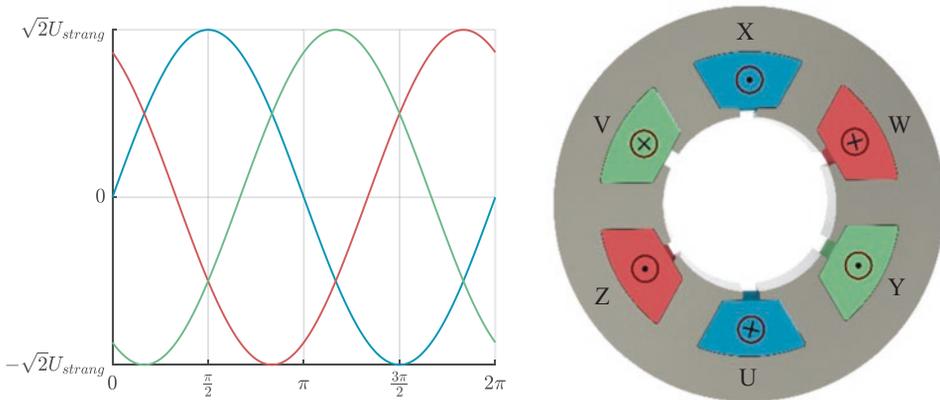


Abb. 9.5 Drehstromsystem einer zweipoligen elektrischen Maschine

ger Spulensysteme entlang des Statorumfangs mit fortlaufender Phasenfolge U, V und W sowie deren Rückleiter X, Y und Z lässt sich eine beliebige Polpaarzahl realisieren. Das Verhältnis aus Drehfelddrehzahl n_1 zu Frequenz der Statorströme f_1 wird durch die Polpaarzahl p bestimmt. Durch Wahl der Polpaarzahl und der Speisefrequenz kann somit direkt Einfluss auf die Drehzahl-Drehmoment-Charakteristik des Motors genommen werden.

Aufbau der Wicklung

Für die Aufteilung der Spulenseiten in diskrete, am Umfang der Maschine verteilte Nuten N sind verschiedene Anordnungen möglich, die durch die sogenannte Lochzahl der Wicklung mit m Strängen beschrieben sind: $q = N/(2 \cdot m \cdot p)$. Es wird zwischen Ganzlochwicklungen ($q \in \mathbb{N}$) und Bruchlochwicklungen ($q \in \mathbb{Q} \setminus \mathbb{N}$) unterschieden. Wicklungen mit $q \geq 1$ sind verteilte Wicklungen, während solche mit $q < 1$ eine Teilmenge der Bruchlochwicklungen bilden und konzentrierte Wicklungen beziehungsweise Einzelzahnwicklungen sind. Konzentrierte Wicklungen zeichnen sich durch ihre geringen Wickelkopfabmessungen und ihre simple Fertigung aus. Nachteilig ist jedoch die Erzeugung zusätzlicher Harmonischer im Luftspaltfeld. Konzentrierte Wicklungen finden somit keine Anwendung in Asynchronmaschinen. Beim Einsatz verteilter Wicklungen kann das Luftspaltfeld möglichst sinusförmig gestaltet werden, was wiederum die Harmonischen reduziert. Dies wirkt sich vorteilhaft auf die Geräusentwicklung und die Verlustdichte des Motors aus. Durch die häufigen Kreuzungspunkte wächst jedoch der Bauraumbedarf im Bereich der Wickelköpfe.

Die Leiter der Wicklung werden in Traktionsantrieben als Runddrahtleiter oder als Hairpinleiter ausgeführt. Runddrahtleiter bieten den Vorteil, nicht gewünschte Stromverdrängungseffekte zu reduzieren. Ihr Nachteil ist ein im Vergleich zur Hairpinwicklung geringerer Kupferfüllfaktor der Nuten, was bei gegebener Drehmomentanforderung und gleichen thermischen Randbedingungen zu einem höheren Bauraumbedarf der Maschine führt. Nachteilig sind Hairpinwicklungen bezüglich des höheren Wechselstromwider-

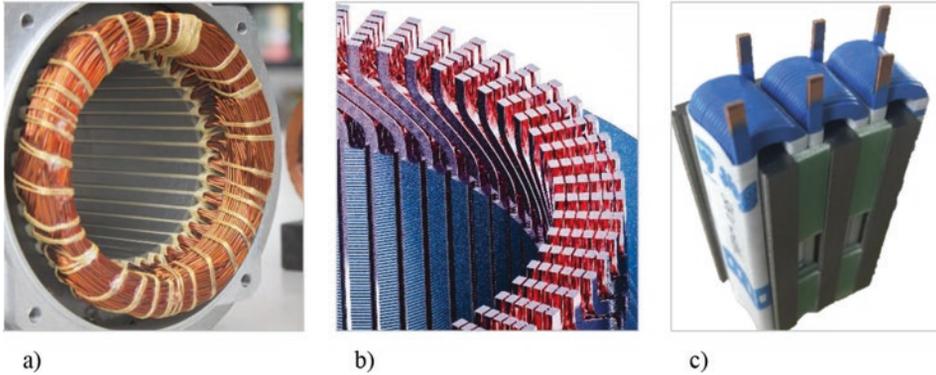


Abb. 9.6 a Runddrahtwicklung, b Hairpinwicklung, c Formspule

stands aufgrund von Stromverdrängung und der Kontaktierung der Wickelköpfe im Produktionsprozess. Die Wickelköpfe der Hairpinwicklungen sind im Vergleich zu denen der Runddrahtwicklungen kompakter auszuführen, was sich vorteilhaft auf den Bauraumbedarf auswirkt.

Neben den zuvor beschriebenen Verfahren steht auch der Einsatz von Formspulen im Fokus der Forschung. Dabei ist eine weitere Erhöhung des Kupferfüllfaktors von Interesse. Formspulen können beispielsweise gegossen oder umformtechnisch hergestellt werden,¹⁴ wobei die nachträgliche Isolation der Formspulen eine Herausforderung darstellt (Abb. 9.6).

9.4 Aufbau von Isoliersystemen

Die Hauptaufgabe des Isoliersystems der elektrischen Maschine besteht darin, die spannungsführenden Komponenten gegeneinander und gegen das Statorblech zu isolieren. Isoliersysteme sind in modernen elektrischen Antriebssträngen Zwischenkreisspannungen von bis zu 800 V oder höher ausgesetzt. Außerdem führt die Verwendung von schnellschaltenden Halbleitern zu immer größer werdenden Belastungen. In Abb. 9.7 ist ein exemplarischer Querschnitt einer Statornut zu sehen, der die wesentlichen Komponenten enthält.

Windungsisolierung

Die Kupferleiter in der elektrischen Maschine sind mit einer isolierenden Lackschicht oder mehreren davon überzogen. Dabei kommen polymerbasierte Isoliermaterialien wie Polyesterimid und Polyamidimid zum Einsatz.¹⁵ In Anwendungen, die besonders hohen elektrischen Belastungen ausgesetzt sind, wird oftmals Polyetheretherketon (PEEK) verwendet.

¹⁴Vgl. Hameyer 2021.

¹⁵Vgl. Stone et al. 2014.

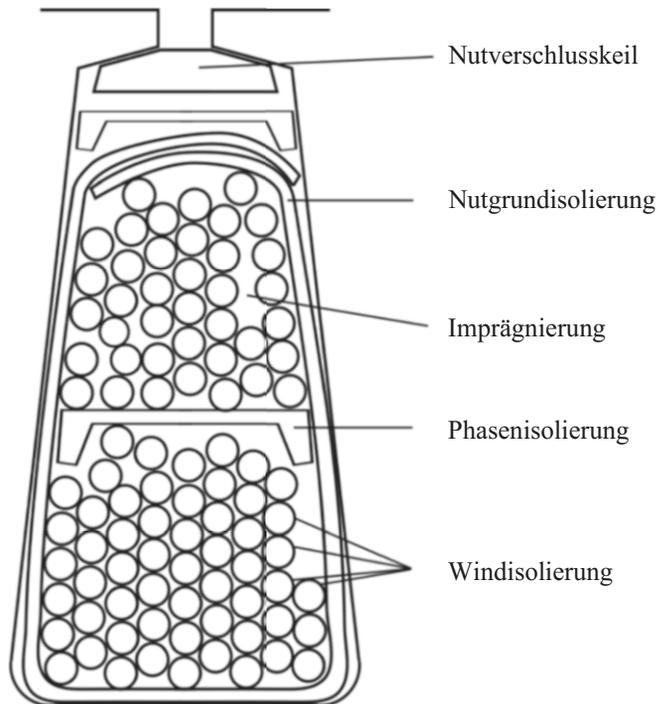


Abb. 9.7 Querschnitt einer Statornut

Nutgrundisolation

Die elektrische Isolierung des Statorblechs wird durch die Nutgrundisolation sichergestellt. Eine zusätzliche Funktion dieser Komponente besteht darin, den mechanischen Abrieb der Leiter zu verringern und die Wicklung insbesondere gegen die scharfen Kanten des Blechs zu schützen. Als Materialien kommen unter anderem flexible Lamine und Aramidpapier zum Einsatz. Zusätzlich werden beispielsweise Nutkeile verwendet, um die Leiter in Position zu halten und das Herausrutschen aus der Nut zu verhindern.¹⁶

Phasenisolierung

Zwischen den einzelnen Phasen treten große Potenzialdifferenzen auf. Zur Isolierung werden Phasentrenner im Wickelkopf und in der Nut zwischen die Drahtbündel der verschiedenen Phasen gelegt. Die verwendeten Materialien gleichen denen, die für die Nutgrundisolation verwendet werden.¹⁷

¹⁶Vgl. Chapman et al. 2008.

¹⁷Vgl. Chapman et al. 2008.

Imprägnierung/Verguss

Das Isoliersystem wird imprägniert beziehungsweise vergossen, um Lufteinschlüsse zwischen den Einzelkomponenten zu verringern. Dies erhöht die Isolierfestigkeit und verbessert zudem die Wärmeleitfähigkeit. Zusätzlich wird die Wicklung gegen äußere Einflüsse geschützt und der mechanische Abrieb sowie Vibrationen werden verringert.¹⁸

Auslegung von Isoliersystemen

Isoliersysteme von elektrischen Maschinen werden üblicherweise entsprechend der Betriebsspannung klassifiziert. In automobilen Traktionsantrieben werden umrichterbetriebene elektrische Niederspannungsmaschinen unterhalb einer effektiven Spannung von 700 V eingesetzt. Diese werden als Isoliersystem des Typs I bezeichnet. Zum Einsatz kommen in der Regel konventionelle, polymerbasierte Stoffe. Das Isoliersystem dieser Maschinen muss während der gesamten Betriebsdauer den elektrischen Belastungen standhalten und darf in keinem Betriebspunkt Teilentladungen aufweisen. In Isoliersystemen des Typs II werden Materialien eingesetzt, die Teilentladungen standhalten können. Solche Isoliermaterialien werden vor allem in Hochspannungsmaschinen verwendet. Teilentladungen können in luftgefüllten Hohlräumen innerhalb des Isoliersystems entstehen und werden insbesondere durch den Umrichterbetrieb und die damit verbundenen steilen Spannungsflanken begünstigt. Durch das Auftreten von Teilentladungen werden die Isoliermaterialien beschädigt, so dass es innerhalb kürzester Zeit zum Ausfall der Maschine kommen kann. Die Teilentladungsfreiheit wird vor allem durch die Auswahl einer ausreichenden Isolierschichtdicke sichergestellt. Das entgegengesetzte Bestreben ist jedoch, die Isolierschichtdicke so gering wie möglich zu halten, um den Kupferfüllfaktor innerhalb der Nut und damit auch das Drehmoment zu maximieren. Durch normative Vorgaben (DIN EN 60034-18-41)¹⁹ wird für ein Isoliersystem eine Prüfspannung definiert, der das Isoliersystem in Typ- und Qualifizierungsprüfungen standhalten muss. Sie ist abhängig von der Zwischenkreisspannung und diversen Sicherheitsfaktoren. So wird insbesondere das Überschwingverhalten abgebildet, das wiederum von der Länge der Anschlusskabel und der Anstiegszeit der Spannung abhängig ist. Es wird ebenfalls eine gegenüber den Testbedingungen erhöhte Temperatur im Betrieb berücksichtigt. Um die elektrische Belastung des Isoliersystems im Auslegungsprozess abzuschätzen, lassen sich Modelle verwenden, mit deren Hilfe auf Basis einer Simulation nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) Teilentladungsprozesse modelliert werden können. Diese Modelle stammen ursprünglich aus der Hochspannungstechnik und werden zur Charakterisierung von Gasentladungsprozessen verwendet. So ist es möglich, die Teilentladungseinsetzspannung der Geometrie zu berechnen. Die beschriebene Methodik wird vor allem für Ersatzanordnungen der Windungsisolierung, aber auch für die Nutgrundisolierung eingesetzt.²⁰

¹⁸Vgl. Chapman et al. 2008.

¹⁹Vgl. Deutsche Kommission Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik (DIN EN 60034-18-41 (VDE 0530-18-41)) 2021.

²⁰Vgl. Driendl et al. 2021; Vgl. Pauli et al. 2020.

9.5 Kühlsystem

Ein stark vereinfachtes Blackbox-Modell einer elektrischen Maschine ist in Abb. 9.8 dargestellt. Im motorischen Betrieb der Maschine wird im Zuge des elektromagnetischen Energiewandlungsprozesses elektrische Leistung P_{el} in mechanische Leistung P_{mech} umgewandelt. Die Verluste des Prozesses können mit Hilfe des Wirkungsgrades η oder eines Verlustfaktors ξ ausgedrückt werden.

Um ein Überhitzen der temperaturkritischen Komponenten wie der Wicklung, den Lagern oder den Permanentmagneten zu vermeiden, muss die entstehende Verlustleistung $P_{verlust}$ in Form eines Wärmestroms \dot{Q}_{gesamt} aus der elektrischen Maschine abgeführt oder durch die Wärmekapazität der Bauteile zwischengespeichert werden. Die Wahl des Kühlsystems beeinflusst den Wärmestrom, der sich aus der Maschine abführen lässt – und somit insbesondere in stationären Betriebspunkten über den Verlustfaktor ξ die maximale Leistung, die der Energiewandler dauerhaft abgeben kann. In Anwendungen der Elektromobilität sind vorwiegend dynamische Lastkollektive vorzufinden. Die entstehende dynamische Verlustleistung muss gemittelt über einen Lastzyklus aus der Maschine abgeführt werden. Bei der Grobdimensionierung elektrischer Maschinen nach dem aktuellen Stand der Technik findet sich dieser Zusammenhang wieder. Die Esson'sche Ziffer C_{mech} kann benutzt werden, um die mechanische Ausgangsleistung P_{mech} in Abhängigkeit von der aktiven Länge l_i , dem Bohrungsdurchmesser D und der Betriebsdrehzahl im Nennpunkt n_0 auszudrücken.

In Auslegungshandbüchern wird bereits bei der Auswahl der Esson'schen Ziffer C_{mech} das Kühlsystem berücksichtigt. Diese wird im Bereich von kleiner $7 \text{ kW} \cdot \text{min} / \text{m}^3$ empfohlen.²¹ Ein theoretisches maximales Potenzial kann abgeschätzt werden, indem bei Vorgabe maximaler Anwendungstemperaturen der Temperaturabfall über den konvektiven Wärmeübergang zum Fluid des Kühlsystems veranschlagt wird. Dabei ergeben sich theoretisch mögliche Werte, die bis zu zwei Zehnerpotenzen höher liegen.²² Auf dem aktuellen Stand der Technik kann dieses theoretische Potenzial nicht voll ausgenutzt werden, da aufgrund der größtenteils konduktiven Wärmeleitung in der Maschine von der Quelle zur Senke zusätzlich Temperatur abfällt und so nicht das volle Potenzial am Kühlsystem zur Verfügung steht. Zur Vermeidung dieses nicht gewollten Temperaturabfalls wird ein zu-

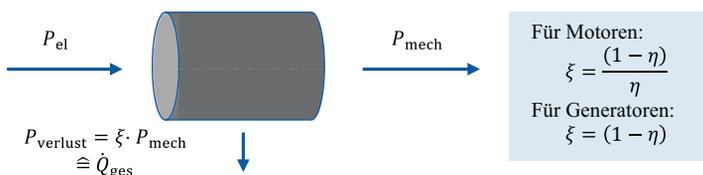


Abb. 9.8 Blackbox-Modell einer elektrischen Maschine

²¹Vgl. Pyrhönen et al. 2008.

²²Vgl. Groschup et al. 2019.

nehmend besseres Verständnis einzelner Wärmewiderstände in der Maschine erforscht²³ und es werden Kühlsysteme entwickelt, in denen die Kühlung möglichst nahe an den Wärmequellen beziehungsweise den temperaturkritischen Bauteilen liegt.²⁴

9.6 Lagerung

Für die elektromagnetische Energiewandlung in modernen Traktionsantrieben mit hohen Leitungsdichten ist ein möglichst kleiner und konstanter Luftspalt essenziell. Um ihn gewährleisten zu können, müssen die in elektrischen Maschinen auftretenden, nicht drehmomentbildenden Kräfte abgestützt werden. Die Hauptaufgaben von Lagern in elektrischen Maschinen bestehen folglich darin, Rotor und Stator exakt und zentrisch zueinander zu positionieren sowie eine möglichst effiziente Drehbewegung zu realisieren. Die zentrische Positionierung durch die Lager ist besonders wichtig, da bei Exzentrizität des Rotors in Betrieb erhebliche Zusatzbelastungen der Lager durch einseitige elektromagnetische Kräfte auftreten. Diese zusätzlichen Belastungen auf die Lagerung sind wiederum stark abhängig von der Exzentrizität.²⁵ Die Belastung kann zu einer erhöhten Schwingungs- und Schallemission führen.²⁶

In Traktionsmaschinen werden aufgrund ihrer Wirtschaftlichkeit, Betriebssicherheit und Großserieneignung primär Wälzlager eingesetzt. Die Gestaltung der Lagerung mit Wälzlagern lässt sich flexibel auf die für Traktionsanwendungen relevanten Betriebs- und Umgebungsbedingungen anpassen. Ein Wälzlager besteht aus zwei Laufflächen, zwischen denen Wälzkörper durch eine Abrollbewegung eine Relativbewegung ermöglichen. Die Wälzkörper können dabei durch einen Käfig geführt werden. Die Gestalt der Wälzkörper ist abhängig von den auftretenden Betriebskräften. Durch die Abrollbewegung der Wälzkörper im Lager entsteht Reibung und Verschleiß. Um eine anforderungsgerechte Lebensdauer und Effizienz garantieren zu können, muss eine geeignete Schmierung gewählt werden. Für die Auslegung der Lagerung sind unter anderem die Einflussgrößen „Betriebs-/Umgebungsbedingungen“, „Bauraum“, „Schwingungsverhalten“, „Lebensdauer“ und „Montage/Demontage“ zu berücksichtigen. Die einzelnen Anforderungen zeigen eine starke Abhängigkeit voneinander auf. So ist die Lebensdauer der Lagerung abhängig von Betriebsbedingungen wie der Temperatur, dem Einwirken von Lastspitzen in zyklischer Belastung oder eventuellen Lagerspannungen in elektrischen Maschinen. Diese Wechselwirkungen und Einflussgrößen müssen bei der lebensdauerfesten Auslegung von Lagerungen in elektrischen Maschinen bedacht werden (Abb. 9.9).

²³ Vgl. Groschup et al. 2021.

²⁴ Vgl. Groschup et al. 2019; Vgl. Groschup et al. 2021.

²⁵ Vgl. Ruf et al. 2016.

²⁶ Vgl. Jaeger et al. 2020; Vgl. Müller et al. 2019.

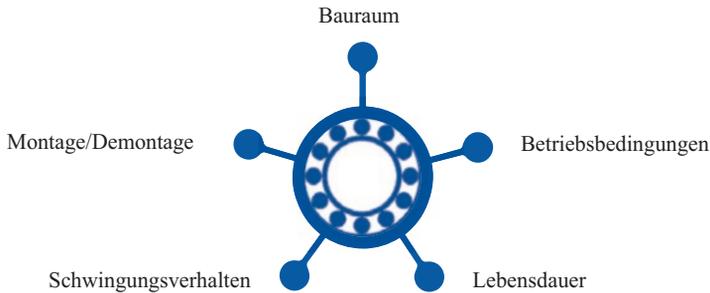


Abb. 9.9 Einflussgrößen bei der Auslegung von Wälzlagermaschinen

Literatur

Teil II: Elektrofahrzeugspezifische Systeme

- Chapman, M; Frost, N; Bruetsch, R.:** *Insulation Systems for Rotating Low-Voltage Machines:* IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2008, S. 257–260
- Deutsche Kommission Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik:** *DIN EN 60034-18-41 (VDE 0530-18-41)* (Deutsche Norm). Berlin: VDE Verlag GmbH, Mai 2021
- Driendl, N; Iütke Jüdefeld, C; Pauli, F; Schröder, M; Hameyer, K.:** *Ladungsträgerbasierte Modellierung von Teilentladungsprozessen in Runddrahtwicklungen umrichter gespeister Niederspannungsmaschinen.* In: e&i Elektrotechnik und Informationstechnik, Jg. 138, 2021, Nr. 2, S. 85–95
- Fischer, R.:** *Elektrische Maschinen.* 14., aktualisierte und erw. Aufl. München: Hanser, 2009
- Glöser-Chahoud, S; Kühn, A; Tercero Espinoza, L. A.** 2016: *Globale Verwendungsstrukturen der Magnetwerkstoffe Neodym und Dysprosium: Eine szenariobasierte Analyse der Auswirkung der Diffusion der Elektromobilität auf den Bedarf an Seltenen Erden.* In: Working Paper Sustainability and Innovation. Karlsruhe
- Groschup, B; Komissarov, M; Stevic, S; Hameyer, K.:** *Operation Enhancement of Permanent Magnet Excited Motors with Advanced Rotor Cooling System:* IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 6/19/2019–6/21/2019: IEEE 2019, S. 1–6
- Groschup, B; Nell, M; Hameyer, K.:** *Operational Enhancement of Electric Drives by Advanced Cooling Technologies:* 2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD). 2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), 4/22/2019–4/23/2019: IEEE 2019, S. 65–70
- Groschup, B; Nell, M; Pauli, F; Hameyer, K.:** *Characteristic Thermal Parameters in Electric Motors: Comparison between Induction- and Permanent Magnet Excited Machine.* In: IEEE Trans. On Energy Conversion 2021, S. 1
- Groschup, B; Pauli, F; Hameyer, K.:** *Influence of the Preformed Coil Design on the Thermal Behavior of Electric Traction Machines.* In: Energies, Jg. 14, 2021, Nr. 4, S. 959
- Hameyer, K. (Hrsg.):** *FlexiCoil: Entwicklung einer großserienfähigen und wirtschaftlichen Produktionstechnologie für umformtechnisch hergestellte Formspulen elektrischer Antriebe. Abschlussbericht.* Aachener Schriftenreihe zur Elektromagnetischen Energiewandlung, 42. 1. Auflage Aufl., Düren: Shaker, 2021

- Hombitzer, M; Franck, D; Hameyer, K.:** *Entwicklungsmethodik für schnelldrehende, permanent-magneterregte Traktionsmaschinen.* In: e&i Elektrotechnik und Informationstechnik, Jg. 134, 2017, Nr. 2, S. 139–147
- Hombitzer, M; Franck, D; von Pfingsten, G; Hameyer, K.:** *Permanentmagneterregter Traktionsantrieb für ein Elektrofahrzeug: Bauraum, Wirkungsgrad und Kosten – das Auslegungsdreieck.* In: Schäfer, H. (Hrsg.): *Elektrische Antriebstechnologie für Hybrid- und Elektrofahrzeuge: Das kostenoptimale elektrische Antriebssystem, mitentscheidend für den Markterfolg* (Reihe: Haus der Technik Fachbuch, Bd. 131). Renningen: Expert Verlag, 2014, S. 277–291
- Jaeger, M; Drichel, P; Schröder, M; Berroth, J; Jacobs, G; Hameyer, K.:** *Die Kopplung elektrotechnischer und strukturdynamischer Domänen zu einem NVH-Systemmodell eines elektrischen Antriebsstrangs.* In: e&i Elektrotechnik und Informationstechnik, Jg. 137, 2020, Nr. 4–5Nr., S. 258–265
- Karthaus, J; Elfgen, S; Leuning, N; Hameyer, K.:** *Iron loss components dependent on mechanical compressive and tensile stress in non-oriented electrical steel.* In: JAE, Jg. 59, 2019, Nr. 1, S. 255–261
- Krings, A; Boglietti, A; Cavagnino, A; Sprague, S.:** *Soft Magnetic Material Status and Trends in Electric Machines.* In: IEEE Trans. Ind. Electron., Jg. 64, 2017, Nr. 3, S. 2405–2414
- Kuz'min, M. D; Skokov, K. P; Jian, H; Radulov, I; Gutfleisch, O.:** *Towards high-performance permanent magnets without rare earths.* In: Journal of Physics: Condensed matter, Jg. 26, 2014, Nr. 6, S. 1–5
- Landgraf, F; Emura, M; Teixeira, J; Campos, M. de:** *Effect of grain size, deformation, aging and anisotropy on hysteresis loss of electrical steels.* In: Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Jg. 215–216, 2000, S. 97–99
- Leuning, N; Elfgen, S; Groschup, B; Bavendiek, G; Steentjes, S; Hameyer, K.:** *Advanced Soft- and Hard-Magnetic Material Models for the Numerical Simulation of Electrical Machines.* In: IEEE Trans. Magn., Jg. 54, 2018, Nr. 11, S. 1–8
- Leuning, N; Ukwungwu, D; Nell, M; Pauli, F; Steentjes, S; Hameyer, K.:** *The Effect of Structural Material Parameters on the Operational Characteristic of Traction Drives for EV Applications.* In: IEEE Trans. Magn., Jg. 57, 2021, Nr. 2, S. 1–6
- Moses, A. J.:** *Energy efficient electrical steels: Magnetic performance prediction and optimization.* In: Scripta Materialia, Jg. 67, 2012, Nr. 6, S. 560–565
- Mülder, C; Franck, M; Schröder, M; Balluff, M; Wanke, A; Hameyer, K.:** *Impact Study of Isolated and Correlated Manufacturing Tolerances of a Permanent Magnet Synchronous Machine for Traction Drives: IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC).* IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 12.05.2019–15.05.2019: IEEE 2019, S. 982–987
- Nell, M; Leuning, N; Mönninghoff, S; Groschup, B; Müller, F; Karthaus, J; Jaeger, M; Schröder, M; Hameyer, K.:** *Complete and accurate modular numerical computation scheme for multi-coupled electric drive systems.* In: IET Science, Measurement & Technology, Jg. 14, 2020, Nr. 3, S. 259–271
- Pauli, F; Kilper, M; Driendl, N; Hameyer, K.:** *Modeling of the Partial Discharge Process Between the Winding and the Stator of Low Voltage Machines for Traction Applications.* In: IEEE Trans. Energy Convers. 2020, S. 1
- Putri, A. K; Nell, M; Hombitzer, M; Franck, D; Hameyer, K.:** *On the Design of a PMSM Rotor with Ferrite Magnets to Substitute a Rare Earth Permanent Magnet System: XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM).* XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 03.09.2018–06.09.2018: IEEE 2018, S. 304–310
- Pyrhönen, J; Jokinen, T; Hrabovcová, V. (Hrsg.):** *Design of Rotating Electrical Machines.* 1 ed. Aufl., Chichester: Wiley, 2008

- Ruf, A; Schröder, M; Putri, A. K; Konrad, R; Franck, D; Hameyer, K.:***Analysis and determination of mechanical bearing load caused by unbalanced magnetic pull.* In: COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Jg. 35, 2016, Nr. 2, S. 728–743
- Ruf, A; Steentjes, S; Pfingsten, G. von; Grosse, T; Hameyer, K.:***Requirements on Soft Magnetic Materials for Electric Traction Motors: 7th International Conference on Magnetism and Metallurgy (WMM) 2016,* S. 111–128
- Stone, G. C; Culbert, I; Boulter, E. A; Dhirani, H. (Hrsg.):***Electrical insulation for rotating machines. Design, evaluation, aging, testing, and repair.* IEEE press series on power engineering. Second edition Aufl., Hoboken New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2014
- Weiss, H. A; Leuning, N; Steentjes, S; Hameyer, K; Andorfer, T; Jenner, S; Volk, W.:***Influence of shear cutting parameters on the electromagnetic properties of non-oriented electrical steel sheets.* In: Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Jg. 421, 2017, S. 250–259

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Rik W. De Doncker, Niklas Fritz und Duc Pham

Leistungselektronische Wandler sind die Bindeglieder zwischen den elektrischen Energiequellen, Verbrauchern und Speichern in Elektrofahrzeugen. Unter anderem steuern sie sämtliche Leistungsflüsse, wandeln Gleich- und Wechselspannungen ineinander um, passen Spannungsniveaus an oder treiben Elektromotoren an. Verlustarme und kostengünstige leistungselektronische Wandler spielen daher eine Schlüsselrolle für die Elektromobilität.

In den nachstehenden Kapiteln werden zunächst die Grundzüge der Leistungselektronik im Allgemeinen vorgestellt, gefolgt von den einzelnen leistungselektronischen Komponenten – zum Beispiel des Ladegeräts – in Elektrofahrzeugen.

10.1 Einführung in die Leistungselektronik

Obwohl der Begriff der Leistungselektronik nur wenig geläufig ist, sind wir tagtäglich von ihr umgeben. Leistungselektronik beschäftigt sich mit der verlustarmen Umformung elektrischer Energie mit Hilfe schaltender Halbleiterbauelemente. Ihre Anwendungsfelder

R. W. De Doncker (✉)

Universitätsprofessor, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: post@isea.rwth-aachen.de

N. Fritz

Gruppenleiter, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: post@isea.rwth-aachen.de

D. Pham

Oberingenieur, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: post@isea.rwth-aachen.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Kampker, H. H. Heimes (Hrsg.), *Elektromobilität*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-65812-3_10

187

reichen von Smartphone-Ladegeräten mit Leistungen im Bereich von wenigen Watt bis zu Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungssystemen (HGÜ) mit Leistungen, die vereinzelt 10 GW übersteigen. Für die Elektromobilität ist die Leistungselektronik eine entscheidende Schlüsseltechnologie und auch viele andere technische Anwendungen wären ohne sie nicht realisierbar. Die hier dargestellten Grundlagen lassen sich etwa in Rashid (2018)¹ oder Mohan et al. (2007)² vertiefen.

Dass in heutigen Energienetzen die Wechselspannungstechnik dominiert, geht auf die Tatsache zurück, dass im 19. Jahrhundert der Transformator die einzige Möglichkeit darstellte, mit der sich das Spannungsniveau anpassen und somit elektrische Energie über große Distanzen hinweg übertragen ließ. Eine Anpassung des Spannungsniveaus von Gleichstrom – der eigentlich effizienteren Art der Energieübertragung – war mit dem Transformator nicht möglich und gelang erst in den vergangenen Jahrzehnten durch die Leistungselektronik. Bereits im frühen 20. Jahrhundert konnte mit Hilfe von Röhrentechnik beispielsweise eine Gleichrichtung von Wechselspannung in Gleichspannung vollzogen werden. Jedoch ist die Geburtsstunde der modernen Leistungselektronik etwa auf das Jahr 1960 zu datieren, als mit dem Thyristor das erste Halbleiterbauelement kommerziell verfügbar wurde, mit dem sich ein Energiefluss aktiv kontrollieren ließ.³

Leistungselektronische *Wandler* sind in der Lage, verschiedene Formen elektrischer Energie ineinander zu überführen und werden daher wie in Abb. 10.1 klassifiziert. Dabei lässt sich nicht nur das Spannungs- oder Stromniveau anpassen, sondern bei Wechselspannung auch die Frequenz oder die Anzahl der Phasen.

Das Grundprinzip jedes leistungselektronischen Wandlers besteht darin, die elektrische Energie nicht kontinuierlich zu übertragen, sondern mit Hilfe schaltender Halbleiterbau-

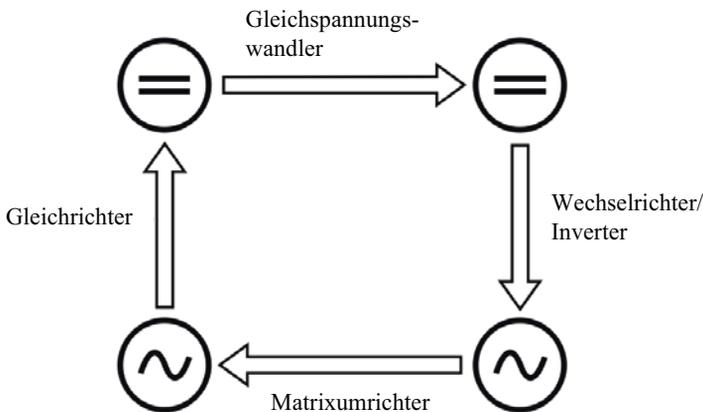


Abb. 10.1 Klassifikation leistungselektronischer Wandler

¹Vgl. Rashid 2018.

²Vgl. Mohan et al. 2007.

³Vgl. Wilson 2000.

elemente in kleine Portionen zu zerteilen, die mit hoher Schaltfrequenz übertragen werden. Genauso relevant wie die Halbleiterschalter sind daher auch die Filter, die am Eingang und Ausgang eingesetzt werden, um den gepulsten Leistungsfluss wieder zu glätten. Mit höherer Schaltfrequenz sinkt der Filteraufwand – was wiederum das Gewicht, das Volumen und die Kosten eines Wandlers reduziert. Die Schaltfrequenz ist jedoch durch die beim Schalten auftretenden Verluste begrenzt.

Die Zielgrößen bei der Auslegung von Wandlern können je nach Anwendungsfeld sehr unterschiedliche Prioritäten haben. Generell ist eine Maximierung des *Wirkungsgrades* beziehungsweise der *Effizienz* anzustreben, um etwa Elektrofahrzeugen bei gleicher Batteriekapazität höhere Reichweiten zu ermöglichen. Heutzutage erzielen leistungselektronische Wandler oftmals Wirkungsgrade von mehr als 95 %. Häufig ist aber auch eine Maximierung der *volumetrischen Leistungsdichte* oder der *gravimetrischen Leistungsdichte* (beispielsweise bei Flugzeuganwendungen) von Interesse. Selbstverständlich sind auch die Kosten und die Lebensdauer höchst relevante Zielgrößen. All diese Ziele lassen sich jedoch nicht in gleichem Maße erreichen und müssen sorgfältig gegeneinander abgewogen werden.

Jede leistungselektronische Anwendung unterliegt gewissen Einschränkungen und Vorgaben: Neben den Eigenschaften des Wandlers selbst – zum Beispiel zulässige Spannungsbereiche, Leistungsklasse, Überlastfähigkeit, Kurzschlussverhalten und dergleichen – sind hier vor allem Normen zu nennen, die etwa die Glattheit der erzeugten Spannungs- und Stromformen sowie die *elektromagnetische Verträglichkeit* (EMV) regulieren. Unter EMV wird das störungsfreie Zusammenspiel von elektrischen Komponenten in Gegenwart elektrischer und *elektromagnetischer Emissionen* (EME) verstanden, wie sie durch Wandler aufgrund ihrer schaltenden Natur erzeugt werden.⁴

Aufgrund der vielen Anwendungen, Leistungsklassen und Anforderungen existieren zahlreiche Schaltungskonzepte, mit denen ein Wandler realisiert werden kann, die *Topologien* genannt werden. Da jede Topologie spezifische Stärken und Schwächen besitzt, steht ihre sorgfältige Auswahl am Anfang jedes Wandler-Designs. Daher ist Leistungselektronik immer auf eine spezifische Anwendung mit ihren jeweiligen Anforderungen als maßgeschneidert zu verstehen und kann nur begrenzt skaliert oder auf andere Anwendungen übertragen werden.

Einige wichtige Eigenschaften, in denen sich Topologien voneinander unterscheiden, sind zum einen *Unidirektionalität* und *Bidirektionalität* – also ob Leistung nur vom Eingang zum Ausgang oder auch umgekehrt übertragen werden kann – und zum anderen das etwaige Vorhandensein *galvanischer Trennung*. Bei galvanisch getrennten Topologien existiert zwischen Ein- und Ausgang kein gemeinsames Bezugspotenzial; meist wird dies durch den Einsatz eines Hochfrequenztransformators erreicht. Neben klassischen Topologien mit nur einem Eingang und nur einem Ausgang werden außerdem zunehmend *Multiport-Topologien* interessant, bei denen drei oder mehr Energiequellen und -senken in einer einzigen Topologie miteinander vernetzt werden.⁵

⁴Vgl. Franz 2011.

⁵Vgl. Neubert 2020.

Um die Effizienz eines Wandlers zu maximieren, müssen die verschiedenen Verlustarten einander gegenübergestellt werden. Jede Halbleitertechnologie hat *Leitverluste*, die durch den sie durchfließenden Strom hervorgerufen werden, sowie *Schaltverluste*, die bei jeder Schalthandlung entstehen, linear mit der Schaltfrequenz wachsen und von vielen Parametern abhängig sind. In den Filterstufen entstehen zudem Verluste durch die *Rippelströme*, die durch den gepulsten Leistungsfluss hervorgerufen werden. Darüber hinaus fallen Verluste in weiteren passiven Komponenten an, bei Transformatoren beispielsweise *Kernverluste* und *Wicklungsverluste*, die durch den Wicklungswiderstand sowie den *Skin-Effekt* und den *Proximity-Effekt* hervorgerufen werden.⁶ Die meisten Verlustarten sind abhängig von der Schaltfrequenz. Daher müssen die zum Einsatz kommende Halbleitertechnologie, die Schaltfrequenz, die Größe der Filter und die sich daraus ergebenden Verluste sorgfältig gegeneinander abgewogen werden. Im Folgenden werden einige Halbleitertechnologien vorgestellt.

10.2 Leistungselektronische Bauelemente

Dioden stellen die einfachste Art dar, Wechselspannung in Gleichspannung gleichzurichten, da sie Strom in nur eine Richtung leiten und ihn in der Gegenrichtung blockieren können. Allerdings ist dieses Verhalten rein passiv, und sie lassen sich weder ein- noch ausschalten. Dafür sind sie jedoch sehr kostengünstig. Aus diesem Grund kommen Dioden häufig in Gleichrichtern bei geringen Leistungen zum Einsatz. Nichtsdestotrotz sind sie auch in vielen Topologien höherer Leistung – etwa als Freilaufdioden – unersetzlich.

Halbleitertechnologien in der Leistungselektronik lassen sich beispielsweise anhand ihrer Leistungsklasse und der erreichbaren Schaltfrequenz klassifizieren. Bauelemente, die sehr hohe Ströme schalten und hohe Spannungen blockieren können, haben auch hohe Schaltverluste. Daher findet man sie in Anwendungen sehr hoher Leistung und niedriger Schaltfrequenz. Andere Halbleitertechnologien hingegen können geringe Ströme verlustärmer schalten und geringere Spannungen blockieren, weshalb sie in Anwendungen geringer Leistung und hoher Schaltfrequenz zu finden sind. Die in diesem Kapitel angerissenen Grundlagen lassen sich zum Beispiel in Lutz et al. (2018)⁷ oder Baliga (2019)⁸ vertiefen.

Der Thyristor ist dasjenige Halbleiterbauelement, das den Beginn der modernen Leistungselektronik markierte.⁹ Er kann in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung Spannung blockieren, aber durch einen Stromstoß an seinem Steuereingang – dem *Gate* – eingeschaltet werden und verhält sich danach in Vorwärtsrichtung wie eine Diode. Allerdings lässt sich der Thyristor nicht aktiv ausschalten, was die Anzahl der möglichen Topologien

⁶Vgl. Hurley und Wölfle 2013.

⁷Vgl. Lutz et al. 2018.

⁸Vgl. Baliga 2019.

⁹Vgl. Wilson 2000.

mit Thyristoren limitiert. Er zeichnet sich durch eine äußerst hohe Stromtragfähigkeit und hohe Schaltverluste aus. Daher findet man ihn in Anwendungen sehr hoher Leistung, zum Beispiel in HGÜ-Systemen. Typische Schaltfrequenzen liegen im Bereich von einigen 100 Hz und typische Leistungsklassen im MW- bis GW-Bereich. Mit der Entwicklung abschaltbarer Halbleiterbauelemente wie dem Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT) ist seine Bedeutung zurückgegangen.

IGBTs sind Halbleiterbauelemente, die in Vorwärtsrichtung Spannung blockieren oder Strom leiten sowie ein- und ausgeschaltet werden können. In fast allen Fällen wird eine Diode parallelgeschaltet, die in Rückwärtsrichtung Strom führen kann, da dies in den meisten Topologien erforderlich ist. Zum Einschalten eines IGBTs wird sein Gate-Anschluss auf eine Spannung von beispielsweise 15 V aufgeladen und zum Abschalten auf 0 V oder eine negative Spannung entladen, was sehr verlustarm geschehen kann. Die Stromtragfähigkeit und die Schaltverluste sind geringer als die von Thyristoren, daher kommen IGBTs in Leistungsklassen ab etwa 10 kW bei Schaltfrequenzen im kHz-Bereich zum Einsatz. Durch die Möglichkeit der Parallelschaltung und die Vorteile höherer Schaltfrequenzen verdrängen sie mittlerweile sogar Thyristoren in HGÜ-Anwendungen.

Ein Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET) lässt sich ebenfalls ein- und ausschalten und kann in Vorwärtsrichtung Spannung blockieren sowie Strom leiten. Die Ansteuerung von MOSFETs ist sehr ähnlich zu der von IGBTs. In Rückwärtsrichtung sind sie inhärent leitfähig, da intern eine antiparallele Diodenstruktur vorliegt. Schaltet man sie jedoch während des Rückwärtsleitens zusätzlich an, können die Leitverluste gesenkt werden, was als *Synchrone Gleichrichtung* bezeichnet wird.¹⁰ Im Vergleich zu IGBTs haben sie geringere Stromtragfähigkeiten, aber auch geringere Schaltverluste, so dass sie in Anwendungen bis zu etwa 10 kW bei Schaltfrequenzen bis zu einigen 100 kHz zu finden sind.

Der Zusammenhang zwischen Leistungsklasse und Schaltfrequenz hängt wesentlich mit den Eigenschaften des Halbleiters Silizium (Si) zusammen. Im vergangenen Jahrzehnt werden zunehmend *Wide-Bandgap-Halbleiter* wie Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN) interessant.¹¹ Sie zeichnen sich dadurch aus, dass mit ihnen ein wesentlich schnelleres Schaltverhalten als mit Silizium erreicht wird. Dadurch sinken die Schaltverluste, so dass bei gleicher Leistungsklasse zu höheren Schaltfrequenzen gegriffen werden kann, was die Leistungsdichte steigert.¹² Oftmals übersteigen die Kosteneinsparungen bei den Filtern die Mehrkosten der Halbleiterbauelemente. SiC-MOSFETs haben das Potenzial, in weiten Teilen der Si-IGBT-Technologie durch wesentlich höhere Schaltfrequenzen von bis zu einigen 100 kHz Konkurrenz zu machen. GaN-Transistoren sind mit etwas geringerer Leistungsklasse und noch schnellerem Schaltverhalten in der Lage, durch Schaltfrequenzen bis in den MHz-Bereich mit Si-MOSFETs zu konkurrieren. Auch zeich-

¹⁰Vgl. Rashid 2018.

¹¹Vgl. Baliga 2017; Vgl. Mantooth et al. 2014.

¹²Vgl. Wienhausen 2019.

nen sich SiC-Schottky-Dioden im Vergleich zu Si-Dioden durch deutlich geringere Schaltverluste aus. Allerdings bergen die schnelleren Schaltvorgänge auch Herausforderungen, vor allem im Bereich der EMV und durch ihren negativen Einfluss auf die Alterung von Wicklungsisolationssystemen, zum Beispiel in Maschinen.¹³

10.3 DC/DC-Wandler

Gleichspannungswandler (DC/DC-Wandler) können an verschiedenen Stellen in Elektrofahrzeugen zum Einsatz kommen, beispielsweise falls die Batterie nicht direkt an den Umrichter der Maschine angeschlossen ist.¹⁴ So kann die Zwischenkreisspannung unabhängig vom Ladezustand der Batterie eingestellt werden und gegebenenfalls dem aktuellen Betriebspunkt der Maschine angepasst werden.¹⁵ Auch in Ladegeräten werden sie eingesetzt, da die Batterie unter präzise kontrollierten Bedingungen mit Gleichstrom geladen werden muss. Schließlich werden sie aber auch zur Speisung der Bordnetzspannung von beispielsweise 12 V eingesetzt, an die die Nebenaggregate angeschlossen werden.¹⁶

In Abb. 10.2 ist eine der grundlegendsten Topologien der Leistungselektronik dargestellt, mit der zwischen zwei Gleichspannungsquellen ein Stromfluss gestellt werden kann: die sogenannte *Halbbrücke*. Aufgrund der verbundenen Massepotenziale ist diese Topologie nicht galvanisch getrennt. Die zwei in Serie verschalteten Halbleiterbauelemente (in Abb. 10.2 sind MOSFETs dargestellt) werden mit der Periodendauer T_{sw} ab-

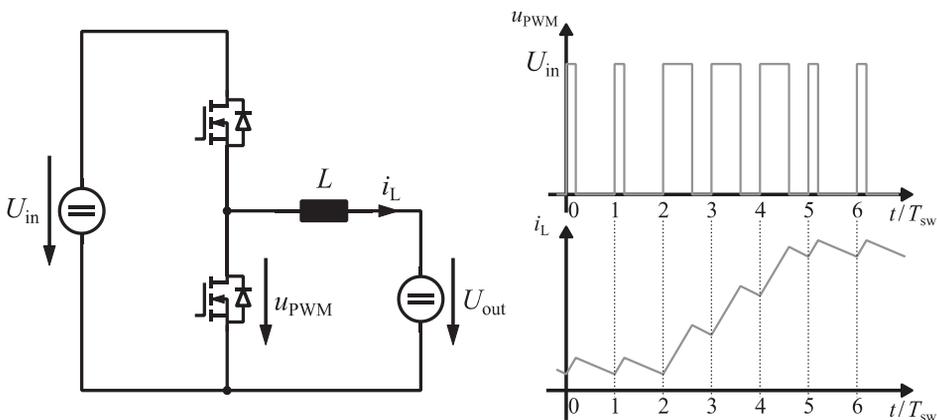


Abb. 10.2 Halbbrücke (links) und PWM-Schaltmuster (rechts)

¹³Vgl. Grau 2021.

¹⁴Vgl. Taraborrelli 2017; Vgl. Landgraf 2013.

¹⁵Vgl. Stippich et al. 2017.

¹⁶Vgl. van Hoek 2017.

wechselnd ein- und ausgeschaltet. Dadurch ergibt sich am Mittelpunkt der Halbbrücke eine pulsformige Spannung u_{PWM} , die im Kurzzeit-Mittelwert einer geringeren Spannung als der Eingangsspannung U_{in} entspricht. Die Induktivität L fungiert hier als Filter, indem sie die gepulste Spannung zu einem Strom i_L glättet, der mit einer gewissen Welligkeit behaftet ist. Durch Variation des Zeitverhältnisses zwischen dem High-Side- und dem Low-Side-Schalter innerhalb der Schaltperiode T_{sw} lässt sich die Höhe des Stromflusses beliebig einstellen, wie in Abb. 10.2 gezeigt. Dieses Prinzip der Ansteuerung der Halbbrücke wird *Pulsweitenmodulation* (PWM) genannt. Auch negative Ströme können gestellt werden, daher ist die hier gezeigte Topologie bidirektional.

In Abb. 10.3 wird ein DC/DC-Wandler dargestellt, der für Elektrofahrzeuge entwickelt wurde, um die Batterie vom Zwischenkreis des Antriebswechselrichters zu entkoppeln und die DC-Link-Spannung somit unabhängig von der Batteriespannung einstellen zu können.¹⁷ Die Batteriespannung U_{bat} kann dabei zwischen 80 V und 500 V liegen und zu einer DC-Link-Spannung U_{DC} von bis zu 800 V gewandelt werden. Als Topologie kommen drei parallelgeschaltete Halbbrücken zum Einsatz, die jeweils eine Nennleistung von 14 kW aufweisen, so dass sich eine Gesamtleistung von 42 kW ergibt. Aufgrund der Verwendung von SiC-MOSFETs lässt sich eine hohe Schaltfrequenz von 150 kHz bei gleichzeitig hoher Effizienz von bis zu 98,4 % erreichen. Durch die zeitliche Versetzung der PWM-Schaltmuster kann sich die Stromwelligkeit der drei Halbbrücken gegenseitig teilweise aufheben, wodurch sich die Induktivitäten verkleinern lassen. Dieses Prinzip wird *Interleaving* genannt. Im Teillast-Betrieb kann es zudem effizienter sein, nur eine oder zwei der drei Halbbrücken alleine zu betreiben, so dass auch hier die Effizienz gesteigert werden kann. Dabei spricht man von *Phase Shedding*. Insgesamt gewinnen modular aufgebaute Wandler wie der hier gezeigte ein immer größeres Interesse als sogenannte *Power-Electronic Building Blocks* (PEBBs).¹⁸

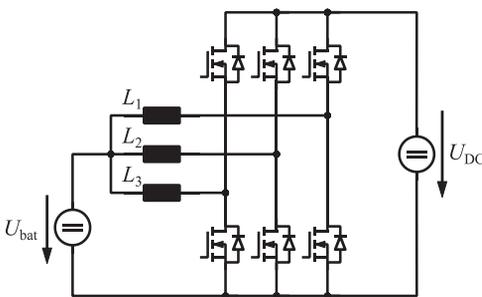


Abb. 10.3 Topologie und Foto eines DC/DC-Wandlers mit SiC-MOSFETs. (Vgl. Sewergin 2021)

¹⁷Vgl. Sewergin 2021.

¹⁸Vgl. Ericson et al. 2006.

Es existiert eine Vielzahl weiterer DC/DC-Wandler-Topologien. Bei sehr hoher Leistungsklasse werden vermehrt *weichschaltende* Topologien benutzt, die im Vergleich zu *hartschaltenden* Topologien wie den hier gezeigten deutlich verringerte Schaltverluste und ein verbessertes EMV-Verhalten aufweisen.¹⁹

10.4 Ladegeräte

Neben dem Antriebsumrichter bildet das Ladegerät eine der wichtigsten leistungselektronischen Anwendungen in Elektrofahrzeugen. Wie in Abb. 10.4 zu sehen, besteht ein Ladegerät aus einem Gleichrichter, der die Netzspannung in eine Gleichspannung wandelt, mit einem nachgeschalteten DC/DC-Wandler, der die Batterie nach den Vorgaben des Batteriemanagementsystems (BMS) lädt. Der DC/DC-Wandler wird dabei meist galvanisch getrennt ausgeführt. Dies hat den Hintergrund, dass auf diese Weise auch bei Isolationsfehlern das Chassis berührungssicher bleibt.

Der einfachste Fall des Ladens lässt sich mit einer normalen Haushaltssteckdose am öffentlichen AC-Niederspannungsnetz mit einer Leistung von maximal 3,7 kW einphasig realisieren – was allerdings zu langen Ladevorgängen führt. Alternativ kann am öffentlichen AC-Niederspannungsnetz auch dreiphasig und wesentlich zügiger mit 11 kW beziehungsweise 22 kW geladen werden – zum Beispiel an den meisten Wallboxen. In beiden Fällen befinden sich die Wandler an Bord des Fahrzeugs (sog. On-Board-Ladegerät), wie in Abb. 10.4 zu sehen ist. Schließlich gibt es das DC-Schnellladen mit Leistungen von bis zu 350 kW. Da es nicht sinnvoll wäre, das On-Board-Ladegerät für diese Leistungen auszulegen, befinden sich die Wandler dabei – anders als in Abb. 10.4 – innerhalb der Schnellladesäule. Das Schnellladekabel verbindet sie direkt mit der Batterie.

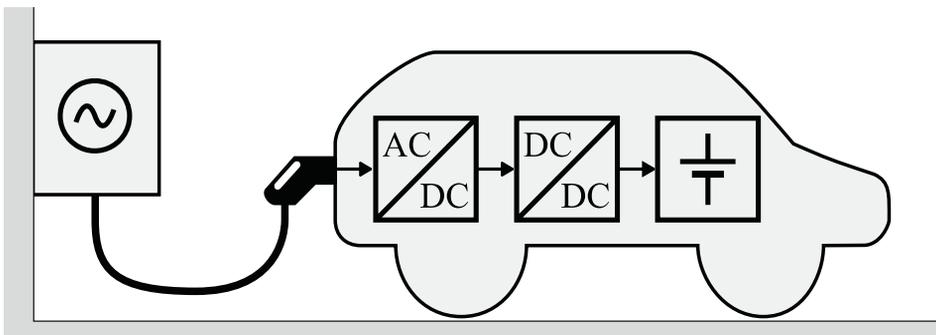


Abb. 10.4 Prinzipskizze des AC-Ladens mit bis zu 22 kW

¹⁹Vgl. Rashid 2018; Vgl. De Doncker et al. 1991.

Für die Gleichrichtung in On-Board-Ladegeräten ist bei Leistungsklassen von 22 kW ein rein passiver Diodengleichrichter nicht ausreichend, da er am Netz Blindleistung erzeugen würde. Daher werden aktive Topologien eingesetzt, die sehr effizient mit dem Prinzip der PWM arbeiten und dem Netz einen sinusförmigen Strom in Phase mit der Netzspannung entnehmen. Diese Eigenschaft von Topologien wird Leistungsfaktor-korrektur (PFC) genannt. Es existieren sowohl unidirektionale als auch bidirektionale Topologien, die PFC-fähig sind.²⁰

Sowohl der Gleichrichter als auch der DC/DC-Wandler können bidirektional ausgeführt werden. Das würde erlauben, die Batterien der wachsenden Elektrofahrzeug-Flotte als flexible Energiespeicher am Stromnetz zu nutzen. Dieses Konzept wird oft als *Vehicle-to-Grid* (V2G) bezeichnet.²¹ Dadurch können auch – etwa durch die Bereitstellung von Blindleistung oder das Vorhalten von Primärregelleistung – netzstabilisierende Dienstleistungen erbracht werden.

In Abb. 10.5 ist der Prototyp eines solchen Ladegerätes abgebildet, das mit Hilfe von GaN-Transistoren aufgebaut wurde und so eine sehr hohe Leistungsdichte erreichen kann.²² Das AC-Frontend, das in der Lage ist, bidirektional Leistung aus dem Netz zu entnehmen und in das Netz einzuspeisen, kann mittels der GaN-Transistoren bei einer Schaltfrequenz von 200 kHz arbeiten. Der nachgeschaltete DC/DC-Wandler ist aufgrund des Transformators galvanisch getrennt und erreicht, da mit der *Dual Active Bridge* eine weichschaltende Topologie gewählt wurde, eine Schaltfrequenz von 500 kHz. Die Nennleistung dieses Ladegerätes beträgt 3,7 kW, es hat ein Volumen von unter 3 Litern und ein Gewicht von weniger als 3 kg.

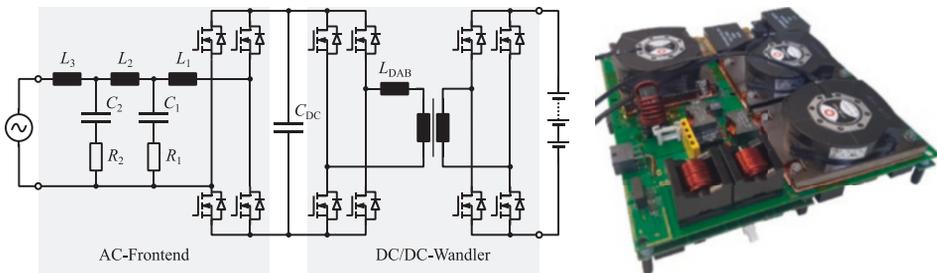


Abb. 10.5 Topologie und Foto eines bidirektionalen Ladegerätes mit GaN-Schaltern. (Vgl. Schülting 2020)

²⁰ Vgl. Rashid 2018.

²¹ Vgl. NPM – Nationale Plattform Zukunft der Mobilität 2020.

²² Vgl. Schülting 2020.

10.5 Wechselrichter

Um sowohl die Drehzahl als auch das Drehmoment von Asynchron- und Synchronmaschinen stufenlos einstellen zu können, wandeln Wechselrichter mit Gleichspannungszwischenkreis (Voltage Source Inverter – VSI) mithilfe von PWM die Gleichspannung derart um, dass rechteckförmige Spannungen an den Maschinenphasen anliegen. Durch das Einstellen des Tastgrades kann die mittlere Spannung in den Maschinenphasen so angepasst werden, dass ein sinusförmiger Strom mit gewünschter Amplitude und Frequenz in den Phasen fließt. Asynchron- und Synchronmotoren mit drei Phasen werden auch als „Drehstrommotoren“ bezeichnet, weil die drei sinusförmigen Phasenströme gleicher Amplitude und Frequenz um 120 Grad phasenverschoben sind. Neben VSIs existieren auch Umrichter, die die Hochvoltbatterie als Stromquelle nutzen. „Current Source Inverter“ (CSI) haben im Vergleich zu VSIs keine Zwischenkreiskapazität, sondern eine DC-Link-Induktivität zur Filterung des Eingangstromes und Ausgangskapazitäten zur Filterung der Phasenströme.²³ Die Filterinduktivität kann jedoch für hohe Leistungen groß ausfallen. VSIs haben sich als Traktionsumrichter für den Automotive-Bereich im Vergleich zu CSI aufgrund der geringeren Kosten und der höheren Effizienz durchgesetzt.²⁴

Abb. 10.6 zeigt eine B6C-Schaltung mit einer dreiphasigen Maschine. Die B6C-Schaltung ist die am weitesten verbreitete Umrichtertopologie mit Gleichspannungszwischenkreis. Die Gleichspannung U_{dc} wird dabei durch die Spannung der Hochvoltbatterie festgelegt und durch die Zwischenkreiskapazität C_{dc} stabilisiert. Die Maschinenphasen werden im Stern verschaltet und an die drei Halbbrücken – bestehend aus Leistungshalbleiterschaltern und Freilaufdiode – angeschlossen. Die B6C-Topologie bietet den Vorteil eines einfachen und günstigen Aufbaus. Ihr stehen jedoch im Vergleich zu Multilevel-Umrichtern nur zwei Spannungsniveaus für die Modulation zur Verfügung, wodurch der Strom eine höhere „Total Harmonic Distortion“ (THD) vorweist. Je höher die THD, desto mehr weicht der Phasenstrom von einem idealen Sinus ab, wodurch der Anteil

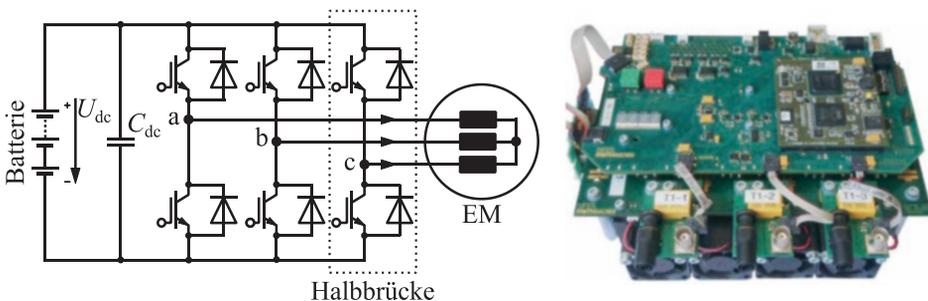


Abb. 10.6 B6C-Topologie und Foto eines dreiphasigen Umrichters. (Vgl. Schubert 2018)

²³Vgl. Rashid 2018.

²⁴Vgl. Wiechmann et al. 2008.

an Harmonischen mit höherer Frequenz ansteigt, die wiederum zu höheren Eisenverlusten im elektrischen Antrieb führen.

Eine Möglichkeit, die THD zu verbessern, bieten „Neutral Point Clamped“ (NPC)-Multilevel-Topologien wie in Abb. 10.7 gezeigt. Dabei werden durch den Einsatz zusätzlicher Schalter und Dioden im Vergleich zur B6C-Topologie statt bloß zweier mehrere Spannungslevel bereitgestellt, was wiederum mit einer niedrigeren THD und dadurch mit geringeren Maschinenverlusten einhergeht. Darüber hinaus bieten Multilevel-Umrichter die Möglichkeit einer fehlertoleranten Maschinenregelung wegen des größeren Freiheitsgrades an Schaltzuständen bei Ausfall einzelner Schalter. Im Vergleich zur B6C-Topologie sind Multilevel-Umrichter zum einen komplexer in ihrer Ansteuerung und zum anderen kostenintensiver in der Herstellung aufgrund des Verbaus einer größeren Anzahl von Komponenten, was in der Folge zu einem höheren Gewicht führt.

Für geschaltete Reluktanzmaschinen wird häufig die in Abb. 10.8 gezeigte asymmetrische Halbbrücke benutzt. Im Vergleich zur Halbbrücke der B6C-Topologie werden die Maschinenphasen einer geschalteten Reluktanzmaschine mit beiden Klemmen an die asymmetrische Halbbrücke angeschlossen. Außerdem liegen die Leistungsschalter und

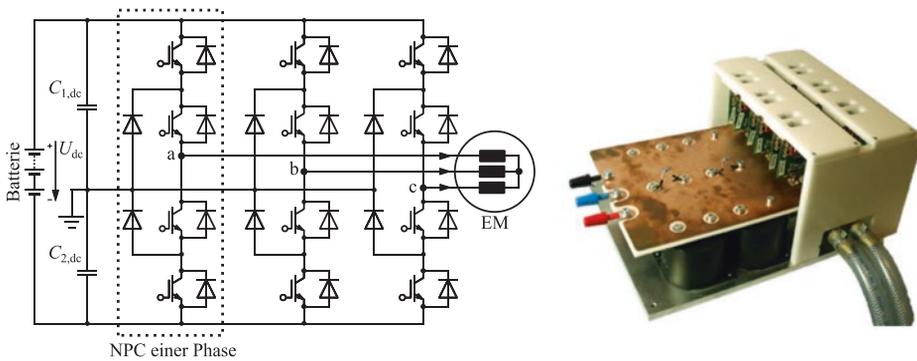


Abb. 10.7 Multilevel-Topologie und Foto eines Multilevel-Umrichters. (Vgl. Bubert 2020)

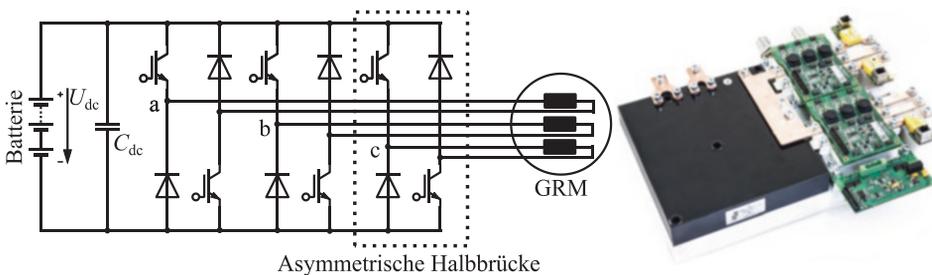


Abb. 10.8 Topologie mit asymmetrischen Halbbrücken und Foto eines dreiphasigen GRM-Umrichters. (Vgl. Klein-Heßling 2018)

die Freilaufdioden in den oberen und unteren Zweigen asymmetrisch. Der wesentliche Unterschied im Vergleich zu Drehstrommaschinen sind die nicht sinusförmigen Phasenströme in geschalteten Reluktanzmaschinen. Stattdessen wird durch geeignetes Auf- und Entmagnetisieren der Maschinenphasen versucht, den zeitlichen Verlauf des Maschinenstromes derart anzupassen, dass sich eine geringe Drehmomentwelligkeit und/oder eine hohe Effizienz erreichen lässt.

Alle zuvor gezeigten Umrichter erlauben einen bidirektionalen Leistungsfluss und sind somit in der Lage, die unterschiedlichen elektrischen Antriebe sowohl motorisch als auch generatorisch zu betreiben. Ein Leistungsfluss von der Hochvoltbatterie zum elektrischen Antrieb bedeutet einen motorischen Betrieb, während ein Leistungsfluss vom elektrischen Antrieb in die Hochvoltbatterie einen generatorischen Betrieb beziehungsweise eine Rekuperation bedeutet.

Mehrphasige Maschinen haben im Vergleich zu den weitverbreiteten dreiphasigen Maschinen den Vorteil, dass sie mehr Freiheitsgrade vorweisen. Im Betrieb führt dies bei Ausfall einzelner Phasen wiederum zu einer höheren Robustheit, da einzelne Stränge sich voneinander unabhängig ansteuern lassen. Außerdem sind mehrphasige Maschinen wegen der höheren Drehmomentdichte von Vorteil.²⁵ Die entsprechenden mehrphasigen Umrichter bestehen im Prinzip aus weiteren parallelgeschalteten Halbbrücken, einphasigen NPC-Umrichterzweigen oder asymmetrischen Halbbrücken (vgl. Abb. 10.6 bis Abb. 10.8), indem die Anzahl der parallelen Zweige oder Halbbrücken auf die zu verwendenden Maschinenphasen ergänzt werden. Um das Prinzip der Modularisierung von Wechselrichtern zu nutzen, ist es ebenfalls möglich, mehrere dreiphasige Umrichter einzusetzen, um eine mehrphasige Maschine anzusteuern. Entsprechend sind die elektrischen Komponenten der einzelnen Umrichter kleiner dimensioniert. Eine Möglichkeit besteht darin, eine sechsphasige Maschine mit zwei dreiphasigen Umrichtern anzusteuern. Neben der höheren Redundanz durch den Antrieb mehrerer Umrichter basiert die Regelung eines einzelnen Umrichters auf etablierten Regelungsverfahren, was die Komplexität der Regelung im Vergleich zur Regelung jeder einzelnen Maschinenphase nur unwesentlich erhöht.

10.6 Regelungsplattform für Wechselrichter

Für die Ansteuerung der Wechselrichter aus Abschn. 10.5 berechnen Regelungsplattformen Schaltsignale für die Halbleiter, um je nach Steuerungs- oder Regelungsverfahren das Drehmoment oder die Drehgeschwindigkeit einer elektrischen Maschine einzustellen. Die Schaltsignale werden an die Gate-Treiber der Halbleiterschalter geleitet, wodurch die Halbleiterschalter angesteuert werden können.

In Abhängigkeit vom Regelungsalgorithmus werden Sensoren benötigt, um bestimmte Größen einer elektrischen Maschine zu regeln oder Informationen für weitere Berechnungen zu nutzen, sodass eine elektromechanische Energieumwandlung in einem elektrischen Antrieb stattfinden kann. Bei einer feldorientierten Regelung (FOC) für

²⁵Vgl. Parsa 2005.

Asynchron- und Synchronmaschinen werden die Wechselströme in den Maschinenphasen mit Hilfe einer mathematischen Koordinatentransformation in Gleichströme umgewandelt, so dass ein Vergleich zwischen Gleichströmen im Regelungsalgorithmus stattfinden kann. Die Referenzströme können vorberechnet werden, um das resultierende Drehmoment an der elektrischen Maschine so einzustellen, dass ein möglichst effizienter Betrieb (Maximum Torque per Ampere – MTPA) oder ein Betrieb mit Feldschwächung (Maximum Torque per Flux – MTPF) gewährleistet werden kann. Die Regelung mit FOC erlaubt ein dynamischeres Verhalten von elektrischen Antrieben aufgrund der entkoppelten Ansteuerung des magnetischen Flusses und der Ströme in elektrischen Maschinen. Für die FOC werden Stromsensoren verwendet, um die Wechselströme am Ausgang des Umrichters für jede Maschinenphase zu messen. Aufgrund geringerer Kosten und einer kompakteren Bauform werden für mobile Anwendungen Open-Loop-Stromsensoren verwendet.²⁶ Des Weiteren wird für die FOC neben Stromsensoren für die einzelnen Maschinenphasen ebenfalls ein Lagegeber benötigt. Üblich ist die Verwendung von Resolvern als Lagegeber in elektrischen Fahrzeugen, die das Signal entweder analog ausgeben oder es mit einem zusätzlichen Resolver/Digital-Wandler in ein digitales Signal umwandeln.²⁷

Heutige leistungsstarke Regelungs-Hardware ist für aufwendige Berechnungen und für das Senden und Empfangen von Daten in Echtzeit geeignet. Mithilfe von Analog-Digital-Umsetzern (ADC) werden die analogen Signale der Stromsensoren in digitale Signale umgesetzt, die zum Beispiel von einem „Field Programmable Gate Array“ (FPGA) verarbeitet werden können. Zur Generierung der hochfrequenten Schaltsignale in Form von Pulsweitenmodulation (PWM) werden häufig ebenfalls FPGAs verwendet. Eine Implementierung des Regelungsalgorithmus wäre auch auf dem FPGA möglich, der jedoch in „Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language“ (VHDL) entwickelt werden müsste. Um die Entwicklungszeit durch Programmierung in höheren Programmiersprachen wie C++ oder mit graphischer Programmierung mit MATLAB/Simulink²⁸ oder ACTIVATE²⁹ zu beschleunigen, werden langsamere „Digital Signal Processors“ (DSPs) verwendet. Ein Beispiel eines DSP ist in Abb. 10.9 gezeigt.

DSPs übernehmen vor allem Funktionen zur Kommunikation mit übergeordneten Systemen durch die UART- und CAN-Schnittstellen. Die eigentliche Kommunikation zwischen dem DSP und dem FPGA geschieht über Speicher-Schnittstellen, beispielsweise „Asynchronous Memory Interface“ (AMI) oder „External Memory Interface“ (EMIF). Darüber hinaus werden für den DSP zusätzlich Flash-Speicher und für den FPGA „Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory“ (EEPROM) sowie „Static Random Memory Access“ (SRAM) zur Abspeicherung der FPGA-Konfiguration genutzt. Abb. 10.10 zeigt eine mögliche Architektur einer Regelungsplattform mit einer Kombination aus DSP und FPGA sowie weiteren Ein- und Ausgängen.

²⁶ Vgl. Reimers et al. 2019.

²⁷ Vgl. Reimers et al. 2019.

²⁸ Vgl. The MathWorks 2021.

²⁹ Vgl. Altair Engineering 2021.

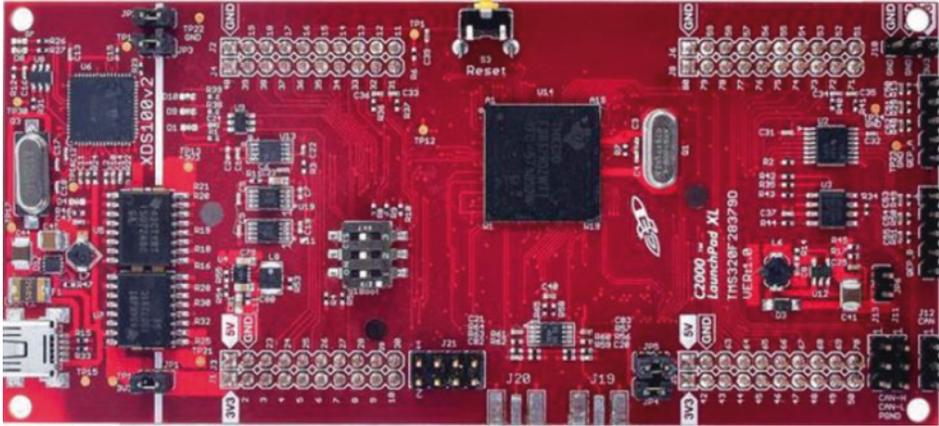


Abb. 10.9 „Texas Instruments“-LaunchPad™ der „C2000 DSP“-Reihe. (Vgl. [Texas Instruments](#) 2021)

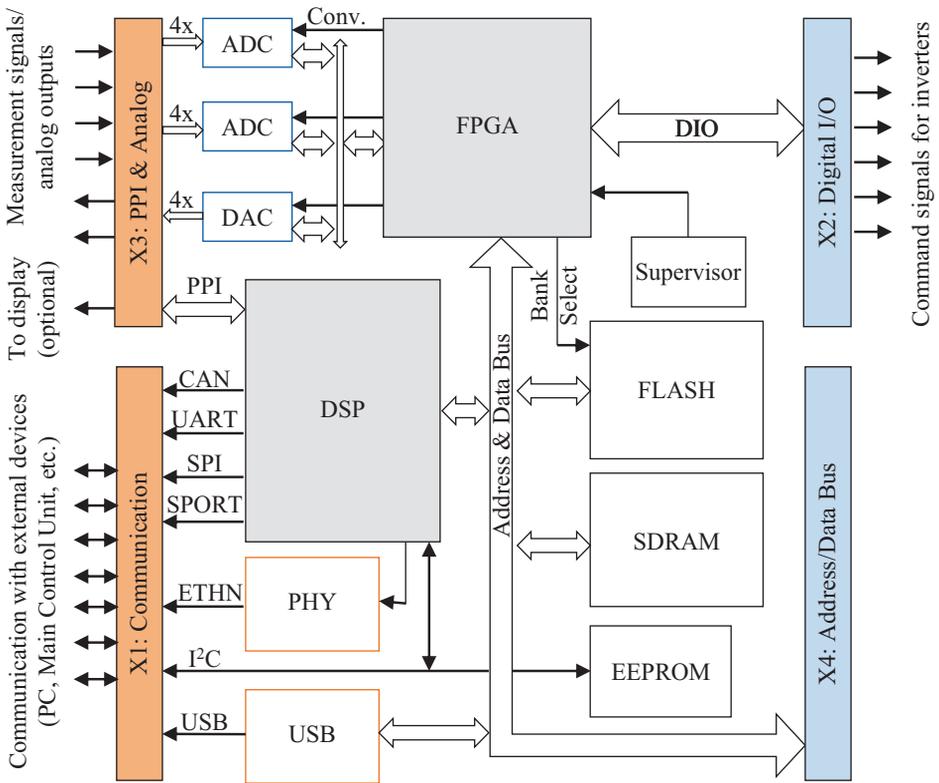


Abb. 10.10 Regelungsplattform für Wechselrichter. (Vgl. [De Doncker et al.](#) 2020)

Literatur

Teil II: Elektrofahrzeugspezifische Systeme

- Altair Engineering:** *ACTIVATE*. <https://www.altair.com/>
- Baliga, B. J.:** *Gallium Nitride and Silicon Carbide Power Devices*. World Scientific, 2017
- Baliga, B. J.:** *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*. 2. Aufl. Cham: Springer International Publishing, 2019
- Bubert, A. M.:** *Optimization of Electric Vehicle Drive Trains with Consideration of Parasitic Currents Inside the Electrical Machine*: RWTH Aachen University, 2020
- De Doncker, R. W.; Divan, D. M.; Kheraluwala, M. H.:** *A Three-Phase Soft-Switched High-Power-Density DC/DC Converter for High-Power Applications*. In: IEEE Trans. Ind. Applicat., Jg. 27, 1991, Nr. 1, S. 63–73
- De Doncker, R. W.; Pülle, D. W. J.; Veltman, A.:** *Advanced Electrical Drives. Analysis, Modeling, Control*. Power Systems: Springer International Publishing, 2020
- Ericson, T; Hingorani, N; Khersonsky, Y.:** *PEBB – Power Electronics Building Blocks from Concept to Reality*: 2006 Record of Conference Papers - IEEE Industry Applications Society 53rd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, Philadelphia, PA, USA, 2006
- Franz, J.:** *EMV. Störungssicherer Aufbau elektronischer Schaltungen*. 4., erw. und überarb. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011
- Grau, V. C.:** *Development of a Test Bench to Investigate the Impact of Steep Voltage Slopes on the Lifetime of Insulation Systems for Coil Windings*: RWTH Aachen University, 2021
- Hurley, W. G.; Wölfle, W. H.:** *Transformers and Inductors for Power Electronics: Theory, Design and Applications*. Chichester: Wiley, 2013
- Klein-Hefling, A.:** *Aktive Gleichstromfilter für Geschaltete Reluktanzantriebe im Einzelpulsbetrieb*: RWTH Aachen University, 2018
- Landgraf, J. (Hrsg.):** *Forschungsprojekt e-performance. Modularer Systembaukasten für elektrifizierte Fahrzeuge*: 1. Aufl. Göttingen: Cuvillier, 2013
- Lutz, J; Schlangenotto, H; Scheuermann, U; De Doncker, R. W.:** *Semiconductor Power Devices. Physics, Characteristics, Reliability*. Cham: Springer International Publishing, 2018
- Mantooth, H. A; Glover, M. D; Shepherd, P.:** *Wide Bandgap Technologies and Their Implications on Miniaturizing Power Electronic Systems*. In: IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron., Jg. 2, 2014, Nr. 3, S. 374–385
- Mohan, N; Undeland, T. M; Robbins, W. P.:** *Power Electronics. Converters, Applications, and Design*. 3. Aufl. Hoboken, NJ: Wiley, 2007
- Neubert, M.:** *Modeling, Synthesis and Operation of Multiport-Active Bridge Converters*: RWTH Aachen University, 2020.
- NPM – Nationale Plattform Zukunft der Mobilität:** *Factsheet „Vehicle to Grid“. Kundennutzen und Netzintegration*. Berlin, 2020
- Parsa, L.:** *On Advantages of Multi-Phase Machines*: 31st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 2005
- Rashid, M. H. (Hrsg.):** *Power Electronics Handbook*. 4. Aufl., Oxford, UK, Cambridge, USA: Butterworth-Heinemann, 2018
- Reimers, J; Dorn-Gomba, L; Mak, C; Emadi, A.:** *Automotive Traction Inverters: Current Status and Future Trends*. In: IEEE Trans. Veh. Technol., Jg. 68, 2019, Nr. 4, S. 3337–3350
- Schubert, M.:** *Hochpräzise Drehmomentregelung von Umrichter-gespeisten Asynchronmaschinen mit instantaner Phasenspannungsmessung*: RWTH Aachen University, 2018

- Schülting, P.:** *Optimierte Auslegung von hochintegrierten und bidirektionalen Onboard GaN-Ladegeräten:* RWTH Aachen University, 2020
- Sewergin, A.:** *Design Challenges and Solutions for the Practical Application of SiC Power Modules. Exemplified by an Automotive DC-DC Converter:* RWTH Aachen University, 2021
- Stippich, A.; van der Broeck, C.; Sewergin, A.; Wienhausen, A. H.; Neubert, M.; Schülting, P.; Taraborrelli, S.; van Hoek, H.; De Doncker, R. W.:** *Key Components of Modular Propulsion Systems for Next Generation Electric Vehicles.* In: CPSS Trans. Power Electron. Appl., Jg. 2, 2017, Nr. 4, S. 249–258
- Taraborrelli, S.:** *Bidirectional Dual Active Bridge Converter Using a Tap Changer for Extended Voltage Ranges:* RWTH Aachen University, 2017
- Texas Instruments:** *LAUNCHXL-F28379D. C2000 Delfino MCU F28379D LaunchPad™ development kit.* <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28379D>
- The MathWorks:** *MATLAB/SIMULINK.* <https://www.mathworks.com/>
- van Hoek, H.:** *Design and Operation Considerations of Three-Phase Dual Active Bridge Converters for Low-Power Applications with Wide Voltage Ranges:* RWTH Aachen University, 2017
- Wiechmann, E. P.; Aqueveque, P.; Burgos, R.; Rodriguez, J.:** *On the Efficiency of Voltage Source and Current Source Inverters for High-Power Drives.* In: IEEE Trans. Ind. Electron., Jg. 55, 2008, Nr. 4, S. 1771–1782
- Wienhausen, A. H.:** *High Integration of Power Electronic Converters Enabled by 3D Printing:* RWTH Aachen University, 2019
- Wilson, T. G.:** *The Evolution of Power Electronics.* In: IEEE Trans. Power Electron., Jg. 15, 2000, Nr. 3, S. 439–446

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Thermomanagement in Elektrofahrzeugen

11

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns,
Mario Kehrer, Francesco Maltoni und Hendrik Löbbberding

Das Thermomanagement muss sich einer Vielzahl von Anforderungen stellen, um sowohl den Komfort für Passagiere gewährleisten zu können als auch die maximale Sicherheit bei der Reichweitenoptimierung zu erzielen. Daraus entstehende Herausforderungen im Energie- und Thermomanagement von Elektrofahrzeugen gilt es mit interdisziplinären Thermomanagementsystemen zu lösen. Es geht dabei nicht nur um die Gewährleistung thermischer Behaglichkeit im Innenraum wie im Verbrennungskraftfahrzeug, sondern auch darum, die Systeme des Antriebsstrangs innerhalb der Betriebstemperaturgrenzen zu halten. Durch die unterschiedlichen Anforderungen an die genannten Betriebstemperaturen,

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

C. Offermanns · M. Kehrer

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: c.offermanns@pem.rwth-aachen.de; m.kehrer@pem.rwth-aachen.de

F. Maltoni

Technical Specialist, FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

E-Mail: maltoni@fev.com

H. Löbbberding (✉)

Team Leader Battery Cell, FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

E-Mail: loebberding@fev.com

© Der/die Autor(en) 2024

A. Kampker, H. H. Heimes (Hrsg.), *Elektromobilität*,

https://doi.org/10.1007/978-3-662-65812-3_11

die wechselnde Richtung der Wärmeströme, geringe Temperaturgradienten und die Relevanz für die Systemsicherheit kann das Thermomanagementsystem von Elektrofahrzeugen nur mit Hilfe interdisziplinärer Ansätze konsequenter Innovation gemeistert werden.

11.1 Herausforderungen des Thermomanagementsystems in Elektrofahrzeugen

Der Verbrennungsmotor funktioniert von tiefen bis zu sehr hohen Umgebungstemperaturen und muss ausschließlich gekühlt werden. Außerdem ist die abzuführende Wärme wegen der hohen Temperaturen einfach an ein Kühlmedium und dann an die Umgebungsluft zu übertragen. Die Menge der Abwärme genügt für die Heizung der Kabine und für die Nebenaggregate, ohne dass die Effizienz des Fahrzeugs darunter leiden muss. Die Ge triebetemperatur ist normalerweise höher als die Umgebungstemperatur, so dass deren Abwärme ebenfalls durch einen Wärmetauscher abgeführt werden kann. Das einzig verbleibende Problem besteht in der Kühlung der Kabine, die durch einen vom Motor angetriebenen Klimakompressor und Kältekreislauf – mit der Abnahme mechanischer Leistung im Fahrzeug – funktioniert.¹

Im Gegensatz dazu arbeitet die Traktionsbatterie in Elektrofahrzeugen bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen. Während besonders tiefen Temperaturen sinkt allerdings die Leistung, insbesondere beim Laden, wohingegen zu hohe Temperaturen sogar ein Sicherheitsrisiko darstellen. Die weiteren Komponenten – etwa der Elektromotor oder die Leistungselektronik im elektrischen Antriebstrang – funktionieren von tiefen bis zu unterschiedlich hohen Temperaturen und sind so effizient, dass die Abwärme kaum für eine Heizung des Kabinenraums ausreicht. Zum einen folgt daraus, dass die Klimatisierung der Kabine durch eine leistungsbedürftige Wärmepumpe erfolgen muss; zum anderen muss die Traktionsbatterie sowohl energieaufwendig erhitzt als auch gekühlt werden können, um im optimalen Betriebstemperaturfenster gehalten zu werden.

Somit muss das Thermomanagementsystem in einem Elektrofahrzeug einen Kompromiss unter vier Zielgrößen abbilden: eine hohe Effizienz auf Systemebene und somit maximale Reichweite, vertretbare Kosten und eine optimale Bauraumnutzung.²

11.2 Thermomanagement der Elektromobilkomponenten

Das Thermomanagement in Elektrofahrzeugen lässt sich nach den wichtigsten Bereichen untergliedern, die ihre jeweiligen thermischen Anforderungen bezüglich des Heizens und Kühlens stellen. Dazu gehören das Batteriesystem, die Elektromotoren, Hochvoltkomponenten sowie der Fahrzeuginnenraum. Auf Basis der Einzel-

¹Vgl. Rao und Wang 2011, S. 4559ff.

²Vgl. Lajunen et al. 2020, S. 6027ff.

anforderungen kann ein gesamtheitliches, energetisch optimiertes Gesamtsystem abgeleitet und integriert werden.

11.2.1 Thermomanagement der Batterie

Für das Thermomanagement der Batterie sind die spezifischen Eigenschaften der Lithium-Ionen-Batterie von großer Bedeutung – sowohl aus der Performance- als auch aus der Sicherheitsperspektive:

- Das Eintreten von exothermen, selbstverstärkenden, chemischen Reaktionen, falls eine gewisse Temperatur der Batterie überschritten wird, was zu Brand- und Explosionsfällen führen kann – auch als „Thermal Runaway“ bezeichnet
- Bereits weit unterhalb dieser Temperaturgrenze ist die Batteriealterung bei höheren Betriebstemperaturen deutlich beschleunigt.
- Das unterschiedliche thermische Verhalten während des Entlade- und Ladevorgangs ist im Thermomanagement zu beachten.
- Das Eintreten schädlicher Konversionsreaktionen zusätzlich zu Interkalationsreaktionen an der Anode der Batterie während des Ladevorgangs bei niedrigen Temperaturen und hohen Strömen – auch „Lithium-Plating“ genannt
- Die optimale Betriebstemperatur zwischen 30 und 40 °C, da der interne Widerstand in diesem Bereich am kleinsten und somit auch die Wärmeentwicklung in der Batterie minimal ist

Um einen sicheren Fahrbetrieb zu ermöglichen, muss das Thermomanagement die höchste Zelltemperatur bei jedem Fahrzustand deutlich unterhalb der Grenze eines „Thermal Runaway“ halten. Dies muss unter Betrachtung des Kennfeldes des internen elektrischen Widerstands der Zellen erfolgen. Weil bei sehr tiefen Temperaturen der Widerstand mit abnehmender Temperatur steigt, wird dann auch die abrufbare Entladeleistung begrenzt. Dennoch muss das Thermomanagementsystem bei Gewährleistung der Sicherheit nicht überdimensioniert werden. Es gibt bereits Ansätze bei elektrischen Sportwagen, in denen die Leistungsbegrenzung für kurze Zeit ausgeschaltet und dafür zusätzliche Zellalterung in Kauf genommen wird. Die zusätzlich erzeugte Wärme wird nach der Leistungsspitze in der Masse der Batterie verteilt, so dass sie anschließend abkühlen kann (Abb. 11.1)³

Betrachtet man die Batteriealterung weiter, wird diese nicht alleine durch eine hohe Temperatur, sondern auch durch einen Temperaturgradienten innerhalb der Zellen und des Systems beschleunigt. Somit ist es ebenfalls Aufgabe des Thermomanagementsystems, die Temperatur homogen über die Zellen einzustellen, um die Langlebigkeit des Batteriesystems zu gewährleisten.

³Vgl. Arora 2018, S. 622ff.

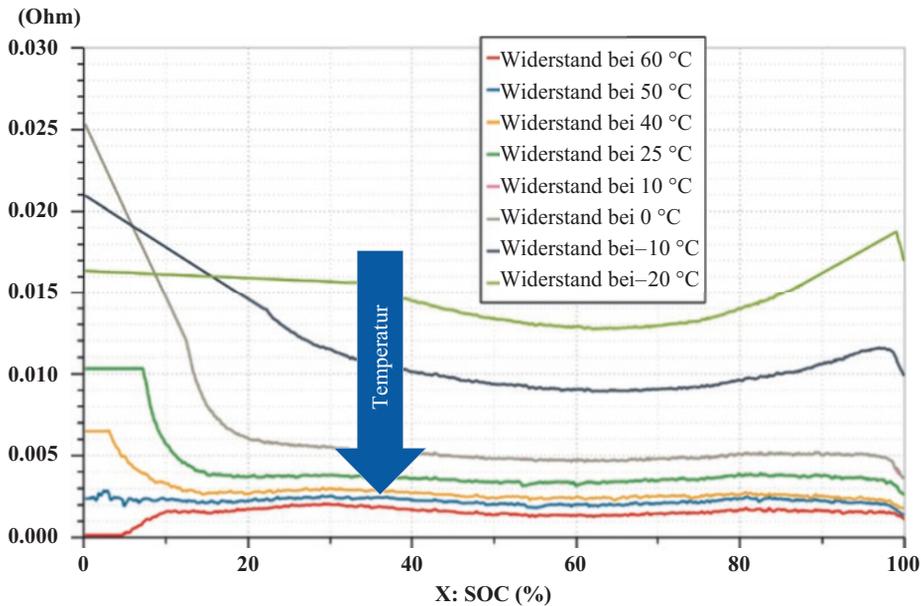


Abb. 11.1 Beispielhafte Temperatur- und Ladezustandsabhängigkeit des Innenwiderstands einer Pouch-Zelle. (Vgl. Heimes et al. 2019)

Der Wunsch der Nutzenden nach Schnellladevorgängen stellt die höchste Leistungsanforderung an das Thermomanagementsystem dar, denn der Innenwiderstand ist aufgrund des chemischen Aufbaus der Batterie beim Laden größer als beim Entladen. Auch muss die Wärme beim Laden kontinuierlich und nicht nur kurzzeitig abgeführt werden, da die Stromstärke für einen Großteil des Ladevorganges konstant hoch ist.

Um das Problem des Lithium-Platings zu beherrschen, ist eine effiziente und schnelle Heizung der Batterie bei tiefen Temperaturen auf mindestens 0 °C vor dem Ladevorgang notwendig. Da eine Wärmepumpe bei tiefen Temperaturen ineffizient ist, kommen – falls erforderlich – Heizmatten mit elektrischen Widerständen zum Einsatz.⁴ Die thermische Isolierung des Batteriegehäuses ist außerdem wichtig, falls die Zellen geheizt werden müssen.

Als Kühlsysteme sind die passive oder die aktive Luftkühlung für Systeme mit geringer Leistungsdichte verbreitet. Für die im Automotive-Bereich üblichen Leistungsklassen gibt es zudem die flüssige Kühlung und in einigen Sonderfällen die Immersionskühlung der Zellen in einer Flüssigkeit. Der Einsatz phasenwechselnder Materialien wird gelegentlich ebenfalls praktiziert, um Temperatur-Inhomogenitäten während der Aufheiz- und Abkühlphasen abzumildern.⁵

⁴Vgl. Arora 2018, S. 622ff.

⁵Vgl. Kim et al. 2019, S. 194f.

Die Integration des Kühlsystems bei einer Luftkühlung lässt sich durch verschiedenartige Konstruktionen realisieren. Anhand der Orientierung der Batteriezellen kann zwischen längs und quer umströmten Zellen unterschieden werden. Zudem kann die Ein- und Ausströmung des Fluids auf derselben Seite (U-förmige Strömung) oder auf gegenüberliegenden Seiten (Z-förmige Strömung) erfolgen. Aufgrund der Aufwärmung des Fluids bereits an den ersten Zellen ist die Kühlleistung zum Ende des Kühlkanals geringer. Dies muss bei der Auslegung berücksichtigt werden. Die begrenzte Anwendung dieser Bauform liegt in der vergleichsweise niedrigen maximalen Wärmeabfuhr des Kühlmediums „Luft“ begründet und ist für Hochleistungs-Elektrofahrzeuge oft ungeeignet (Abb. 11.2).

Bei Kühlung über einen sekundären Flüssigkeitskreislauf kann zwischen der Kühlung durch Kühlrippen, der Zwischenzellkühlung, der Immersionskühlung und der Bodenkühlung in Kanälen unterschieden werden. Während die Kühlrippen, die zwischen den Zellen montiert sind, mit einer besonders hohen Wärmekapazität die entstehende Wärme an einen Kühlfluss außerhalb der Zellen durch Wärmeleitung abgeben, werden bei der klassischen Bodenkühlung und der Zwischenzellkühlung Kanäle unter beziehungsweise zwischen den Zellen selbst von Fluid durchströmt und kühlen dadurch die Zellen effektiv.

Die Immersionskühlung stellt einen Spezialfall dar, der für besonders performante Anwendungen infrage kommt und durch die Immersion der elektrischen Zellen in eine nicht leitende Flüssigkeit technisch äußerst anspruchsvoll ist.⁶

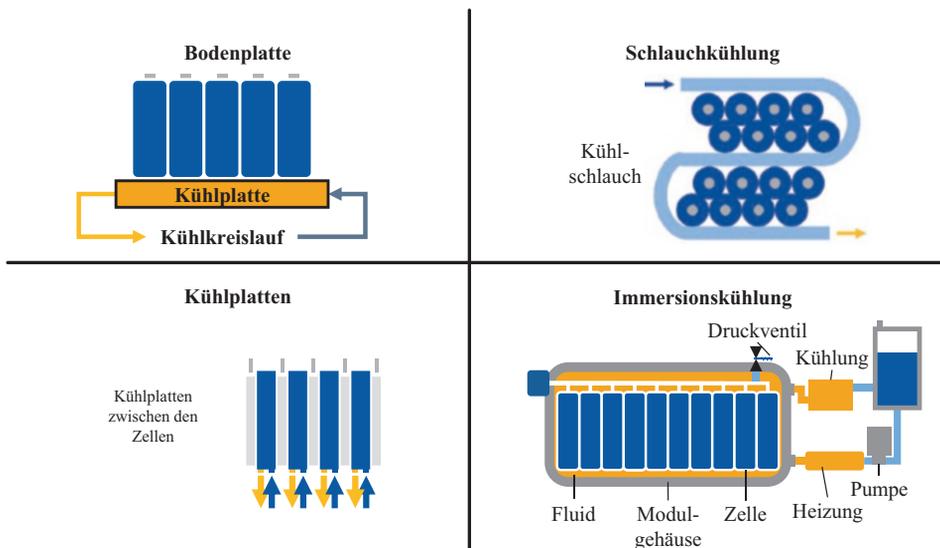


Abb. 11.2 Typische Kühlsystemkonfigurationen an Batteriesystemen mit Flüssigkeitskühlung. (I. A. a. Zeyen und Wiebelt 2013, S. 168)

⁶Vgl. Dubey et al. 2021, S. 2f.

11.2.2 Thermomanagement des Elektromotors

Die Anforderungen an die Temperatur in Elektromotoren sind hauptsächlich durch die Temperaturbeständigkeit der Wicklungsisolierung im Motor begrenzt. Die elektrischen Isolierstoffe dürfen im Betrieb die vorgeschriebenen Maximaltemperaturen nicht überschreiten. Bei Überschreitung droht eine schnelle Alterung oder ein gesamtheitliches Versagen, was zu einem Kurzschluss führen kann. Die üblichen Temperaturgrenzen liegen bei 120 bis 160 °C. Durch die nicht besonders hohe thermische Leitfähigkeit von Silizium-Eisen-Legierungen der Blechpakete im Elektromotor wird eine Kühlmediumtemperatur von typischerweise nicht mehr als 70 °C für eine ausreichende Wärmeabfuhr benötigt.

Durch den Trend der heutigen Motordesigns, mit besonders hohen Drehzahlen zu arbeiten, ist die Wärmeentwicklung während des Betriebs sehr hoch. Das limitiert die Dauerleistung elektrischer Maschinen oft auf 50 bis 60 % der möglichen Maximalleistung. Zur Effizienzsteigerung ist die Betrachtung neuartiger Kühlkonzepte unabdingbar.⁷

Eine hohe Betriebstemperatur beeinflusst ebenfalls die Motorleistung – aus zwei Gründen: Erstens steigt der elektrische Widerstand der Kupferwicklungen („Hairpins“), und zweitens verändern sich die magnetischen Eigenschaften der auf seltenen Erden basierenden Permanentmagnete, so dass die Stärke des magnetischen Feldes und somit das Drehmoment des Motors sinkt. Außerdem können sich die Permanentmagneten bei hohen Temperaturen entmagnetisieren.⁸

Über eine Mantelkühlung können elektrische Motoren extern über das Motorgehäuse gekühlt werden. Das Konzept ist in der Industrie durch die vergleichsweise einfache Implementierung weitverbreitet. Da die Aktivkomponenten nur indirekt gekühlt werden, reduziert sich jedoch die Effektivität der Kühlung. Prinzipiell kann zwischen einer Kühlung mit Flüssigkeiten und Gasen unterschieden werden. Zum Einsatz kommen Wasser, Öle und Wasser-Glykol-Gemische als Flüssigmedien sowie Luft oder Wasserstoff als Gase. Alternativ kann auch eine Phasenwechsel-Verdunstungskühlung zum Einsatz kommen. In Hochleistungsmotoren werden die Wickelköpfe teilweise außerdem mit Kühllöl bespritzt.⁹

Des Weiteren kann entstehende Wärme der aktiven Motorkomponenten direkt über eine Innenkühlung abgeführt werden. Die Anwendung ist kostenintensiver als eine externe Kühlung, erzeugt jedoch effektivere Kühlungsmöglichkeiten. Bei besonders kleinen und leistungsschwachen Motoren kann dabei eine passive Kühlung ausreichen. Die Wärmeabfuhr erfolgt durch natürliche Konvektion und Strahlung. Mit Hilfe der Implementierung einer Innenzirkulation von Kühlmedien durch eine Pumpe lässt sich eine aktive Kühlung durch erzwungene Konvektion erreichen. Die Kühlung ist weitaus effektiver, in der Konstruktion jedoch auch komplexer, und sie hat einen höheren Energieverbrauch. Mögliche Ansätze der aktiven Innenkühlung sind Kühlleitungen im Statorblech, eine Statornutkühlung

⁷Vgl. Gundabattini et al. 2021.

⁸Vgl. Yang et al. 2017, S. 108f.

⁹Vgl. Yang et al. 2017, S. 110f.

oder innengekühlte Hohldrähte der elektromagnetischen Spulen. Dies sind allerdings Konzepte, die sich noch im Entwicklungsstadium befinden.¹⁰

11.2.3 Thermomanagement der Hochvoltkomponenten

Die Leistungselektronik in Hochvoltkomponenten ist von einem sehr hohen Wirkungsgrad und somit von einer geringen Wärmeentwicklung gekennzeichnet, darf aber hohe Temperaturen nicht überschreiten. High-End-Halbleiter wie Siliziumcarbid weisen gute Wirkungsgrade bei höheren Temperaturen und Schaltfrequenzen auf. Galliumnitrid etwa hat einen geringeren Kühlungsbedarf durch hohe Effizienz bei hohen Spannungen und geringen Strömen. Die Anforderungen an das Thermomanagement sind hauptsächlich darauf gerichtet, die Temperaturen homogen und innerhalb der Betriebsgrenzen zu halten. In gängigen Kühlkonzepten wird das Kühlwasser entlang komplexer Heat-Sinks geleitet, um sicherzustellen, dass möglichst geringe Temperaturgradienten in den Platinen und Halbleitern entstehen, die zum Versagen oder zur Ermüdung führen könnten.

11.2.4 Thermomanagement des Fahrzeuginnenraums

Um die Behaglichkeit von Passagieren zu gewährleisten, die maßgeblich auf der empfundenen Temperatur, der Luftqualität und der Zugluft basiert, ist die Betrachtung des Thermomanagements im Fahrzeuginnenraum notwendig. Typische Zielwerte liegen zwischen 21 und 27 °C. Da die Klimatisierung des Innenraums bis zu 35 % des Energieverbrauchs beansprucht und dadurch die Reichweite eines Elektrofahrzeugs um bis zu 50 % reduzieren kann, ist ein energieeffizientes Thermomanagement im Innenraum von essenzieller Bedeutung.¹¹

Zur Erfüllung dieser thermischen Anforderungen im Innenraum kommen immer häufiger Wärmepumpen zum Einsatz. Diese können bei intelligenter Verschaltung sowohl zum Erhitzen als auch zum Kühlen genutzt werden, weisen jedoch einen signifikanten Leistungsbedarf auf. Zur Reduzierung des Leistungsbedarfs existieren Ansätze, bei denen der Umluftanteil sowie der Anteil der Umgebungsluft variiert werden.

Einen weiteren Ansatz bietet die aktive Zonierung des Fahrzeuginnenraums mit Hilfe einer Mehrzonenklimatisierung, um nur tatsächlich belegte Fahrzeugbereiche entsprechend zu klimatisieren und dadurch Energie einzusparen. Außerdem können leichte, elektrische Direktheizungen verwendet werden, die als Luftheritzer einfach zu regeln sind und einen kleinen Bauraum aufweisen. Die Anwendung als Flächenheizsystem in Kombination mit einem Lüftungssystem ist ebenfalls möglich und bietet den Vorteil, die

¹⁰Vgl. Gundabattini et al. 2021, S. 4f.

¹¹Vgl. Lajunen et al. 2020, S. 6027.

anfängliche Trägheit der Wärmepumpe zu überbrücken. Flächenheizsysteme als direkte Kontaktflächen im Bereich des Lenkrads sowie des Sitzes sind bereits weitverbreitet.

Eine Vorkonditionierung (Erwärmung oder Kühlung) der Kabine unter Ausnutzung des Ladestroms während des Ladevorgangs bietet ebenfalls die Möglichkeit, hohe Energieeinsparungen und eine subsequeunte Reichweitenerhöhung von bis zu 14 % während der anschließenden Fahrt zu erzielen.¹²

11.2.5 Gesamtsystembetrachtung des Thermomanagements

Die Gesamtsystemauslegung soll die unterschiedlichen Bedürfnisse der einzelnen Komponenten miteinander in Einklang bringen. Grundsätzlich ist eine Wärmequelle um 60 bis 70 °C aus dem Motor und der Leistungselektronik konstant vorhanden, während die Batterie und die Kabine andere Temperaturanforderungen haben, die sich stärker nach den Umgebungsbedingungen richten.

Aus diesem Grund werden üblicherweise zwei getrennte Kreisläufe vorgesehen. Der Motorkreislauf gibt durch einen Kühler Wärme zur Umgebungsluft ab. Die Traktionsbatterie und die Kabine teilen sich einen Kältekreislauf, der durch einen größeren Kompressor und Kondensator Wärme zur Umgebungsluft abgibt.

Die unterschiedlichen Solltemperaturen können durch zwei unterschiedliche Expansionsventile, jeweils für einen Evaporator, realisiert werden. Während der Evaporator für die Kabine immer Wärme mit der Luft austauscht, sind für die Batterie mehrere Möglichkeiten denkbar: zum einen die direkte Kühlung, bei der das Kältemittel innerhalb der Batterie verdampft, zum anderen die indirekte Kühlung, bei der die Kältemittel in einem „Chiller“ genannten Wärmetauscher mit einem Kühlmittel Wärme austauscht, das in die Batteriekühlkreisläufe einfließt.¹³ Solange die Kühlflüssigkeit aus zwei Phasen besteht, geschieht die direkte Verdampfung bei einer vom Systemdruck bestimmten, stabilen Temperatur, denn die Temperatur steigt bei überhitztem Dampf sehr steil an. Daher erzeugt die direkte Verdampfung Schwierigkeiten in der Regelung des Systems: Auf der einen Seite muss die Verdampfung vor dem Kompressor vollzogen werden, um ihn durch Tropfen nicht zu beschädigen; auf der anderen Seite darf der überhitzte Dampf zur Schonung der Batterie nicht zu heiß werden. Aus diesem Grund ist die indirekte Kühlung, in der der Kältekreislauf Wärme mit einem Kühlkreislauf austauscht, deutlich weiter verbreitet. Dadurch tauscht die Batterie Wärme bei einer annähernd stabilen Temperatur mit dem Kühlmedium aus. Die Implementierung ist mit mehreren Komponenten (Wärmetauscher und Pumpe) verbunden, gestaltet sich jedoch einfacher in der Umsetzung und bietet eine hohe Sicherheit im Betrieb.¹⁴

¹²Vgl. Lajunen et al. 2020, S. 6029.

¹³Vgl. Wang et al. 2018, S. 4011ff.

¹⁴Vgl. Jaguemont und van Mierlo 2020, S. 19f.

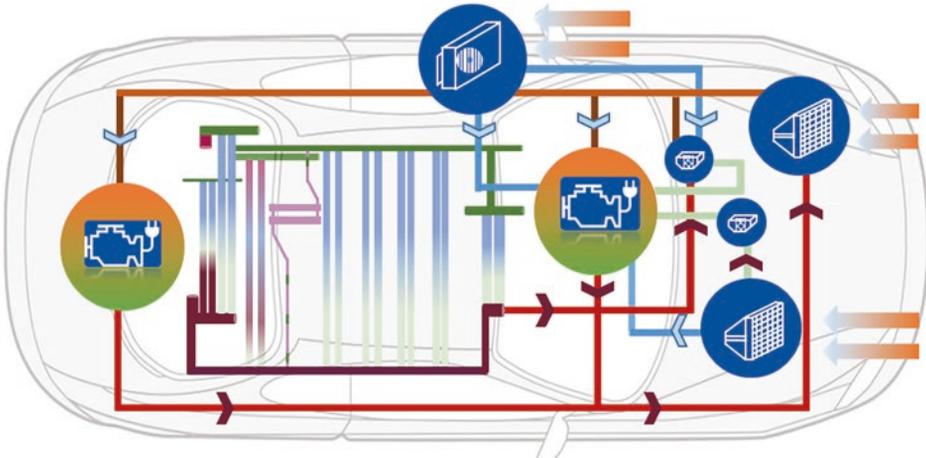


Abb. 11.3 Schema des Thermomanagementsystems mit optimierten Betriebsmodi. (Vgl. Wienkötter 2019)

11.3 Bauraum der Thermomanagement-Komponenten

Die zentralen Elemente, die im Fahrzeug integriert werden müssen, sind die Kühler, die bei unterschiedlichen Temperaturen Wärme abgeben. Sie werden üblicherweise getrennt und nebeneinander positioniert, damit sie vom Fahrtwind durchströmt werden. Die Pumpen und Wärmetauscher, Befüllungs- und Überdruckventile, Sensorik und Steuerungseinheiten werden immer häufiger in integrierten Kühlmodulen realisiert und geliefert, damit diese vor dem Einbau im Fahrzeug überprüft werden können und möglichst kompakt sind (Abb. 11.3).

11.4 Computerbasierte Systemmodellierungsansätze des Thermomanagements

Die Modellierung des Thermomanagements mit Hilfe von computerbasierten Simulationen bildet einen wichtigen Bestandteil in der heutigen Auslegung von Systemen. Insbesondere die Simulation von Batteriesystemen stellt eine Herausforderung dar.

Das zentrale Problem liegt in der Kopplung zwischen den elektrischen Größen (Spannung, Strom, SoC, Innenwiderstand) der Batteriezellen und weiteren Komponenten sowie der resultierenden Wärmeentwicklung. Dies kann durch elektrisch-thermische Modelle simuliert werden, wobei zum Beispiel der Innenwiderstand der Zelle aus anderen elektri-

schen Variablen und der Temperatur abgeleitet wird, so dass sich die Wärmeentwicklung aus dem Zellwiderstand berechnen lässt.¹⁵

Dazu wird auf Basis von SoC und Stromstärke die reversible Wärme der chemischen Reaktionen berechnet, die von der Umwandlung und Interkalation der chemischen Komponenten und letztlich vom Ladezustand abhängig ist. Durch die Anwendung elektrothermischer Simulationen des Batteriesystems können Komponenten dimensioniert und die Lebensdauer des Systems optimiert werden. Darüber hinaus ist der Input der Simulation von hohem Wert für die darauf aufbauende Auslegung und Regelung des Thermomanagements.

Durch detaillierte 3-D-Simulationen werden die lokalen Zelltemperaturen und notwendige Wärmeabfuhr berechnet sowie die strömungsdynamischen Eigenschaften des Kühlmediums im Kontakt mit den Zellen bestimmt. Die Ergebnisse werden im Anschluss als Randbedingungen in typischerweise 1-D-Systemsimulationen verwendet. Dabei liegt der Fokus auf der Auswahl der Nebenaggregate und der Dynamik des Systems. Der digitale Zwilling des Thermomanagements kann nun mit der Steuerungs-Software der Steuerungseinheit gesteuert werden, um die Funktionalität sowie extreme Bedingungen und Lastfälle zu überprüfen. Die Entwicklung einer Steuerungslogik und deren Validierung wird auf diese Weise enorm erleichtert.

Für die Ermittlung der Randbedingungen wie beispielsweise Spitztemperatur, Kühlbedarfe des Elektromotors und den Hochvoltkomponenten kann analog vorgegangen werden. Mit Hilfe detaillierter elektrisch-thermischer Modelle der Komponenten lässt sich zunächst die Wärmeentwicklung berechnen. Auf dieser Basis können adäquate Kühlkonzepte ausgewählt und in die Randbedingungen in die 1-D-Systemsimulation integriert werden.

Literatur

Teil II: Elektrofahrzeugspezifische Systeme

- Arora, S.:** *Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging technologies.* In: Journal of Power Sources, Jg. 400, 2018, S. 621–640
- Dubey, P; Pulugundla, G; Srouji, A. K.:** *Direct Comparison of Immersion and Cold-Plate Based Cooling for Automotive Li-Ion Battery Modules.* In: Energies, Jg. 14, 2021, Nr. (5)Nr.
- Gundabattini, E; Mystkowski, A; Idzkowski, A; R., R. S; Solomon, D. G.:** *Thermal Mapping of a High-Speed Electric Motor Used for Traction Applications and Analysis of Various Cooling Methods – A Review.* In: Energies, Jg. 14, 2021, Nr. 5, S. 1472
- Heimes, H; Kampker, A; Mohsseni, A; Maltoni, F; Biederbeck, J.:** *Cell Tab Cooling System for Battery Life Extension.* In: IEEE ITherm Conference, Jg. 18, 2019, S. 1125–1133
- Jaguemont, J; van Mierlo, J.:** *A comprehensive review of future thermal management systems for battery-electrified vehicles.* In: Journal of Energy Storage, Jg. 31, 2020, S. 101551

¹⁵Vgl. Siczek 2019.

- Kim, J; Oh, J; Lee, H.:** *Review on battery thermal management system for electric vehicles.* In: Applied Thermal Engineering, Jg. 149, 2019, S. 192–212
- Lajunen, A; Yang, Y; Emadi, A.:** *Review of Cabin Thermal Management for Electrified Passenger Vehicles.* In: IEEE Trans. Veh. Technol., Jg. 69, 2020, Nr. 6, S. 6025–6040
- Rao, Z; Wang, S.:** *A review of power battery thermal energy management.* In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Jg. 15, 2011, Nr. 9, S. 4554–4571
- Siczek, K. J.:** *Modeling of Batteries: Next-Generation Batteries with Sulfur Cathodes* Elsevier, 2019, S. 201–218
- Wang, Y; Gao, Q; Wang, G; Lu, P; Zhao, M; Bao, W.:** *A review on research status and key technologies of battery thermal management and its enhanced safety.* In: Int J Energy Res, Jg. 42, 2018, Nr. 13, S. 4008–4033
- Wienkötter, M.:** *Die Batterie: Ausgeklügeltes Thermomanagement, 800 Volt Systemspannung,* 04.09.2019a
- Yang, Y; Bilgin, B; Kasprzak, M; Nalakath, S; Sadek, H; Preindl, M; Cotton, J; Schofield, N; Emadi, A.:** *Thermal management of electric machines.* In: IET Electrical Systems in Transportation, Jg. 7, 2017, Nr. 2, S. 104–116
- Zeyen, M. G; Wiebelt, A.:** *Thermisches Management der Batterie.* In: Korthauer, R. (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 165–175

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.



Produktion von elektrofahrzeug-spezifischen Systemen

Die hohen Anschaffungskosten für ein Elektrofahrzeug haben potenzielle Käuferinnen und Käufer in der Vergangenheit äußerst skeptisch gestimmt. Heutzutage sind Elektrofahrzeuge mit Blick auf die Kosten bereits wettbewerbsfähig. Dennoch bemüht sich die Branche um eine weitere Verminderung der Produktionskosten – auch dank verkürzten Produktentwicklungszeiten, wie sie für die Elektromobilität charakteristisch sind. Neue Strukturen in der Wertschöpfungskette sowie grundlegend neue und disruptive Technologien auf Produkt- und Prozessseite bilden indes immense Herausforderungen für eine erfolgreiche und kosteneffiziente Industrialisierung – vor allem in der späteren Phase des klassischen Produktentwicklungszyklus. Kap. 12 zeigt: Zwischen Prototyp und Serienfertigung müssen einige traditionelle methodische Ansätze – beispielsweise das Lieferantenmanagement – neu gedacht werden.

Kap. 13 widmet sich indes den Produktionsprozessen der Fahrzeugstruktur, wonach Kap. 14 die Montage von Elektrofahrzeugen thematisiert. Neben spezifischen Besonderheiten bei der Herstellung des Gesamtfahrzeugs steht anschließend die Produktion der eigentlichen Elektromobilkomponenten im Vordergrund. Sie ist nicht nur durch einen vergleichsweise jungen Erfahrungsstand wie technisch-technologischen Reifegrad gekennzeichnet: Sie bestimmt auch die Gesamtkosten eines elektrifizierten Fahrzeugs. Vor diesem Hintergrund beschreibt Kap. 15, dass die Produktion des Hochvoltspeichers eine signifikante Rolle einnimmt, da sie rund 50 % der Kosten verursacht. Inwiefern neben Hochvoltspeicher und elektrischem Antrieb – vor allem in Nutzfahrzeugen – die Brennstoffzelle als Lösungsbaustein zur Realisierung einer höheren Reichweite betrachtet wird, beleuchtet Kap. 16 im Detail. Anschließend befasst sich Kap. 17 mit den Produktionsverfahren elektrischer Maschinen und Kap. 18 mit den Herstellungsprozessen in der Leistungselektronik von Elektrofahrzeugen.



Vom Prototypen zur Serienfertigung

12

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Benjamin Dorn,
Andreas Kraus und Michael Nankemann

Im Zuge des Industrialisierungsprozesses haben methodische Bausteine eine signifikante Bedeutung erlangt. Diese Bausteine liegen entlang des Produktentwicklungszyklus und sind grundsätzlich unabhängig vom betrachteten Produkt. Mit Blick auf die Elektromobilität gilt es jedoch, während der unterschiedlichen Schritte spezifische Herausforderungen zu adressieren. Anlaufmanagement, Anlaufstrategie und Anlauforganisation beispielsweise erhalten einen besonderen Stellenwert, da Produkt und Prozesse im Rahmen der Elektromobilität von unscharfen Interdependenzen und teils unterschiedlichen technischen Reifegraden charakterisiert sind. Ein weiteres Beispiel bildet das Lieferantenmanagement: Es

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

B. Dorn

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: b.dorn@pem.rwth-aachen.de

A. Kraus (✉)

Senior Expert Data Engineering, PowerCo SE, Salzgitter, Deutschland

E-Mail: a.kraus@pem.rwth-aachen.de

M. Nankemann

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: m.nankemann@pem.rwth-aachen.de

muss die veränderte Wertschöpfungskette innerhalb der Elektromobilität vor allem im Hinblick auf neue Marktteilnehmer – besonders im asiatischen Raum – berücksichtigen. Dieser und weitere methodische Bausteine werden im Folgenden beschrieben.

12.1 Anlaufmanagement

Im Kontext der Automobilindustrie bezeichnet das Anlaufmanagement die Steuerung aller Aktivitäten im Rahmen des Serienanlaufprozesses. Gängige Kriterien zur Abgrenzung des Serienanlaufs vom restlichen Produktentstehungsprozess sind das Entwicklungsstadium des Produkts und die Ziel-Produktionskapazität unter Berücksichtigung definierter Anforderungen an die Prozessstabilität. Der entsprechend durch Produktfreigabe und Serienstückzahl begrenzte Serienanlauf gliedert sich in die drei Bereiche Vorserie, Nullserie und Produktionshochlauf.¹

In der ersten Phase, der Vorserie, liegt der Fokus auf der Problemfrüherkennung, der Prozessverbesserung und der Analyse von Mitarbeiterqualifikationen. Zu diesem Zweck werden seriennahe Prototypen hergestellt; die Bauteilproduktion wird indes nur teilweise durch Serienwerkzeuge realisiert. Die Nullserie ist eine seriennahe Produktion, in der alle verwendeten Teile vollständig definiert sind und den späteren Serienwerkzeugen entstammen. Zusätzlich liegt für alle Komponenten, sowohl eigengefertigte als auch fremdbezogene, eine detaillierte Kostenschätzung vor. Mit der Freigabe für die Serie beginnt der Produktionshochlauf, gekennzeichnet durch den Meilenstein „Start of Production“ (SoP). Beendet ist der Hochlauf erst mit einer stabilen Produktion, mit der die geplanten Stückzahlen unter Serienbedingungen gefertigt werden.² Kennzeichnend für das Anlaufmanagement ist, dass sich mit dem Lauf durch diese drei Phasen das Hauptaugenmerk des Managements verschiebt: Während zu Beginn die Anpassung des Produkts an die Bedürfnisse der Fertigung im Vordergrund steht, rückt mit fortschreitendem Anlauf die Optimierung der Produktionssysteme in den Fokus.³

Die übergeordnete Steuerung der Anläufe erfolgt gemäß der sogenannten Anlaufstrategie, die als standortübergreifende Richtlinie für alle unternehmensinternen Serienanläufe zu verstehen ist. Im Wesentlichen ist die Anlaufstrategie durch die Dimensionen „Flexibilität“, „Komplexität“, „Qualität“ und „Kosten“ geprägt und äußert sich in unterschiedlichen Ausprägungen der Anlaufkurve, welche die Ausbringungsmengen im zeitlichen Verlauf darstellt. Mit ihr wird für alle involvierten Parteien eine Handlungsgrundlage definiert und die Unternehmensstrategie auf jeden Serienanlauf übertragen.⁴ Beispielsweise ist für die strategische Positionierung eines Unternehmens als Technologieführer eine besonders rasche Einführung disruptiver Technologien erforderlich. Mit innovativen Produkten, die in kurzer Zeit zur Marktreife gebracht werden, lassen sich

¹ Vgl. Schmitt 2015, 7–9; Vgl. Nagel 2011, S. 11f.

² Vgl. Burggräf und Schuh 2021, S. 513ff.

³ Vgl. Nagel 2011, S. 14f.

⁴ Vgl. Schmitt 2015, S. 3f; Vgl. Corsten et al. 2018, S. 540.

nachhaltige Wettbewerbsvorteile etablieren, auch „Pioniergewinne“ genannt. In der Vergangenheit haben vor allem deutsche Automobilhersteller häufig einen solchen „First-Mover“-Strategieansatz verfolgt. Nach anfänglicher Zurückhaltung ist dies auch im Bereich der Elektromobilität der Fall. Zu beobachten ist das unter anderem an Investments in Milliardenhöhe durch die OEMs. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Investitionen konzentriert sich auf den Aufbau neuer Produktionsstrukturen – mit dem Ziel, die eigene Wertschöpfungstiefe im Bereich der Elektromobilität mit innovativen Produktionskonzepten weiter auszubauen. Allerdings stehen die OEMs und automobiler Zulieferer bei diesem Wandel in einem hart umkämpften Markt und auch aufgrund gesetzlicher Vorgaben unter einem nie dagewesenen Zeitdruck. Gleichzeitig bleiben die hohen Ansprüche an die Qualität der Produktionsprozesse in der Automobilindustrie bestehen. Entsprechend ambitionierte Ziele für Produktionsanläufe müssen aus Gründen der Wirtschaftlichkeit unter möglichst geringem Mitteleinsatz erreicht werden. Aufgrund dieses Zielkonflikts ist eine integrierte Betrachtung der drei Dimensionen „Zeit“, „Qualität“ und „Kosten“ im Rahmen einer auf Wettbewerbsfähigkeit ausgerichteten Anlaufstrategie unerlässlich.⁵ Dabei sind vor- und nachgelagerte Entwicklungs- und Produktionsprozesse funktionsübergreifend zu koordinieren und die Anschlussfähigkeit der Funktionen und Bereiche weiterer Produktionsstandorte und beteiligter Unternehmen sicherzustellen.

Mit Beginn des Serienanlaufs werden erstmalig alle am Produktentstehungsprozess beteiligten Bereiche und Akteure zusammengeführt. Um erhebliche Reibungsverluste bei der funktions- und unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit zu verringern, erfolgt die Abstimmung zwischen den einzelnen Schnittstellen durch eine übergeordnete Instanz, die sogenannte Anlauforganisation. Eine Anlauforganisation kann auf unterschiedliche Art und Weise umgesetzt werden, die von den Eigenschaften des jeweiligen Unternehmens und den übrigen Rahmenbedingungen abhängig ist. Dabei wird zwischen temporär aufgestellten Anlauf-Teams und eigenständigen Funktionseinheiten unterschieden. In beiden Fällen handelt es sich um interdisziplinär zusammengesetzte Teams aus unterschiedlichen Funktionsbereichen des Unternehmens.⁶ Die in dem Team oder der Funktionseinheit gebündelte fachliche und methodische Kompetenz unterstützt bei der effizienten Lösung auftretender Probleme. In der Vergangenheit wurden Anlauforganisationen bei Automobilherstellern meist in Form eigenständiger Einheiten strukturiert. In diesen Anlauforganisationen ließen sich Erfahrungen und Erkenntnisse aus zahlreichen Anläufen bündeln und langfristig sichern.⁷ Sehr kurze Anlaufzeiten in immer kürzeren Abständen waren die Folge dieser kontinuierlichen Optimierung. Der Fortsetzung dieser Erfolgsgeschichte in der Automobilindustrie steht, neben den übrigen Herausforderungen einer digitalisierten und immer stärker vernetzten Welt, die radikale Umstellung auf eine neue Antriebstechnologie gegenüber. Das Funktionsprinzip batterieelektrischer Antriebe bringt zahlreiche ungelöste technische

⁵Vgl. Schuh et al. 2008, S. 19.

⁶Vgl. Schmitt et al. 2018, S. 219.

⁷Vgl. Schuh et al. 2008, S. 30.

Fragestellungen mit sich, zu deren Lösung nicht auf bestehende Kompetenzen zurückgegriffen werden kann. Zusätzlich zur fachlichen Neuausrichtung sind dank der erheblich geringeren Anzahl verbauter Komponenten strukturelle Veränderungen notwendig. Je nach gewählter Wertschöpfungstiefe verringert sich die Anzahl der zu produzierenden Teile mehr oder weniger drastisch, so dass die Größe der Funktionseinheiten ebenfalls reduziert werden muss. Innerhalb dieser Einheiten gilt es jedoch, die verschiedenen Bereiche des Unternehmens stärker als zuvor miteinander zu verbinden.⁸ Eine intensive interdisziplinäre Zusammenarbeit ist eine zwingende Voraussetzung, um innovative Ansätze wie etwa die „Cell-to-Chassis“-Technologie umsetzen zu können. Vor dem Hintergrund dieser Entwicklungen könnte die erhöhte Flexibilität der Anlauforganisation in den Fokus rücken.

Innerhalb der Anlauforganisation sind zwei Organisationselemente zu definieren. Eines davon ist eine räumliche und formale Einordnung der Bereiche des Serienanlaufs in Form einer Aufbauorganisation. Daneben werden im Rahmen der Ablauforganisation die zeitlichen und logischen Beziehungen der einzelnen Bereiche herausgestellt.⁹ Während die Aufbauorganisation die strukturellen Rahmenbedingungen festhält, legt die Ablauforganisation die Arbeits- und Informationsprozesse anhand standardisierter Regelwerke und Methoden wie dem Gateway-Konzept fest. Darin werden die jeweils wichtigsten Phasen und Meilensteine definiert und allen Anlaufbeteiligten eindeutige Verantwortlichkeiten und Arbeitsumfänge zugewiesen. Ohne eine klar definierte Anlauforganisation und -struktur sind Verantwortlichkeiten, Rollenverständnisse und Schnittstellen unzureichend geregelt – mit Ressourcenkonflikten und mangelnder Kompetenz als Folge. Insbesondere im Kontext der Ablauforganisation ergeben sich aus dem Wandel zur Elektromobilität neue Herausforderungen. Während bei Anläufen zur Produktion von Verbrennungsmotoren aus jahrelanger Erfahrung der Umfang eines jeden Arbeitspakets präzise beschrieben werden konnte, ergeben sich bei der Produktion von Elektromotoren immer wieder unbekannte, neue Herausforderungen. Die erforderliche Lösung unerwarteter Probleme stört die Abläufe und beeinträchtigt die Planungssicherheit.

12.2 Lieferantenmanagement

Das Lieferantenmanagement wird als wesentliches Handlungsfeld des Beschaffungsmanagements betrachtet und ist zentral für die Erreichung der Qualitäts-, Zeit- und Kostenziele des Anlaufmanagements.¹⁰ Vor allem in der Elektromobilproduktion ist dieser Aufgabe große Bedeutung beizumessen, da dort eine starke Verschiebung der Wertschöpfung zu den Lieferanten zu beobachten ist.¹¹ Bei zentralen Komponenten wie Batterie und Motor handelt es sich oft um Eigenentwicklungen der Zulieferer, so dass die Differenzierung vom Wettbewerb des OEM zunehmend über Produkteigenschaften erfolgt, die maß-

⁸Vgl. Burggräf und Schuh 2021, S. 500.

⁹Vgl. Schmitt 2015, S. 4.

¹⁰Vgl. Helmold und Terry 2016, S. 1.

¹¹Vgl. Göpfert et al. 2017, S. 431.

geblich durch das Know-how des Lieferanten geprägt werden.¹² Der OEM wird vermehrt zu einer koordinierenden Instanz in einem abteilungs- und funktionsgrenzüberschreitenden Netzwerk unterschiedlicher Partner.

Besonders bei der Einführung neuer Produkt- und Produktionstechnologien, die im Kontext der Elektromobilität zwingend und in großem Ausmaß erforderlich ist, entscheidet die frühzeitige Identifikation geeigneter Partner und deren Integration in das eigene Produktionsnetzwerk über den wirtschaftlichen Erfolg.¹³ Wesentliche Schritte im Lieferantenmanagement sind die Definition geeigneter Kriterien zur Klassifizierung und Auswahl der Lieferanten sowie die Messung der diesbezüglichen Leistungsfähigkeit der Lieferanten. Gleichzeitig ist es Aufgabe des Lieferantenmanagements, im Sinne der Lieferantenentwicklung deren Performance durch einen kontinuierlichen Optimierungsprozess zu steigern. Eine tiefgreifende Integration der Lieferanten in die Abläufe und Strukturen des eigenen Unternehmens ermöglicht eine effiziente Kooperation der beteiligten Betriebe.¹⁴ Diesem Umstand kommt im Zuge der Elektrifizierung der Mobilität eine besondere Bedeutung zu, da von Grund auf neu entwickelte Produktionssysteme und -linien zur Serienfertigung von Batteriesystemen und Elektromotoren benötigt werden. Das für den Aufbau dieser Linien erforderliche Know-how ist wertschöpfungskettenübergreifend noch nicht in ausreichendem Maß vorhanden. Dementsprechend ist eine intensive Abstimmung bei der Entwicklungsarbeit zur Identifikation produktionstechnischer Limitationen oder produktseitiger Auswirkungen von Prozessänderungen unabdingbar.

12.3 Logistikmanagement

Eng mit dem Lieferantenmanagement ist das Management der standortinternen sowie produktionsnetzwerkübergreifenden Logistik verbunden. Die Logistik gilt gemeinhin als zentrale Instanz zur Koordination der Produktions- und Prozessabläufe eines produzierenden Unternehmens mit dem übergeordneten Ziel, den Güterfluss zum Kunden sicherzustellen.¹⁵ Wesentliche Herausforderung dabei ist es, die aus gegebenen Restriktionen resultierenden Zielkonflikte zwischen den Interessen der definierten Bereiche und beteiligten Parteien aufzulösen. Ein erfolgreiches Logistikmanagement erfordert insbesondere im Anlauf einer Serienproduktion eine ganzheitliche Berücksichtigung der Belange der Logistik während des gesamten Produktentstehungsprozesses. Planungsfehler, die entweder nicht oder nur durch erheblichen Mitteleinsatz korrigiert werden können, gilt es durch einen regen Informationsaustausch zwischen Prozess- und Produktentwicklung in allen Phasen der Produktentwicklung zu vermeiden. Wichtige Aspekte sind dabei unter

¹²Vgl. Wellbrock und Ludin 2019, S. 83.

¹³Vgl. Helmold 2021, S. 16.

¹⁴Vgl. Helmold 2021, S. 53.

¹⁵Vgl. Pfohl 2021, S. 4f.

anderem eine logistikgerechte Fabrikplanung und das Management von Komplexität in der Produktentwicklung.¹⁶ Im automobilen Umfeld kommen standardisierte Logistikkonzepte zum Einsatz, die im Wesentlichen der Komplexitätsreduktion dienen sollen.¹⁷ Die Elektromobilität stellt diese für historisch gewachsene Produktionsnetzwerke optimierten Systeme vor neue Herausforderungen. So führt die mangelnde Verfügbarkeit wesentlicher Rohstoffe und zentraler Komponenten vermehrt zu Störungen des Produktionsablaufs, mit erheblichen Konsequenzen für die Effizienz der logistischen Prozesse. Dies wird anhand der Kenngröße „Logistikleistung“ messbar gemacht, unter anderem definiert als der „Beitrag zur Sicherstellung der Verfügbarkeit im Unternehmen benötigter Ressourcen“ sowie Logistikkosten.¹⁸

12.4 Produktionsmanagement

Neuartige Produkte, nicht ausgereifte Prozesse und eine derzeit unsichere Nachfrage nach Elektrofahrzeugen stellen die Produktion von Elektromobilkomponenten vor große Herausforderungen hinsichtlich Effizienz und Flexibilität. In diesem Spannungsfeld bestehen die Hauptaufgaben des Produktionsmanagements in der Planung, Überwachung und Steuerung aller betrieblichen Ressourcen im Produktionsumfeld.¹⁹ Das Ziel des Produktionsmanagements besteht darin, die Herstellung der Elektromobilkomponenten – unter Berücksichtigung der erforderlichen Produktqualität und -quantität – zu einem vorab festgelegten Zeitpunkt zu gewährleisten.²⁰ Da die Elektrofahrzeug-Nachfrage mit Blick sowohl auf die Stückzahl als auch auf Varianten nach wie vor ungewiss ist, muss außerdem ein hohes Maß an Flexibilität sichergestellt werden (siehe Abschn. 12.5). Auf der Produktseite besitzen Elektromotoren eine deutlich geringere Komplexität im Vergleich zu Verbrennungsmotoren. Dieser produktseitige Vorteil wird jedoch durch die wesentlich geringeren Erfahrungswerte im Bereich der Produktionsprozesse von elektrischen Traktionsmotoren teilweise überkompensiert. Dadurch sind insbesondere Anlaufphasen neuartiger Produktvarianten häufig geprägt von geringen Gesamtanlagen-Effektivitäten, unzureichenden Produktqualitäten und entsprechend hohen Ausschussraten (siehe Abschn. 12.1). Dieselben Herausforderungen sind derzeit im Rahmen der Batterieproduktion zu beobachten, die durch den hohen Wettbewerbsdruck in diesem Segment noch zusätzlich verstärkt werden.²¹

¹⁶Vgl. Klug 2018, S. 45.

¹⁷Vgl. Klug 2018, S. 74.

¹⁸Vgl. Weber 2018, S. 1.

¹⁹Vgl. Schuh und Schmidt 2014, S. 1f.

²⁰Vgl. Schuh und Schmidt 2014, S. 1f.

²¹Vgl. BMWi 2021.

12.5 Änderungsmanagement

Die Anpassungsfähigkeit bestehender Produktionslinien gewinnt durch die technologische Schnelllebigkeit und die daraus resultierenden stetig kürzer werdenden Produktlebenszyklen immer mehr an Bedeutung. Insbesondere in dynamischen Umfeldern wie der Elektromobilproduktion ist dies seit einigen Jahren zu beobachten.²² Die Hauptaufgabe des Änderungsmanagements besteht darin, nachträgliche Anpassungen verbindlich festgelegter und bereits freigegebener Arbeitsinhalte im Produktionsumfeld vorzunehmen. Übergeordnetes Ziel ist es dabei, diese Aufgabe möglichst zeit- und kosteneffizient zu realisieren und damit die Einhaltung sowohl der Termintreue als auch des Kostenrahmens zu gewährleisten. Dazu muss die Anpassungsfähigkeit des Produktionssystems von der Makroebene (etwa das Produktionslayout samt Ausbaustufen) bis zur Mikroebene (beispielsweise die Flexibilität im Vorrichtungsbau) frühzeitig berücksichtigt werden. Änderungen in den ersten Phasen des Produktentstehungsprozesses besitzen in der Regel den geringsten Anpassungsaufwand hinsichtlich Zeit und Kosten, während Änderungen in der Konstruktionsphase oder sogar während der Serienproduktion einen deutlich höheren Aufwand mit sich bringen. Der genaue Aufwand ist dabei stark von der Art und dem Umfang der Änderung abhängig. Produkt- oder prozessseitige Änderungen entlang des Produktentstehungsprozesses sind dabei nicht nur als Störgröße, sondern auch als Potenzial für kontinuierliche Verbesserung zu betrachten, da Änderungen teilweise zu Qualitätssteigerungen oder zur Zeit- und Kostenreduktion führen können.²³ Es geht also darum, ein geeignetes Änderungsmanagement zu etablieren, um auf die Anpassungen zielgerichtet und effizient reagieren zu können.

12.6 Kostenmanagement

Kosten bilden neben den beiden Größen „Zeit“ und „Qualität“ eine wichtige Dimension des klassischen Zieldreiecks, da Kosten unmittelbaren Einfluss auf die Gewinnmarge des Produkts und somit auch auf die Profitabilität und die Konkurrenzfähigkeit des Unternehmens haben. Die Hauptaufgabe des Kostenmanagements besteht sowohl in der Identifikation von Kostentreibern als auch in der Kostenplanung sowie -steuerung entlang des gesamten Produktentstehungsprozesses.²⁴ In diesem Kontext sind insbesondere Fehlerfolgekosten zu vermeiden, die in der Regel einen stark negativen Einfluss auf die Gesamtkostenbilanz eines Produkts besitzen. Steht ein Produkt kurz vor seiner Herstellung, sind rund 95 % seiner Kosten festgelegt, so dass sich eine Beseitigung von Ausgaben zu diesem späten Zeitpunkt als äußerst schwierig erweist (zum Vergleich: bei abgeschlossener Entwicklung eines Produkts stehen 80 % der Kosten fest). Die tiefgreifendste Konsequenz im

²²Vgl. Schuh et al. 2008, S. 215f.

²³Vgl. Schuh et al. 2008, S. 215f.

²⁴Vgl. Stölzle et al. 2005.

Rahmen des Kostenmanagements besteht darin, dass 60 % der kumulativen Lebenszykluskosten eines Produkts bereits während der Konzeptphase festgelegt werden.²⁵ Zur möglichst frühzeitigen Erkennung produkt- sowie produktionsseitiger Kostentreiber und zur Vermeidung von Fehlerfolgekosten existiert eine Auswahl verschiedener Methoden. Eine weitverbreitete Methode zu Beginn des Produktentstehungsprozesses bildet das „Design for Manufacturing and Assembly“ (DFMA). Durch diese Methode werden Unternehmen in die Lage versetzt, schnell und kostengünstig hochwertige Produkte zu entwickeln und herzustellen, indem Fehlerfolgekosten vermieden werden.²⁶ Zu Beginn einer Serienproduktion wird außerdem häufig eine virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) der Produktionsanlagen vorgenommen,²⁷ durch die potenzielle Probleme bereits vor der realen Inbetriebnahme erkannt und entsprechende Lösungsansätze entwickelt werden können. Für die Elektromobilproduktion spielen die Kosten eine äußerst bedeutsame Rolle, um sich im Wettbewerb mit der konventionellen Automobilproduktion zu etablieren. Maßgeblicher Kostentreiber ist dabei weiterhin die Traktionsbatterie.

Literatur

Teil III: Produktion von elektrofahrzeugspezifischen Systemen

Blokdyk, G.: *Design For Manufacturability. A Complete Guide*, 2019

BMW: *Batterien für die Mobilität von morgen. Innovationen und Investitionen entlang der Wertschöpfungskette für Batterien der neuesten Generation schaffen die Grundlage für die Sicherung von Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung.* <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/batteriezellfertigung.html>. Abruf 01.06.2022

Boothroyd, G; Dewhurst, P; Knight, W. A.: *Product design for manufacture and assembly* (Manufacturing engineering and materials processing, 74). Third edition Aufl. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2011

Burggräf, P; Schuh, G.: *Fabrikplanung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021

Corsten, H; Gössinger, R; Spengler, T. S. (Hrsg.): *Handbuch Produktions- und Logistikmanagement in Wertschöpfungsnetzwerken*. De Gruyter Handbook, München, Wien: De Gruyter Oldenbourg, 2018

Göpfert, I; Braun, D; Schulz, M.: *Automobillogistik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017

Helmold, M.: *Innovatives Lieferantenmanagement*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021

Helmold, M; Terry, B.: *Lieferantenmanagement 2030*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016

Klug, F.: *Logistikmanagement in der Automobilindustrie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018

²⁵ Vgl. Blokdyk 2019.

²⁶ Vgl. Boothroyd et al. 2011.

²⁷ Vgl. VDMA 2020, S. 4ff.

- Nagel, J.:** *Risikoorientiertes Anlaufmanagement* (Beiträge zur Produktionswirtschaft). 1. Aufl. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2011. Zugl.: Cottbus, Brandenburgische Techn. Univ., Diss., 2010
- Pfohl, H.-C.:** *Logistikmanagement*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021
- Schmitt, R.:** *Anlaufmanagement – Begriffe und Definitionen. Begriffe und Definitionen*. Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag, 2015
- Schmitt, R.; Heine, I.; Jiang, R.; Giedziella, F.; Basse, F.; Voet, H.; Lu, S.:** *On the future of ramp-up management*. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Jg. 23, 2018, S. 217–225
- Schuh, G.; Schmidt, C. (Hrsg.):** *Produktionsmanagement. Handbuch Produktion und Management* 5. VDI-Buch. 2. Aufl. Aufl., Berlin: Springer Vieweg, 2014
- Schuh, G.; Stölzle, W.; Straube, F. (Hrsg.):** *Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008
- Schuh, G.; Stölzle, W.; Straube, F. (Hrsg.):** *Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen. Ein Leitfaden für die Praxis*. VDI-Buch, Berlin, Heidelberg: Springer, 2008
- Stölzle, W.; Hofmann, E.; Hofer, F. (Hrsg.):** *Supply Chain Costing: Konzeptionelle Grundlagen und ausgewählte Instrumente. Prozesse optimieren, Berichtswesen anpassen, Kosten senken*, 8, Wiesbaden: Gabler Verlag, 2005
- VDMA:** *Leitfaden Virtuelle Inbetriebnahme. Handlungsempfehlungen zum wirtschaftlichen Einstieg*. https://industrie40.vdma.org/documents/4214230/57246917/VDMA_Leitfaden_VIBN_1607503338494.pdf/c6b632a6-ebc2-113e-5753-073e4b28eb34
- Weber, J.:** *Logistikleistung – Definition*. In: Gabler Wirtschaftslexikon 2018.
- Wellbrock, W.; Ludin, D.:** *Nachhaltiges Beschaffungsmanagement*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Benjamin Dorn,
Mario Kehrer, Simon Dünwald, Dennis Badura,
Maximilian Terren und Thilo Röth

Heutzutage ist die Flexibilität und Anpassung von Produktionssystemen in Abhängigkeit von der Stückzahl ein zunehmend wichtiger Bestandteil im Herstellungsprozess. Insbesondere der Trend zu neuen Antriebstechnologien und der Wandel weg vom klassischen

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

B. Dorn (✉) · M. Kehrer

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: b.dorn@pem.rwth-aachen.de; m.kehrer@pem.rwth-aachen.de

S. Dünwald

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: s.duennwald@pem.rwth-aachen.de

D. Badura

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: d.badura@pem.rwth-aachen.de

M. Terren

Projektleiter, Fensterbau Mersch, Sankt-Vith, Belgien

T. Röth

Geschäftsführer, ACA-Invest GmbH, Aachen, Deutschland

E-Mail: roeth@fh-aachen.de

Verbrennungsmotor zielen auf zunächst kleinserielle oder prototypische Produktionsmengen. Dabei sind niedrige Herstellungskosten seitens der industriellen Produzenten wünschenswert. Herstellungsverfahren gleicher Komponenten können aus wirtschaftlicher Sicht je nach Losgröße stark variieren. Ein Verfahren für Großserien eignet sich keinesfalls für eine Prototypenproduktion. Zudem führen die heutigen Entwicklungen zu produktspezifischen Anforderungen, die mit den Standard-Produktionsverfahren nicht effizient realisierbar sind. In Verbindung mit „Industrie 4.0“-Ansätzen wird eine flexiblere Produktionsplanung mit den entsprechend optimalen Herstellungsverfahren erwartet.¹ Dabei treten als Fertigungsverfahren im Automobilbereich die Kunststoff- und die Metall-Teileproduktionen in den Vordergrund. Die Wahl des richtigen Herstellungsverfahrens erfordert eine effiziente Bewertung der Produktionsmenge. Das Hauptaugenmerk liegt dabei zunächst bei der Produktionsplanung auf der Außenhautkomponente und ihrer Stückzahl, woraufhin die weiterführenden Kostenbilanzierungen für ein bestimmtes Szenario folgen. Daraus ergibt sich eine angepasste Produktionsplanung, die es erlaubt, eine Aussage über ein geeignetes Herstellungsverfahren zu treffen. Im Fokus der Kunststoff-Teileproduktionen stehen in Abhängigkeit von der Stückzahl das Handlaminieren, das Thermoformen, das Spritzgießen und das SMC-Pressen. Die metallischen Verarbeitungswerkstoffe erfordern ebenfalls eine Analyse des Herstellungsszenarios für die Komponentenproduktion, weil hier eine vielfältige Auswahl von Verarbeitungstechniken zur Verfügung steht. Von besonderer Relevanz sind die Baugruppen Vierkant-Hohlprofil, Stirnwand, Space-Frame-Knoten und Federbeinaufnahmen. Neben dem eigentlichen Herstellungsverfahren liegt im Fügen von Außenhaut und Karosserie eine weitere Herausforderung. Die wesentlichen Anforderungen – so wie die Verbindung von Elementen mit unterschiedlichen Materialeigenschaften – bedürfen verschiedener Lösungen. Automobilhersteller streben dabei unter anderem Gewichtsreduktionen bei gleichzeitig hoher Leistungsfähigkeit an, was zu weiteren Eingrenzungen führt. Das Fügen von Außenhaut und Karosserie benötigt somit Verfahren, die über die etablierten Methoden wie Laserschweißen und Widerstandsschweißen hinausgehen. Auf ebendiese – beispielsweise Kleben, Löten und mechanische Verfahren – wird im vorliegenden Kapitel ebenfalls näher eingegangen. Ein Fokus liegt dabei auf der Produktion von Elektromobilmfahrzeugen und deren Fügemethoden.

13.1 Stückzahlsspezifische Produktionsverfahren der Außenhautkomponenten

Im Zuge des Aufschwungs der Elektromobilität haben sich viele neue Fahrzeughersteller und Start-up-Unternehmen gegründet. Aufgrund der geringen Stückzahl der produzierten Fahrzeuge haben prototypische Produktionsverfahren der Außenhautkomponenten eine Daseinsberechtigung, um die (Werkzeug-)Kosten möglichst gering zu halten. Im

¹Vgl. Russack und Jerrentrup 2019, S. 6.

Folgenden sollen daher die technischen Fertigungsverfahren entlang definierter Außenhautkomponenten beleuchtet werden.

Um einen effizienten Ablauf der Herstellung gewichtsoptimierter, einzelner Fahrzeugkomponenten zu schaffen, sind Produktionsverfahren vorzusehen, die der zugrundeliegenden jährlichen Bedarfsmenge an Teilen angemessen sind. Beginnend bei Verfahren für prototypische Produktionsmengen bis hin zu industriellen Großserien kann die Prozesstechnologie bei der Herstellung gleicher Komponenten erheblich schwanken. Um herauszufinden, welche Produktionstechnologie idealerweise für eine definierte jährliche Menge von Werkstücken genutzt werden sollte, kann daher die zu erwartende Stückzahl einer Außenhautkomponente – etwa in Bezug auf die Absatzprognose eines Elektrofahrzeugs, das diese Komponente nutzt – herangezogen werden. Im Zuge der Beschaffung eines passenden Herstellungsprozesses sollten dann anlagenseitige Anschaffungskosten, Energie- und Emissionsaufwände sowie Modularität und Flexibilität des Prozesses insbesondere bei stückzahlabhängigen Schwankungen und technologischen Weiterentwicklungen, Rüstzeiten sowie Wartungs- und Betriebskosten für das vorab definierte Szenario der Produktion bilanziert werden. Auch die Fragen nach dem Grad der Automatisierung und der Digitalisierung des Prozesses und die damit verbundenen Investitionen haben in den vergangenen Jahren abermals erheblich an Bedeutung bei der Erörterung eines geeigneten Produktionsverfahrens gewonnen.^{2,3}

Im Folgenden werden daher die stückzahlspezifischen Produktionsverfahren zur Herstellung der Außenhaut eines Elektrofahrzeug-Vorderwagens kurz vorgestellt:

13.1.1 Stückzahlabhängige Produktionsverfahren auf Basis von Kunststoffwerkstoffen

Beim Verarbeitungswerkstoff Kunststoff sind die Verfahren Handlaminieren, Thermoformen, Spritzgießen und SMC-Pressen gängige Produktionstechniken industriell hergestellter Außenhautkomponenten. Die vorgestellten Verfahren unterscheiden sich dabei deutlich in ihrer Eignung in Bezug auf die Stückzahlabhängigkeit der Komponentenproduktion. Abb. 13.1 zeigt eine Gegenüberstellung dieser Herstellungsverfahren für unterschiedliche Mengen von Kunststoffteilen.

Für eine Produktion von bis zu 220 Komponenten eines Kunststoffteils pro Jahr stellt das Handlaminieren die wirtschaftlichste Produktionsmethode dar. Stückzahlen im Bereich von 220 bis 67.000 sind mit Hilfe des Thermoformens herzustellen. Zwischen 67.000 und 110.000 sollten die Karosseriekomponenten mittels Spritzgießverfahren gefertigt werden. Ab einer Stückzahl von 110.000 bis 190.000 Teilen werden die Komponenten auf verschiedenen Produktionsanlagen hergestellt. Stoßfänger werden dabei mit Hilfe des

²Vgl. Kampker et al. 2018.

³Vgl. ten Hompel et al. 2020.

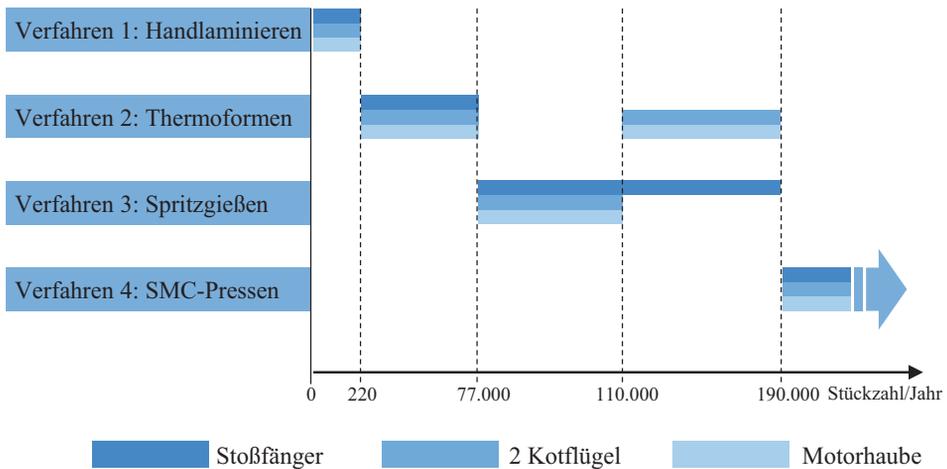


Abb. 13.1 Stückzahloptimierte Kunststoff-Teileproduktion. (Vgl. Kampker et al. 2018)

Spritzgießverfahrens und Kotflügel sowie Motorhauben mit dem Thermoformverfahren gefertigt. Ab 190.000 Werkstücken pro Jahr bietet es sich für alle hier benannten Außenhautkomponenten an, auf die Technik des SMC-Pressens zurückzugreifen.⁴

13.1.2 Die technischen Verfahren der Kunststoff-Teileproduktion in der Übersicht

Handlaminiere

Das Handlaminiere stellt das älteste Herstellungsverfahren für die Verarbeitung von glasfaserverstärkten duroplastischen Kunststoffen (GFK) dar. Die Methode wird manuell umgesetzt, indem Harz mit definiert gelegten Textilglasverstärkungen – etwa Matten, Gewebe – zumeist in eine Negativform gegeben wird. Durch die Reaktion von dem im Harz enthaltenen Bindemittel und Härter kommt es zur Aushärtung des Kunststoffwerkstücks. Insbesondere für prototypische Anwendungen sowie Klein- und Spezialserien in der Elektromobilität zeichnet sich das Handlaminiere durch die relativ geringen Investitions- und Werkzeugaufwände aus.^{5,6,7}

Thermoformen

Das Thermo- oder Warmformen ist ein Verarbeitungsverfahren, das auf einer hitzebedingten Umformung sogenannter thermoplastischer Kunststoffe basiert. Durch die Unterstützung eines anliegenden Vakuums oder von Druckluft wird das auf die Umformtemperatur

⁴Vgl. Kampker et al. 2018.

⁵Vgl. Kampker et al. 2018.

⁶Vgl. ten Hompel et al. 2020.

⁷Vgl. Bonnet 2016.

vorgewärmte Werkstück mittels einer entsprechenden Form – ähnlich dem metallischen Tiefziehprozess – auf definierte Dimensionen gezogen. Dabei nimmt die ursprüngliche Dicke des Werkstücks ab, da es zu einer Flächenausdehnung ohne Materialnachschiebung kommt. Um die korrekten Materialstärken an allen Stellen des Werkstücks zu gewährleisten, müssen das Rohvolumen sowie die Fließfähigkeit des Kunststoffes im erarbeiteten thermoplastischen Verfahrensschritt vorab exakt bestimmt werden. Das Thermoformen zeichnet sich durch geringe Fixkosten aus, die sich im Wesentlichen aus den Investitionskosten der Maschinen und Werkzeuge zusammensetzen. Das Verfahren eignet sich für mittlere bis – je nach Komponentenkomplexität – hohe Stückzahlen von Werkteilen pro Jahr.^{8,9}

Spritzgießen

Zur Herstellung von Kunststoffelementen kann auch das sogenannte Spritzgießen genutzt werden. Hierzu wird zumeist ein Kunststoffgranulat geschmolzen und unter Hochdruck in eine Werkzeugform eingeführt. Der Hohlraum oder auch als Kavität bezeichnete Zwischenraum der Spritzgussform definiert die Form des späteren Kunststoffwerkstücks. Das in der Kavität in seiner finalen Form wiedererstarrende Werkstück kann hiernach entnommen werden. Gegebenenfalls abstehende Kanten, meist im Bereich der die Form befüllenden Zugänge, können im Anschluss nachgearbeitet werden. Das Spritzgießen eignet sich gut für mittlere bis große Produktionsmengen von längerfristig gleichbleibenden Bauteilen und kann nahezu vollautomatisiert betrieben werden. Eines der bekanntesten Produkte dieser Herstellungsart ist beispielsweise der Lego-Block. Wegen der hohen Investitionskosten für die metallischen Formwerkzeuge ist das Verfahren bei regelmäßigen geometrischen Veränderungen am Bauteil jedoch zumeist ungeeignet.^{10,11}

SMC-Pressen

Beim „Sheet-Molding-Compound“ (SMC)-Pressen werden zumeist teigartige Halbzeugmatten aus duroplastischen Reaktionsharzen und Glasfasern zur Herstellung eines Kunststoffwerkstücks genutzt. Die vorgefertigten SMC-Matten sind vor dem eigentlichen Pressverfahren so vorbereitet, dass sie unter Druck mit Hilfe metallischer Formwerkzeuge unter Fließpressen zum fertigen Bauteil verarbeitet werden können. Da die Investition in die Anlagentechnik des Verfahrens relativ hoch ist, wird der Prozess erst bei hohen Stückzahlen wirtschaftlich. Dabei profitiert das Verfahren jedoch davon, dass relativ komplexe Strukturen sowie Zusatzapplikationen an einem Werkstück bereits in einem Arbeitsschritt umgesetzt werden können, was die Herstellungszeit für das einzelne Werkstück verringert. Außerdem zeichnet sich das Verfahren durch einen hohen Automatisierungsgrad aus.^{12,13}

⁸Vgl. Kampker et al. 2018.

⁹Vgl. Bonnet 2016.

¹⁰Vgl. Kampker et al. 2018.

¹¹Vgl. Bonnet 2016.

¹²Vgl. Kampker et al. 2018.

¹³Vgl. Bonnet 2016.

13.1.3 Stückzahlabhängige Produktionsverfahren auf Basis von Metallen

Ebenso wie bei der Verarbeitung von Fahrzeugkomponenten aus Kunststoff sind auch bei der Verarbeitung von metallischen Ausgangsstoffen zu finalen Werkstücken verschiedene stückzahlabhängige Produktionsverfahren industriell etabliert. Auch hier muss die Wahl der geeigneten Produktionstechnik auf das geplante Herstellungsszenario abgestimmt sein.

Im Folgenden sollen dazu die Baugruppen Vierkant-Hohlprofil, Stirnwand, Space-Frame-Knoten und Federbeinaufnahmen nach ihren gängigen Herstellungsprozessen vorgestellt werden.

13.1.4 Vierkant-Hohlprofil-Herstellung

Abb. 13.2 zeigt die gängigen Herstellungsverfahren für die mengenabhängige Produktion von Vierkant-Hohlprofilen.

Vierkant-Hohlprofile werden beim elektrischen Fahrzeug beispielsweise als Seitenaufprallschutz genutzt und bestehen meist aus Stahl oder Aluminium. Für den Werkstoff Stahl hat sich bis zu einer Stückzahl von 160.000 Teilen im Jahr mit einer Länge von 1 m das Gesenkbiegeverfahren als wirtschaftlich herausgestellt. Ab 160.000 Teilen pro Jahr wird bei Stahl dann meist das Profilwalzverfahren genutzt. Bei Aluminium bietet es sich ab einer Produktionsmenge von 800.000 Werkstücken pro Jahr an, das Strangpressverfahren zu nutzen.¹⁴

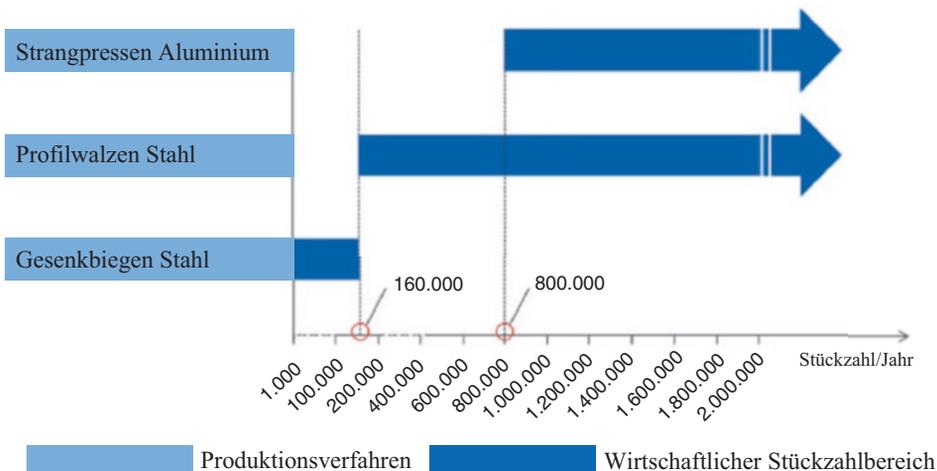


Abb. 13.2 Stückzahloptimiertes Produktionsprogramm von Vierkant-Hohlprofilen. (Vgl. Kampker et al. 2018)

¹⁴Vgl. Kampker et al. 2018.

13.1.5 Die technischen Verfahren der Vierkant-Hohlprofil-Herstellung in der Übersicht

Gesenkbiegen

Gesenkbiegen, ebenso wie das Freibiegen, gehören zu den am häufigsten eingesetzten Biegeverfahren für metallische Werkstoffe. Das Gesenkbiegen ist dabei fest mit dem Freibiegen verbunden, da dem Gesenkbiegen stets eine Phase des Freibiegens vorangeht. Beim umformenden Prozess wird das zu verbiegende Blech in ein entsprechendes Gesenk eingelegt. Danach bringt ein Stempel eine definierte lokale Kraft von oben auf das Blech auf, sodass das Werkstück in das Gesenk gedrückt wird. Dadurch kommt es zu einer definierten Verformung.

Mit Hilfe des Gesenkbiegens lassen sich auf diese Weise beispielsweise U-Profile herstellen. Um daraus im Anschluss ein Vierkant-Hohlprofil zu produzieren, ist immer ein weiterer Verarbeitungsschritt notwendig, in dem die beiden Halbzeuge miteinander zum fertigen Produkt verschweißt werden. Diese Faktoren machen das Verfahren einerseits günstig und flexibel, zeigen andererseits jedoch Schwächen, wenn große Mengen von Werkstücken produziert werden sollen.^{15,16}

Profilwalzen

Das Profilwalzen ist eine untergeordnete Rubrik des Walzens. Das Verfahren basiert auf einer durch die Werkzeuge (Walzen) druckbedingten Verformung des Werkstücks. Durch die Kombination mehrerer Walzen und eines sogenannten Dorns, der das Walzgut zur Mitte hin durchdringt, können schon beim Profilwalzen runde Rohre und auch Vierkantrohre hergestellt werden. Abb. 13.3 zeigt die exemplarische Herstellung eines Rohres im Mannesmann-Verfahren.

Das Verfahren, das eine erhöhte Maschinenkomplexität aufweist, ermöglicht durch Vereinzeln des aus der Umformmaschine laufenden Endlos-Werkstücks einen deutlich erhöhten Produktionsdurchsatz. Im Gegensatz zum Gesenkbiegen muss bei diesem Fertigungsverfahren nur noch eine Verschweißung – statt zwei – zur Herstellung eines Vierkant-Hohlprofils umgesetzt werden.^{17,18}

Strangpressen

In einer weiteren Variante zur Herstellung eines Vierkant-Hohlprofils, beispielsweise aus Aluminium, kann das Verfahren des Strangpressens zum Einsatz kommen. Dabei wird ein aufgeheizter Metallblock, der auf diese Weise bessere Fließigenschaften erhält, mit

¹⁵Vgl. Kampker et al. 2018.

¹⁶Vgl. Bonten 2020.

¹⁷Vgl. Kampker et al. 2018.

¹⁸Vgl. Siegert 2015.

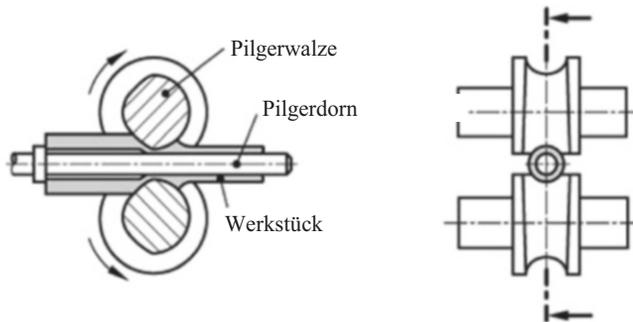
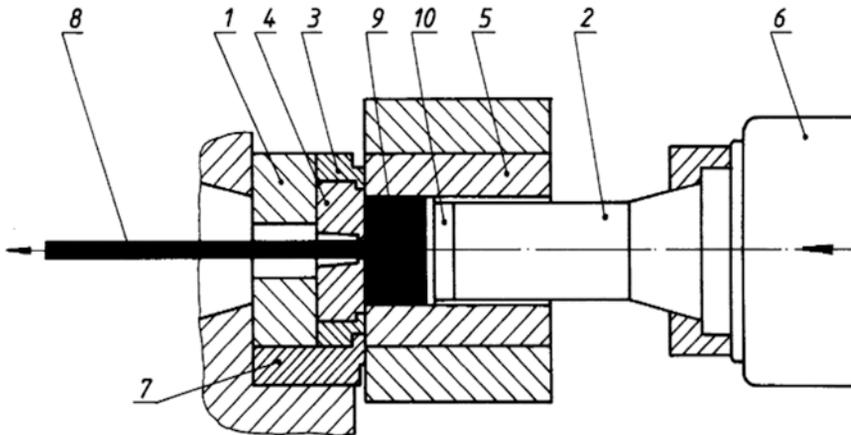


Abb. 13.3 Pilgerschrittwalzen zum Erzeugen nahtloser Rohre (Mannesmann-Verfahren). (Vgl. Siegert 2015)



Prinzip des direkten Vollstrangpressens. 1 Druckplatte, 2 Stempel, 3 Werkzeugträger, 4 Matrize, 5 Rezipient, 6 Plunger, 7 Schieber, 8 Profilstrang, 9 Block, 10 Pressscheibe

Abb. 13.4 Direktes Vollstrangpressen. (Vgl. Dietrich 2018)

hohem Druck und definierter Geschwindigkeit durch eine besonders gehärtete und widerstandsfähige Matrize – meist eine Flachmatrize – gepresst (siehe Abb. 13.4). Ergebnis dieses Vorgehens ist ein geradliniges Endlosprofil, das nur noch auf die gewünschte Länge vereinzelt werden muss. Das Verfahren ist besonders geschwindigkeitseffizient und eignet sich somit für größte Stückzahlen in der Herstellung elektrischer Fahrzeugmodelle.^{19,20}

¹⁹Vgl. Kampker et al. 2018.

²⁰Vgl. Dietrich 2018.

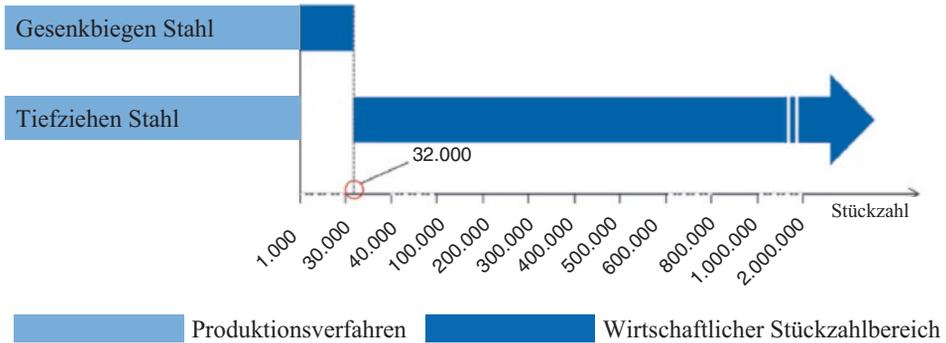


Abb. 13.5 Stückzahloptimiertes Produktionsprogramm von Stirnwänden. (Vgl. Kampker et al. 2018)

Stirnwand-Herstellung

Abb. 13.5 zeigt die Fertigung einer Stirnwand durch die Verfahren des Gesenkbiegens und des Tiefziehens für Stahl.

Zu erkennen ist, dass bei der Produktion von Stirnwänden, die auch beim elektrischen Fahrzeug von Bedeutung bleiben, bei einer jährlichen Teilmenge von bis zu 32.000 Stück das Verfahren des Gesenkbiegens zu bevorzugen ist. Wenn die Produktionsmengen diesen Wert überschreiten, ist das Tiefziehverfahren sinnvoll.

13.1.6 Das technische Tiefziehen für die Stirnwandproduktion

Das metallurgische Tiefziehverfahren ist grob vergleichbar mit der bereits vorgestellten Technik des Thermoformens. Das Verfahren gilt als eines der wichtigsten zur Umformung von Blechen und bildet die Grundlage zur Massenfertigung verschiedener metallischer Werkstücke. Das Tiefziehen bildet dabei ein Zugdruckumformen eines entsprechenden Blechs. Technisch betrachtet wird beim Tiefziehen ein Ausgangsblech in eine nach unten hin geöffnete Halterung eingesetzt und von einem Ziehring sowie einem Niederhalter mit definiertem Widerstand festgedrückt. Mittels eines Stempels, der von oben auf das Werkstück drückt, wird das Blech in eine definierte Form gezogen (Abb. 13.6). Dabei nimmt die Dicke des Werkstücks ab, und es kann bei sehr starken oder falsch berechneten Verformungen zur Rissbildung im Blech und an besonders dünnwandigen Stellen im Muster kommen. Das Verfahren bietet die Möglichkeit, automatisiert und relativ schnell zu produzieren.^{21,22}

²¹Vgl. Kampker et al. 2018.

²²Vgl. Dietrich 2018.

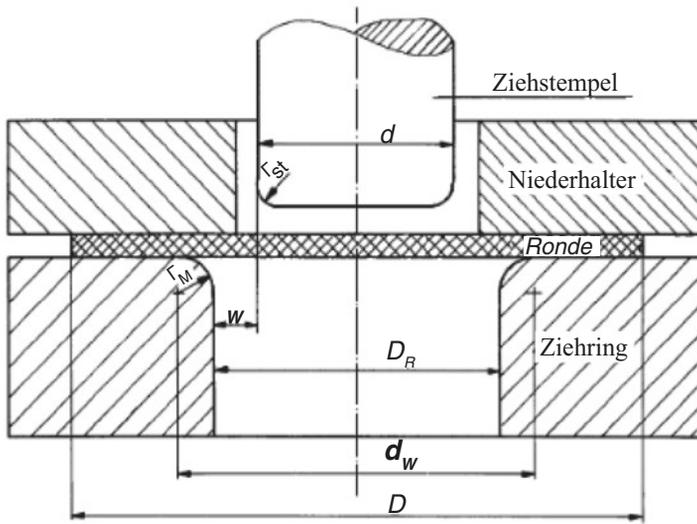


Abb. 13.6 Tiefziehvorrichtung. (Vgl. Dietrich 2018)

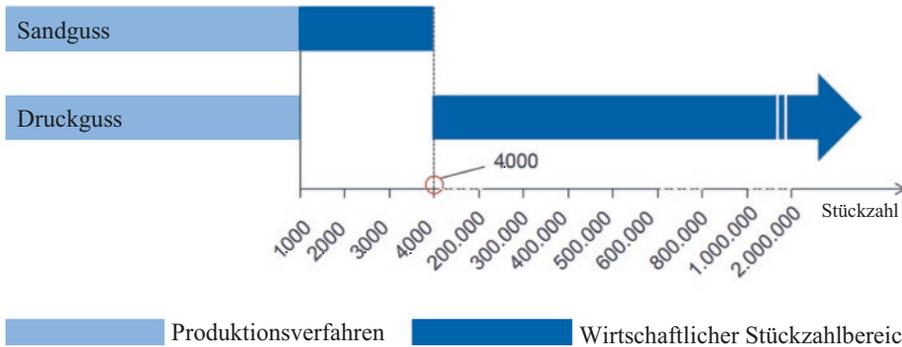


Abb. 13.7 Stückzahloptimiertes Produktionsprogramm von Space-Frame-Knoten. (Vgl. Kampker et al. 2018)

13.1.7 Space-Frame-Knoten-Herstellung

Abb. 13.7 zeigt die Herstellung von Space-Frame-Knoten durch die Verarbeitungsprozesse des Sand- und des Druckgusses.

In Abb. 13.7 ist zu erkennen, dass bis zu einer Produktionsmenge von 4000 Teilen im Jahr an Space-Frame-Knoten das Sandgussverfahren zu bevorzugen ist. Erst ab einer jährlichen Produktionsmenge von mehr als 4000 wird das Druckgussverfahren wirtschaftlicher.

13.1.8 Die technischen Verfahren der Space-Frame-Knoten-Herstellung in der Übersicht

Sandguss

Der Sandguss ist ein Verfahren der Gießereitechnik, das sich besonders gut eignet, wenn mit relativ geringem Werkzeugaufwand Gussteile gefertigt werden sollen. Da die Methode technologische Weiterentwicklungen von Bauteildimensionen relativ aufwandsarm unterstützt, ist sie in der Automobilindustrie weitverbreitet. Um ein Werkstück im Sandgussverfahren herzustellen, wird zunächst eine spezielle, hitzebeständige Sandmischung angerührt. Im Anschluss wird der Sand meist durch ein positives Muster, das den Maßen des späteren Bauteils entspricht, zu einer sogenannten Negativ-Form gepresst. In die fertige Form wird dann die metallische Schmelze gegeben, die sich in der Gussform verteilt und nach Abkühlung das fertige Bauteil ergibt. Abschließend wird die Sandform vom Bauteil abgeschlagen, das gegebenenfalls noch nachbereitet – beispielsweise entgratet – wird und dann für die Anwendung im Fahrzeug nutzbar ist.^{23,24}

Druckguss

Das zumeist mit einem aufwendigeren Prozessablauf und Werkzeug betriebene Druckgussverfahren eignet sich – wegen des investitionsintensiveren Prozesses – zur Herstellung größerer Produktionschargen. Beim Druckgussverfahren wird die Schmelze in eine Gießkammer eingeführt. Danach wird das flüssige Metall durch einen Kolben unter hohem Druck in das zweiteilige Werkzeug gepresst, wo es erstarrt. Das Verfahren ist im Vergleich zum Sandguss deutlich schneller und bringt einen geringeren Nacharbeitsaufwand am fertigen Bauteil mit sich. Der Druckguss bietet außerdem hohe Bauteilfestigkeit, hohe Qualität und die Möglichkeit zur Herstellung komplexer und detailreicher Oberflächen.^{25,26}

13.1.9 Herstellung der Federbeinaufnahme

Abb. 13.8 gewährt einen Einblick in die Herstellungsoptionen für die Federbeinaufnahme.

Unter wirtschaftlichen Standpunkten ist bei der Produktion von Federbeinaufnahmen bis zu einer Stückzahl von 4500 Teilen pro Jahr das CNC-Fräsen als Herstellungsverfahren zu bevorzugen. Erst ab einer jährlichen Produktionsmenge von mehr als 4500 Werkstücken pro Jahr sollte auf das Druckgussverfahren zurückgegriffen werden.

²³ Vgl. Kampker et al. 2018.

²⁴ Vgl. Fritz und Schulze 2015.

²⁵ Vgl. Kampker et al. 2018.

²⁶ Vgl. Fritz und Schulze 2015.

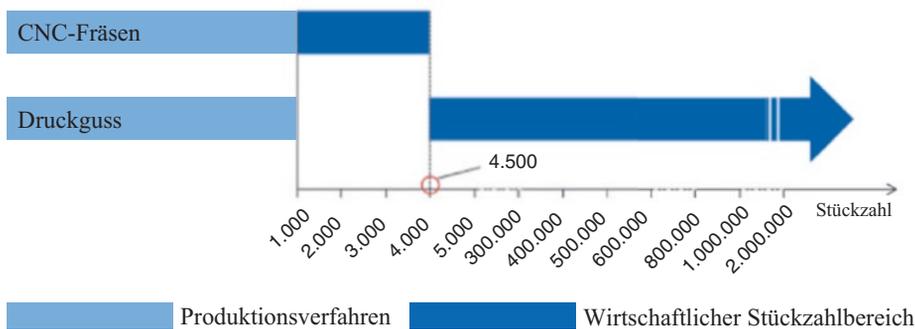


Abb. 13.8 Stückzahloptimiertes Produktionsverfahren zur Federbeinaufnahme. (Vgl. Kampker et al. 2018)

13.1.10 CNC-Fräsen als Herstellungsverfahren in der Übersicht

Beim Fräsen wird eine Relativbewegung zwischen dem Werkstück und dem Werkzeug erzielt. Dies geschieht durch eine kreisförmige Schnittbewegung zu einer senkrecht oder schräg zur Drehachse des Werkzeugs verlaufenden Vorschubbewegung. Diese Vorschubbewegung kann sowohl vom Werkzeug als auch vom Werkstück sowie von beiden kombiniert ausgeführt werden. Der Vorschub- und die Wirkrichtungswinkel sind zeitlich veränderlich. Eine Fräsmaschine hat mindestens drei geradlinige Vorschubachsen. Diese Achsen werden simultan und abhängig voneinander gesteuert, wodurch sich beliebige Bahnen mit dem Werkzeug auf dem Werkstück fahren lassen (Bahnsteuerung). Zusätzlich zu den Vorschubachsen besitzen moderne Fräsmaschinen noch zwei Drehachsen, mit denen der Drehvektor der Fräsachse auf jedem Punkt der Bahn eine beliebige Richtung annehmen kann. Das Werkstück wird dafür meist aus einem metallischen Rohmaterial oder Halbzeug durch das definierte materialabtragende Verfahren produziert (Abb. 13.9).²⁷

Beim „Computer-Numerical-Control“ (CNC)-Fräsen wird mittels einer computergestützten Steuerungstechnik, in die ein vorab definiertes Werkstückendmuster programmiert wurde, über einen meist vollautomatisiert bewegten Fräsaufsatz ein Werkstück hergestellt. Im Gegensatz zu Fräsoperationen, die durch einen Handwerker gesteuert werden, ist ein automatisiert arbeitendes Fräsverfahren meist schneller und präziser in der Ausführung. Aufgrund der Tatsache, dass Fräsen einen großen Materialaufwand mit sich bringt, ist das Verfahren bei größeren Produktionsmengen eher ungeeignet.^{28,29}

²⁷ Vgl. Fastermann 2016.

²⁸ Vgl. Kampker et al. 2018.

²⁹ Vgl. Steck 2019.

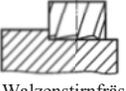
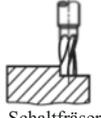
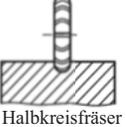
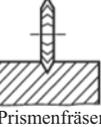
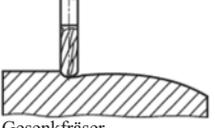
Fräsertyp	Wirkprofil	Wirkfläche	Beispiele
1 Umfangs- (walzen-) fräser	werkstück- ungebunden	Umfangs- fläche kreis- zylindrisch	 Walzenfräser
2 Stirn- fräser	werkstück- ungebunden	Seite (-Stirn)- und Umfangs- flächen	 Walzenstirnfräser  Schaltfräser  Messerkopf
3 Profil- fräser	werkstück- gebunden	Profilfläche	 Halbkreisfräser  Prismenfräser  Scheibenfräser
4 Form- fräser	werkstück- ungebunden	Formfläche beliebig	 Gesenkfräser

Abb. 13.9 Fräsverfahren nach DIN 8589-3. (Vgl. Fritz 2018)

13.1.11 Weitere stückzahlabhängige Produktionsverfahren

3-D-Druck

Der 3-D-Druck ist ein Fertigungsverfahren zur schnellen und – im Verhältnis zu vielen anderen Verfahren – preisgünstigen Herstellung von Modellen, Mustern, Prototypen, Werkzeugen und Endprodukten. Grundlage für den Druck sind 3-D-CAD-Modelle. Wichtig ist dabei, dass es sich um ein Volumenmodell handelt, bei dem sämtliche Dimensionen – Höhe, Breite und Tiefe – definiert sind. 3-D-Druck wird als „*generatives Fertigungsverfahren*“ bezeichnet. Das bedeutet, dass die Fertigung direkt auf Basis der rechnerinternen Datenmodelle erfolgt. Oft ist auch von „*Rapid Prototyping*“ oder „*Additive Manufacturing*“ die Rede, wenn es um 3-D-Druck geht. Viele Herstellungsverfahren, beispielsweise das Fräsen, entfernen Material beim Bau des Objekts. Sie sind deshalb *subtraktive Herstellungsverfahren*. Beim 3-D-Druck wird das Stück aus vorher flüssigem oder pulverartigem Material im Schichtbauverfahren geschaffen. Damit ist der 3-D-Druck ein *additives Herstellungsverfahren*, woher sich die englische Bezeichnung des „*Additive Manufacturing*“ – *additive Fertigung* – für die Technologie erklärt: Das Material wird Schicht für Schicht zu einem Objekt aufgebaut. Dadurch sind nahezu beliebige Formen möglich. Hinterschneidungen oder Ausformbarkeit wie beim Spritzguss müssen bei der Konstruktion nicht berücksichtigt werden. Die Materialien, aus denen der Baukörper ent-

steht, sind unterschiedlich. Außer Kunststoffen sind auch Metalle oder Papier möglich. Allen Verfahren ist gemeinsam, dass die Schichten entweder durch Verkleben oder Verschweißen auf die vorhergehende Schicht aufgebracht werden. Bei zahlreichen Technologien wird überschüssiges Baumaterial wiederverwendet. Oftmals müssen 3-D-gedruckte Bauteile jedoch noch nachbearbeitet werden. Je nach Geometrie des Bauteils werden Stützstrukturen mit eingebaut, die herausgebrochen werden müssen, wonach die Bruchstellen zu glätten sind.³⁰

13.2 Fügen von Außenhaut und Karosserie

In Diskussion um eine möglichst effektive Art der Fortbewegung hat die Karosserie eines batterieelektrischen Fahrzeugs wichtigen Einfluss auf die Gesamteffektivität des Autos. Von wesentlicher Bedeutung ist dabei, dass die Karosserie möglichst leicht sowie dennoch leistungsfähig und sicher ist, um dadurch Gewicht am Gesamtfahrzeug einzusparen und die elektrische Reichweite zu erhöhen. Gelingt das, werden nicht nur Strecken zwischen zwei Ladepunkten erweitert, sondern es bietet sich auch die Möglichkeit, die Batteriespeicherkapazität im Fahrzeug zu reduzieren. Dadurch wird das Auto abermals leichter sowie günstiger in der Produktion und letztlich auch in der Anschaffung für die Nutzenden.

Im Bereich der Automobilkarosserie werden daher verschiedene Lösungsansätze zur Gewichtsreduktion verfolgt. Dazu zählen der Einsatz von hoch- und höchstfestem Stahl zur Reduzierung der Blechdicken im Vergleich zu konventionellem Stahl, die Verwendung von Leichtbauwerkstoffen geringerer Dichte – etwa Aluminium oder Kunststoff – sowie das Konzept der Mischbauweise. Im Bereich der Fahrzeugaußenhaut wird das Prinzip des Leichtbaus, ähnlich wie bei der Karosserie, durch den Einsatz von Stahlwerkstoffen mit höherer Festigkeit und geringerer Blechdicke oder von Leichtbauwerkstoffen – insbesondere Kunststoff – realisiert. Daraus resultiert eine Vielzahl fügetechnisch anspruchsvoller Aufgaben, bei der verschiedene Werkstoffe miteinander verbunden werden müssen. Diese Aufgabe erschwert sich dadurch, dass unterschiedliche Materialeigenschaften bei der Verbindung von Elementen zu berücksichtigen sind. Etablierte Verfahren wie das Laser- und/oder das Widerstandsschweißen lassen sich deswegen nicht immer ohne Weiteres anwenden. Die physikalischen Eigenschaften der verwendeten Materialien wie beispielsweise Stahl, Aluminium oder Kunststoff variieren teilweise deutlich. Um unterschiedliche Werkstoffe trotzdem miteinander verbinden zu können, haben sich deswegen weitere Schweißverfahren, aber auch Kleben, Löten oder mechanische Verfahren als Fügetechniken etabliert.

Im Folgenden werden diejenigen Verfahren beleuchtet, die sich vor allem im Elektrofahrzeugbau durchgesetzt haben und heute zum Fügen von Außenhaut und Karosseriekomponenten zum Einsatz kommen. Dazu zählen das Widerstandspunktschweißen, das

³⁰Vgl. Fastermann 2016.

Laserstrahlschweißen, die Klebtechnik, das Rührreißschweißen und mechanische Fügeverfahren wie das Durchsetzfügen oder das Verbinden mit Funktionselementen, unter anderem Nieten und Schrauben.³¹

13.2.1 Schweißverfahren zum Fügen von Außenhaut und Karosserie

Widerstandspunktschweißen

Charakteristisch für das sogenannte Widerstandspunktschweißen ist es, dass die zum Verschweißen von zwei metallischen Werkstücken benötigte Prozesswärme durch eine Widerstandserwärmung – induziert durch eine Stromquelle – erreicht wird. Dazu werden zwei zu verschweißende Werkstücke zwischen zwei Punktschweißelektroden platziert. Ein Stromstoß erwärmt die Verbindungsstelle durch den elektrischen Widerstand so hoch, dass die metallischen Elemente miteinander verbunden werden. Dazu werden vorab die meist aus Kupfer gefertigten Elektroden mit einer Kraft von mehreren kN auf die Schweißstelle gepresst, bevor Ströme von bis zu 60 kA die Metalle durch Verschweißung zusammenfügen.

Das Verfahren eignet sich insbesondere für das Schweißen von dünnen Stahlblechen. Aluminium und Kupfer sind ebenfalls schweißbar, allerdings kann es dabei zu einem erhöhten Elektrodenverschleiß kommen. Das Widerstandspunktschweißen ist aufgrund seiner hohen Prozessgeschwindigkeit, der hervorragenden Automatisierbarkeit und der hohen Wirtschaftlichkeit derzeit ein dominierendes Fügeverfahren in der automobilen Karosseriefertigung.^{32,33}

Laserschweißen

Basis des Laserstrahlschweißens ist ein hochenergetischer Lichtstrahl – der Laserstrahl. Dabei handelt es sich um kohärentes monochromatisches Licht, das sich aufgrund seiner geringen Divergenz zur Übertragung über vergleichsweise lange Strecken eignet und eine hohe Leistungsdichte besitzt. Die Wellenlänge des erzeugten Lichts hängt unmittelbar mit der Art der Strahlerzeugung zusammen. Dazu kommen entweder CO₂-, Nd:YAG- oder Diodenlaserstrahlquellen zum Einsatz. Die Übertragung des Laserlichts wird entweder über Spiegel – beim CO₂-Laser – oder über lichtleitende, flexible Fasern – beim Nd:YAG- und Diodenlaser – realisiert. Zum Schweißen wird der Laserstrahl über eine Optik auf dem Werkstück fokussiert, um dadurch die benötigte Energiedichte zu erhalten. Die Energieeinbringung in das Werkstück basiert auf der Absorption des Laserstrahls durch den Bauteilwerkstoff, wobei der Absorptionsgrad je nach Werkstoff und Wellenlänge des Laserstrahls stark variiert. Zu den Vorteilen des Laserstrahlschweißens zählen der Umstand,

³¹ Vgl. Kampker et al. 2018.

³² Vgl. Kampker et al. 2018.

³³ Vgl. Fahrenwaldt et al. 2009.

dass damit fast alle metallischen Werkstoffe gefügt werden können, sowie sehr hohe erreichbare Schweißgeschwindigkeiten von bis zu 20 m/min, die vergleichsweise geringe Streckenenergie und die lediglich einseitig benötigte Zugänglichkeit zur Fügestelle. Nachteilig sind der hohe Investitionsaufwand in die Schweißanlage und benötigte Sicherheitseinrichtungen, hohe Betriebskosten, ein geringer Wirkungsgrad bei Strahlerzeugung und Energieeinkopplung sowie die hohen Anforderungen an die Bauteilvorbereitung und -positionierung.^{34,35}

Rührreibschweißen

Das Verfahren des Rührreibschweißens („Friction Stir Welding“ – FSW) ist ein vergleichsweise junges Schweißverfahren mit einem enormen Anwendungspotenzial. Die Einbringung der zum Schweißen notwendigen Prozesswärme wird alleine über die Reibung des Werkzeugs, bestehend aus Stift und Schulter, auf dem und im Werkstück realisiert. Dadurch wird das zu fügende Material plastifiziert und durch die Rotation des Werkzeugs verrührt. Ein Aufschmelzen der Füge­teile findet dabei nicht statt, sodass keine Umwandlung der flüssigen in die feste Phase erfolgt. Die Bildung von spröden intermetallischen Phasen wird durch diese Tatsache weitestgehend vermieden. Daraus ergibt sich unter anderem die hervorragende Eignung zum Fügen von Mischverbindungen und das damit verbundene Leichtbaupotenzial.³⁶

13.2.2 Weitere Verfahren zum Fügen von Außenhaut und Karosserie

Kleben

Das starke Bestreben zum Leichtbau als wesentlichen Grundansatz der Elektromobilität führt dazu, dass neben metallischen Werkstoffen auch Kunststoffe verarbeitet werden. Während diese Stoffe auf der einen Seite Vorteile durch Leichtigkeit bringen, scheiden sie auf der anderen Seite oftmals für die gängigen metallverarbeitenden Verfahren – insbesondere das Schweißen – aus. Daher werden alternative Füge­techniken benötigt. Ein wesentlicher Ansatz zum Fügen von Elementen, die nicht zum Verschweißen geeignet sind, ist das Kleben. Bei diesem Verfahren werden zwei Werkstückoberflächen durch einen Klebstoff mittels Flächenhaftung an den Bauteilen und durch die innere Steifigkeit des Klebstoffs miteinander verbunden. Dabei besteht die Möglichkeit, dass die Bauteiloberfläche und der Klebstoff für die Anforderungen an der definierten Klebestelle speziell vorbereitet werden. Die zugrundeliegenden Kräfte werden „Adhäsion“ und „Kohäsion“ genannt. Die Adhäsion wirkt zwischen Klebstoff und Füge­teil, die Kohäsi-

³⁴ Vgl. Kampker et al. 2018.

³⁵ Vgl. Fahrenwaldt et al. 2009.

³⁶ Vgl. Kampker et al. 2018.

Fügetechnik. Diese müssen nicht nur über sehr gute und dauerhafte mechanische Festigkeit verfügen, sondern auch eine dauerhaft niederohmige Stromleitung garantieren. Aufgrund seiner besonders guten elektrischen Leitfähigkeit wird Kupfer für elektrische Kontakte eingesetzt. Dieser Werkstoff wird vermehrt mit Aluminium kombiniert oder sogar ganz durch Aluminium substituiert, um Kosten- und Gewichtsvorteile zu nutzen. Häufig sind demnach Kupfer-Kupfer- und Aluminium-Aluminium-Verbindungen sowie mit steigender Nachfrage auch Kupfer-Aluminium-Verbindungen in elektrischen Kontakten zu finden. Den Ansprüchen von Fügeverbindungen gleicher Werkstoffart werden bekannte Fügeverfahren gerecht. Wärmearme Fügeverfahren kommen vor allem dort zum Einsatz, wo Mischverbindungen aus Kupfer und Aluminium erforderlich werden. Dabei bestehen aufgrund unterschiedlicher Werkstoffeigenschaften besondere Herausforderungen für eine mechanisch stabile und elektrisch leitfähige Schweißverbindung. Berücksichtigt werden müssen große Unterschiede für Schmelztemperaturen, Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit ebenso wie die ausgeprägte Bildung intermetallischer spröder Phasen in Schmelzschweißverbindungen. Als Standard haben sich Verfahren wie Ultraschallschweißen, Widerstandsschweißen und Laserstrahlschweißen zum Fügen in der Elektronik und Feinwerktechnik etabliert, aber auch das Lötten und neuartige Technologien wie das Micro-Clinching kommen zum Einsatz.

Ultraschallschweißen

Das Ultraschallschweißen kann als eine Kombination von Reib- und Kaltpressschweißen betrachtet werden. Dabei werden die zwei sich überlappenden Füge Teile zwischen einem festen Amboss und der sogenannten Sonotrode – ein schwingendes Werkzeug – zusammengepresst. Die Sonotrode überträgt Schwingungen von 20 bis 64 kHz auf die Füge Teile. Durch die sich daraus ergebende Reibung und unter dem Druck der Anpressung werden die Bauteile miteinander verschweißt.^{40,41}

Widerstandsschweißen

Beim Widerstandsschweißen erfolgt die Verbindungsherstellung durch Aufbringung äußerer Kräfte, die zusammen mit dem eingebrachten Schweißstrom die erforderlichen Kontakt- und Werkstoffwiderstände ausbilden. Die Einstellung der Schweißparameter „Zeit“ (Vorhalte-, Schweiß- und Nachhaltezeit), „Schweißstrom“ und „Elektrodenkraft“ erfordern vor allem bei Werkstoffen wie Aluminium und Kupfer die Berücksichtigung der spezifischen Werkstoffeigenschaften. Im Vergleich zu Stahlschweißungen müssen der Schweißstrom heraufgesetzt und die Schweißkraft sowie die Schweißzeit reduziert werden. Durch eine geeignete Prozessparametrierung gelingt es für Aluminium-Kupfer-Verbindungen – insbesondere im Dünoblechbereich – und für elektrische Kontakte, die Bildung intermetallischer Phasen gering zu halten beziehungsweise gänzlich zu vermeiden.

⁴⁰Vgl. Kampker et al. 2018.

⁴¹Vgl. Habenicht 2012.

Laserstrahlschweißen

Das Laserstrahlschweißen findet vielfältige Anwendung, so auch in der Elektronik und Feinwerktechnik. Die Bandbreite der mit dem Laser zu verschweißenden Werkstoffe reicht von unlegiertem und niedriglegiertem Stahl bis hin zu hochwertigen Titan- und Nickelbasislegierungen. Aluminium und Kupfer bereiten aufgrund ihrer thermophysikalischen Materialeigenschaften Probleme bei der Energieeinkopplung und der Prozessstabilität. Mit entsprechender Prozessgestaltung und unter Berücksichtigung der werkstoffspezifischen Erfordernisse lassen sich gute Mischverbindungen schweißen. Das Schweißen von Kupfer stellt aufgrund der Strahlabsorption eine besondere Herausforderung dar. Gute Ergebnisse lassen sich bereits durch Schweißen mit grünem Laserlicht erzielen (siehe Abb. 13.11). Da für Mischverbindungen aus Aluminium und Kupfer vor allem wärmearme Verfahren oder solche mit präzise definierbarer Energieeinbringung erfolgversprechend sind, werden Fügetechnologien wie Rührreibschweißen und Elektronenstrahlschweißen für diese Anwendungsgebiete immer interessanter. In diesem Zusammenhang existierten zahlreiche Forschungsvorhaben.

Micro-Clinching

Insbesondere bei der Verbindung von Batterieschweißstellen hat sich gezeigt, dass die vorhandenen Fügetechniken aufgrund ihrer Prozessabläufe nicht immer ein Optimum der Fügetechnik zwischen stromableitendem Medium und Batterie darstellen. Infolgedessen hat sich in den vergangenen Jahren auch die Technologie zum Fügen von elektrischen Batteriebauteilen und kleinen Bauteilen entwickelt und sich das Verfahren des Micro-Clinchings als Technologiealternative herausgestellt. Dabei werden zwei aufeinanderliegende Metallbleche gemeinsam in eine definierte starre Form gepresst. Durch den Pressvorgang, der durch beide Metalle geht, beginnen die Werkstoffe, sich durch eine gegenseitige Überlappung zu verbinden. Rein durch die Verformung sind die beiden Werkstücke an der Verbindungstelle nun nahezu miteinander verschmolzen und besitzen

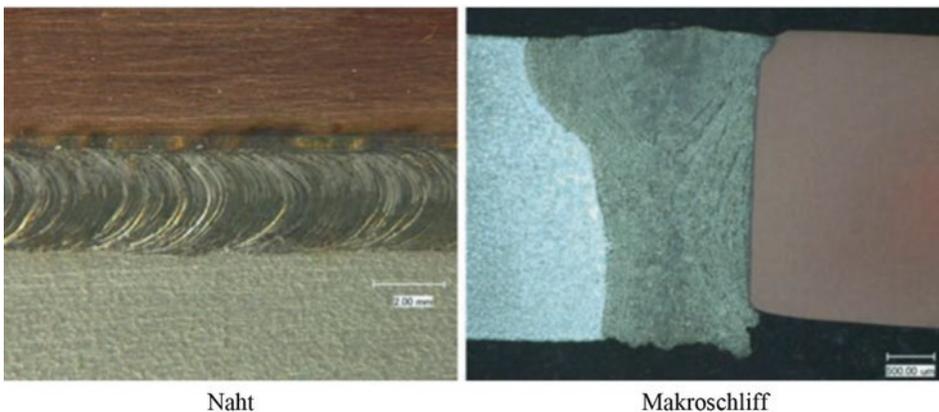


Abb. 13.11 Al-Cu-Verbindung, laserstrahlgeschweißt [ISF RWTH Aachen]

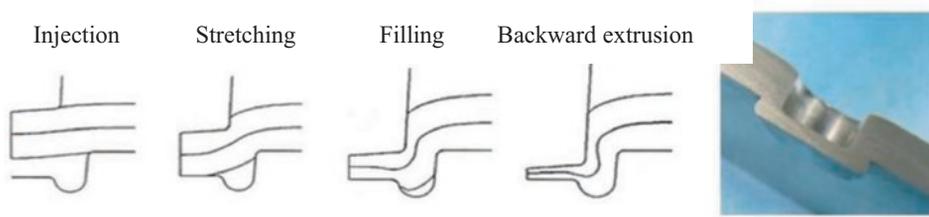


Abb. 13.12 Phasen des Clinching-Prozesses und eine exemplarische Verbindung. (Vgl. Presz und Cacko 2016)

eine relativ feste sowie stromschlüssige Verbindung. Abb. 13.12 zeigt, wie sich durch vier definierte Arbeitsschritte des Verfahrens – „Injection“, „Stretching“, „Filling“ und „Backward Extrusion“ – die Micro-Clinching-Verbindung schaffen lässt.^{42,43}

Literatur

Teil III: Produktion von elektrofahrzeugspezifischen Systemen

- Bonnet, M.:** *Kunststofftechnik. Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele* (Lehrbuch). 3., überarbeitete und erweiterte Auflage Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016
- Bonten, C.:** *Kunststofftechnik. Einführung und Grundlagen* (Hanser eLibrary). 3., aktualisierte Auflage Aufl. München: Hanser, 2020
- Dietrich, J. (Hrsg.):** *Praxis der Umformtechnik. Umform- und Zerteilverfahren, Werkzeuge, Maschinen*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018
- Fahrenwaldt, H. J.; Schuler, V; Twrdek, J; Wittel, H.:** *Praxiswissen Schweißtechnik. Werkstoffe, Prozesse, Fertigung*. 3. Auflage Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009
- Fastermann, P.:** *3D-Drucken. Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert* (Technik im Fokus). 2., aktualisierte Auflage Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016
- Fritz, A. H. (Hrsg.):** *Fertigungstechnik*. Springer-Lehrbuch. 12., neu bearbeitete und ergänzte Auflage Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018
- Fritz, A. H; Schulze, G.:** *Fertigungstechnik*. 11. Auflage Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015
- Habenicht, G.:** *Kleben – erfolgreich und fehlerfrei. Handwerk, Praktiker, Ausbildung, Industrie*. 6. Auflage Aufl.: Vieweg+Teubner, 2012
- Hompel, M. ten; Bauernhansl, T; Vogel-Heuser, B.:** *Handbuch Industrie 4.0. Band 3: Logistik*. 3. Auflage Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020
- Kampker, A; Vallée, D; Schnettler, A. (Hrsg.):** *Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. 2. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018
- Presz, W; Cacko, R.:** *Initial Micro-Clinching Analysis*. In: Journal of Manufacturing Technologies 2016, Nr. Vol. 41, No 2/2016Nr., S. 29–33

⁴²Vgl. Kampker et al. 2018.

⁴³Vgl. Presz und Cacko 2016.

- Russack, T; Jerrentrup, R. (Hrsg.):** *Ausgewählte Verfahren zur Optimierung des Ressourceneinsatzes und Flexibilisierung in der Fertigung*, Essen: MA Akademie Verlagsund Druck-Gesellschaft mbH, 2019
- Siegert, K.:** *Blechumformung. Verfahren, Werkzeuge und Maschinen* (VDI-Buch Ser). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin/Heidelberg, 2015
- Steck, R.:** *CNC-Fräsen für Maker. Baue, programmiere und steuere deine DIY-Fräse* (Hanser eLibrary). München: Hanser, 2019

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Montage von Elektrofahrzeugen

14

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Benjamin Dorn,
Mario Kehrer, Simon Dünnwald, Lucas Budde, Maximilian
Keusen, Felix Rosen, Christoph Deutskens, Kai Kreisköther,
Ruben Förstmann und Carsten Nee

Rapide steigende Absatzzahlen auf globalen Märkten, verbunden mit der Forderung nach zunehmender Derivatevielfalt, verleihen der Auslegung der Produktionsprozesse von Elektrofahrzeugen zentrale Bedeutung. Die Produktionsplanung muss die Voraussetzungen dafür schaffen, dass sich die Produktion in den gesetzten Korridoren flexibel an die aktuell

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

B. Dorn · M. Kehrer

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: b.dorn@pem.rwth-aachen.de; m.kehrer@pem.rwth-aachen.de

S. Dünnwald (✉)

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: s.duennwald@pem.rwth-aachen.de

L. Budde · M. Keusen

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: l.budde@pem.rwth-aachen.de; m.keusen@pem.rwth-aachen.de

F. Rosen

Trainee E-Mobility, Aumann Beelen GmbH, Beelen, Deutschland

E-Mail: felix.rosen@aumann.com

gegebene Kundennachfrage anpassen lässt. Die Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen ist ein zentraler Fokus.¹ Neben den Fertigungsprozessen für die Einzelkomponenten selbst bilden dafür vor allem die Montageprozesse der Fahrzeuge wesentliche Stellhebel.

Im vorliegenden Abschnitt wird zunächst darauf eingegangen, wodurch Montagevorgänge im Allgemeinen gekennzeichnet sind und welche die wesentlichen Funktionen der Montage sind. Nach einem Überblick zu den verschiedenen Montageorganisationen, die sich auf die technische-organisatorische Umsetzung beziehen, werden Trends und Herausforderungen im Montagebereich der Elektromobilproduktion vorgestellt. Dabei werden vor allem die Veränderungen gegenüber konventionellen Fahrzeugmontagen aufgezeigt. Neben den aufgrund der elektrifizierten Komponenten neuen Montagelinien unterscheiden sich außerdem die Tätigkeiten im Bereich der Facharbeitenden. Wurde in der Vergangenheit der Fokus auf „Lean Production“ gelegt, wird heute eine wirtschaftliche Produktindividualisierung bei hoher Variantenvielfalt und geringeren Stückzahlen mit Hilfe von Automatisierung angestrebt.² Im vorliegenden Kapitel wird dafür der Einsatz *speicherprogrammierbarer Steuerungen* (SPS) zur Prozesssteuerung und Datenverarbeitung erläutert. Außerdem werden zentrale Stichworte wie „Industrie 4.0“ und „Big Data“ thematisiert, die die künftigen Entwicklungen im Prozessbereich bestimmen. Zum Abschluss werden technische Umsetzungen für Montagevorgänge bei Elektromobilmotoren diskutiert: das „Conversion Design“ und das „Purpose Design“, die sich auf die Integration eines elektrifizierten Antriebsstrangs von bestehenden Fahrzeugkonzepten beziehungsweise auf die Neumontage von elektrifizierten Fahrzeugen beziehen. Die neuen Herausforderungen, aber auch die Chancen zur Flexibilität im Produktionsprozess und die Ermöglichung von Variantenvielfalt stehen bei der Montage im Vordergrund. Die vierte industrielle Revolution treibt Automobilhersteller zu kleinteiligen Standardisierungen einzelner Prozessschritte sowie der Vernetzung und Modularisierung.³ Dafür werden weitere Möglichkeiten zur Realisierung flexibler Produktionssysteme für individuelle Ausführungen vorgestellt.

¹ Vgl. Goth et al. 2018, S. 20.

² Vgl. Goth et al. 2018, S. 17.

³ Vgl. Kropik 2021, S. 8f.

C. Deutskens
CEO & Partner, PEM Motion GmbH, Aachen, Deutschland
E-Mail: c.deutskens@pem-motion.com

K. Kreisköther
Co-Founder & CEO, Ducktrain, Aachen, Deutschland
E-Mail: Kai.kreiskoether@ducktrain.io

R. Förstmann
Projektleiter, TQ-Systems GmbH, Wetter (Ruhr), Deutschland
E-Mail: ruben.foerstmann@tq-group.com

C. Nee
Associate Partner, McKinsey & Company Inc., Hamburg, Deutschland
E-Mail: Carsten_Nee@mckinsey.com

14.1 Grundlagen der Montage

Der Begriff *Montage* umfasst die Gesamtheit aller Vorgänge, die dem Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern dienen. Dies beinhaltet neben dem Fügevorgang auch die vorgelagerten Prozessschritte „Handhabung“ und „Justage“ sowie die nachgelagerte Funktionsüberprüfung der Endprodukte.⁴ Wird beispielsweise der Stator eines Elektromotors in das Aggregatgehäuse montiert, so zählen das zielgerichtete Bewegen und Einpressen zu den primären, direkt an der Verbindung beteiligten Montagevorgängen. Sekundäre, unterstützende Vorgänge sind etwa das Reinigen, das Justieren oder die Prüfung der finalen Position (vgl. Abb. 14.1).

Die Montage ist eine der zentral wertschöpfenden Tätigkeiten eines produzierenden Unternehmens, da während des Montageprozesses zunehmend Einzelteile zu einem höherwertigen Objekt zusammengesetzt werden, wodurch der Wert des Produktes steigt.

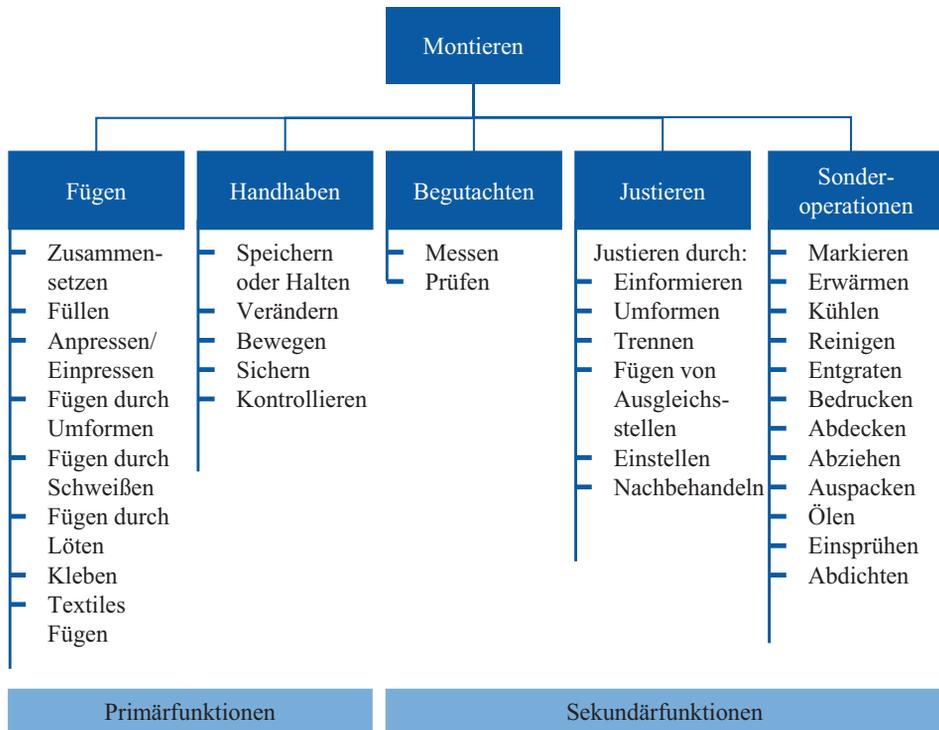


Abb. 14.1 Funktionen der Montage in Anlehnung an Hammerstingl (2019). (Vgl. Hammerstingl 2019)

⁴Vgl. CIRP – The International Academy for Production Engineering 2020.

Die strukturelle Gestaltung eines Produkts übt dabei einen wesentlichen Einfluss auf den Montageablauf sowie auf die zur Montage genutzten Technologien aus. So schreibt etwa in der Batteriemontage die Superpositionierung der einzelnen Baugruppen „Kühlplatte“, „Zellstapel“, „Kontaktiersystem“ und „Moduldeckel“ eine klar definierte Montagereihenfolge vor. Produkte sind möglichst einfach und im Hinblick auf Montageschnittstellen flexibel zu gestalten, um die Komplexität und Dauer der Montage zu reduzieren.⁵

Die Reihenfolge der einzelnen Prozessschritte hat grundlegenden Einfluss auf die *Montageorganisation*. Als *Montageorganisation* wird die Art und Weise bezeichnet, wie eine Montage technisch-organisatorisch vorgenommen werden soll (CIRP 2020). Eine primäre Unterscheidung von Montageorganisationsformen wird häufig anhand des Bewegungszustandes der Montageobjekte in der Montage getroffen. Dabei wird unterschieden, ob das Objekt während der Montage stillsteht (Verrichtungsprinzip) oder sich in Bewegung befindet (Fließprinzip). Als sekundäres Unterscheidungskriterium gilt zum Beispiel, ob die Arbeitsplätze stationär oder in Bewegung sind (vgl. Abb. 14.2).

In modernen Konzepten von Montageorganisationen lässt sich zu den elementar differenzierenden Faktoren „Ort“ und „Zeit“ der eingesetzte technische Umfang als weitere Dimension einfügen. Der Begriff *Automatisierung* beschreibt die Übertragung menschlicher Arbeitsschritte auf selbstständig arbeitende künstliche Systeme.⁶ In diesem Kontext wird zwischen *automatisierten* Prozessen, die zumindest punktuell menschliche Arbeitskraft oder Entscheidungsfindung erfordern, und *automatischen* Prozessen unterschieden, die vollständig ohne menschliche Interaktion ablaufen. Die Datenverarbeitung und Prozesssteuerung erfolgt typischerweise mittels sogenannter *speicherprogrammierbarer Steuerungen* (SPS).

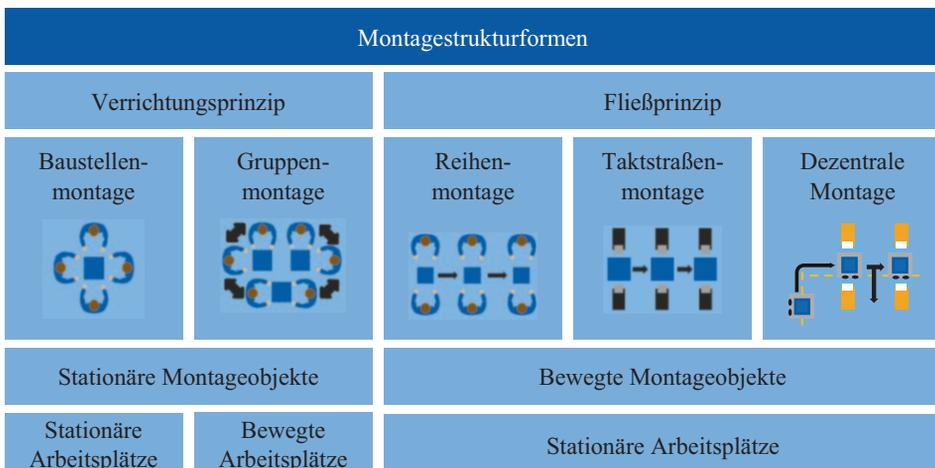


Abb. 14.2 Organisationsformen der Montage in Anlehnung an Seliger (2018). (Vgl. Seliger 2018)

⁵Vgl. Bender et al. 2021.

⁶Vgl. Hammerstingl.

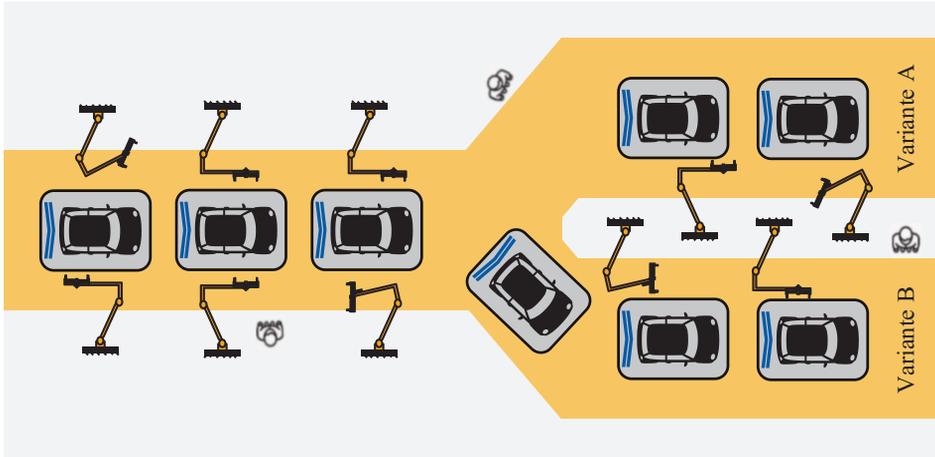


Abb. 14.3 Fahrzeugmontage mit Hilfe fahrerloser Transportsysteme

Auf dieser Basis lässt sich die Automatisierung als einen der wichtigsten Trends für Montagesysteme darstellen. Dies bietet vor allem Unternehmen den Vorteil der Auswahl produktionsgerechter Montageorganisationen.⁷ Einige der in der heutigen Zeit maßgebendsten Entwicklungen für die Elektromobilproduktion sowie deren Organisation sind die Systemdezentralisierung zugunsten einer höheren Produktvariantenflexibilität (vgl. Abb. 14.3) sowie die Implementierung von „Big Data“ und künstlicher Intelligenz vor dem Hintergrund der „Industrie 4.0“.⁸

14.2 Montageveränderungen gegenüber konventioneller Fahrzeugmontage

Die Montage von rein elektrischen Fahrzeugen (EV) unterscheidet sich abschnittsweise stark von konventionell verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen (CV). Rein elektrofahrzeugspezifische, ähnliche und modifizierte Produktionsschritte sind in Abb. 14.4 dargestellt. Ein wesentlicher Unterschied gegenüber der Montage von konventionell angetriebenen Fahrzeugen liegt bei der für EV notwendigen Leistungselektronik wie dem Pulswechselrichter (PWR), dem „On-Board Charger“ (OBC), der Traktionsbatterie, dem elektrischen Traktionsmotor und dem Kabelbaum. Insbesondere das stärkere Ausmaß der Verkabelung bei zahlreichen Spannungsniveaus von 12 V bis zu 800 V und höher erfordern besondere Prüfstationen innerhalb der Fertigungslinie sowie besonders geschultes Personal.⁹ Die Antriebseinheit – bestehend aus Traktionsmotoren, Traktions-

⁷Vgl. Seliger 2018.

⁸Vgl. Cohen et al. 2019.

⁹I.A.a. Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG – Porsche Deutschland 2021.

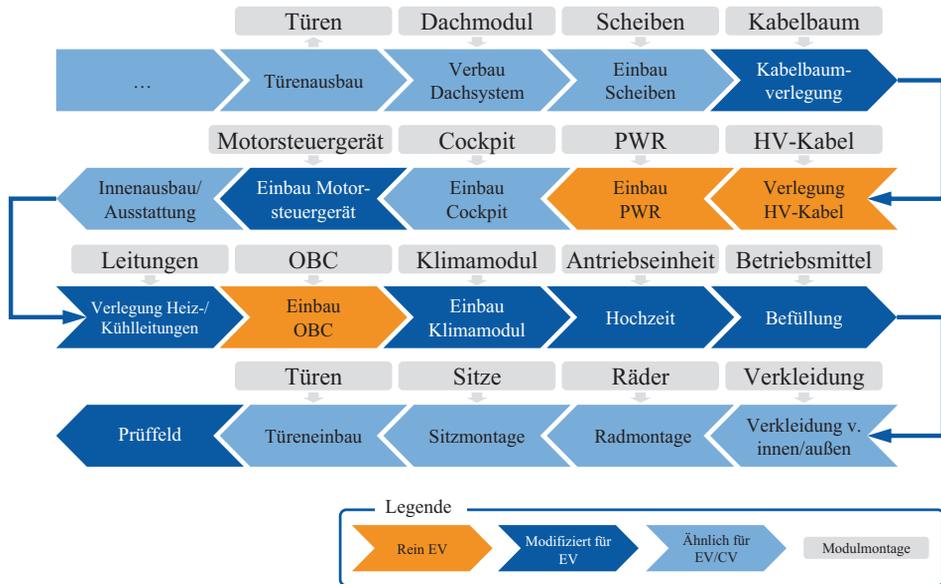


Abb. 14.4 Exemplarische Montageschritte einer Endfertigung eines EV (HV = Hochvolt, PWR = Pulswechselrichter, OBC = „On-Board Charger“, EV = „Electric Vehicle“, CV = „Combustion Vehicle“). (I. A. a. Kropik 2021, S. 20 ff.) (i. A. a. Wack 2020, S. 51) (i. A. a. Kirchner 2019, S. 64) (i. A. a. Sedlack 2021)

batterie und Achsen – wird in separaten Vormontageschritten positioniert, um in der sogenannten Hochzeit mit der Karosserie vereint zu werden. Vor allem durch die Hochvoltbatterie im Fahrzeugboden erfordert die Hochzeit starke Modifikationen.

Bei der Befüllung eines rein elektrischen Fahrzeugs entfällt der konventionelle Kraftstoff, jedoch werden weiterhin Betriebsmittel wie Kühlwasser und Wischwasser benötigt. Konstruktive Änderungen gegenüber CV – wie zum Beispiel sicherheitsrelevante Verstärkungen zum Schutz der Hochvoltkomponenten – erfordern eine Anpassung von Unterbodenmodulen sowie des Crash-Trägers im Bug- und Heckmodul.

Entscheidend für die Produktion eines Elektrofahrzeugs ist zudem die Wahl zwischen einem „Conversion Design“ und einem „Purpose Design“. Beim „Conversion Design“ wird die bestehende konventionelle Fahrzeugstruktur beibehalten und mit einem alternativen Antrieb versehen, was bei geringen Stückzahlen Kosten sparen kann. Demgegenüber steht das „Purpose Design“, bei dem ein Auto von Grund auf mit dem elektrischen Antriebsstrang neu entwickelt wird. Dies kann bei Pkw mit hohen Stückzahlen langfristig Kosteneinsparungen mit sich bringen. Die meisten Elektrofahrzeug-Start-up-Unternehmen nutzen das „Purpose Design“. Aber auch etablierte OEMs sind heutzutage an einem Punkt angelangt, an dem rein elektrische Baukästen als „Purpose Design“ entwickelt werden, die über eine Produktreihe hinaus fungieren.¹⁰ Das sind Baukastensysteme, die als Antriebsstrang

¹⁰Vgl. Volkswagen Newsroom 2021.

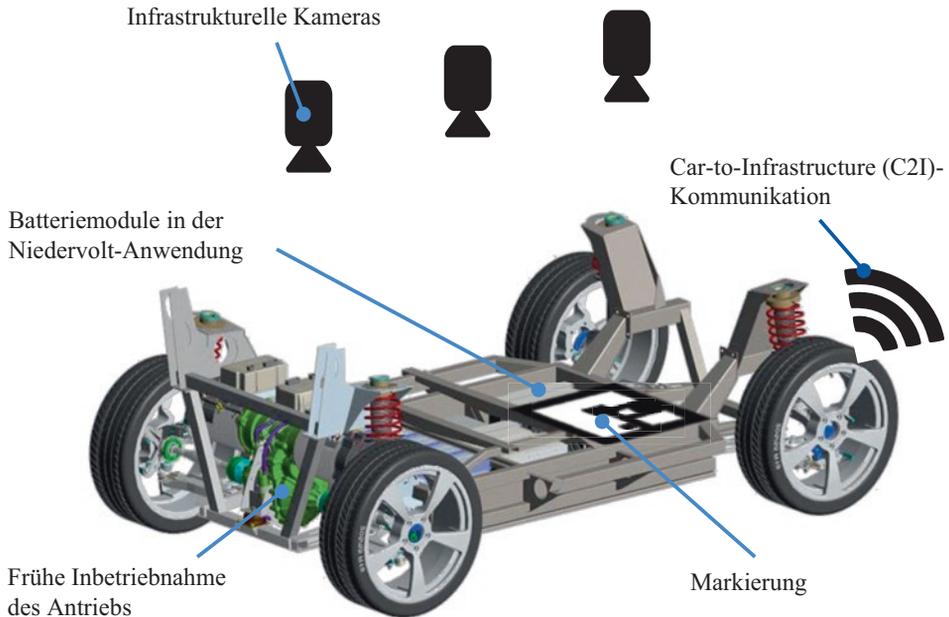


Abb. 14.5 Mögliche Lösungsmodule des selbstfahrenden Fahrwerks. (I. A. a.Wenning et al. 2020, S. 577)

typenübergreifend für verschiedene rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge eingesetzt werden.¹¹ Dabei kann der Radstand variabel und die Batteriegröße – sowie damit einhergehend auch die Reichweite – einstellbar sein. Außerdem ist es möglich, dass solche Baukästen für elektrische Fahrzeuge reinen Hinterradantrieb oder Allradantrieb abdecken. (In den Abschn. 5.1 und 19.5 sind „Conversion Design“ und „Purpose Design“ ausführlich beschrieben.)

Die Elektromobilität bietet insbesondere mit einem „Purpose Design“ neue Chancen, etwa in Form von selbstfahrenden Fahrwerken im Produktionsprozess. In Abb. 14.5 sind mögliche Module zur technischen Umsetzung dargestellt. Durch ein frühes Montieren der Antriebs- und Steuereinheiten können selbstfahrende Fahrwerke statt kostenintensiver Fördermittel wie Hängeförderer, Plattenbänder und/oder fahrerlose Transportsysteme (FTS) verwendet werden. Selbstfahrende Fahrwerke ermöglichen mehr Flexibilität im Produktionsprozess, wodurch es einfacher zu realisieren ist, mehr Variantenvielfalt in das Produkt zu integrieren als in einer sequenziellen Produktionslinie. Auf diese Weise kann sich die Produktionslinie in ein Produktionsnetz verwandeln, um das Produkt der Variante entsprechend an separat anfahrbare Montagestationen zu führen. Der Hersteller kann in einem solchen Produktionsnetz wesentlich agiler eingreifen und es besser skalieren als in einer konventionellen, starren Produktionslinie. Die erforderliche Kamera- und

¹¹Vgl. Mahendra 2012.

Sensortechnik zur Erfassung und Steuerung der Position des selbstfahrenden Chassis kann modellübergreifend für mehrere Fahrzeugarten und Generationen erfolgen. Damit eine Hochvolt-Schulung nur für einen Teil des Montagepersonals notwendig ist, lässt sich durch eine geschickte Verschaltung der Batterieeinheit – durch die Nutzung nur einiger Batteriemodule – das Fahrzeug während der Produktion im Niedervoltbereich betreiben. Der Zeitpunkt der Hochvolt-Initialisierung wird dann weitgehend an das Ende verlegt.^{12, 13}

Wie aufgezeigt, bieten Elektrofahrzeuge zahlreiche Freiheitsgrade in der Fahrzeugstruktur, die dadurch gleichermaßen Herausforderungen und Chancen für die Montagestrukturen bereithalten. Die Fahrzeugstruktur kann auf den Montageprozess abgestimmt werden und mit einer montagegerechten Konstruktion und Variantenmanagement erhebliche Kosten einsparen.¹⁴

Literatur

Teil III: Produktion von elektrofahrzeugspezifischen Systemen

- Bender, B; Gericke, K; Pahl, G; Beitz, W. (Hrsg.):** *Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung.* Springer eBook Collection. 9. Auflage Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2021
- CIRP – The International Academy for Production Engineering:** *Dictionary of production engineering IV – assembly.* = *Wörterbuch der Fertigungstechnik IV – Montage* (Springer eBook Collection, 4). Trilingual Edition Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2020
- Cohen, Y; Faccio, M; Pilati, F; Yao, X.:** *Design and management of digital manufacturing and assembly systems in the Industry 4.0 era.* In: *Int J Adv Manuf Technol*, Jg. 105, 2019, Nr. 9, S. 3565–3577
- Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG – Porsche Deutschland:** *Porsche Taycan – Porsche Deutschland.* https://www.porsche.com/germany/models/taycan/taycan-models/?gclid=Cj0KCQjwtrSLBhCLARIsACH6Rmj9MaqDpTuvInlxo0nj6SSDrhyVJ3qwLVDksB_8pmYexkKbWbx_xaoaAtCHE-ALw_wcB&gclid=aw.ds. Abruf 18.10.2021
- Goth, G; Kretschmer, S; Pfeiffer, I. (Hrsg.):** *Auswirkungen der Elektromobilität auf die betriebliche Aus- und Weiterbildung.* 74, Bielefeld: wbv Media GmbH & Co. KG, 2018
- Hammerstingl, V. G. J.:** *Steigerung der Rekonfigurationsfähigkeit von Montageanlagen durch Cyber-physische Feldgeräte.* Dissertation
- Kampker, A; Burggräf, P; Gartzten, T; Swist, M; Bäumers, Y; Petersohn, G.:** *Herausforderungen bei der Montage von E-Fahrzeugen.* Jg. 102 (9), 2012, S. 550–555
- Kampker, A; Kreisköther, K. D; Schumacher, M; Wenning, M.:** *Selbstfahrende Chassis in der elektromobilen Fahrzeugendmontage.* In: *ATZ Extra*, Jg. 23, 2018, Nr. S11Nr., S. 40–45
- Kirchner, P.:** *Fördertechnisches Gesamtsystem für eine automatisierte und flexible Fahrzeugfertigung.* Dissertation. Chemnitz, 2019
- Kropik, M.:** *Produktionsleitsysteme für die Automobilindustrie.* 2. Auflage Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021

¹²Vgl. Kampker et al. 2018.

¹³Vgl. Schuh et al. 2017.

¹⁴Vgl. Kampker et al. 2012, S. 554f.

- Mahendra, A.:** *VOLKSWAGEN MQB*. In: Auto Tech Review 2012.
- Schuh, G; Brecher, C; Klocke, F; Schmitt, R. (Hrsg.):** *AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2017 Internet of Production für agile Unternehmen. AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2017, 18. bis 19. Mai*. 1. Auflage Aufl., Aachen: Apprimus Verlag, 2017
- Sedlack, H.** 2021: *Porsche Taycan Turbo S*, Jg. 4. <https://www.welt.de/mediathek/reportage/automobile/sendung207623305/Dreamcars-Porsche-Taycan-Turbo-S.html>. Abruf 14.10.2021
- Seliger, G.:** *Montage und Demontage*. In: Grote, K.-H; Bender, B; Göhlich, D. (Hrsg.): Taschenbuch für den Maschinenbau 25., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage Aufl. Berlin, Germany: Springer Vieweg, 2018, S. 1503–1509
- Volkswagen Newsroom:** *Modularer E-Antriebs-Baukasten*. <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/modularer-e-antriebs-baukasten-3677>. Abruf 18.10.2021
- Wack, K.-J.:** *Interdisziplinäre Absicherung der Produktionsplanung in der Automobilindustrie*. Dissertation. Ilmenau, 2020
- Wenning, M; Kawollek, S; Kampker, A.:** *Self-driving chassis for low-invest and highly flexible electric vehicle assembly*. In: Procedia Manufacturing, Jg. 43, 2020, S. 576–582
- Hammerstingl, V. G. J.:** *Steigerung der Rekonfigurationsfähigkeit von Montageanlagen durch Cyber-physische Feldgeräte*. Dissertation. München, 2019

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Produktionsverfahren von Batteriezellen und -systemen

15

Heiner Hans Heimes, Benjamin Dorn, Marc Locke,
Sarah Wennemar, Robert Ludwigs, Lorenz Plocher
und Simon Voß

Die Bereitstellung der elektrischen Antriebsenergie erfolgt in batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) derzeit überwiegend durch Lithium-Ionen-Batteriesysteme. Diese Systeme bestehen aus Batteriemodulen und Batteriezellen in unterschiedlichen Formaten. Das Batteriesystem ist dabei eine Schlüsselkomponente des Elektrofahrzeugs und beeinflusst maßgeblich die

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

B. Dorn

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: b.dorn@pem.rwth-aachen.de

M. Locke

Senior Battery Expert, ACCURE Battery Intelligence, Aachen, Deutschland

E-Mail: m.locke@accure.net

S. Wennemar (✉)

Gruppenleiterin, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: s.wennemar@pem.rwth-aachen.de

R. Ludwigs · L. Plocher

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: r.ludwigs@pem.rwth-aachen.de; l.plocher@pem.rwth-aachen.de

S. Voß

Geschäftsführer eLab und Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering
of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: s.voss@pem.rwth-aachen.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Kampker, H. H. Heimes (Hrsg.), *Elektromobilität*,

https://doi.org/10.1007/978-3-662-65812-3_15

259

Reichweite sowie die Performance. Außerdem macht das Batteriesystem einen Großteil der Kosten von heutigen Elektrofahrzeugen aus. Um im internationalen Wettbewerb langfristig erfolgreich zu sein, müssen Hersteller von Elektrofahrzeugen daher bereits in der Entwicklung und Produktion von Batteriesystemen Qualitäts- und Kostenpotenziale ausschöpfen. Darüber hinaus wird eine nachhaltige Produktion von Batteriezellen, -modulen und -systemen besonders in Europa in den kommenden Jahren immer wichtiger.

Das folgende Kapitel stellt die Herstellungsprozesse von Batteriezellen mit den Hauptproduktionsschritten „Elektrodenfertigung“, „Zellassemblierung“ und „Zellfinalisierung“ dar. Anschließend werden die notwendigen Produktionsprozesse für die Herstellung von Batteriemodulen und Batteriesystemen erläutert. Ein abschließender Ausblick auf künftige Produktionsprozesse in der Batteriezellfertigung soll mögliche Differenzierungsmerkmale für Batterie- und Elektrofahrzeughersteller aufzeigen.

15.1 Herstellungsprozess einer Batteriezelle

Die Prozesskette zur Herstellung einer Batteriezelle wird in die Elektrodenfertigung, die Zellassemblierung und die Zellfinalisierung unterteilt.¹

15.1.1 Elektrodenfertigung

Die Elektrodenfertigung umfasst sämtliche Prozessschritte zur Herstellung der Batterieelektroden. Dabei wird zwischen Anoden und Kathoden differenziert. Für die Anoden- und Kathodenherstellung kommen die gleichen Prozesse zum Einsatz, die verwendeten Materialien unterscheiden sich jedoch. Das Aktivmaterial auf Anodenseite ist in aktuellen Lithium-Ionen-Batterien graphitbasiert. Auf der Kathodenseite kommt meist NMC ($\text{LiNi}_x\text{-Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$), NCA ($\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$) oder LFP (LiFePO_4) als Aktivmaterial zum Einsatz. Die Herstellung von Anoden und Kathoden erfolgt auf separaten Produktionslinien, die üblicherweise räumlich voneinander getrennt sind, um Kontaminationen zu vermeiden. Abb. 15.1 gibt einen Überblick zu den Prozessschritten für die Fertigung von Elektroden.²

Mischen/Dispergieren

Im ersten Schritt werden die angelieferten Aktivmaterialien mit Bindern und eventuell auch mit Additiven in einem Trockenmischprozess vermengt. Danach wird Lösungsmittel hinzugegeben und nass dispergiert. Ziel des Misch- und Dispergierprozesses ist die Herstellung eines homogenen „Slurry“ mit definierter Viskosität, Partikelgröße und -verteilung.

¹Vgl. Kampker et al. 2013.

²Vgl. Korthauer 2013.

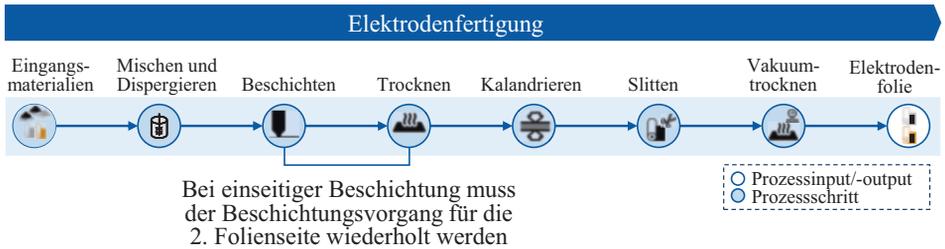


Abb. 15.1 Prozesskette der Elektrodenfertigung

Beschichten

Das Slurry wird anschließend mittels einer Pumpe zu einem Auftragswerkzeug gefördert. Als Auftragswerkzeug können verschiedene Technologien wie Schlitzdüsen oder Raket eingesetzt werden. Das Slurry wird in einem Rolle-zu-Rolle-Prozess mit Hilfe des Auftragswerkzeugs auf eine Stromableiterfolie gebracht. Relevante Parameter bei der Beschichtung sind unter anderem Scherkräfte, Schichtdicke und Kantengeometrie.

Trocknen

In einem direkt angeschlossenen Trocknungsprozess wird das Lösungsmittel aus der Beschichtung evaporiert. Je nach Art des Lösungsmittels wird es abgeführt und aufgefangen oder in einem Wiedergewinnungsprozess aufbereitet. Nach dem Trocknungsprozess wird die beschichtete Stromableiterfolie wieder aufgewickelt. Der Beschichtungs- und Trocknungsprozess muss bei einseitiger Beschichtung für die andere Folienseite wiederholt werden. Bei einer simultanen doppelseitigen Beschichtung ist dies nicht notwendig.

Kalandrieren

Das aufgetragene und getrocknete Aktivmaterial besitzt eine Porosität, die unter anderem durch den Lösungsmittelanteil, die Lösungsmittelverteilung und die Trocknung definiert wird. Aus diesem Grund wird die Beschichtung im Anschluss komprimiert, um eine für die elektrochemischen Eigenschaften gewünschte Porosität zu erzeugen. Dazu wird die beidseitig beschichtete Stromableiterfolie in einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren einem Kalandrierer zugeführt. Zur Vermeidung von Verunreinigungen wird die Beschichtungsfläche vorab gereinigt. Ein Kalandrierer besteht aus mindestens zwei in der Regel beheizten Kalandrierrollen, die einen definierten Liniendruck auf die Beschichtung ausüben.³

Slitten

In einem weiteren Rolle-zu-Rolle-Verfahren werden die breiten Elektrodenbahnen in einem Längstrennungsprozess in mehrere schmalere Elektrodenbahnen geslitten. Dazu können rollierende Schneidmesser oder Laserschneidanlagen zum Einsatz kommen.

³Vgl. Schreiner et al. 2019.

Vakuumentrocknen

Die derart erzeugten schmalen Elektroden werden in Vakuumentrocknern platziert. Mittels Temperatur- und Druckanpassungen wird den Elektroden noch Restfeuchtigkeit entzogen, bevor sie in der Zellausbaueinheit weiterverwendet werden können.

15.1.2 Zellausbaueinheit

Die Zellausbaueinheit umfasst sämtliche Prozessschritte zur Herstellung einer Batteriezelle von den Anoden- und Kathodenfolien aus der Elektrodenfertigung bis zur (Teil-)Versiegelung des Batteriezellgehäuses. Die Prozessketten differenzieren sich stark je nach Batteriezellformat. Dabei wird zwischen Rundzellen, Pouch-Zellen und prismatischen Zellen unterschieden. Abb. 15.2 zeigt die unterschiedlichen Prozessketten der Zellformate. Im Folgenden wird die Zellausbaueinheit der Pouch-Zelle detaillierter vorgestellt und die Ausbaueinheit der prismatischen und zylindrischen Zelle umrissen.

Vereinzelung

Anoden- und Kathodenfolien werden abgewickelt und in sogenannte Elektrodenblätter vereinzelung. Zur Vereinzelung können Stanzwerkzeuge oder Laserschneidanlagen eingesetzt werden. Wichtige Parameter sind vor allem die genaue Einhaltung der Schnittkanten-geometrie sowie die Schnittkantenqualität.

Stapeln

Im Anschluss wird durch eine alternierende Anordnung von Anode, Separator und Kathode ein Zellstapel produziert. Zur Herstellung des Zellstapels können unterschiedliche Verfahren wie etwa das Einzelblattstapeln oder Z-Falten zum Einsatz kommen. Die Prozessqualität wird vor allem durch die Stapelgenauigkeit bestimmt.

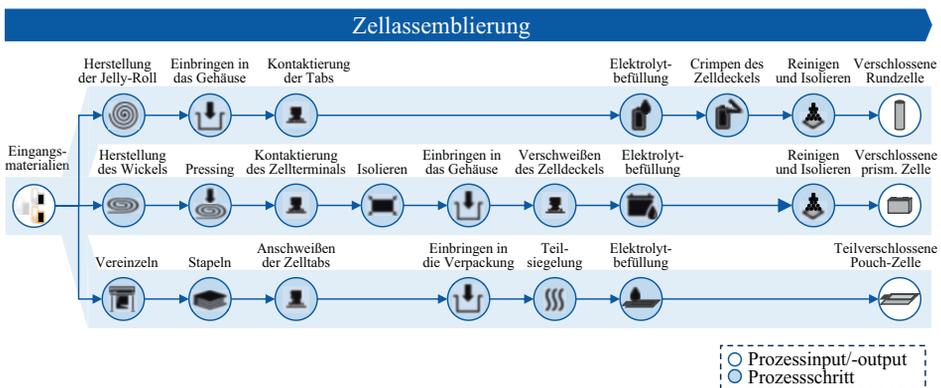


Abb. 15.2 Prozesskette der Zellausbaueinheit

Anschweißen der Zelltabs

Die übereinanderliegenden, unbeschichteten Zellfahnen der Anoden- und Kathodenblätter werden gekürzt und jeweils mit einem sogenannten Tab verschweißt. Dadurch werden die jeweiligen Elektroden innerhalb des Zellstapels parallel miteinander verschaltet.

Einbringen in die Verpackung und Teilsiegelung

Der Zellstapel wird in eine tiefgezogene Pouch-Folie eingebracht und mit einer weiteren Pouch-Folie bedeckt. Im Anschluss werden drei Seiten der Zelle versiegelt. Dazu werden heiße Siegelbalken auf die übereinanderliegenden Pouch-Folien gepresst, die die Innenschichten der Pouch-Folien miteinander verschmelzen.

Elektrolytbefüllung

Über die verbliebene offene Seite wird der Elektrolyt in die Zelle eingebracht. Die gleichmäßige Benetzung des Elektrolyten, eine definierte Elektrolytmenge und eine extrem niedrige Luftfeuchtigkeit während der Befüllung sind die ausschlaggebenden Merkmale dieses Prozesses. Dazu wird eine hochgenaue Dosierlanze verwendet, die Zelle abwechselnd befüllt und mit einem definierten Druckprofil beaufschlagt. Dadurch werden die Kapillareffekte innerhalb der Zelle aktiviert.

Vorläufige Versiegelung

Nach der Befüllung wird die Zelle auf der verbliebenen offenen Seite versiegelt. Diese letzte Siegelnaht wird mit einigem Abstand zum Zellstapel vorgenommen, so dass sich ein verschlossener Hohlraum – die sogenannte Gastasche – innerhalb der Siegelnaht befindet, der im Laufe der Zellfinalisierung benötigt wird.

Rundzelle

Im Gegensatz zu einem Zellstapel wird für die Rundzelle eine sogenannte Jelly-Roll hergestellt. Dazu werden eine Anoden-, eine Kathoden- und zwei Separatorbahnen um einen Wickeldorn gewickelt. Die Elektroden werden vorab mit den Zell-Tabs verschweißt. Der Wickel wird mit Hilfe eines Klebestreifens fixiert und in das zylindrische Gehäuse eingebracht. Die beiden Tabs werden mit dem Gehäuse und dem Deckel verschweißt. Die Zelle wird mit Elektrolyt befüllt und der Deckel auf das Gehäuse gecrimpt. Anschließend wird die Zelle gereinigt und mittels einer Schutzfolie elektrisch isoliert.

Prismatische Zelle

In einer prismatischen Zelle kann entweder ein Zellstapel oder ein Flachwickel verwendet werden. Im Falle eines Flachwickels wird dieser nach dem Wickeln gepresst und die freien Elektrodenenden werden miteinander kontaktiert. Der Flachwickel wird an das Zellterminal und den Zelldeckel verschweißt. Der Flachwickel mit angeschweißtem Deckel wird isoliert und in das Gehäuse eingebracht, wonach der Zelldeckel mit dem Gehäuse verschweißt wird. Der Elektrolyt wird über eine Befüllöffnung im Zelldeckel eingefüllt. Danach wird die Öffnung durch einen Dorneinsatz verschlossen, die Zelle wird gereinigt und mit Hilfe einer Schutzfolie elektrisch isoliert. Die Befüllöffnung der prismatischen Zelle

wird meist nur temporär verschlossen, um im Nachgang an die Formierung das entstandene Gas zu entfernen und gegebenenfalls ein zweites Mal nach dem Pre-Charging (siehe den folgenden Abschn. 15.1.3) zu befüllen. Durch das Entgasen nach der Formierung wird Deformationen durch die Gasbildung entgegengewirkt.

15.1.3 Zellfinalisierung

Die Zellfinalisierung umfasst sämtliche Prozessschritte von der befüllten Zelle bis zur versandfertigen Zelle. Durch die hohe Abhängigkeit der bei der Zellfinalisierung stattfindenden chemischen Prozesse können die Herstellungsphasen im Gegensatz zu denen der Elektrodenfertigung und der Zellassemblierung in unterschiedlicher Reihenfolge, Häufigkeit und Dauer durchlaufen werden. Abb. 15.3 zeigt daher lediglich eine mögliche Prozesskette für jedes Zellformat.

Vorbereitung

Der Benetzungsvorgang lässt sich durch das Press Rolling/Vibration und das Hochtemperatur-Soaking (HT-Soaking) beschleunigen. Diese Prozessschritte schließen sich an den Befüllvorgang der Zelle an. Beim „Press Rolling“ wird dabei ein definierter Druck mit Hilfe eines Walzenpaares auf die Pouch-Zelle appliziert. Dabei wird der Elektrolyt in die Poren gedrückt. Bei der prismatischen Zelle und bei der Rundzelle kann dieser Prozessschritt aufgrund des starren Gehäuses nicht vorgenommen werden. Bei diesen Zellen kann der Elektrolyt durch Vibration in die Poren eingebracht werden. Beim sogenannten HT-Soaking wird die Zelle auf rund 30 bis 40 °C erhitzt.⁴ Durch die geringere Viskosität des Elektrolyten dringt dieser ebenfalls schneller in die Poren der Elektroden ein. Der Prozessschritt des HT-Soaking kann bei allen Zellformaten ausgeführt werden.

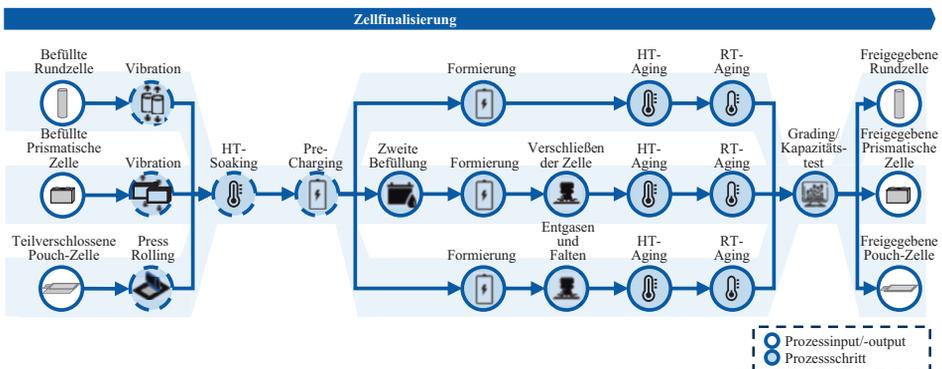


Abb. 15.3 Mögliche Prozesskette der Zellfinalisierung

⁴Vgl. Mao et al. 2018.

Pre-Charging

Beim Pre-Charging-Prozess wird die Zelle mit einer geringen C-Rate bis etwa 1,5 V geladen.⁵ Das dient dazu, eine mögliche Korrosion am Ableiter-Tab zu verhindern. Bei großformatigen Zellen (meist prismatische und Pouch-Zellen) kann der Pre-Charging-Prozess noch bis zu einem geringen „State of Charge“ (SoC) weitergeführt und die Zelle im Anschluss entgast werden. Das hat den Vorteil, dass die Gase, die beim Pre-Charging entstehen, aus der Zelle entlassen werden können und somit die mechanische Belastung durch Druckentstehung innerhalb der Zelle bei der Formierung reduziert wird. Wird das während des Pre-Charging entstehende Gas nicht abgeführt, kann es zu Gaseinschlüssen im Elektrodenmaterial und Delamination der einzelnen Elektroden- und Separatorschichten kommen, was sich negativ auf die in der Formierung ausgebildeten Produkteigenschaften auswirken kann. Prismatische und Pouch-Zelle können im Anschluss noch ein weiteres Mal mit Elektrolyten befüllt werden, um die Verluste während der Formierung auszugleichen.

Formierung

Die Formierung bezeichnet den ersten kontrollierten Lade- und Entladevorgang einer Batteriezelle. Beim ersten Lade- und Entladezyklus wird die „Solid-Electrolyte-Interface“ (SEI)-Schicht durch die Zersetzung des Elektrolyten an der Anode ausgebildet. Die ausgebildete SEI-Schicht ist abhängig von unterschiedlichen Einflussfaktoren – unter anderem von der C-Rate, der Temperatur und der Zyklenanzahl – und hat Einfluss auf die Lebensdauer, die Kapazität und die Sicherheit der Lithium-Ionen-Zelle. Der erste Ladezyklus beginnt bei einer geringen Stromstärke, damit die SEI-Schicht sich auf dem Graphit der Anoden sukzessiv und möglichst homogen formen kann. Die Ausbildung der SEI-Schicht ist in der Regel nach einem Zyklus bis maximal drei Ladezyklen vollständig abgeschlossen. Die Anzahl der aufeinanderfolgenden Zyklen, in denen die Stromstärke kontinuierlich gesteigert wird, ist vom jeweiligen Zellhersteller und den verwendeten Materialien abhängig. Die Formierung kann bis zu 24 h dauern und erfolgt entweder in einem Regal- oder einem Kammerkonzept.⁶

Finales Verschließen der Zelle

Das finale Verschließen der Zelle findet nur bei der Pouch-Zelle und bei der prismatischen Zelle statt, da die Rundzelle bereits vollständig vor der Zellfinalisierung verschlossen wurde. Bei der Pouch-Zelle wird zuerst durch das Einstechen der Gastasche mit einer Nadel das bei der Formierung entstandene Gas freigesetzt. Anschließend wird die offene Stelle erneut näher am Zell-Stack versiegelt. Das geschieht unter Vakuum, um das entstandene Gas aus der Zelle freizulassen sowie eine formstabile Zelle zu erhalten. Die Gastasche wird abgetrennt und als Sondermüll entsorgt. Zur Steigerung der volumetrischen Energiedichte werden die Siegelnähte gefaltet und geklebt. Bei der prismatischen Zelle wird die

⁵Vgl. An et al. 2017.

⁶Vgl. Sarah Michaelis et al. 2020.

Befüllöffnung mittels Laserschweißen geschlossen. Sollte schon eine Entgasung nach dem Pre-Charging Prozess stattgefunden haben, kann dieser Prozessschritt nach der Formierung entfallen.

Aging

Die Reifung, das sogenannte Aging, bezeichnet das Lagern der Batteriezelle nach der Formierung ohne weitere Stromzuführung. Der Zweck dieses Prozessschrittes ist die chemische Stabilisierung der Grenzschicht, die Sicherstellung der Funktionalität für den Langzeitbetrieb sowie die Qualitätssicherung. Zelleigenschaften werden durch eine regelmäßige Messung der Leerlaufspannung über einen Zeitraum von bis zu drei Wochen überwacht. Die Reifungsdauer ist abhängig von der Zellchemie und den Qualitätsanforderungen. Die Zellen durchlaufen dabei in der Regel zuerst ein Hochtemperatur (HT)- und anschließend ein Raumtemperatur (RT)-Aging. Ein wichtiges Qualitätsmerkmal, das bei dem Prozess des Agings kontrolliert wird, ist die Selbstentladungsrate. Die Zellen werden zum Aging in Reiferegalen oder -türmen gelagert.⁷

„End-of-Line“-Test

Der letzte Prozessschritt der Batteriezellherstellung umfasst eine mechanische und elektrische Endkontrolle und wird als „End-of-Line“ (EoL)-Test bezeichnet. Je nach Hersteller werden unter anderem Pulstests, Messungen des Innenwiderstands (DC) sowie der Selbstentladungsrate und der Kapazität, optische Inspektionen, OCV-Tests und Dichtheitstests vorgenommen. Die Batterien werden – basierend auf den Ergebnissen der unterschiedlichen Tests – in Leistungsklassen eingeteilt (Grading) beziehungsweise bei unzureichender Qualität aussortiert. Wenn die Prüfungen abgeschlossen sind und alle Tests erfolgreich bestanden wurden, können die Zellen verpackt und versendet werden.

15.2 Batteriemodul- und -packmontage

In diesem Kapitel wird die Montage von Batteriemodulen und Batteriepacks beziehungsweise Batteriesystemen vorgestellt. Dazu werden zunächst einige Grundlagen zu Modulen und Packs erläutert. Für den Einsatz in Elektrofahrzeugen werden in der Regel mehrere Zellen zu einem Batteriemodul zusammengefasst. Dabei ist darauf zu achten, dass die ausgewählten Zellen eine möglichst gleiche Qualität aufweisen, da die schwächste Zelle die Performance – Leistung, Ladezeit und Lebensdauer – des gesamten Moduls bestimmt. Die Verschaltung der Zellen ist üblicherweise so ausgelegt, dass die Spannung des Moduls 60 V nicht überschreitet.⁸ Grund dafür ist die erhöhte Gefährdung des Personals bei höheren Spannungsniveaus, weshalb eine besondere Schulung der Mitarbeitenden sowie umfassende Sicherheitsmaßnahmen erforderlich sind. Grundsätzlich unterscheiden sich Batteriemodule in ihrer Gestalt, Kühlung und Kontaktierung in Abhängigkeit vom eingesetzten Zellformat:

⁷Vgl. Duffner et al. 2021.

⁸Vgl. Kim et al. 2015.

- Pouch-Zellen können aufgrund ihres nicht formsteifen Gehäuses „atmen“. Um dies zu begrenzen, werden Pouch-Zellen für die Modulmontage verspannt. Die Verschaltung von Pouch-Zellenmodulen kann dabei über sogenannte U-Profile erfolgen. Außerdem besteht bei Pouch-Zellen die Möglichkeit, eine Kühlung in den Zellzwischenräumen zu realisieren.
- Rundzellen weisen eine besonders hohe Steifigkeit auf. Aus diesem Grund ist bei diesen Zellen keine Verspannung der Zellen notwendig. Ihre Positionierung und Fixierung erfolgt klassischerweise mit Zellhaltern, in die die Zellen eingesteckt werden. Die Kontaktierung lässt sich aufgrund der Position der beiden Pole über Deckel und Bodenplatte realisieren. Die Zwischenräume aufgrund der Zellgeometrie ermöglichen eine Kühlung an den Zellwänden.
- Prismatische Zellen werden in der Regel in Metall- oder Kunststoffgehäusen zunächst verklebt und anschließend zur Reduktion der Zellatmung verspannt. Der Kleber dient neben der Fixierung als thermischer und elektrischer Isolator. Als Material eignen sich dazu Polyurethane mit Elastomer-Eigenschaften. Die Kühlung prismatischer Zellen erfolgt über die Ober- oder Unterseite der Zellen.

Mehrere solcher Module werden im Anschluss zu einem Batteriepack verschaltet. Die Verschaltung erfolgt, abhängig von den Anforderungen an Spannung und Stromstärke, parallel oder in Serie. Neben den Modulen gehören zu einem Batteriepack weitere Komponenten, die die Sicherheit und Funktionsfähigkeit des Systems gewährleisten. Das können sowohl mechanische als auch elektrische und elektronische Bauteile sein.

15.2.1 Montageprozess des Moduls

Im Folgenden wird die Montage von Batteriemodulen in Abhängigkeit vom jeweiligen Zelltyp erläutert. Die Montage erfolgt in den fünf Schritten Vormontage (Eingangsprüfung, Reinigung, Stecken/Kleben/Stapeln), Verpressen, elektrische Kontaktierung (Auflegung des Busbars, Verschweißen/Fügen, Prüfen Schweißverbindung), Montage der Slave Platine und des Deckels (Anbringen Platinen & Sensoren, Montage Deckel) sowie der Endkontrolle (EoL-Tests), wie Abb. 15.4 zeigt.

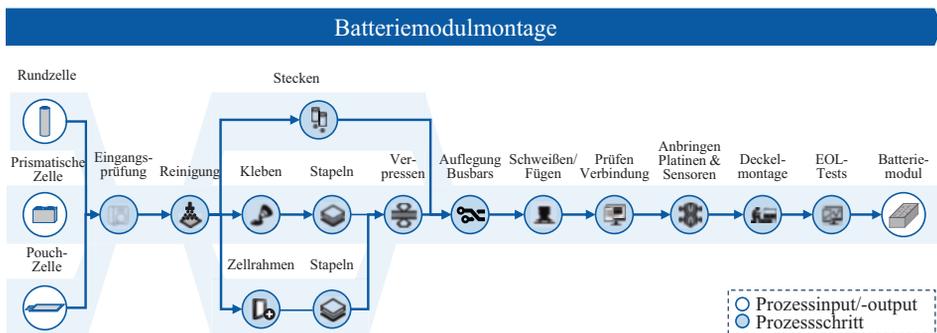


Abb. 15.4 Montageprozess des Batteriemoduls

Vormontage

Im Rahmen der Vormontage werden die Zellen in einer Eingangskontrolle zunächst auf ihre Qualität geprüft. Dazu werden Eigenschaften wie Spannung, Innenwiderstand und Kapazität gemessen, und die Zellen werden klassifiziert oder im Extremfall aussortiert. Anschließend werden sie gereinigt. In Abhängigkeit vom Zellformat erfolgt die Montage mehrerer Zellen zu einer Einheit. Zylindrische Zellen werden dazu in einen Zellhalter gesteckt, während prismatische Zellen zu Stapeln verklebt werden. Der Kleber kann sowohl mit Hilfe einer Klebepistole als auch in Form von Klebestreifen aufgetragen werden. Pouch-Zellen hingegen werden aufgrund ihrer geringen Formsteifigkeit zunächst in Zellrahmen integriert und im Anschluss gestapelt. Wichtige Parameter bei der Vormontage sind die Positionsgenauigkeit und die Prozessgeschwindigkeit.

Verspannung

Prismatische Zellen sowie Pouch-Zellen werden im Anschluss an die Vormontage verspannt. Optional kann außerdem eine elektrische Isolation erfolgen. Dazu werden Kunststoffplatten oder Folien an den Seiten des Zellstapels montiert, die den Stapel im Falle eines Kurzschlusses gegenüber dem Gehäuse isolieren. Für die Verspannung werden die Zellstapel mittels Spannvorrichtung, Bandage oder durch den Modulkörper verpresst, bevor sie in das Gehäuse eingesetzt werden.

Elektrische Kontaktierung

Für die elektrische Kontaktierung werden zunächst starre Leiter, sogenannte Busbars, auf die Zellstapel gelegt. Anschließend können diese mit Hilfe verschiedener Fügetechnologien mit den Zellen verbunden werden. Zur Auswahl stehen Laser-, Ultraschall- oder Widerstandsschweißen. Die Technologien weisen dabei unterschiedliche Vorzüge und Nachteile auf. Insbesondere Ultraschall und Laserschweißen werden in der Industrie verstärkt für die Zellkontaktierung verwendet. Laserbasierte Systeme bieten dabei die Vorteile einer hohen Flexibilität und geringer Kontaktwiderstände bei gleichzeitig hoher mechanischer Stabilität. Eine alternative Kontaktierungstechnologie, die bei Rundzellen zum Einsatz kommt, stellt das Drahtbonden dar. Diese Methode kann sowohl laser- als auch ultraschallbasiert ausgeführt werden. Die Verbindung zwischen Zellenstromsammler und Zelle wird dabei durch einen Draht realisiert, der an beiden Enden angeschweißt wird. Abgeschlossen wird der Prozessschritt durch eine optische Kontrolle der Schweißnähte beziehungsweise -punkte.⁹

Montage Slave-Platine und Deckel

Auf die Kontaktierung folgt die Montage von Slave-Platine und Schlussplatte. Die BMS-Slave-Platine wird per Schweiß- oder Schraubverfahren am Modul befestigt. Anschließend wird die Verknüpfung von Zellen und BMS mittels Schweiß- oder Steckverbindung vorgenommen. Außerdem werden Temperatursensoren in das Modul eingeklebt, das anschließend verkabelt wird, wonach wiederum der Deckel mittels Verschraubung oder Clips montiert wird.

⁹Vgl. Zwicker et al. 2020.

Endkontrolle

Abschließend wird eine Endkontrolle vorgenommen. Im Rahmen dieses Tests werden Toleranzen geprüft, Software installiert, Zell-Balancing ausgeführt, der SoC eingestellt und der elektrische Widerstand geprüft.

15.2.2 Montageprozess des Packs

In diesem Abschnitt wird die Montage der Batteriemodule zu fertigen Batteriepacks vorgestellt. Der Prozess kann in sechs Hauptschritte eingeteilt werden: Einsatz der Zellmodule (Vormontage und Einsetzen der Module), Befestigung der Module, elektrische und thermische Integration (Einsetzen von Elektronik und Kühlsystem, Verkabelung/Kontaktierung), Verschließen und Dichtheitstest (Deckelmontage und Dichtheitsprüfung), Laden und Flashen (Laden des Systems und Flashen) sowie Endkontrolle (EoL-Tests). Abb. 15.5 verdeutlicht die einzelnen Schritte.

Einsatz der Zellmodule

Im ersten Schritt werden Kühl- und Heizplatten im Batteriepackgehäuse montiert. Danach werden die Batteriemodule entpackt und in das Batteriegehäuse eingesetzt.

Befestigung der Module

Anschließend werden die Module beispielsweise mittels Verschraubung am Systemgehäuse fixiert. Dadurch wird die Steifigkeit erhöht und ein erhöhter Schutz der Module vor Vibrationen gewährleistet.

Elektrische und thermische Integration

Nach der Befestigung der Module erfolgt im Schritt der elektrischen und thermischen Integration die Montage von Kühlsystem, Batteriemanagementsystem (BMS) und Hochvoltmodul. Das Master-BMS sowie das Hochvoltmodul werden anschließend mit den Slave-BMS der Batteriemodule verkabelt. Außerdem wird das Kühlsystem an die Kühlelemente angeschlossen, und es werden die fahrzeugseitigen Anschlüsse des Batteriesystems – unter anderem Kühlkreislauf und Kabel – montiert. Eine Besonderheit in diesem

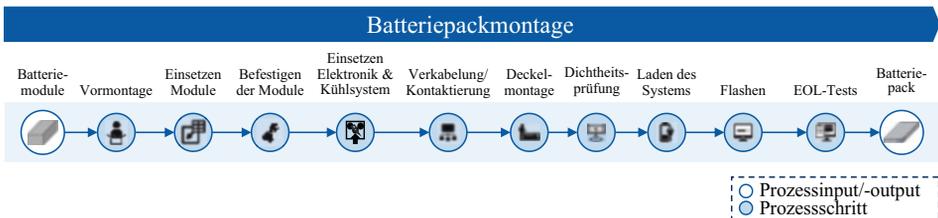


Abb. 15.5 Montageprozess des Batteriepacks

Prozessschritt stellt die manuelle Montage der Hochvoltkabel in einem ansonsten hochautomatisierten Prozess dar. Die Ursache dafür liegt in der anspruchsvollen Handhabung der biegeschlaffen Kabel.

Verschließen und Dichtheitstest

In diesem Prozessschritt wird das Pack mit Hilfe eines Deckels verschlossen und verschraubt. Zur Abdichtung wird zuvor eine Dichtschnur oder eine geklebte Dichtung aufgetragen. Der Deckel ist zur Sicherheit mit einer Berstscheibe ausgestattet, die im Falle einer Fehlfunktion mit Gasentwicklung bricht und so einen kontrollierten Druckabbau ermöglicht. Um eine Beschädigung zu verhindern, erfolgt die Montage der Berstscheibe nach der anschließenden Dichtheitsprüfung. Zum Schluss werden eine Dichtheitsprüfung des Packs und ein Leakage-Test des Kühlsystems mittels Gasprüfung vorgenommen.

Laden und Flashen

Kongruent zur Modulmontage wird im Prozessschritt „Laden und Flashen“ zunächst das BMS geflasht und anschließend die aktuelle Software installiert. Die Funktion der Software wird überprüft und das Batteriesystem bis zu einem gleichmäßigen Ladezustand der Zellen (Cell balancing) geladen. In manchen Fällen wird zusätzlich die Funktion des Thermomanagementsystems mittels thermografischem Messsystem überprüft.

Endkontrolle

Als letzter Schritt in der Packmontage erfolgt die „End-of-Line“-Prüfung, in deren Rahmen eine optische und technische Prüfung des Systems vorgenommen wird. Dazu gehört auch eine Funktionsprüfung von BMS und Thermomanagement sowie eine Leistungsprüfung mittels Be- und Entladung. Das System wird anschließend auf einen gewünschten SoC geladen und gelabelt. Nach der Anbringung von Warnhinweisen kann das System verpackt werden.

15.3 Die Zukunft der Batterieproduktion

In den kommenden Jahren ist zu erwarten, dass sämtliche Prozessschritte der Batteriezellproduktion von der Elektrodenfertigung über die Zellassemblierung bis hin zur Formierung stetig weiterentwickelt werden. Dabei bieten vor allem das Beschichten und Trocknen sowie die Formierung große Optimierungspotenziale mit Blick auf die Fertigungskosten und den Energieverbrauch.¹⁰ Darüber hinaus sind Neuerungen in der Batteriemodul- und Batteriepackmontage zu erwarten.

¹⁰Vgl. Liu et al. 2021, S. 4.

Elektrodenfertigung

Da die Trocknung und Rückgewinnung der Lösungsmittel sehr kostenintensiv und teilweise umweltschädlich sind, wird angestrebt, derzeit verwendete Lösungsmittel durch Wasser zu ersetzen. Parallel dazu stehen weitere Ansätze in der Diskussion, die es erlauben, die Menge erforderlicher Lösungsmittel zu verringern. Dadurch lassen sich die benötigte Energie und die notwendige Zeit zum Trocknen reduzieren. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass das Mischen in einem kontinuierlichen Prozess geschieht. Dies hat zum Ergebnis, dass der Fertigungsprozess effizienter ausgelegt werden kann und somit höhere Fertigungsdurchsätze erzielbar sind. Bei der Trocknung kann künftig auf neue, effizientere Trockenverfahren wie Infrarot-, Mikrowellen-, und Lasertrocknung zurückgegriffen werden. Vor allem in Kombination mit geringen Lösemittelanteilen im Slurry ist absehbar, dass diese Technologien Potenziale zur Energieeinsparung bereitstellen. Darüber hinaus erfordern sie tendenziell geringere Bauräume als herkömmliche konventionelle Konvektionstrocknung – bei gleichem oder gesteigertem Fertigungsdurchsatz. Eine weitere Reduktion des Lösemittelanteils im Slurry führt schließlich zum Verfahren der Trockenbeschichtung.¹¹ Erste Erfolge dazu werden von OEMs bereits kommuniziert.¹² Die Bestandteile der Beschichtung werden dabei als vorgemischtes Pulver auf die Stromableiterfolie gebracht und dann durch das Kalandrieren fixiert.¹³

Zellassemblierung

Die Kombination neuer, kontinuierlicher Zellassemblierungsprozesse wird die Effizienz einer Zellproduktionslinie deutlich steigern können. Als Beispiel sei das kontinuierliche Z-Falten erwähnt.¹⁴

Zellfinalisierung

Im Bereich der Zellfinalisierung besteht hohes Potenzial durch die Minderung von Investitionskosten- und Energiekosten sowie der Reduzierung der Formierdauer durch das Einbringen künstlicher „Solid-Electrolyte-Interface“ (SEI)-Beschichtungen.¹⁵ Auch ist zu erwarten, dass durch KI-gestützte Messtechnologien Prozesszeiten der Formierung und des Aging signifikant reduzieren werden können.

Neue Batteriezell-Prozesstechnologien

Mit der additiven Zellfertigung und dem 3-D-Druck von Batteriezellen werden zusätzlich vollkommen neue Produktionsverfahren auf den Markt kommen. Derzeit werden diese vor allem für die Produktion von Feststoffbatterien erforscht. Vereinzelt finden Lösungen be-

¹¹ Vgl. Hutchkins 06. September, 2021.

¹² Vgl. Tesla 2020.

¹³ Vgl. Liu et al. 2021, S. 5ff.; Vgl. Kwade et al. 2018, S. 298.

¹⁴ Vgl. Kwade et al. 2018, S. 298.

¹⁵ Vgl. Liu et al. 2021, S. 11.

reits im Pilotlinienmaßstab Anwendung.^{16, 17} Es ist jedoch davon auszugehen, dass sie vorerst nur im Bereich der Forschung, Prototypenfertigung sowie für Spezialanwendungen zum Einsatz kommen werden.

Neuerungen in Batteriemodul- und Batteriepackmontage

Die Weiterentwicklung prozesstechnischer Lösungen für die Montage von Batteriemodulen und Batteriepacks für Elektrofahrzeuge wird in den kommenden Jahren voraussichtlich vom Trend des „Cell-to-Pack“-Ansatzes beeinflusst werden. Diese Innovation soll durch den Verzicht auf das Batteriemodul einige Vorteile hinsichtlich geringeren Materialeinsatzes, günstigerer Materialien und reduzierter Fertigungsaufwände sowie hoher Automatisierungsgrade bei mindestens gleichbleibender Produktqualität und Fertigungskosten ermöglichen.¹⁸ Durch diese Maßnahme können ein Großteil der im Abschn. „Modulmontage“ beschriebenen Komponenten sowie die zugehörigen Montageschritte eingespart werden. Gleichzeitig wird das Gewicht des Batteriepacks reduziert und die Energiedichte erhöht.¹⁹

Neben dem „Cell-to-Pack“-Ansatz existieren weitere Bestrebungen, von der Flexibilität des Batteriemoduls Gebrauch zu machen. Ein Ansatz ist die Standardisierung von Batteriemodulen mit Hilfe von Baukastensystemen, die signifikante Kostenreduktionen erlauben sollen. Durch den Einsatz baugleicher Module in unterschiedlicher Anzahl pro Fahrzeug können verschiedene Fahrzeugklassen und Reichweitenoptionen realisiert werden. Infolge von Skaleneffekten lassen sich die Gesamtkosten für das Batteriesystem senken.

Literatur

Teil III: Produktion von elektrofahrzeugspezifischen Systemen

- An, S. J; Li, J; Du, Z; Daniel, C; Wood, D. L.:** *Fast formation cycling for lithium ion batteries.* In: Journal of Power Sources, Jg. 342, 2017, S. 846–852
- Blackstone Resources:** *Blackstone Resources – Battery Technology.* <https://www.blackstoneresources.ch/activities/battery-technology/>. Abruf 04.11.2021
- Duffner, F; Kronemeyer, N; Tübke, J; Leker, J; Winter, M; Schmuch, R.:** *Post-lithium-ion battery cell production and its compatibility with lithium-ion cell production infrastructure.* In: Nat Energy, Jg. 6, 2021, Nr. 2, S. 123–134
- Hutchkins, M.A.:** *A new spin on battery manufacturing.* In: pv magazine, 06. September, 2021
- Kampker, A; Vallée, D; Schnettler, A.:** *Elektromobilität.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013
- Kim, H; Oh, S.-M; Scrosati, B; Sun, Y.-K.:** *High-performance electrode materials for lithium-ion batteries for electric vehicles: Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles* Elsevier, 2015, S. 191–241

¹⁶Vgl. Sher 2021.

¹⁷Vgl. Blackstone Resources 2021.

¹⁸Vgl. Pampel et al. 2022.

¹⁹Vgl. Löbbberding et al. 2020.

- Korthauer, R.:** *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013
- Kwade, A; Haselrieder, W; Leithoff, R; Modlinger, A; Dietrich, F; Droeder, K.:** *Current status and challenges for automotive battery production technologies*. In: *Nat Energy*, Jg. 3, 2018, Nr. 4, S. 290–300
- Liu, Y; Zhang, R; Wang, J; Wang, Y.:** *Current and future lithium-ion battery manufacturing*. In: *iScience*, Jg. 24, 2021, Nr. 4, S. 102332
- Löbberding, H; Wessel, S; Offermanns, C; Kehrer, M; Rother, J; Heimes, H; Kampker, A.:** *From Cell to Battery System in BEVs: Analysis of System Packing Efficiency and Cell Types*. In: *WEVJ*, Jg. 11, 2020, Nr. 4, S. 77
- Mao, C; An, S. J; Meyer, H. M; Li, J; Wood, M; Ruther, R. E; Wood, D. L.:** *Balancing formation time and electrochemical performance of high energy lithium-ion batteries*. In: *Journal of Power Sources*, Jg. 402, 2018, S. 107–115
- Pampel, F; Pischinger, S; Teuber, M.:** *A systematic comparison of the packing density of battery cell-to-pack concepts at different degrees of implementation*. In: *Results in Engineering*, Jg. 13, 2022, S. 100310
- Sarah Michaelis; Ehsan Rahimzel; Achim Kampker; Heiner Heimes; Christian Offermanns; Marc Locke; Hendrik Löbberding; Sarah Wennemar; Axel Thielmann; Tim Hettesheimer; Christoph Neef; Arno Kwade; Wolfgang Haselrieder; Steffen Biomerke; Stefan Doose; Nicolas von Drachenfels; Robin Drees; Arian Fröhlich; Laura Gottschalk; Louisa Hoffmann; Maher Kouli; Ruben Leithoff; Sina Rahls; Julian Rickert; Lars Oliver Schmidt; Alexander Schoo; Matthias Thomitzek; Artem Turetskyy; Filip Vysoudil:** *Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030. Update 2020*. Frankfurt am Main, 2020
- Schreiner, D; Oguntke, M; Günther, T; Reinhart, G.:** *Modelling of the Calendering Process of NMC-622 Cathodes in Battery Production Analyzing Machine/Material–Process–Structure Correlations*. In: *Energy Technol.*, Jg. 7, 2019, Nr. 11, S. 1900840
- Sher, D.:** *Blackstone develops 3D printed solid-state batteries with an eye on Tesla*. In: *3D Printing Media Network*, 22.01.2021
- Tesla:** *2020 Annual Meeting of Stockholders and Battery Day|Tesla*. https://www.tesla.com/de_de/2020shareholdermeeting. Abruf 15.05.2021
- Zwicker, M; Moghadam, M; Zhang, W; Nielsen, C. V.:** *Automotive battery pack manufacturing – a review of battery to tab joining*. In: *Journal of Advanced Joining Processes*, Jg. 1, 2020, S. 100017

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Produktionsverfahren von Brennstoffzellen und -systemen

16

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Benjamin Dorn, Christoph Schön, Sebastian Hagedorn, Philipp Reims und Moritz Müller-Roden

Die Wertschöpfungskette von Brennstoffzellensystemen kann im Wesentlichen in drei übergeordnete Schritte unterteilt werden. Im ersten Schritt werden die Komponenten der Brennstoffzelle hergestellt, die den Kern des elektrochemischen Systems bilden. Die Produktion dieser Komponenten wird in Abschn. 16.1 erläutert. Im zweiten Schritt erfolgt die

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

B. Dorn

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland
E-Mail: b.dorn@pem.rwth-aachen.de

C. Schön

E-Mobility Innovation Manager, LKQ Europe, Zug, Schweiz
E-Mail: Christoph.Schoen@lkqeuropa.com

S. Hagedorn (✉)

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland
E-Mail: s.hagedorn@pem.rwth-aachen.de

P. Reims · M. Müller-Roden

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: p.reims@pem.rwth-aachen.de; moritz.mueller-roden@rwth-aachen.de

Fertigung des Brennstoffzellen-Stacks, innerhalb dessen die Komponenten zu Zellen assembliert und in Reihe verschaltet werden. Dieser Produktionsprozess ist Gegenstand von Abschn. 16.2. Abschließend wird in Abschn. 16.3 der dritte Schritt beschrieben: die Assemblierung des Brennstoffzellensystems.

16.1 Herstellung der Stack-Komponenten

Die Komponenten des Brennstoffzellen-Stacks bestehen im Wesentlichen aus der Bipolarplatte (BPP), der Membran-Elektroden-Einheit (MEA) sowie weiteren Komponenten wie Stromkollektoren und Endplatten. Im Folgenden werden die Herstellungsprozesse der einzelnen Komponenten detailliert beleuchtet.

16.1.1 Produktion von Bipolarplatten

Metallische Bipolarplatten durchlaufen in der Regel sechs Bearbeitungsschritte, die in Abb. 16.1 dargestellt sind. Nach Aufbringung einer Korrosionsschutzschicht zur Lebensdauerverlängerung werden die herstellereigenspezifischen „Flowfields“ durch einen Umformprozess in das Metall eingebracht. Auf die anschließende Vereinzelung der Bandware folgt ein Fügeprozess, bei dem zwei Bipolarplattenhälften jeweils an ihrer Rückseite verbunden werden. Der dadurch entstandene „Innenraum“ der Bipolarplatten führt später das Kühlmedium, das für den hohen Wärmeabtransport verantwortlich ist. Die entstandene Fügeverbindung wird innerhalb eines Qualitätssicherungsprozesses auf Dichtheit geprüft. Abschließend erfolgt die Aufbringung einer kunststoffbasierten Dichtungsschicht (Flowfield-Dichtung) auf dem äußeren Rand der Bipolarplattenvorderseite. Im Folgenden werden die prozesstechnischen Details der beschriebenen Fertigungsfolge betrachtet.

Beim Beschichtungsprozess metallischer Bipolarplatten kommt die physikalische Gasphasenabscheidung („Physical Vapor Deposition“ – PVD) zum Einsatz. Das von Fremdpartikeln auf der Oberfläche befreite Bipolarplatten-Rohmaterial – im Folgenden „Substrat“ genannt – wird einer mit Argon gefüllten Vakuumkammer zugeführt. Innerhalb dieser Vakuumkammer befindet sich das Beschichtungsmaterial in festem Aggregatzustand – im Folgenden als „Target“ bezeichnet – zusammen mit einer positiven Elektrode oberhalb des Substrats. Unterhalb des Substrats befinden sich Magnetkörper in spezifischer Anordnung

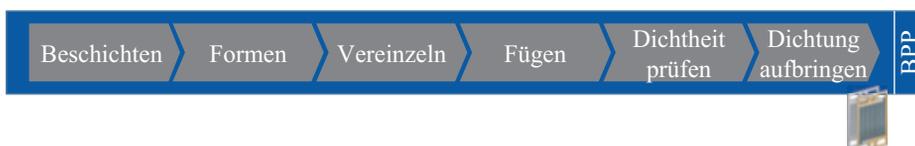


Abb. 16.1 Prozessschritte zur Herstellung von Bipolarplatten. (Vgl. Kampker et al. 2020, S. 5)

sowie eine negative Elektrode. Bei Prozessbeginn bildet sich durch Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen den beiden Elektroden ein elektrisches Feld, das zu einer Ionisierung des Argons führt. Die entstandenen Ar^+ -Ionen lösen Atome des Targets, die in Richtung der Oberfläche des Substrats beschleunigt werden und dort die geforderte Korrosionsschutzschicht bilden. Nach Abschluss des Verfahrens und einer zerstörungsfreien Inline-Qualitätsprüfung gelangt die beschichtete Bandware in den Umformprozess.

Für die Einbringung der Flowfields auf die BPP-Außenseite und der Kühlmittelkanäle auf die BPP-Innenseite kommt innerhalb des BPP-Umformprozesses meist eine der beiden alternativen Prozesstechnologien „Sheet-Hydroforming“ und „Stanzen“ zur Anwendung. Beim Sheet-Hydroforming wird das Bandmaterial durch ein mit Hochdruck (rund 1000 bis 4000 bar) aufgebrachtes Fluid auf eine Matrize gepresst und somit umgeformt.¹ Der Prozess bietet eine hohe Umformqualität bei erhöhten Taktzeiten.² Der Stanzprozess findet meist mehrstufig statt und bringt die gewünschten Geometrien per Umformwerkzeug in das Rohmaterial ein.³ Vorteil des Stanzumformens ist eine hohe Prozessgeschwindigkeit.⁴ Auf die Einbringung der Flowfields folgt die Vereinzelung der Bandware, sofern dies noch nicht parallel mit dem Umformen geschehen ist.

Innerhalb des Fügeprozesses werden jeweils zwei halbe Bipolarplatten auf ihrer Kühlmittelseite miteinander verbunden. Dies geschieht zunächst durch eine Positionierung und gegebenenfalls Fixierung der beiden Komponenten, woraufhin über den äußeren Umfang per Laserschweißverfahren eine Schweißnaht erzeugt wird. Ist der Fügeprozess abgeschlossen, wird die Dichtheit des Innenraums der Bipolarplatte geprüft.

Für die Dichtheitsprüfung der Bipolarplatten existieren unterschiedliche Verfahren, die sich unter anderem durch das Prüfmedium, die Prüfdauer und den Prüfgrenzwert unterscheiden. Beispielsweise kann eine Akkumulationsprüfung unter Verwendung von Helium oder eine Vakuumprüfung unter Verwendung von Luft als Prüfgas erfolgen.⁵ Ausschlaggebend bei der Wahl einer passenden Prüfmethode sind die erforderlichen Prüfgenauigkeiten, die der Stack-Hersteller vorgibt. Nach einer erfolgreichen Dichtheitsprüfung wird die Flowfield-Dichtung auf die BPP-Außenseiten appliziert.

Die Aufbringung der Flowfield-Dichtungsschicht auf die Ober- sowie Unterseite der Bipolarplatte kann per Siebdruckverfahren oder Dispenser ausgeführt werden. Muss sich die Bipolarplatte beim Siebdruckverfahren unterhalb eines Schablonenträgers befinden, kann die Flowfield-Dichtung per Dispenser auch unter flexiblen Freiheitsgraden aufgebracht werden. In beiden Fällen müssen im Laufe des Applikationsprozesses beide Seiten der Bipolarplatte zugänglich gemacht werden. Die Dichtungsapplikation stellt den letzten Schritt der Bipolarplattenfertigung dar.

¹Vgl. Kampker et al. 2020, S. 20; Vgl. Bell et al. 2020, S. 791.

²Vgl. Koc et al. 2009, S. 1774.

³Vgl. Alo et al. 2019, S. 928.

⁴Vgl. Institute of Electrical and Electronics Engineers et al. 2010, S. 288.

⁵Vgl. Vinogradov et al., S. 100.

16.1.2 Produktion von Membran-Elektroden-Einheiten

Die Membran-Elektroden-Einheit entsteht durch die Verbindung einer katalysatorbeschichteten Membran (CCM) mit zwei Gasdiffusionsschichten (GDL).⁶ Die zugehörigen Bearbeitungsschritte sind Abb. 16.2 zu entnehmen. Dieser Verbindungsprozess erfolgt über das sogenannte Heißpressverfahren. Derzeit meist stückweise realisiert, entwickeln sich die Forschungsbestrebungen hin zu einem kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle-Verfahren.⁷ Die Herstellung der katalysatorbeschichteten Membran mit dem sogenannten Decal-Verfahren und die Fertigung der Gasdiffusionsschicht – basierend auf einem klassischen Papierherstellungsprozess – werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

16.1.3 CCM

Durch den Mischprozess werden unter anderem die Materialverteilung und die Viskosität des Katalysator-Slurry für die Brennstoffzelle beeinflusst. Im Rahmen des Mischvorgangs werden das Katalysatorpulver, Ionomer, Lösungsmittel und gegebenenfalls weitere Produkte gerührt oder per Ultraschall dispergiert. Dabei ist es notwendig, dass sämtliche Katalysatorpartikel gleichmäßig in Kontakt mit den anderen Mischkomponenten kommen. Ist darüber hinaus die Viskosität des gemischten Slurry zu gering, besteht die Gefahr der Substratdurchdringung. Ist die Viskosität zu hoch, können Schwierigkeiten in der gleichmäßigen Materialverteilung oder beim Trocknen auftreten.⁸ Sobald der gewünschte Materialzustand durch den Mischprozess eingestellt ist, folgt die Substratbeschichtung.

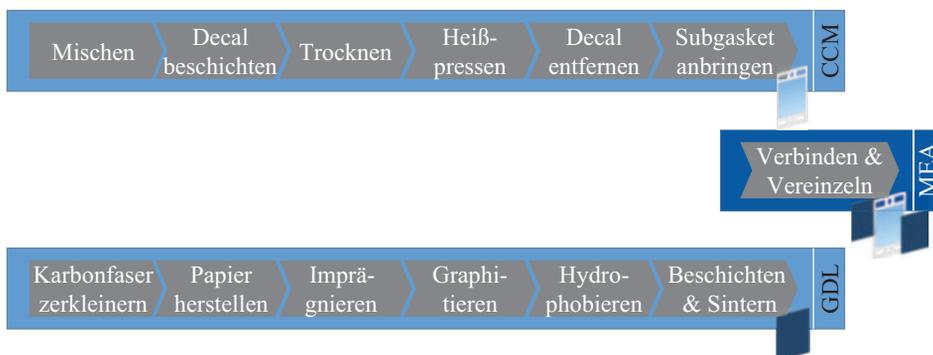


Abb. 16.2 Prozessschritte zur Herstellung von Membran-Elektroden-Einheiten. (Vgl. Kampker et al. 2020, S. 5)

⁶Vgl. Shahgaldi et al. 2018, S. 1023.

⁷Vgl. Mayyas und Mann 2019, S. 512.

⁸Vgl. Zhang 2008, S. 893.

Nach aktuellem Stand der Technik erfolgt die Substratbeschichtung per Decal-Verfahren. Aufgrund der hydrophilen Eigenschaften der Polymermembran wird das viskose Katalysator-Slurry zunächst auf einer Trägerfolie – dem sogenannten Decal (Aufkleber) – aufgebracht. Der Beschichtungsprozess kann per Schlitzdüse, Sprühverfahren oder Rakel erfolgen. Das beschichtete Decal, in der Regel aus Polytetrafluorethylen (PTFE) bestehend, wird im Anschluss einem Trocknungsprozess unterzogen, bei dem Lösemittel aus dem Katalysator-Slurry ausgedampft und das Material verfestigt wird.⁹ Beim anschließenden Heißpressverfahren wird bei einer Temperatur von etwa 140 °C die Katalysatorschicht vom Decal auf die Polymermembran übertragen. Um eine Produktion in Großserie zu gewährleisten, sollte dieses Verfahren in einem kontinuierlichen Prozess stattfinden. Im Anschluss an die Übertragung wird das Decal möglichst ohne Slurry-Rückstände entfernt. Es folgt die Applikation des Subgaskets.

Das Subgasket aus PET-Material wird im industriellen Maßstab beispielsweise in Anlehnung an ein Patent der Firma 3M über ein Rolle-zu-Rolle-Verfahren um die MEA appliziert.¹⁰ Zunächst werden CCM-Sheets auf die Unterseite des Subgasket-Bandmaterials gebracht. Im Anschluss erfolgt die Applikation eines zweiten Subgasket-Bands auf die CCM-Sheets. Nach Entfernen von überschüssigem Subgasketmaterial im Bereich der aktiven Fläche werden dort GDLs aufgebracht. Es entsteht Fünf-Lagen-MEA-Bandmaterial, das nach Vereinzelung und einem erneuten Heißpressvorgang in die auszuliefernden MEAs überführt wird. Die Herausforderung bei diesem Verfahren besteht in der korrekten Platzierung und Ausrichtung der CCM, Subgaskets und GDLs im Verhältnis zueinander, was eine komplexe Anlagentechnologie bedingt.¹¹

16.1.4 GDL

Die Gasdiffusionslage (GDL) besteht aus Karbonpapier. Nach der Zerkleinerung von PAN-Fasern erfolgt die Verarbeitung zu Papier.¹² Das etwa sechs bis zwölf Millimeter lange PAN-Schnittgut durchläuft anschließend die Verarbeitung zu einer Suspension. Daraufhin wird das Material über unterschiedliche Rollenführungen zu Nassvlies verpresst und getrocknet sowie kalandriert.¹³

Eine Nachbehandlung des Karbonpapiers mit duroplastischem Harz erzeugt die gewünschte Materialfestigkeit sowie Porosität. Nach Aufbringen einer Vorspannung und einer Vorbenetzung erfolgt das Eintauchen in das Harzbad, wobei der Harzgehalt durch

⁹Vgl. Kampker et al. 2020, S. 8.

¹⁰Vgl. Eric J. Iverson et al., S. 1.

¹¹Vgl. James et al. 2018, S. 140.

¹²Vgl. Vince Kelly, S. 2 f.

¹³Vgl. Christopher J. Biermann, S. 209.

das spezifische Gewicht und die Dichte der Harzlösung eingestellt wird.^{14, 15, 16, 17} Innerhalb eines nachgelagerten Trocknungsprozesses werden verbliebene Lösungsmittel bei zirka 150 °C verdampft und das Harz wird gehärtet.

Beim Graphitierungsprozess erfolgt die Umwandlung der Kohlenstoffstruktur des Karbonpapiers in Graphitstruktur, was ein höheres Elastizitätsmodul, höhere elektrische sowie thermische Leitfähigkeit und höhere oxidative Beständigkeit hervorruft. Bei Temperaturen zwischen 1400 und 3000 °C werden 99 % des PAN-Polymers in Kohlenstoffstruktur umgewandelt. Innerhalb des GraphitierungsOfens herrscht Schutzgasatmosphäre unter Verwendung von Stickstoff, Argon oder Bor.¹⁸

Zur Verbesserung der hydrophoben Eigenschaften wird das GDL-Substrat in eine wässrige PTFE-Lösung getaucht. Dieser Prozess ähnelt dem Verfahren des Imprägnierens. Nach Benetzung des Materials folgt auf die Entfernung der Lösemittel durch Trocknung ein Sinterprozess, bei dem die PTFE-Partikel bei etwa 300 bis 350 °C an das Grundmaterial gebunden werden.¹⁹

Die mikroporöse Schicht (MPL) verbessert das Wassermanagement im Bereich der Katalysatorschichten. Sie führt flüssiges Wasser effektiv ab. Die MPL wird per Rakel mit einer Schichtdicke von rund 50 µm auf die GDL getragen. Alternativ dazu ist die Verwendung von Siebdruck oder Sprühen möglich. Der Prozess endet mit einer langsamen Verdampfung der Lösemittel (Vorwärmen) und einem anschließenden Sinterprozess, der für ausreichende Haftung zwischen Beschichtung und Grundmaterial sorgt.²⁰

16.1.5 MEA

Die Membran-Elektroden-Einheit entsteht durch Zusammenfügen der katalysatorbeschichteten Membran mit den Gasdiffusionslagen auf Anoden- und Kathodenseite (Sieben-Lagen-MEA). Das sogenannte MEA-Bonding findet – ähnlich zum Decal-Verfahren – per Heißpressvorgang statt. Bei der Auslegung des Prozesses kommt es darauf an, dass die Heißpresstemperatur nicht zu hoch gewählt wird. Übersteigt sie die Glasübergangstemperatur zu sehr, verliert die Polymermembran ihre wasserbindenden Eigenschaften und die Ionomer-Säuregruppe baut sich ab. Des Weiteren kann die Katalysatorschicht von der Membran abgelöst werden.²¹

¹⁴Vgl. Hauke Lengsfeld et al., S. 37.

¹⁵Vgl. Park 2018, S. 98.

¹⁶Vgl. Vielstich 2010, S. 1619.

¹⁷Vgl. Pilato 2010, S. 270 ff.

¹⁸Vgl. Morgan 2005, 304 ff.

¹⁹Vgl. Vielstich 2010, S. 1622.; Vgl. Kampker et al. 2020, S. 16.

²⁰Vgl. Vielstich 2010, S. 1622.

²¹Vgl. Zhang 2008, S. 911.

16.1.6 Produktion weiterer Komponenten

Für die Produktion des Brennstoffzellen-Stacks werden außerdem zwei Endplatten und zwei Stromkollektoren benötigt. Endplatten bestehen in der Regel aus Aluminium, Edelstahl oder Titan.²² Sie werden durch Fräsen oder Druckgießen hergestellt. Zu den Anforderungen an Endplatten gehören zum einen hohe mechanische Festigkeit und zum anderen geringer Bauraum und geringes Gewicht. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind besondere Geometrien erforderlich – beispielsweise Wabenstruktur.²³ Diese Geometrien sind derzeit vielfältig, weshalb ein Produktionsverfahren bevorzugt wird, das individuelle Geometrien verarbeiten kann. Stromkollektoren ermöglichen die Stromabnahme in Richtung Verbraucher. Da die Komponente eine hohe elektrische Leitfähigkeit besitzen sowie temperaturbeständig und druckfest sein muss, kommen häufig Kupfer, goldbeschichteter Edelstahl oder beschichtete Titanlegierungen zum Einsatz. Die 0,3 bis 1 mm dicken Stromkollektoren werden vorzugsweise gestanzt.

16.2 Fertigung des Brennstoffzellen-Stacks

Bei der Fertigung des Brennstoffzellen-Stacks werden die einzelnen Brennstoffzellen zu einer funktionalen Einheit verschaltet. Der Brennstoffzellen-Stack besteht aus einer beliebigen Anzahl einzelner Brennstoffzellen. Sie werden in Serie verschaltet und ermöglichen dadurch eine skalierbare Einstellung des Leistungsbereichs des Brennstoffzellensystems. Zusätzlich zu den verschalteten Zellen benötigt der Stack weitere Peripheriekomponenten, die die Funktionsweise der elektrochemischen Reaktion sicherstellen. Jeder Stack beinhaltet dazu Endplatten, Stromkollektoren, Verteilerplatten und eine Überwachungseinheit, wie in Abb. 8.3, Abschn. 8.3.1 dargestellt. Entlang des Fertigungsprozesses des Brennstoffzellen-Stacks werden diese Komponenten montiert und verschaltet.

Abb. 16.3 zeigt den Fertigungsprozess eines Brennstoffzellen-Stacks. Er untergliedert sich grob in sechs Prozessschritte des Stapelns und Montierens der Zellen, des Komprimierens des Stapels mit anschließender Verspannung, der Dichtheitsprüfung und des



Abb. 16.3 Fertigungsprozess eines Brennstoffzellen-Stacks

²²Vgl. Bendzulla 2010, S. 71.

²³Vgl. Dey et al. 2019, S. 4.

Finalisierungsprozesses. Abschließend wird der Stack eingefahren und geprüft. Die einzelnen Prozessschritte werden nachfolgend detaillierter beleuchtet.

Stapeln und Vormontieren

Der erste Schritt des Fertigungsprozesses ist das Vormontieren der Endplatte und des Stromkollektors, die die einzelnen Brennstoffzellen umschließen. In der Industrie werden zur vereinfachten Positionierung der Komponenten Führungsschienen verwendet. Im Anschluss werden die Brennstoffzellen übereinandergestapelt. Dabei werden die Zellen nicht als vollständige Einzelzelle übereinandergelegt, sondern alternierend zwei verschweißte Bipolarhalbplatten (siehe Abschn. 8.2) und eine MEA gestapelt. In Abhängigkeit von der Ausführung der MEA – fünf oder sieben Lagen – muss zwischen BPP und MEA noch eine Dichtung gestapelt werden. Ist die benötigte Anzahl von Zellen gestapelt, folgen ein zweiter Stromkollektor und die Verteilerplatte, die die Medienanschlüsse beinhaltet. Aufgrund der unterschiedlichen Formen und Strukturen der verschiedenen Komponenten ist eine hohe Positionierungsgenauigkeit zu gewährleisten, um die Dichtigkeit des Stacks sicherzustellen.

Komprimieren

Der vollständig gestapelte Stack muss im nächsten Prozessschritt komprimiert werden, um die Dichtigkeit und Eigensteifigkeit herzustellen. Dabei wird der Stapel mit Hilfe einer Presse und einer Presskraft von 40 kN bis 60 kN komprimiert. Es bestehen hohe Anforderungen an die Sauberkeit der Verspannungsanlage und die Präzision mit Blick auf Presskraft und Versatzweg.

Verspannen

Der komprimierte Stapel wird verspannt, um den Druck aufrechtzuerhalten. Dafür können Gewindestangen, Spannbänder oder ein spannungstragendes Gehäuse verwendet werden. Spannbänder weisen gegenüber den Gewindestangen Vorteile in Bezug auf Bauraum, Gewicht und Montagegeschwindigkeit auf – sie sind jedoch häufig nicht zerstörungsfrei demontierbar.

Dichtheit prüfen

Zur Überprüfung der Dichtheit des Stacks werden die Medienanschlüsse der Verteilerplatte an eine Prüfanlage angeschlossen. Bei der Durchführung von Druckabfall- und Durchflusstests wird sowohl die Gesamtdichtheit des Stacks als auch der einzelnen Medienkreisläufe überprüft. Vor allem für den wasserstoffführenden Anodenkreislauf bestehen hohe Anforderungen, zum Beispiel maximale Leckraten von $1 \times 10^{-2} \text{ Pa m}^3/\text{s}$.²⁴

²⁴DIN EN IEC 62282-2-100 (VDE 0130-2-100):2021-04, Brennstoffzellentechnologien – Teil 2–100: Brennstoffzellenmodule – Sicherheit (IEC 62282-2-100:2020); Deutsche Fassung EN IEC 62282-2-100:2020.

Finalisieren

Nach bestandener Dichtheitsprüfung werden die letzten Peripheriekomponenten des Stacks montiert. Dazu zählt insbesondere die „Control-Voltage-Module“ (CVM)-Einheit, die zur Spannungsüberwachung der einzelnen Zellen dient. Sie wird dafür mit den einzelnen Bipolarplatten unter Verwendung eines Epoxidharzes kontaktiert. An die Stromkollektoren des Stapels wird eine Stromsammelschiene montiert, die später den Anschluss für die HV-Verkabelung darstellt. Zuletzt wird der Stack in ein Gehäuse gefügt und isoliert.

Einfahren & Prüfen

Der abschließende Prozessschritt in der Produktion von Brennstoffzellen-Stacks dient vor allem der Herstellung ihrer Leistungsfähigkeit. Im Einfahrprozess („Break-in“) werden dem Stack Reaktionsmedien zugeführt sowie verschiedene Last- und Betriebszyklen durchlaufen. Die Leistungsfähigkeit des Stacks steigt dabei zu Beginn stark an und nähert sich anschließend asymptotisch einem Optimum. Die genauen Vorgänge während des Break-in-Prozesses sind noch nicht vollständig erforscht. Es treten verschiedene Wirkmechanismen auf, die zusammen zur Steigerung der Leistungsfähigkeit führen. So werden beispielsweise Übergangswiderstände durch die initiale Befeuchtung der Membran verringert und Verunreinigungen vom Katalysator entfernt. Da das Einfahren der zeitintensivste Prozessschritt ist, muss ein Optimum zwischen der Prozesszeit und der eingestellten Leistungsfähigkeit des Stacks definiert werden. Abschließend werden die Leistung, die elektrische Isolation und in manchen Fällen die Dichtheit überprüft.

16.3 Assemblierung des Gesamtsystems

Die Assemblierung des Brennstoffzellen-Gesamtsystems findet gemäß dem aktuellen Stand der Technik in drei Prozessschritten statt (vgl. Abb. 16.4). In der Montage der Balance-of-Plant werden die unterschiedlichen Systemkomponenten wie Stack, Luftbefeuchter, Verdichter und Rezirkulationsgebläse zu einem Brennstoffzellensystem mechanisch assembliert. Die elektrische Integration verbindet die Systemkomponenten mit dem Steuergerät. Beim End-of-Line-Testing werden Sicherheits- sowie Leistungstests vorgenommen. Im Folgenden werden die einzelnen Prozessschritte näher betrachtet.

Im Fertigungsschritt „Balance-of-Plant montieren“ werden alle Peripheriekomponenten des Brennstoffzellensystems befestigt (vgl. Abb. 16.5). Zunächst wird der Stack an einem Rahmen fixiert, der gleichzeitig zur späteren Anbindung ins Fahrzeug genutzt wird. Die



Abb. 16.4 Prozessablauf der System-Montage der Balance-of-Plant

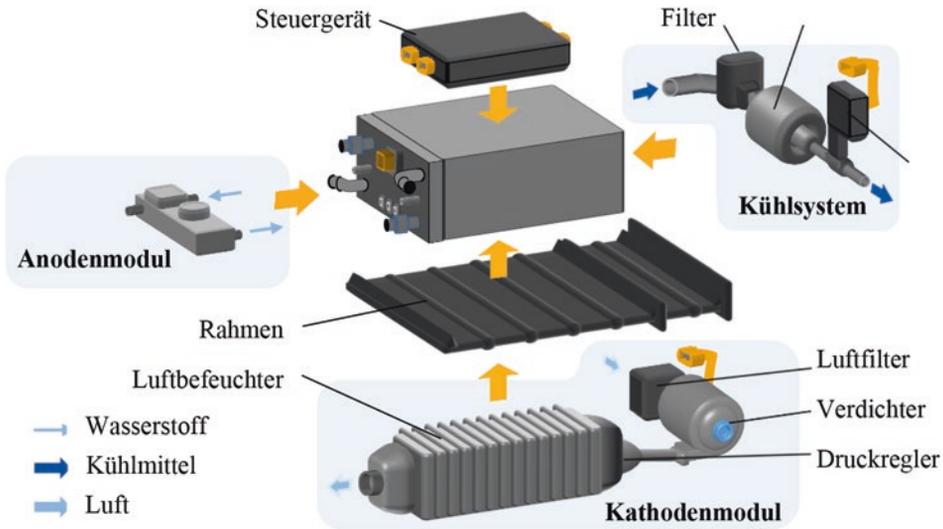


Abb. 16.5 Schematische Darstellung der Montage der Balance-of-Plant. (Vgl. Kampker et al. 2020)

einzelnen BoP-Komponenten werden anschließend entweder am Rahmen oder direkt am Stack montiert, was aufgrund heutiger geringer Stückzahlen und einer erhöhten Montagekomplexität meist in manueller Arbeitsweise erfolgt.²⁵ Als Alternative zur direkten Montage der einzelnen Komponenten an Rahmen oder Stack ist es möglich, zunächst die Vormontage der einzelnen Baugruppen umzusetzen. Die Montage der Balance-of-Plant ist im Detail stark vom Systemdesign abhängig, da sich sowohl die verwendeten Komponenten als auch deren Anordnung zueinander je nach Anwendungsfall und Leistungsspektrum fundamental unterscheiden können.

Die elektrische Integration umfasst den Anschluss des Kabelbaums sowie der HV-Ausgangsverkabelung. Das HV-Kabel, das zum Antriebsstrang führt, wird an den vorgesehenen Anschlüssen am DC/DC-Wandler kontaktiert. Außerdem wird der Kabelbaum an die Leistungsverteilung und die Regelung des Brennstoffzellensystems angebracht. Dieser enthält alle weiteren elektrischen Verbindungen zum Fahrzeug, zum Beispiel zum Hauptsteuergerät und zum Niedervolt-Stromkreis. Das Brennstoffzellensystem ist nun vollständig montiert.

Die „End-of-Line“ (EoL)-Prüfung bewertet nicht nur die Qualität und Sicherheit des fertigen Brennstoffzellensystems, sondern auch die Stabilität des Produktionsprozesses. Während die Detektion fehlerhafter Systemkomponenten das primäre Ziel der Prüfung ist, kann sie gleichzeitig durch die Analyse auftretender Fehlerbilder zu qualitätssichernden Maßnahmen im Produktionsprozess und einer Reduktion der Ausschussrate beitragen. Das assemblierte BZ-System wird einem Funktions- und Leistungstest unterzogen und dafür an einen EoL-Prüfstand angeschlossen. Der verwendete Prüfstand erfüllt dabei die Aufgaben der Medienzufuhr und elektrischen Last zur Simulation der Leistungsfähigkeit

²⁵Vgl. James et al. 2018.

des Systems im Fahrzeug. Das System, das in diesem Zustand nicht mit Wasserstofftanks verbunden ist, wird auf eine ordnungsgemäße Montage sowie die Erzielung der Nennleistung geprüft.²⁶

Anschließend wird außerdem die Dichtheit aller Medienkreisläufe sichergestellt. Dazu lässt sich ein Wasserstoffgemisch oder auch Helium als Prüfgas verwenden, da beide Optionen vergleichbare Leckraten feststellen.²⁷ Zuletzt wird eine optische Prüfung des Brennstoffzellensystems vorgenommen, um mögliche Beschädigungen oder sonstige Auffälligkeiten zu entdecken. Besteht das Brennstoffzellensystem sämtliche „Factory-Acceptance“-Tests, wird es zur Montage im Fahrzeug freigegeben. In der Fahrzeugintegration findet zudem die Verbindung der Leitungssysteme zu den Wasserstofftanks statt.

Die Produktion von Brennstoffzellen-Gesamtsystemen im Kontext der Automobilindustrie stellt noch eine recht junge Technologie dar und besitzt daher Optimierungspotenziale in der Großserienproduktion. Dabei sind Themen der Parallelisierung, der Automatisierung und der Teilereduktion hervorzuheben.

Für eine Parallelisierung in der Montage der Balance-of-Plant bietet es sich an, die Zahl der vormontierten Module zu erhöhen. Dadurch lassen sich Kreisläufe getrennt sowie parallel assemblieren. Eine verstärkt modularisierte Produktstruktur ermöglicht außerdem einen einfacheren Austausch defekter Komponenten und den Aufbau dezentralisierter Organisationsstrukturen im Service-Bereich.²⁸ Aufgrund der geringen Stückzahl der Produktion von Brennstoffzellenfahrzeugen läuft der Produktionsprozess meist manuell ab. Während die Leistungsüberprüfung nach der Kontaktierung mit dem Steuergerät des Brennstoffzellensystems automatisiert geschieht, werden die Sicherheitstests mit Blick auf austretenden Wasserstoff mit Hilfe eines Handprüfgeräts vorgenommen. Diese und andere manuelle Montage- und Prüfprozesse lassen sich durch einen höheren Automatisierungsgrad skalieren. Durch die Reduktion der Bauteilanzahl oder sogar komplette Neuauslegungen lassen sich Bauraum und Gewicht einsparen. Das Brennstoffzellensystem des Toyota Mirai I beispielsweise besitzt im Vergleich zu seinem Vorgängermodell einen bis zu 20 % reduzierten Bauraum bei gleichzeitiger Steigerung der Stack-Leistung um 27 %.²⁹ Die Speicherung des Wasserstoffs findet üblicherweise in zylindrischen Drucktanks statt, durch die hohe Einbußen mit Blick auf Bauraum und Fahrdynamik entstehen. Aktueller Forschungsschwerpunkt sind daher quaderförmige Drucktanks, die besser und platzsparender im Unterboden des Fahrzeugs integriert werden können.³⁰ Durch die beschriebenen Maßnahmen lassen sich die Montage und die Integration des Brennstoffzellensystems langfristig vereinfachen, so dass sich Potenziale zur Senkung der Systemkosten in der Produktion eröffnen.

²⁶ Vgl. Kampker et al. 2020.

²⁷ Vgl. Green Car Congress 2018.

²⁸ Vgl. Buchmüller 2019.

²⁹ Vgl. Nonobe 2017.

³⁰ Vgl. Hübner 2021.

Literatur

Teil III: Produktion von elektrofahrzeugspezifischen Systemen

- Alo, O. A.; Otunniyi, I. O.; Pienaar, H.:** *Manufacturing methods for metallic bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cell*. In: Materials and Manufacturing Processes, Jg. 34, 2019, Nr. 8, S. 927–955
- Bell, C; Corney, J; Zuelli, N; Savings, D.:** *A state of the art review of hydroforming technology*. In: Int J Mater Form, Jg. 13, 2020, Nr. 5, S. 789–828
- Bendzulla, A.:** *Von der Komponente zum Stack: Entwicklung und Auslegung von HT-PEFC-Stacks der 5 kW-Klasse* (Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt, Bd. 69). Jülich: Forschungszentrum Jülich, 2010. Zugl.: Aachen, Univ., Diss., 2010
- Buchmüller, M.:** *Nachhaltigkeit und Produktmodularisierung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019
- Christopher J. Biermann:** *Handbook of Pulping and Papermaking, Second Edition (z-lib.org)*, Jg. 1996
- Dey, T; Deshpande, J; Singdeo, D; Ghosh, P. C.:** *Study of PEM Fuel Cell End Plate Design by Structural Analysis Based on Contact Pressure*. In: Journal of Energy, Jg. 2019, 2019, Nr. 4, S. 1–11
- Eric J. Iverson; Daniel M. Pierpont; Michael A. Yandrasits; Steven J. Hamrock; Stephan J. Obradovich; Donald G. Peterson:** *Fuel cell subassemblies incorporating subgasketed thrifted membranes*. <https://patents.google.com/patent/US20110151350A1/en?q=US2011%2f0151350A1>. Abruf 06.07.2021
- Green Car Congress:** *Producing the Mercedes-Benz GLC F-Cell fuel-cell SUV*. <https://www.greencarcongress.com/2018/03/20180321-glcfc.html>. Abruf 06.05.2021
- Hauke Lengsfeld; Hendrik Mainka; Volker Altstädt:** *Carbonfasern; Herstellung, Anwendung, Verarbeitung*
- Hübner, I.:** *Neuartige Drucktanks für Wasserstoff*. <https://www.elektroniknet.de/automotive/elektroniknet/neuartige-drucktanks-fuer-wasserstoff.185418.html>. Abruf 11.05.2021
- Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE Robotics and Automation Society; Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering; IEEE International Conference on Automation Science and Engineering; IEEE CASE: IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2010. 21–24 Aug. 2010, Toronto, Ontario, Canada.** Piscataway, NJ: IEEE, 2010
- James, B. D; Huya-Kouadio, J; Houchins, C; Desantis, D.:** *Final SA 2018 Transportation Fuel Cell Cost Analysis -2020-01-23*: Unpublished, 2018
- James, B. D; Huya-Kouadio, J. M; Houchins, C; Desantis, D. A.:** *Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2017 Update*. Arlington, VA, 2018
- Kampker, A; Ayvaz, P; Schön, C; Reims, P.:** *Produktion von Brennstoffzellen-Systemen*. 1. Aufl. Aachen, 2020
- Kampker, A; Ayvaz, P; Schön, C; Reims, P.:** *Produktion von Brennstoffzellenkomponenten*. 1 Aufl. Aachen, Juli 2020
- Koc, M; Mahabunphachai, S; Dundar, F.:** *PEMFC Metallic Bipolar Plates: Effect of Manufacturing Method on Corrosion Resistance*. In: ECS Trans., Jg. 25, 2009, Nr. 1, S. 1773–1782
- Mayyas, A; Mann, M.:** *Emerging Manufacturing Technologies for Fuel Cells and Electrolyzers*. In: Procedia Manufacturing, Jg. 33, 2019, S. 508–515
- Morgan, P.:** *Carbon fibers and their composites*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005

- Nonobe, Y.:** *Development of the fuel cell vehicle mirai*. In: IEEJ Trans Elec Electron Eng, Jg. 12, 2017, Nr. 1, S. 5–9
- Park, S.-J.:** *Carbon Fibers*. Singapore: Springer Singapore, 2018
- Pilato, L.:** *Phenolic Resins: A Century of Progress*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010
- Shahgaldi, S; Alaefour, I; Li, X.:** *Impact of manufacturing processes on proton exchange membrane fuel cell performance*. In: Applied Energy, Jg. 225, 2018, S. 1022–1032
- Vielstich, W.:** *Handbook of fuel cells. Fundamentals, technology and applications*. Hoboken, NJ: Wiley Interscience, 2010
- Vince Kelly:** *Chopped Carbon Fiber*, S. 1–4
- Vinogradov, M. L; Kostrin, D. K; Karganov, M. V; Tiskovich, V. Y.:** *How to choose a leak detection method*: IEEE NW Russia Young, S. 100–104
- Zhang, J.:** *PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers. Fundamentals and Applications*. London: Springer-Verlag, 2008

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Produktionsverfahren elektrischer Maschinen

17

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Benjamin Dorn,
Michael Nankemann, Andreas Kraus, Christian Stäck
und Henrik Born

Unabhängig von der Art der Energiebereitstellung, sei es durch einen Hochvoltspeicher wie einer Lithium-Ionen-Batterie oder durch eine Brennstoffzelle: Im elektrifizierten Fahrzeug sind eine oder mehrere elektrische Maschinen für den Antrieb verantwortlich.

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

B. Dorn

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland
E-Mail: b.dorn@pem.rwth-aachen.de

M. Nankemann

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: m.nankemann@pem.rwth-aachen.de

A. Kraus (✉)

Senior Expert Data Engineering, PowerCo SE, Salzgitter, Deutschland
E-Mail: a.kraus@pem.rwth-aachen.de

C. Stäck · H. Born

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: c.staeck@pem.rwth-aachen.de; h.born@pem.rwth-aachen.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Kampker, H. H. Heimes (Hrsg.), *Elektromobilität*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-65812-3_17

289

Wie in Kap. 9 eingeführt, gibt es unterschiedliche Motortopologien. Aufgrund der besonderen produktbezogenen Bedeutung des Blechpakets der elektrischen Maschine wird im folgenden Kapitel das Herstellungsverfahren thematisiert. Aus produktionstechnischer Sicht ist insbesondere die Rotorproduktion als Differenzierungsmerkmal zwischen diesen Topologien zu beachten. Dabei werden auch unterschiedliche Möglichkeiten betrachtet, Technologien zur Produktion des Stators der elektrischen Maschine miteinander zu kombinieren. Aufgrund ihrer steigenden Bedeutung im Kontext der Traktionsanwendung im elektrischen Fahrzeug wird ein Hauptaugenmerk auf die Flachdraht-Technologie („Hairpin“) gelegt. Abschließend werden die Qualitätssicherung in der Produktion elektrischer Maschinen und unterschiedliche Aspekte der Montage beschrieben.

17.1 Herstellung des Elektroblechpakets

Um Wirbelstromverluste zu reduzieren, bestehen Blechpakete als Eisenkerne der aktiven Komponenten von Elektromotoren aus Paketen weichmagnetischen Elektroblechs. Das in der Automobilbranche zur Herstellung von Blechpaketen verwendete Elektroblech hat üblicherweise eine Materialstärke von zirka 0,3 Millimetern und ist mit einer wenige Mikrometer dünnen Isolationsschicht versehen.¹ Geringe Blechdicken von 0,2 Millimetern kommen meist nur in Hochleistungsanwendungen zum Einsatz, da den verbesserten Produkteigenschaften erhöhte Produktionskosten sowohl in der Rohmaterialherstellung als auch in der Verarbeitung gegenüberstehen. Für die Herstellung eines Elektroblechpakets werden einzelne Blechlamellen aus Rohmaterialband oder -tafeln ausgeschnitten und zu einem Stapel geschichtet, der im Anschluss zu einem kompakten Paket verbunden wird (vgl. Abb. 17.1). Für diese Prozessschritte existieren verschiedenen Verfahrensalternativen.

Der Produktionsprozess beginnt mit dem Zuschnitt des als Coil oder in tafelform gelieferten Elektroblechs. In Kleinserien beziehungsweise für Prototypenanwendungen werden meist Elektroblechtafeln im Laserstrahl-schneidverfahren zugeschnitten. Dieser Prozess erlaubt eine flexible Gestaltung der Blechkontur, ist jedoch mit vergleichsweise hohen Zykluszeiten verbunden. Zusätzlich nimmt die entstehende Hitze negativen Einfluss auf die Kornstruktur und damit auf die elektromagnetischen Eigenschaften des Blechs.² Die geschnittenen Bleche müssen in einem separaten Prozessschritt manuell oder automatisiert gestapelt werden. Dies gilt ebenfalls für Bleche, die im Einzelnutungsverfahren hergestellt werden. Dabei erfolgt für jede Teilgeometrie der Blechkontur – beispielsweise jede Nut eines Statorblechs – ein einzelner Stanzhub. Dementsprechend groß ist die Zykluszeit, so dass dieses Verfahren lediglich bei der Herstellung von großen Generatoren, unter anderem für Windkraftanlagen, zur Anwendung kommt. Vor allem in der Großserienproduktion ist das Stanzen im Folgegesamt-schnitt die wirtschaftlichere Alternative. Auf Schnellläuferpressen werden mit durchschnittlich 200 bis 300 Hüben pro Minute ganze Blechpakete in

¹Vgl. Doerr et al. 2018, S. 20; Vgl. Leuning et al. 2019, S. 185.

²Vgl. Naumoski 2018, S. 41ff.

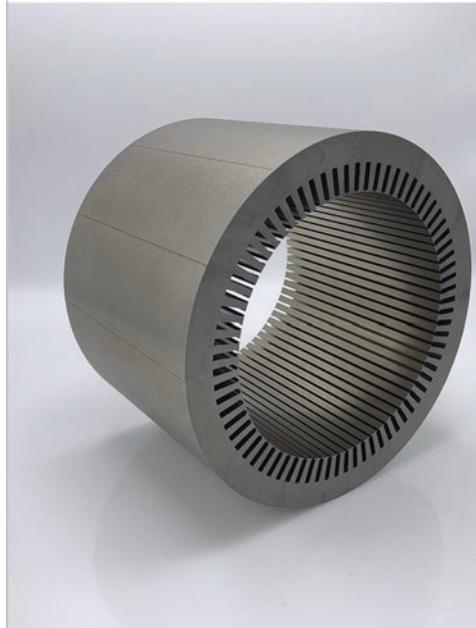


Abb. 17.1 Statorblechpaket eines Asynchronmotors. (Lifa AG)

wenigen Minuten hergestellt. Dazu wird das Elektroband durch eine Vorschubeinheit vom Coil abgewickelt und im Stanztakt über den Stanztisch geführt. Das ein bis drei Meter lange Stanzwerkzeug schneidet die vorgesehene Blechkontur innen beginnend in mehreren Schritten aus dem Coil. Im Sinne der effizienten Nutzung des Rohmaterials werden Rotor und Stator häufig in einer integrierten Anordnung gestanzt. Die fertigen Blechschnitte werden mit dem Stanzhub automatisch in der Matrize des Werkzeugs gestapelt. Aufgrund erheblicher Anlagenkosten ist dieses Verfahren insbesondere in der Großserienfertigung rentabel und zusätzlich durch hohe Werkzeugkosten in der Variantenflexibilität beschränkt.³

Das Verbinden der Blechlamellen zu einem kompakten Paket – als „Paketieren“ bezeichnet – geschieht kraft- oder stoffschlüssig. Eine kraftschlüssige Verbindung der Bleche kann bereits im Stanzwerkzeug hergestellt werden, indem jedes Blech mit Hilfe von Durchsetzungen mit dem vorangegangenen Blech verbunden wird.⁴ Dieses als „Stanzpaketieren“ bezeichnete Verfahren ist mit Verlusten der Motorleistung verbunden, da die veränderte Kornstruktur des Blechs sowie mögliche Schäden an der Isolationsschicht störende Wirbelströme verursachen. Um diese Verluste zu begrenzen, werden die Durchsetzungen in elektromagnetisch weniger relevanten Randbereichen positioniert. Alternativ besteht die Möglichkeit, Bleche durch Verschweißen oder Verkleben stoffschlüssig zu paketieren. Werden Blechlamellen mit einer Schweißnaht ver-

³Vgl. Kolbe 2020, S. 357; Vgl. Schuler Pressen GmbH 2021, S. 4.

⁴Vgl. Kolbe 2020, 387.

sehen, sind aufgrund von elektrischen Verbindungen und Veränderungen der granularen Struktur ebenfalls Wirbelströme die Folge. Konstruktions- und prozessbedingt können Schweißnähte an Blechpaketen lediglich am äußeren Rand angebracht werden. Dies führt zum einen dazu, dass die Schweißnähte beim Stator im Randbereich liegen und die Verluste aus Wirbelströmen gering ausfallen; zum anderen würden Schweißnähte außen am Rotor genau im Luftspalt zwischen Rotor und Stator liegen und damit erheblichen Einfluss auf die elektromagnetischen Eigenschaften des Motors nehmen. Daher findet das Schweißen von Rotorblechen bei Elektromotoren mit innenliegendem Rotor keine Anwendung. Elektrisch leitende Verbindungen zwischen den Blechen und deren negative Auswirkungen auf die Produkteigenschaften werden bei Klebeverbindungen weitestgehend vermieden. Im Klebeprozess wird ein Klebstoff – zum Beispiel Cyanacrylat – mittels einer Düsenanordnung vor dem Stanzprozess einseitig auf das Blech aufgetragen. Das Aushärten des Klebstoffs erfolgt bei Raumtemperatur oder unter Erwärmung bis hin zu Temperaturen von 100 °C.⁵ Neben dieser Form des Klebens hat sich das sogenannte Backlackverfahren etabliert. Dabei tritt ein wärmevernetzendes Epoxidharz an die Stelle des üblicherweise verwendeten Isolierlacks. Das separate Aufbringen von Klebstoff direkt vor dem Stanzprozess entfällt. Die gestanzten Bleche werden gestapelt in eine Backvorrichtung eingespannt und bei Temperaturen zwischen 200 und 300 °C unter Druck (>1 MPa) mehrere Stunden lang zu einem Paket verbacken.⁶ Durch die vollflächige Verbindung der Lamellen entsteht ein Paket mit hoher Festigkeit und sehr guten elektromagnetischen Eigenschaften. Den produktseitigen Vorteilen stehen jedoch erhöhte Kosten mit Blick auf das Rohmaterial und den Anlagenbedarf sowie lange Prozesszeiten entgegen.

Eine deutliche Reduktion des Verschnitts und damit des Kostentreibers Rohmaterial lässt sich durch eine Segmentierung des Stators erzielen – also durch die Aufteilung der Statorgeometrie in Ringausschnitte, die bei günstiger Werkzeuggestaltung verschnittreduziert gestanzt werden können. Diese Bauform ist zusätzlich mit dem Vorteil verbunden, dass Rotor- und Statorbleche unabhängig voneinander gestanzt werden und die Materialparameter des Elektroblechs damit anforderungsgerecht wählbar sind. Im Falle einer Segmentierung des Stators werden die einzelnen Teilsegmente im paketierten Zustand, beispielhaft in Abb. 17.2 dargestellt, zu einem fertigen Stator gefügt.

Von den verschiedenen Verfahrensalternativen zur Herstellung einer Blechkontur ist für die Stückzahlen einer Großserienfertigung also lediglich der Folgegesamtschnitt geeignet. Bei der Wahl des Paketierverfahrens steht der Kompromiss zwischen Produkteigenschaften und Kosten im Vordergrund. Das vor allem in der Großserie wirtschaftliche Stanzpaketieren ist mit produktseitigen Limitationen behaftet, wohingegen die guten elektromagnetischen Eigenschaften verbackener Pakete mit höheren Materialkosten und längeren Prozesszeiten erkauft werden. Die Segmentierung des Stators ist ein möglicher Weg, den hohen Materialkosten entgegenzuwirken.

⁵Vgl. von Lindenfels et al. 2019, S. 415.

⁶Vgl. Voestalpine 2021, S. 4.



Abb. 17.2 Backpaketiertes Teilsegment eines Asynchronmotors. (SWD Stator und Rortechnik AG)

17.2 Rotorproduktion

Im Rahmen der Rotorfertigung unterscheiden sich die zugrundeliegenden Technologieketten zwischen den einzelnen Erregungsprinzipien maßgeblich (vgl. Abb. 17.3). Im Folgenden werden diese Unterschiede herausgearbeitet und die für die Fertigung eingesetzten Technologien beschrieben. Während in FSM Wickeltechnologien zum Einsatz kommen – vergleichbar zur Statorfertigung – und die Produktion von ASM insbesondere durch die urformende Herstellung des Käfigs geprägt ist, werden für die Produktion von PMSM-Rotoren Magnete montiert. Gemeinsame Bestandteile der Fertigungskette aller drei Rortypen sind die Produktion der Rotorwelle, das Fügen der Welle in das Rotorblechpaket sowie das Auswuchten (vgl. Abb. 17.3). Diese Gemeinsamkeiten werden im Folgenden kurz erläutert, bevor sich die anschließenden Abschnitte den Prozessketten der FSM, PMSM und ASM widmen.

Die finale geometrische Form der Rotorwellen wird durch spanende Fertigungsverfahren aus dem Bereich der Hartbearbeitung hergestellt.⁷ Zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften folgt darauf eine Einsatzhärtung, die aus den Prozessschritten Aufkohlen, Härten und Anlassen besteht.⁸ Abschließend wird durch eine erneute spanende Hartbearbeitung – etwa durch Schleifen – die Oberflächengüte erhöht.

⁷Vgl. [Fleischer et al. 2020](#).

⁸Vgl. [Heco 2021](#).

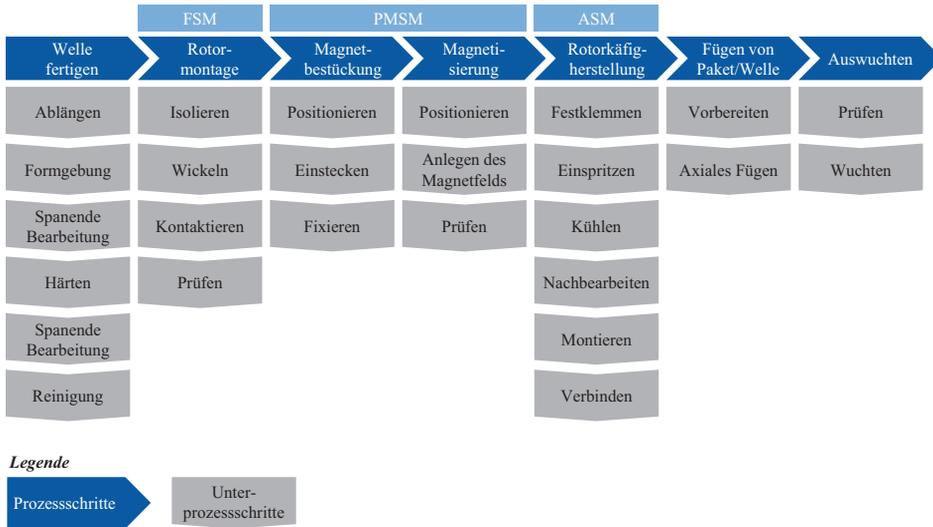


Abb. 17.3 Prozessschritte der Rotorproduktion

Zur Fügung der Welle in das Blechpaket existieren verschiedene Technologie-Alternativen.⁹ Beim Eindehnen wird die Rotorwelle gekühlt und anschließend im geschrumpften Zustand in das Blechpaket gefügt. Der Temperaturengleich führt zur Ausbildung eines Presssitzes. Üblicherweise wird in der Serienfertigung zur Kühlung der Welle Stickstoff eingesetzt. Beim Aufschrumpfen wird das Blechpaket entweder durch Induktion oder in einem Ofen erwärmt und die Welle anschließend in das ausgedehnte Blechpaket kraftlos gefügt. Sowohl durch Eindehnen als auch durch Aufschrumpfen werden Welle und Blechpaket während des Temperaturengleichs kraftschlüssig gefügt. Möglich ist auch eine Kombination der beiden beschriebenen Verfahren. Beim Einpressen wird die Welle ohne thermische Vorbehandlung mit Kraft in das Blechpaket gefügt, so dass durch eine Passungsweite die beiden Bauteile kraftschlüssig miteinander verbunden werden. Eine weitere Möglichkeit der Verbindung von Blechpaket und Rotorwelle stellt die Verwendung einer Passfeder dar. Diese kann mittels Einschlagen, Einlegen oder Einkleben montiert werden. Zur axialen Sicherung kommt in der Regel ein Sicherungsring zum Einsatz. Die Verwendung einer Passfeder entspricht dabei einer formschlüssigen Verbindung.¹⁰

Rotoren werden am Ende der Prozesskette ausgewuchtet, um etwaige Unwuchten zu neutralisieren. Dabei kann entweder das additive Wuchten oder das subtraktive Wuchten eingesetzt werden.¹¹ Beim additiven Wuchten wird dem Gesamtsystem an definierten Punkten Masse hinzugefügt – beispielsweise durch Auftragschweißen. Beim subtraktiven

⁹Vgl. Hinzen 2018, S. 125 ff.

¹⁰Vgl. Fleischer et al. 2020.

¹¹Vgl. Wossner et al. 2018, S. 1ff.

Wuchten, das derzeit den Stand der Technik darstellt, wird dem Gesamtsystem an definierten Punkten Masse entnommen. Üblicherweise werden dabei Bohrungen in die an den axialen Enden des Rotors befestigten Wuchtscheiben eingebracht.

17.2.1 Fremderregte Synchronmaschine (FSM)

Zu Beginn der FSM-Fertigung werden die Pole isoliert, die später die gewickelten Spulen aufnehmen. Für diesen Prozessschritt werden ähnliche Technologien wie zur Isolation der Statornuten eingesetzt. Nach der Isolation folgt die Bewicklung der Pole und somit der Kernprozess zur Fertigung von FSM. Die hierfür verwendeten Wickeltechnologien entsprechen den in Abschn. 17.3 (Statorproduktion) beschriebenen Verfahren. Nach der Bewicklung folgt die Montage eines Schleifrings, der in der Regel aus Kupfer hergestellt wird. Anschließend werden die Spulen mit dem Schleifring verbunden, der während des späteren Betriebs wiederum mit einer Gleichstromquelle verbunden ist. An Schleifringen kann während des Betriebs Verschleiß auftreten, wodurch die FSM im Gegensatz zur ASM und zur PMSM nicht wartungsfrei ist.¹² Um den Wartungsaufwand für FSM zu reduzieren, wurden alternative Lösungsansätze entwickelt, bei denen die Bestromung beispielsweise über Induktion realisiert wird. Durch solche Entwicklungen lässt sich der Vorteil der Wartungsfreiheit mit dem Verzicht von seltenen Erden im Rotor kombinieren.¹³ Am Ende der Prozesskette wird eine Prüfung der FSM-Rotoren vorgenommen, bei der durch testweise Bestromung oder induktive Verfahren die Wicklungen getestet werden. Relevante Prozessparameter sind dabei zum einen der Drahtzug bei der Wicklung der Spulen und zum anderen die Rotationsgeschwindigkeit des Halbzeugs. Die Qualität der Rotoren wird in erster Linie durch den Füllfaktor, Drahtbeschädigungen und Isolationsbeschädigungen charakterisiert.

17.2.2 Permanenterregte Synchronmaschine (PMSM)

Die Kernkomponente des PMSM-Rotors sind die in den Rotor integrierten Permanentmagneten. Im Folgenden wird die Herstellung von Rohmagneten, ihre Magnetisierung sowie ihre Montage in das Rotorblechpaket beschrieben.

Zur Herstellung von Neodym-Magneten werden in einem Vakuumschmelzofen zunächst die verschiedenen Bestandteile der Legierung zu einer homogenen Masse verbunden. Anschließend werden die ausgehärteten Materialblöcke zu einem feinen Pulver vermahlen. Es folgt die Pressung des Pulvers in einem Magnetfeld. Danach werden die vorgepressten Pulverblöcke in einem Vakuumsinterofen gesintert. Bei Bedarf können die Rohblöcke im Anschluss noch mit Diamantwerkzeugen auf die gewünschte Form zu-

¹²Vgl. Schäfer 2018.

¹³Vgl. MAHLE GmbH 2021.

geschnitten werden. Vor der Magnetisierung wird je nach Materialzusammensetzung noch die Oberfläche der Magneten behandelt, um einen Korrosionsschutz aufzubauen. Der folgende Prozessschritt ist die Magnetisierung, die entweder direkt im Anschluss an die Oberflächenbehandlung oder erst nach der Montage der Magneten vorgenommen werden kann.¹⁴ Beide Varianten sind im Kontext der PMSM-Rotorproduktion möglich und werden im Folgenden beschrieben.

Durch eine Magnetisierung vor der Magnetmontage wird der Montageprozess hinsichtlich Handling und Automatisierbarkeit erschwert. Die Magnetisierung wird durch ein extern angelegtes, starkes Magnetfeld erreicht. Das äußere Magnetfeld wird durch eine von einem Kondensator gespeisten Spule appliziert, wobei das äußere Magnetfeld über eine größere Sättigungsfeldstärke als die zu magnetisierenden Magnete verfügt. Die Folge ist eine irreversible Ausrichtung der Magnetspins bei Permanentmagneten. Relevante Prozessparameter, die bei der Magnetisierung zu berücksichtigen sind, sind Pulsfrequenz, Stromstärke und Außentemperatur. Ein übliches Qualitätsmerkmal des Prozesses ist die Magnetsättigung des Magnets. Wird die Magnetisierung erst nach der Magnetmontage durchgeführt, so wird ebenfalls ein starkes äußeres Magnetfeld appliziert. Dabei werden jedoch mehrere Spulen verwendet, und der Prozess muss in Abhängigkeit von der Rotorarchitektur mehrfach wiederholt werden. Dies kann wiederum die Entmagnetisierung von anderen Magneten verursachen. Die relevanten Prozessparameter und Qualitätsmerkmale entsprechen denen der Magnetisierung vor der Montage, wobei zusätzlich noch die gleichmäßige Magnetsättigung als Qualitätsmerkmal zu berücksichtigen ist.

Um das Blechpaket mit Magneten zu bestücken, können verschiedene Technologien eingesetzt werden. Es wird hierbei konstruktiv zwischen vergrabenen und oberflächennahen Magneten unterschieden. Bei vergrabenen Magneten können die Technologien „Einpressen“, „Verstemmen“ oder „Kleben“ zur Befestigung eingesetzt werden. Oberflächennahe Magneten werden durch eine Bandagierung am Blechpaket des Rotors befestigt. Beim Einpressen werden die magnetisierten oder auch noch unmagnetisierten Magnete von einem Greifer aufgenommen und in Füge richtung in die Rotornuten gepresst. Beim Verstemmen werden die Magnete nach dem Fügeprozess im Blechpaket verstemmt und somit axial fixiert. Diese axiale Fixierung der Magnete erfolgt über eine plastische Deformierung vorgesehener Konturbereiche im Blechpaket. Beim Kleben wird der Klebstoff über Düsen in die Nuten des Rotorblechpakets eingeführt; anschließend werden die Magnete in die Nuten gefügt. Der Aushärtprozess des Klebstoffs erfolgt üblicherweise thermisch in einem Ofen. Beim Bandagieren als letzte Variante werden die Magnete zunächst temporär auf dem Umfang des Rotorblechpakets fixiert und anschließend für eine dauerhafte Fixierung mit epoxidharzgetränkter Kohlefaser umwickelt. Dies dient zusätzlich als mechanischer Schutz der Magnete.¹⁵

¹⁴Vgl. Franke et al. 2011.

¹⁵Vgl. Fleischer et al. 2020.

17.2.3 Asynchronmaschine (ASM)

Kernprozess der Rotorfertigung für ASM ist die Herstellung des Rotorkäfigs. Dabei wird zwischen der Herstellung durch Druckguss und der Herstellung durch Fügeprozesse unterschieden. Für den Druckgussprozess wird zunächst das Blechpaket festgeklemmt und somit in das Gusswerkzeug integriert. Anschließend wird flüssiges Aluminium oder Kupfer eingespritzt und somit das Druckgussverfahren ausgeübt. Sobald das geschmolzene Metall in den Gusswerkzeugraum gelangt, beginnt es abzukühlen und dadurch zu erstarren. Abschließend wird das Gussteil nachbearbeitet, wodurch die Anguslunker entfernt werden. Die für den Prozess relevanten Parameter sind der Anpressdruck, die Anpresszeit, die Schmelztemperatur, die Abkühlzeit, der Sauerstoffgehalt sowie die Legierungszusammensetzung. Als relevante Qualitätsmerkmale werden in der Regel der Füllfaktor und die Porosität herangezogen. Die Verwendung von Kupfer anstelle von Aluminium reduziert die Verluste während des Betriebs des Motors, was mit einer Erhöhung des Wirkungsgrades einhergeht. Aufgrund der geringeren Verluste durch die Verwendung von Kupferdruckguss ist es möglich, eine verminderte Motorkühlung zu wählen, wodurch sich in der Regel auch der benötigte Bauraum reduziert.¹⁶ Als Alternative zur Käfigherstellung können ebenfalls vorgegossene Kupferstäbe und -ringe zusammengesteckt werden. Nach diesem Montageschritt werden die Kupferstäbe und -ringe mittels Schweiß- oder Lötverfahren stoffschlüssig miteinander verbunden. Die zu berücksichtigenden Prozessparameter sind dabei die Temperatur, der Druck und die Haltezeit. Das relevante Qualitätskriterium ist die Leitfähigkeit der Fügestellen.

17.3 Statorproduktion

Der Stator ist der feststehende Teil eines Elektromotors und dient der Erzeugung eines magnetischen Drehfeldes. Die Kernbestandteile des Stators sind das Blechpaket, die Spulenwicklung und das Isoliersystem sowie Komponenten zur Verschaltung und zur geometrischen Wicklungsführung (Abb. 17.4).

Die Wicklung wird in der Regel aus dem Halbzeug Kupferlackdraht hergestellt. Die Kupferlackdrahtproduktion wird in Abschn. 17.3.1 beschrieben.

Im Allgemeinen gliedert sich die Statorproduktion in die vier Teilprozesse „Nutisolation“, „Spulenwicklung“, „Sekundärisolation“ sowie „prozessbegleitende Prüfprozesse“.

Im Prozessschritt „Nutisolation“ werden die Statornuten isoliert, um das Blechpaket von der später einzulegenden Spulenwicklung elektrisch zu separieren.

Der Prozess der Spulenwicklung befasst sich mit der Herstellung und Einbringung des elektrischen Leitermaterials – in der Regel Kupferlackdrähte – in den Spulenkörper. Im Umfeld der automobilen Traktionsantriebe werden vorrangig klassische Wickelverfahren

¹⁶Vgl. Kienle + Spiess GmbH 2021.

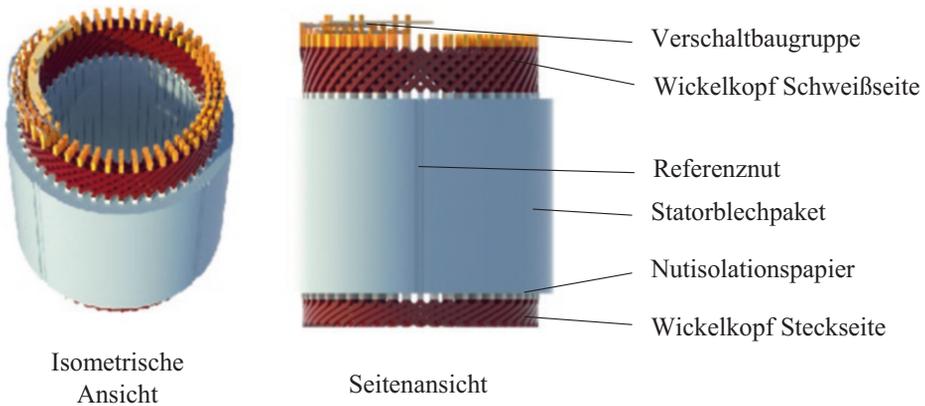


Abb. 17.4 Schematischer Aufbau eines Stators. (Exemplarisch in der Hairpin-Bauweise)

und montageseitig geprägte Steckspulensysteme wie die Hairpin-Technologie angewendet.¹⁷ In Abschn. 17.3.2 werden die Prozessalternativen der Wicklungsherstellung vorgestellt.

Durch die Sekundärinsulation, die zum Beispiel im Imprägnier- oder Vergussverfahren aufgebracht wird, wird der Stator zusätzlich in einem nachgelagerten Isolationsprozess isoliert. Dieser Schritt garantiert eine verbesserte Wärmeleitung durch die Schließung von Zwischenräumen in der Wicklung und bietet sowohl Fixierung als auch Schutz des Stators gegenüber äußeren Belastungen.

Die Nutisolation und die Sekundärinsulation sind Bestandteile des Isoliersystems eines Stators (siehe Abschn. 9.4). Die Verarbeitung dieser Bestandteile wird in Abschn. 17.3.3 erläutert.

Die prozessbegleitende Prüfung beschäftigt sich mit der kostenoptimalen Qualitätssicherung des Stators. Sie wird zwischen verschiedenen Produktionsschritten vorgenommen. Ziel ist dabei, Fehler zu erkennen, bevor eine Nacharbeit nicht mehr möglich ist. Der für diesen Fall kritische Prozessschritt unterscheidet sich je nach Statorausführung. Bei herkömmlichen, gewickelten Statoren liegt er in der Regel im Wickelprozess, bei Hairpin-Statoren nach dem Prozessschritt des Kontaktierens der Hairpins. Außerdem wird eine elektrische Prüfung des fertigen Stators auf Funktionsfähigkeit vorgenommen. Dies erfolgt in der Regel durch Hochspannungs- und Widerstandsprüfungen (siehe Abschn. 17.4).

Mit dem zunehmenden Elektromotorenbedarf im Traktionsbereich steigt auch die Variantenvielfalt der Statoren. Die hohe Varianz in der Statorgestaltung führt zu einem diversifizierten Produktionstechnologie-Portfolio.

¹⁷Vgl. Fleischer et al. 2017.

17.3.1 Kupferlackdrahtproduktion

Die zentrale Komponente in der Statorproduktion ist der stromführende Kupferlackdraht. Insbesondere aufgrund des guten Verhältnisses zwischen optimalen elektrischen und thermischen Leitfähigkeiten bei gleichzeitig moderaten Kosten wird Kupfer für stromführende Teile im Elektromotor verwendet. Das elektrisch leitende Kupfer ist von einer isolierenden Lackschicht umgeben, um die stromführenden Drähte einerseits voneinander und andererseits vom Statorblechpaket elektrisch zu trennen. Je nach Art des Wickelverfahrens, wird Kupferlackdraht mit rundem oder mit rechteckigem Drahtquerschnitt eingesetzt, wobei Draht mit rechteckigem Querschnitt vorwiegend mit hoher Biegesteifigkeit zur Fertigung von Elektromotoren mit Steckspulen-Wicklungen zum Einsatz kommt (siehe Abschn. 17.3.2).

Die Wertschöpfung der Produktion von isoliertem Kupferdraht besteht aus zwei Schritten. Zunächst wird der blanke Kupferdraht hergestellt, wobei zwei verschiedene Produktionsverfahren zum Einsatz kommen (vgl. Abb. 17.5).

Ausgangsmaterial beim Prozess des Drahtziehens von Kupferdrähten ist ein per Stranggussverfahren hergestellter Kupferstrang. Dieser wird vorgewalzt und vorgewärmt im eigentlichen Ziehprozess durch eine Vielzahl sogenannter Zieheisen gezogen. Durch die Zieheisen wird der Kupferdraht von Ziehstufe zu Ziehstufe in Abhängigkeit vom Durchmesser der entsprechenden Ziehsteinbohrung verringert. Die Anzahl der Ziehstufen ist abhängig vom gewünschten Drahtdurchmesser. Das Drahtziehen ist für eine hohe Varianz von Drahtquerschnitten und Geometrien – beispielsweise rund, rechteckig, trapezförmig oder hohl – geeignet.

Ausgangsmaterial bei der Produktion von Kupferdraht mit dem Walzprozess ist ein durch das Drahtziehverfahren hergestellter Runddraht. Dieser wird senkrecht zur Walzenachse durch einen Walzspalt geführt, um so Durchmesser beziehungsweise Höhe des Drahtes zu ändern. Das Verfahren kommt vorwiegend bei der Erzeugung definierter, viereckiger Geometrien wie Rechteck oder Trapez zum Einsatz.¹⁸

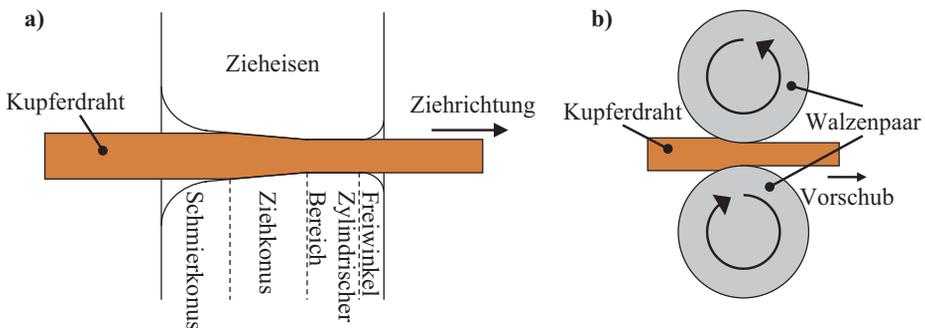


Abb. 17.5 Funktionsprinzip (a) des Ziehverfahrens und (b) des Walzverfahrens

¹⁸Vgl. Hagedorn et al. 2016.

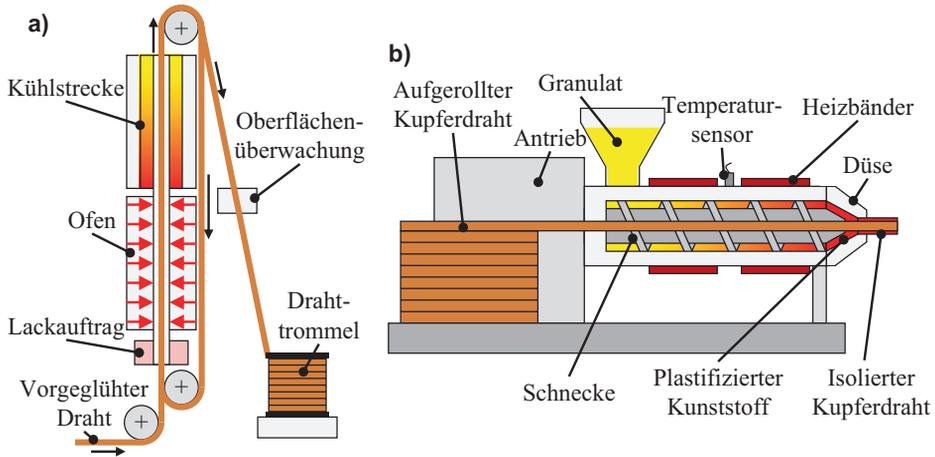


Abb. 17.6 Funktionsprinzip (a) des Lackierverfahrens und (b) des Extrusionsverfahrens

Abhängig von der gewählten Drahtisolation, werden ebenfalls zwei Verfahren zur Beschichtung unterschieden (vgl. Abb. 17.6).

Beim Lackierprozess wird der vorgeglühte Draht in die flüssige Isolation – etwa Polyimid (PI) oder Polyamidimid (PAI) – getaucht und das überschüssige Isolationsmaterial in nachfolgenden Matrizen abgestreift, so dass eine ebene Schicht der Isolation auf dem blanken Kupferdraht haften bleibt. In einem nachgelagerten Ofen verdampfen die Lösemittel in der flüssigen Isolation. Auf den Ofen folgt eine Kühlstrecke, wo der isolierte Draht von der Ofentemperatur ausgehend kontrolliert heruntergekühlt wird, wodurch die aufgetragene Isolation aushärtet. In Abhängigkeit von der gewünschten Isolationsschichtdicke durchläuft der Draht den Lackauftrag einschließlich des darauffolgenden Ofens sowie der Kühlstrecke mehrmals. Zur besseren Haftung des Isolationslackes kann vorab eine Grundierung aufgetragen werden. Neben einer potenziellen Grundierung sind vor allem die Parameter beim Lackierprozess – zum Beispiel die Ofentemperatur oder die Anzahl der aufgetragenen Schichten pro Durchlauf – von hoher Relevanz für die Flexibilität und die Adhäsion der Isolation auf dem Kupferdraht.

Bei der Beschichtung des Drahtes durch den Extrusionsprozess wird Kunststoffgranulat durch Heizbänder erhitzt, und eine Extrusionsschnecke presst den plastifizierten Kunststoff aus einer Düse heraus. Der blanken Kupferdraht durchläuft den Extruder ebenfalls und wird am Düsenausgang mit dem plastifizierten Kunststoff ummantelt. Der Kunststoff härtet im Anschluss aus und bleibt so am Draht haften. Durch den Extrusionsprozess wird die Isolationsschicht in einem Schritt aufgetragen. Für den Anwendungsbereich der Hairpin-Technologie werden als Isolationsmaterialien Polyetheretherketon (PEEK) oder Polyimid (PI) verwendet.

Die technischen Lieferbedingungen und Eigenschaften von lackisolierten Rund- und Flachdrähten werden in der DIN EN 60317¹⁹ spezifiziert. Die dazugehörigen Prüfver-

¹⁹Vgl. DIN e.V. 2014.

fahren gehen aus der DIN EN 60851²⁰ hervor. Infolge der hohen automobilen Qualitätsanforderungen entspricht die Norm jedoch in vielen Fällen nicht mehr dem Stand der Technik. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Nachfrage zur 800-Volt-Technologie im elektrischen Antriebsstrang wachsen die Anforderungen an die elektrischen Isolationssysteme von Kupferflachdraht als hochsensibler Bauteil in der Antriebseinheit immer weiter. Neben den Produktionsprozessen und deren Einfluss auf die Isolation rückt vor allem der Herstellungsprozess selbst zunehmend ins Blickfeld.

17.3.2 Wicklungsherstellung

Für Effizienz und Leistung des Elektromotors ist die Wicklung eines Stators von entscheidender Bedeutung. Aufgrund steigender Rohstoffpreise und des Bestrebens, kompaktere Elektromotoren herzustellen, ist außerdem die Geometrie der Kupferwicklungen von zunehmendem Interesse.

Das zentrale Bestreben bei der Auslegung und Produktion von Statoren besteht darin, die Packungsdichte des Kupfers in den Statornuten zu maximieren. Zur Beurteilung der Kompaktheit einer Wicklung eignet sich die dimensionslose Größe des Füllfaktors. Dabei wird zwischen elektrischem und mechanischem Füllfaktor unterschieden. Der elektrische Füllfaktor k_{el} beschreibt das Verhältnis des leitfähigen Leiterquerschnitts zum Querschnitt des zur Verfügung stehenden Wickelraumes in der Statornut. Der mechanische Füllfaktor k_{mech} beschreibt analog dazu die mechanische Ausfüllung des Wickelraumes unter Einbezug der Isolationsmaterialien. Da bei der Wicklung mit Draht zwangsläufig Hohlräume entstehen, die nicht ausgefüllt werden können, wie Abb. 17.7 verdeutlicht, ist der Füllfaktor stets kleiner eins.

In der Runddrahtwickeltechnik wird zwischen der wilden und der orthozyklischen Wicklung unterschieden. Bei der wilden Wicklung liegen die Drähte unsortiert neben- und übereinander, was dazu führt, dass kein optimaler Füllfaktor erreicht wird. Der mechani-

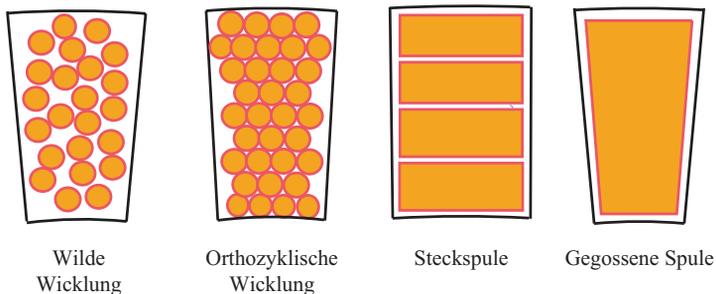


Abb. 17.7 Schematische Nutfüllung verschiedener Wicklungstopologien

²⁰Vgl. DIN e.V. 2010.

sche Füllfaktor $k_{mech, max}$ beträgt etwa 73 %. Bei orthozyklischen Wicklungen liegen die Drähte der jeweiligen Oberwicklung in den Tälern der Unterwicklung. Diese Wicklungen zeichnen sich durch eine hohe Leistungsdichte, weniger Kupferverbrauch und bessere magnetische Eigenschaften aus. Theoretisch lässt sich ein mechanischer Füllfaktor von rund 91 % erreichen. In der Praxis sind diese Werte, unter anderem aufgrund der Wickelkörpergeometrie, nicht erreichbar. Es existieren jedoch Alternativen zur Bewicklung mit eckigen Profildrähten und sogenannten Formsteckspulen oder Hairpins, die den elektrischen Füllfaktor durch optimale Ausnutzung der Nutgeometrie weiter steigern können. Die theoretisch optimale Ausnutzung des Wickelraumes kann durch ein Einleitersystem – zum Beispiel als gegossene Spule – erzielt werden. Es ist zu beachten, dass das Bewicklungsverfahren stets einen Einfluss auf das Wickelschema – etwa über die Windungsanzahl – ausübt und somit auch die Eigenschaften und Charakteristika des elektrischen Antriebs beeinflusst.^{21,22}

Darüber hinaus wird in der Wickeltechnik zwischen konzentrierten und verteilten Wicklungen unterschieden. Bei konzentrierten Wicklungen wird auf jedem Zahnpol über den Statorumfang eine Einzelwicklung erzeugt, und die Einzelsegmente werden anschließend verschaltet. Die homogene Verteilung der Spulenwicklung über den gesamten Umfang des Stators wird als „verteilte Wicklung“ bezeichnet und ermöglicht in der Regel homogenere Drehfeldqualitäten. Nachteilig ist jedoch der höhere Drahtverlegungsaufwand. Beim Bewickeln von Spulen entstehen sogenannte Wickelköpfe außerhalb des eigentlichen Spulenkörpers. Das Leitermaterial in den Wickelköpfen trägt nicht zur Drehmomentenerzeugung des Elektromotors bei und senkt den Wirkungsgrad durch ohmsche Verluste und parasitäre Magnetfelder. Besonders bei konzentrierten Wicklungstopologien können die Wickelköpfe auf eine minimale geometrische Ausprägung reduziert werden, so dass axial kurzbauende Motoren erzielt werden können, die zum Beispiel Anwendung in Hybridantrieben in der Anordnung zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe finden. Die Länge des Stators, in der die Wicklung innerhalb des Blechpakets verläuft und damit zuträglich für die Drehfelderzeugung ist, wird als „aktive Länge“ bezeichnet. Für reine Fahr- und Traktionsantriebe kommt bevorzugt die verteilte Wicklung zum Einsatz, wobei die Leistung des Elektromotors einfach über die axiale Länge des Motors skaliert werden kann.²³

Grundsätzlich erfolgt die Bewicklung eines Stators in einem Prozess aus vier Schritten: dem Terminieren, dem Wickeln und gegebenenfalls Einziehen, dem Abschneiden und dem Verschalten. Die Terminierung des Drahts bedeutet in diesem Zusammenhang die initiale Befestigung des Drahts am Wickelkörper. Im Anschluss erfolgt die eigentliche Bewicklung, deren unterschiedliche Technologien in den folgenden Abschnitten erläutert

²¹ Vgl. Hagedorn et al. 2016.

²² Vgl. Zerbe 2019.

²³ Vgl. Zerbe 2019.

werden (vgl. Abb. 17.8). Zuletzt wird die Befestigung des Drahtes durch Abschneiden wieder gelöst und die Drähte werden verschaltet.²⁴

Die Wicklung eines Stators kann mit Hilfe zahlreicher Wickeltechnologien erzeugt werden. Vor allem die Spulenverteilung und das Verhältnis von Statorlänge zu Statordurchmesser hat eine Auswirkung auf die Wahl der Wickeltechnologie. Man unterscheidet zwischen den direkten Wickelverfahren, bei denen der Draht einzeln und unmittelbar in den Spulenkörper eingelegt wird, und den indirekten Wickelverfahren, bei denen die Wicklung zunächst außerhalb des Spulenkörpers vorbereitet und anschließend durch einen Zusatzprozess eingebracht wird. Klassische Vertreter der direkten Verfahren sind das Linear-, das Nadel- und das Flyerwickeln. Der Kategorie der indirekten Verfahren lassen sich zum Beispiel die Flyereinzugswicklung oder die Steckspulentechnologie zuordnen.^{25,26}

In der Linearwickeltechnik wird der Draht mit einem sich in konstanter Geschwindigkeit bewegenden Drahtführer auf den rotierenden Formkörper gewickelt (vgl. Abb. 17.8 links). Dies ermöglicht eine kostengünstige, schnelle und gut parallelisierbare orthozyklische Drahtablage. Allerdings lassen sich mit der Linearwickeltechnik nur konzentrierte und vorrangig externe Wicklungen realisieren. Die Linearwickeltechnik eignet sich insbesondere für das Bewickeln rotationssymmetrischer Bauteile.²⁷

Beim Nadelwickeln wird der Draht direkt in die Nuten eingezogen, wobei die Wickelnadel den Draht direkt im Stator ablegt (vgl. Abb. 17.8 Mitte). Dies bietet eine hohe Flexibilität, niedrige Werkzeugkosten und einen geringen Rüstaufwand, senkt allerdings

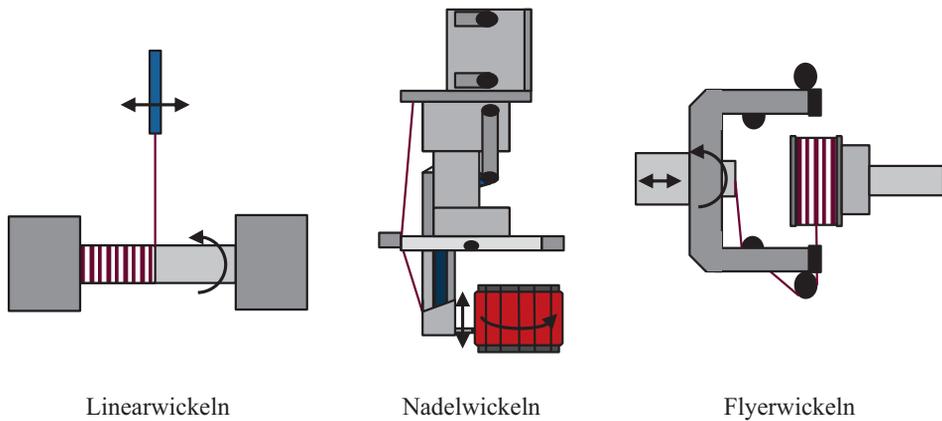


Abb. 17.8 Schematische Darstellung der klassischen Wickelverfahren. (In Anlehnung an vgl. Hagedorn et al. 2016)

²⁴Vgl. Feldmann et al. 2014.

²⁵Vgl. Hagedorn et al. 2016.

²⁶Vgl. Fleischer et al. 2017.

²⁷Vgl. Sequenz 1950.

aufgrund der Wickelnadeldurchfahrt den elektrischen Füllfaktor und ruft durch die notwendige Drahtvorspannung eine hohe Drahtbelastung hervor. Die Technologie eignet sich vor allem für kleinere Motoren, da sich dort flexible Wickelschemata ohne eine Segmentierung des Blechpakets realisieren lassen.

Das Flyerwickeln erhält seinen Namen vom sogenannten Flyerwickelarm, der den Draht in einer schnell rotierenden Bewegung aufwickelt (vgl. Abb. 17.8 rechts). Das zu bewickelnde Bauteil ist dabei stationär, was das wesentliche Unterscheidungsmerkmal zum Linearwickeln darstellt. Generell bietet das direkte Flyerwickeln eine kurze Taktzeit und eine relativ hohe Variantenflexibilität. Allerdings sind bei direktem Wickeln nur konzentrierte und wilde Wicklungen möglich.

Eine alternative Erweiterung des Flyerwickelns bieten die Einziehverfahren, die die Methode zum indirekten Wickelverfahren ausbauen. Dabei wird der Kupferlackdraht auf eine Schablone aufgewickelt oder als Luftspule gelegt und anschließend über ein Einbringwerkzeug in die Statornut eingezogen. Bei diesem Verfahren sind eine manuelle Nacharbeit und eine externe Kontaktierung der Drahtenden notwendig. Das Flyerwickeln ist bei geschlossenen Statoren die am häufigsten verwendete Wickeltechnologie. Vorteile bestehen in der Möglichkeit des Herstellens einer verteilten Wicklung sowie in den daraus resultierenden erhöhten elektrischen Füllfaktoren. Nachteile der Flyereinzugwicklung liegen in den langen Taktzeiten, einer hohen Drahtbeanspruchung und einem oftmals voluminösen Wickelkopf.²⁸

Im Anschluss an den Wickelprozess erfolgt bei zahlreichen Verfahren die nachgelagerte Wicklungsbearbeitung. Dazu zählt zum Beispiel das Bandagieren des Wickelkopfes, das für die Stabilisierung von Wickelköpfen mit eingezogenen Wicklungen eingesetzt wird. Dieser Schritt ist zeitaufwendig und nur mit hohem Aufwand automatisierbar. Ein weiterer Prozess der Wicklungsbearbeitung kann das Zwischenformen von Wicklungen sein. Die Wicklung wird durch Presswerkzeuge in den Nutgrund gepresst, um den Füllfaktor zu erhöhen und sicherzustellen, dass Drähte vollständig in der Nut liegen. Im abschließenden Prozessschritt der Wicklungsherstellung erfolgt das Verschalten der einzelnen Teilwicklungen und Wicklungssegmente zu Phasen und zum gesamten Stator. Dieser Schritt ist je nach Stator-Topologie oder Wicklungsverfahren nicht immer automatisierbar und zudem durch äußerlich identisch erscheinende Wicklungen fehleranfällig.

Die klassischen Runddrahtwickelverfahren haben nicht nur den Nachteil niedriger Kupferfüllfaktoren aufgrund stochastischer Drahtverlegung, sondern sie erfüllen in vielen Anwendungen die hohen Anforderungen der Automobilindustrie an Qualität, Prozesssicherheit und -stabilität sowie geringe Stückkosten nur in unzureichendem Maße.

Große Potenziale zur Beseitigung dieser Produktionsschwächen bietet die Steckspulentechnologie in der Hairpin-Bauweise. Unter Hairpin-Spulen werden Steck- beziehungsweise Stabspulen verstanden, die aus massivem Profildraht oder aus sogenannten Kunststäben bestehen.²⁹ Um die Leiter in die notwendige Geometrie zur Erzeugung des

²⁸Vgl. Hagedorn et al. 2016.

²⁹Kunststäbe sind aus mehreren Einzeleibern zusammengefasste Stäbe.

Wickelschemas zu überführen, müssen aufgrund des massiven Drahtquerschnitts Umformprozesse gemäß DIN 8550-2 vorgenommen werden, bevor sie in die Nuten des Blechpakets eingebracht werden. Es handelt sich daher um ein indirektes Verfahren zur Wicklungsherstellung. Der Begriff „Hairpin“ basiert dabei auf der Geometrie des geformten Drahtthalbzeuges, die der Form einer zwei- oder dreidimensionalen Haarnadel ähnelt. Auf den drahtformenden Prozess folgt ein Montageprozess zum Einbringen der Hairpins in das Blechpaket. Es wird zwischen der Segment-Hairpin-Wicklung und der kontinuierlichen Hairpin-Wicklung unterschieden.³⁰

Aufgrund der vorgefertigten Geometrie der Hairpins lassen sich deutlich höhere elektrische Füllfaktoren von mehr als 70 % realisieren, was sich leistungssteigernd auswirkt (vgl. Abb. 17.7). Der zunehmenden Anforderung leistungsstärkerer Motoren kann zudem die Eignung von Steckspulen für axial lange Statoren gerecht werden. Eine Leistungsvariation von Elektromotoren wird oftmals über die Variation der aktiven Statorlänge gesteuert, da die Änderung des Spulendurchmessers erhebliche Konsequenzen für die gesamte Prozesskette implizieren kann. Außerdem weist die Produktion von Hairpin-Statoren gegenüber der klassischen Spulenumwicklung eine höhere Prozesssicherheit auf. Als Nachteil von Hairpin-Statoren gilt die niedrige Variantenflexibilität, da die Hairpins der Statorgeometrie angepasst werden müssen.

Die Hairpin-Topologie umfasst drei verschiedene Hairpin-Ausführungen (vgl. Abb. 17.9). Die sogenannten U-Hairpins werden hufeisenförmig gebogen, so dass sie nur auf einer Seite kontaktiert werden müssen. Dies ermöglicht auf der Steckseite niedrigere

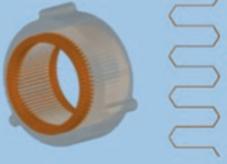
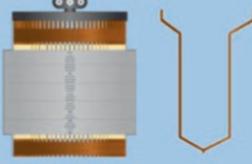
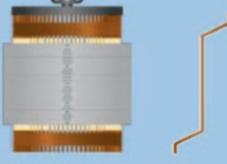
Kontinuierliche Hairpinwicklung	U-Hairpin	I-Hairpin
		
<ul style="list-style-type: none"> • Entfall der komplexen Schweißvorgänge • Hohe Komplexität der Biege- und Montagevorgänge • Beidseitig geringe Wickelkopfhöhe 	<ul style="list-style-type: none"> • Moderate Anzahl von Schweißpunkten • Moderate Komplexität der Biegevorgänge • Reife Technologie • Einseitig geringe Wickelkopfhöhe 	<ul style="list-style-type: none"> • Beidseitig hohe Wickelkopfhöhe • Beidseitig vorteilhafte Kühlmöglichkeiten aufgrund einer großen Oberfläche • Hohe Anzahl von Schweißpunkten

Abb. 17.9 Übersicht zu gängigen Hairpin-Topologien. (Schaeffler AG, BMW AG, Continental AG)

³⁰Vgl. Pfund.

Wickelkopfhöhen. Zudem fallen die Anzahl der Schweißpunkte sowie die Komplexität der Biegevorgänge moderat aus. U-Hairpins bilden die im Automobilbau am häufigsten verwendete Hairpin-Geometrie.³¹

Im Gegensatz dazu werden bei der I-Hairpin-Technologie geradlinige Pins in den Stator eingeschoben und beidseitig verschaltet. Dies bedingt eine hohe beidseitige Wickelkopfhöhe, aber auch eine verbesserte Kühlmöglichkeit aufgrund der vergrößerten Oberfläche. Die I-Pins erfordern eine große Anzahl von Schweißpunkten, dafür entfallen jedoch die komplexen und kostenintensiven Biegevorgänge vollständig.

Zudem existiert noch die Möglichkeit, eine kontinuierliche Hairpinwicklung zu erstellen. Dadurch entfällt der Schweißprozess, allerdings erhöht diese Hairpin-Topologie die Komplexität der Biege- und Montagevorgänge in erheblichem Maße. Kontinuierliche Hairpinwicklungen erzeugen beidseitig eine geringe Wickelkopfhöhe. Das nachteilige Design der Statoröffnungen kann allerdings auch zu geringerer Effizienz in bestimmten Anwendungsfällen führen.

Da die Hairpin-Technologie hohe Anlageninvestitionen voraussetzt und zahlreiche Prozessschritte notwendig sind, wird Kosteneffizienz in der Automobilindustrie erst ab rund 100.000 Stück pro Jahr erreicht. Ein großes Problem bei der Hairpin-Technologie besteht in der teilweise noch nicht ausgereiften Produktionstechnologie und damit verbundenen Effizienzeinbußen in der Herstellung.

In Anbetracht der steigenden Stückzahlen von Elektrofahrzeugen sowie der fortschreitenden Entwicklung der Produktionstechnik im Bereich der Hairpin-Statorproduktion, zeichnet sich in der Automobilindustrie eine Überlegenheit der Hairpin-Technologie gegenüber klassischen Wickelverfahren ab. Die zunehmende Etablierung von Hairpins in der Automobilindustrie lässt sich am steigenden Marktanteil der Hairpin-Technologie ablesen.

17.3.3 Verarbeitung von Isoliersystemen

Das Isoliersystem eines Stators ist aus mehreren Isolationselementen aufgebaut, die verschiedene Komponenten des Stators voneinander trennen (siehe Abschn. 9.4). Im Folgenden wird auf die Verarbeitung der Isolationselemente innerhalb der Statorproduktion näher eingegangen.

Zunächst ist das Isolieren der Statornuten durch eine Nutgrundisolierung zu nennen – auch „Nutisolation“ genannt –, die den Drahtleiter vom Blechpaket trennt. Zur Realisierung der Nutisolation haben sich drei Verfahren durchgesetzt: die Papier-/Folienisolation, die Isolation durch Kunststoffformteile beziehungsweise Spritzguss sowie der Dünnwand-spritzguss.^{32,33}

³¹ Vgl. Kampker et al. 2020.

³² Vgl. Stone et al. 2014.

³³ Vgl. Feldmann et al. 2014.

Bei der Papier- beziehungsweise Folienisolation werden die Statornuten durch Einschub eines Flächenisulationsstoffes isoliert. Dafür wird ein papierähnliches Material entsprechend der Nutgeometrie gefalzt, gefaltet und anschließend in das Blechpaket eingeschoben respektive mittels Luftdrucks eingeschossen. Vorteil dieser Variante ist die konstante Schichtdicke des Isolationsmaterials, allerdings ist auch die potenzielle Reibung zwischen Flächenisolation und Blechpaket zu beachten, ebenso wie die geringe Wärmeleitfähigkeit der Isolation durch Lufteinschlüsse. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, die Nuten durch Kunststoffformteile zu isolieren. Die Kunststoffformteile werden entweder vor der Wicklung auf das Statorblechpaket appliziert oder statorextern bewickelt und anschließend montiert. Allerdings sinkt der Kupferfüllfaktor mit steigendem Volumen der Kunststoffformteile aufgrund ihrer prozessbedingt hohen Wandstärken. Eine weitere Möglichkeit zur Isolation bietet der sogenannte Dünnwandspritzguss, bei dem Kunststoff in die Statornuten eingespritzt wird. Anschließend wird eine dünne Isolationsschicht durch das Abschaben überflüssiger Masse realisiert.³⁴

Zur Phasenisolierung der Leiter zueinander können optional Phasentrenner bei der Produktion in den Stator eingebracht werden. Dafür werden während der Wicklungsherstellung üblicherweise zusätzliche Flächenisolationen im Wickelkopf oder speziell geformte Nutgrundisolationen eingesetzt. Zum Verschluss offener oder halboffener Statornuten und zur Fixierung der Wicklung in den Nuten dienen sogenannte Deckschieber – in der Regel Kunststoffformteile –, die dem Isoliersystem zugeordnet werden und die Blechpaketnut mechanisch verschließen. Die Montage von Phasenisolationen oder eines Deckschiebers sind in der Statorproduktion optionale Prozessschritte und von den mechanischen und elektrischen Anforderungen des Stators abhängig.

Zuletzt ist die Sekundärisolation innerhalb der Isoliersysteme zu nennen. Dabei besteht zunächst die Möglichkeit, Imprägnierharze auf die Wickelköpfe zu träufeln und somit Lufteinschlüsse zwischen den Einzelkomponenten zu verringern. Dieser Prozess erfolgt zumeist bei erhöhter Prozesstemperatur unter konstanter Rotation des Stators. Der Kapillareffekt bewirkt eine Durchdringung der Nut durch das niedrigviskose Harz. Ein weiteres Verfahren besteht im sogenannten Tränken, bei dem ein erwärmter Stator in ein Harzbad getaucht wird. Bei dieser Methode sind eventuell reinigende Nacharbeiten vorzusehen. In der Kleinserien- und Prototypenfertigung werden mit dem Imprägnierharz zur Erreichung höherer und vollständiger Nutdurchdringungen auch Vakuum- oder Vakuumdruckimprägnierungsverfahren eingesetzt. Die Imprägnierung im Vakuum sorgt für eine gleichmäßigere und dünnere Imprägnierschicht, weshalb das Verfahren sehr hohe Füllfaktoren ermöglicht und als flexibel gilt. Für ausgewählte Anwendungen werden in der Imprägniertechnik auch der Spritz- und der Vollverguss eingesetzt. Allen Imprägnierverfahren ist indes gemeinsam, dass sie eine Erwärmung des Stators auf etwa 80 bis 150 °C erfordern.^{35,36} In der Hairpin-Technologie besteht neben der Verdrängung von Lufteinschlüssen innerhalb der Wicklung die Anforderung an die Sekundärisolation der

³⁴Vgl. Kampker et al. 2016.

³⁵Vgl. Stöck 2016.

³⁶Vgl. Thurman 1989.

Kontaktierstellen. Diese Funktion lässt sich durch die zuvor genannten Verfahren realisieren. Zunehmend setzt sich dafür auch die Pulverisolation im Wirbelsinterverfahren durch.³⁷

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das Isoliersystem in der Statorproduktion ein vielschichtiges System mit einer vielfältigen Prozessalternativen-Morphologie darstellt. Die notwendigen Produktionsprozessschritte sind individuell gemäß dem Produktdesign auszuwählen.

17.4 Endmontage elektrischer Maschinen

Die Montage der einzelnen Komponenten unterliegt hohen Anforderungen, die für den langlebigen Betrieb einzuhalten sind. Aufgrund der hohen Drehzahlen müssen die rotierenden Bauteile passgenau eingesetzt werden, da sich dies sonst auf das Schwingungsverhalten, die Lebensdauer und die Dichtigkeit der Antriebseinheit auswirkt. Eine weitere Herausforderung entsteht infolge der Verkettung mit vorgelagerten Prozessen. Ungenauigkeiten in der Fertigung der Einzelkomponenten haben einen negativen Einfluss auf die Montierbarkeit und Qualität des Gesamtprodukts. Dem wird durch komplexe Fehler-Ursachen-Analysen begegnet, allerdings treten infolge der hohen Komplexität der gesamten Wertschöpfungskette häufig unvorhergesehene Prozessinterdependenzen auf, die einen negativen Einfluss auf die Gesamtqualität haben. Zur Vermeidung von Felddausfällen ist trotz hochpräziser Endmontagetechniken eine abschließende Qualitätssicherung unabdingbar. Die Prüftechnik stellt damit einen zentralen Wertschöpfungsbeitrag im Rahmen der Elektromotorenproduktion dar.

Vor diesem Hintergrund werden nachstehend zunächst die aufeinanderfolgenden Prozessschritte der Endmontagetechnik beschrieben (siehe Abschn. 17.4.1). Auf dieser Basis wird an- und abschließend die „End-of-Line“ (EoL)-Prüfung samt der verschiedenen mechanischen und elektrischen Prüftechnologien beleuchtet (siehe Abschn. 17.4.2).

17.4.1 Endmontagetechnik

Die Effizienzpotenziale bei der Montage von Elektromotoren liegen im Wesentlichen im Variantenmanagement und in der Automatisierung. Ziel des Variantenmanagements ist die Reduktion der Bauteilanzahl sowie die Auslagerung variantenbildender Produktionsschritte oder deren Verlegung an das Ende der Montagelinie, um die Montagekomplexität zu verringern. Aufgrund der überwiegend axialen Fügeoperationen ist in der Elektromotorenmontage bereits ein hoher Automatisierungsgrad vorhanden. Nichtsdestotrotz wird weiterhin das Ziel verfolgt, substituierbare manuelle Prozesse zu identifizieren und zu automatisieren, um die Produktionskosten sowie die Qualität zu verbessern. Die Endmontage der elektrischen Antriebseinheit erfolgt im Wesentlichen in sechs Schritten, die nachstehend im Einzelnen kurz beschrieben werden.

³⁷Vgl. Kampker et al. 2020.

Prozessschritt 1

Im ersten Schritt wird der gefertigte Stator durch Aufschrumpfen in das Gehäuse eingefügt. Durch induktives Erwärmen des Gehäuses wird dieses aufgeweitet, so dass der Stator kraftfrei axial in das Gehäuse eingefügt werden kann. Durch das Abkühlen des Gehäuses schrumpft dieses wieder, so dass eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Gehäuse und Stator entsteht. Alternativ dazu kann der Stator in das ungedehnte Gehäuse eingepresst oder mit diesem verklebt werden. Formschlüssige Verbindungen können durch eine Passfeder oder kraftschlüssige Verbindungen durch Verschrauben realisiert werden.

Prozessschritt 2

Die Montage der Kugellager erfolgt analog zur Montage des Stators in das Gehäuse. In der Regel werden die Kugellager auf die entsprechenden Absätze der Rotor-Welle gepresst. Alternativ kann auch dabei ein thermisches Verfahren eingesetzt werden, bei dem das Lager thermisch aufgeweitet beziehungsweise die Rotorwelle thermisch eingedehnt wird.

Prozessschritt 3

Bei der Montage des Rotors wird dieser als komplette Baugruppe mit Hilfe einer Füge- spindel gegriffen und in den Stator eingefügt. Ein Führungsdorn nimmt das untere Wellenende entgegen, um ein Ausschlagen des Rotors durch die hohen Magnetkräfte (bei PSM-Maschinen) zu verhindern. Um eine hohe Positionsgenauigkeit zu gewährleisten und um der Kollisionsgefahr infolge des geringen Luftspalts zwischen Rotor und Stator entgegenzuwirken, wird der Rotor mit geringer Vorschubgeschwindigkeit eingefügt.

Prozessschritt 4

Der drehende Teil des Resolvers wird auf der Rotorwelle mittels Verkleben externer Bauteile – etwa Schrauben und Passfeder – oder thermischen Pressens montiert. Gleiches gilt für den stehenden Teil des Resolvers, der auf dem Stator montiert wird.

Prozessschritt 5

Beim Kontaktieren werden die einzelnen Phasen mit Kabelschuhen versehen, um diese bei der Montage im Fahrzeug mit dem elektrischen Gesamtsystem verbinden zu können. Das Kabel wird in den Kabelschuh eingeführt, wonach eine mechanische Verformung des Kabelschuhs eine formschlüssige Verbindung zwischen Kabelschuh und Kabel erzeugt.

Prozessschritt 6

Anschließend werden die Lagerschilde montiert. Sie beinhalten Lagersitze, die die jeweils äußeren Ringe des Lagers aufnehmen, welche zuvor auf die Rotorwelle montiert wurden. Gleichzeitig wird durch die Lagerschilde das Gehäuse geschlossen. Um die Dichtigkeit zu gewährleisten, wird zwischen den Lagerschilden und dem mit ihnen verschraubten Gehäuse zusätzlich ein Klebestreifen aufgetragen.

17.4.2 EoL-Prüftechnik

Nach abgeschlossener Montage erfolgt die EoL-Prüfung. Dabei werden die Funktionalität und die Leistungsfähigkeit des Elektromotors getestet und die elektrische Maschine charakterisiert, um die Leistungselektronik entsprechend zu parametrisieren. Dazu wird der Motor in einen Prüfstand eingespannt und elektrisch sowie mechanisch kontaktiert. Im Zuge der EoL-Prüfung werden verschiedene Testverfahren eingesetzt, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

Bei der *Belastungsprüfung* durchläuft der Elektromotor verschiedene Lastzustände entsprechend einem vorab definierten Prüfprogramm. Der Motor wird dabei an einen Belastungsmotor gekoppelt, der über eine integrierte Messeinheit für Drehzahl und Drehmoment verfügt. Dadurch kann der Elektromotor flexibel belastet und sowohl im motorischen als auch im generatorischen Betrieb überprüft werden. Die abgegebene Leistung in diesen Lastzuständen wird aufgezeichnet, so dass zahlreiche Erkenntnisse über die Leistungscharakteristika des Motors gewonnen und gegebenenfalls auch fehlerhafte Motoren aussortiert werden können.

Bei permanenten Synchronmaschinen kommt bei der Überprüfung mitunter die Messung der Back-, „Electro Magnetic Force“ (EMF) zum Einsatz. Dabei wird diejenige elektromagnetische Kraft im Rahmen der *Belastungsprüfung* gemessen, die durch (elektro-)magnetische Induktion verursacht wird. Die elektrischen Phasen werden an ein Spannungsmessgerät angeschlossen, und der Motor wird mit Hilfe einer externen Lastmaschine angetrieben. Die durch die magnetischen Kräfte induzierte Spannung in den Phasen wird aufgezeichnet, wodurch Rückschlüsse auf die Phasensymmetrie sowie Beschädigungen bei den Magneten oder den Wicklungen gezogen werden können.

Die *Leerlaufprüfung* gibt Aufschluss über Eigenschaften des magnetischen Kreises, auftretende Verluste sowie das rein mechanische Verhalten während des Laufs. Beim motorischen Verfahren wird der Elektromotor ohne Last mit Nenn Drehzahl betrieben, und durch Analyse der Wirkzusammenhänge zwischen angelegter Spannung und Magnetfeldveränderungen werden Rückschlüsse auf die auftretenden Verluste gezogen. Beim generatorischen Verfahren wird der Motor durch einen kalibrierten, fremderregten Elektromotor angetrieben und hinsichtlich des elektromagnetischen Verhaltens untersucht.

Bei der *Widerstandsmessung* am montierten Motor werden Verschaltung und Verkabelung des Elektromotors auf den Innenwiderstand der einzelnen Windungen sowie auf Kurzschlüsse überprüft. In EoL-Prüfständen wird eine Spannung in der Größenordnung der Betriebsspannung angelegt und der Strom sowie die abfallende Spannung über die Wicklung vermessen. Aus den ermittelten Werten wird mit Hilfe des Ohm'schen Gesetzes der Innenwiderstand errechnet und mit den Vorgaben verglichen.

Der *Geräusch- und Schwingungsprüfung* kommt im Rahmen der EoL-Prüfung die größte Bedeutung zu. Aufgrund der hohen Drehzahlen des Elektromotors liegen dort hohe Anforderungen an auftretende Schwingungen vor, da diese zu einem schnelleren Verschleiß und damit zum Ausfall der Antriebseinheit beitragen. Solche Anomalien können durch verschiedene Ursachen hervorgerufen werden, zum Beispiel durch Exzentrizitäten, Unwuchten oder Lagerschäden. Mit Hilfe von piezoelektrischen Beschleunigungssensoren oder Laser-

Doppler-Vibrometern erfassen die Messsysteme den Körperschall beziehungsweise die mechanischen Schwingungen. Die Integration der Geräusch- und Schwingungsprüfung in eine laufende Produktion ist häufig sehr komplex, da die hochsensiblen Messeinrichtungen von den laufenden Maschinen der Produktionssysteme nicht beeinflusst werden dürfen.

Literatur

Teil III: Produktion von elektrofahrzeugspezifischen Systemen

- DIN e.V.:** DIN EN 60851-1 Wickeldrähte – Prüfverfahren – Teil 1: Allgemeines (IEC 60851-1:1996 + A1:2003 + A2:2009). Berlin: Beuth-Verlag, 2010
- DIN e.V.:** DIN EN 60317-0-2 Technische Lieferbedingungen für bestimmte Typen von Wickeldrähten – Teil 0–2: Allgemeine Anforderungen – Lackisolierte Flachdrähte aus Kupfer (IEC 60317-0-2:2013). Berlin: Beuth-Verlag, 2014
- Doerr, J; Attensperger, T; Wittmann, L; Enzinger, T.:** *Die neuen elektrischen Achsantriebe von Audi*. In: ATZ Elektron, Jg. 13, 2018, Nr. 3, S. 16–27
- Feldmann, K; Schöppner, V; Spur, G. (Hrsg.):** *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*. Edition Handbuch der Fertigungstechnik, Hrsg. von Günter Spur; 5. 2., vollständig neu bearbeitete Auflage Aufl., München: Hanser, 2014
- Fleischer, J; Haag, S; Hofmann, J.:** *Quo Vadis Wickeltechnik. Eine Studie zum aktuellen Stand der Technik und zur Recherche zukünftiger Trends im Automobilbau*, 2017
- Fleischer, J; Haag, S; Hofmann, J.:** *Quo Vadis Wickeltechnik. Eine Studie zum aktuellen Stand der Technik und zur Recherche zukünftiger Trends im Automobilbau*, 2017
- Fleischer, J; Hausmann, L; Halwas, M; Hofmann, J; Wirth, F; Wößner, W.:** *Wissen Kompakt: Produktion elektrischer Traktionsmotoren*. https://www.wbk.kit.edu/downloads/Wissen_kompakt_Elektromotoren_Produktion.pdf. Abruf 01.06.2022
- Franke, J; Tremel, J; Kuhl, A.:** *Innovative developments for automated magnet handling and bonding of rare earth magnets* Tampere, 2011
- Hagedorn, J; Sell-Le Blanc, F; Fleischer, J.:** *Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren. Ein Beitrag zur Energieeffizienz*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016
- Heco:** *What is Rotor Manufacturing? Understanding rotors is key to saving maintenance dollars on your plant floor*. <https://www.hecoinc.com/heco-system/rotor-manufacturing#Shafts>. Abruf 01.06.2022
- Hinzen, H. (Hrsg.):** *Maschinenelemente 2. Lager, Welle-Nabe-Verbindungen, Getriebe*. De Gruyter Studium. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage Aufl., Berlin, Boston: De Gruyter, 2018
- Kampker, A; Heimes, H; Kawollek, S; Treichel, P; Kraus, A; Rassmann, A; Hitzel, T.:** *Produktionsprozess eines Hairpin-Stators*. 2 Aufl. Frankfurt am Main, 2020
- Kampker, A; Kreiskother, K; Buning, M. K; Adam, M.:** *Thin-walled injection molding for slot insulation of long stator sheet stacks*. In: Conference, I. E. D. P. (Hrsg.): 2016 6th International Electric Drives Production Conference (IEDPC): November 30th-December 1st, 2016, Nuremberg, Germany proceedings. [Piscataway, NJ]: IEEE 2016.
- Kienle + Spiess GmbH:** *Energiesparende Elektromotoren. Premium Efficiency (IE3)*. <https://kienle-spiess.com/kupferdruckguss.html>
- Kolbe, M.:** *Stanztechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020
- Leuning, N; Elfgen, S; Weiss, H. A; Volk, W; Hameyer, K.:** *Der Einfluss des Schneidens von Elektroblechlamellen und die geeignete numerische Modellierung*. In: Elektrotech. Inftech., Jg. 136, 2019, Nr. 2, S. 184–194

- Lindenfels, J. von; Ziegler, M; Kneidl, M; Kuehl, A; Franke, J.:** *Challenges in bonding processes in the production of electric motors.* In: Wulfsberg, J. P; Hintze, W; Behrens, B.-A. (Hrsg.): *Production at the leading edge of technology* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 411–420
- MAHLE GmbH:** *MAHLE entwickelt hocheffizienten magnetfreien E-Motor* Stuttgart, 05.05.2021
- Naumoski, H.:** *Untersuchung des Einflusses der Bearbeitung auf die magnetischen Eigenschaften von nichtkornorientiertem Elektroblech.* Dissertation, 03. Dezember 2018
- Pfund, T.:** *Die Schaeffler eDrive Plattform. Modular und hochintegriert:* Schaeffler Kolloquium 2018, S. 173–180
- Schäfer, P.:** *Projekt erforscht Betrieb der fremderregten Synchronmaschine. Wird der stromerregte Synchronmotor zur Alternative für den Antrieb von Elektrofahrzeugen? Ein Projekt der TH Nürnberg forscht am sicheren Betrieb des Elektromotors.* <https://www.springerprofessional.de/elektromotor/elektrische-antriebstechnik/projekt-erforscht-betrieb-der-fremderregten-synchronmaschine/15443622>. Abruf 01.06.2022
- Schuler Pressen GmbH:** *Produktbroschüre Smartline-Baureihe.* https://www.schulergroup.com/major/download_center/broschueren_drives_generators/download_drives_generators/drives_generators_broschuere_smartline_d.pdf. Abruf 16.12.2021
- Sequenz, H.:** *Die Wicklungen elektrischer Maschinen. 1. Wechselstrom-Ankerwicklungen.* Wien: Springer Vieweg, 1950
- Stöck, M.:** *Steigerung der Leistungsdichte und der Wirtschaftlichkeit von Elektromotoren für atomotive Fahrtriebe,* 2016
- Stone, G. C; Culbert, I; Boulter, E. A; Dhirani, H. (Hrsg.):** *Electrical insulation for rotating machines. Design, evaluation, aging, testing, and repair.* IEEE press series on power engineering. Second edition Aufl., Hoboken New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2014
- Thurman, C. E.:** *Trickle impregnation of small motors.* In: IEEE Electr. Insul. Mag., Jg. 5, 1989, Nr. 3, S. 30–35
- Voestalpine:** *Verarbeitungsrichtlinien Backlack.* https://www.voestalpine.com/isovac/content/download/35344/file/Verarbeitungsrichtlinien_Backlack_D_130421.pdf. Abruf 20.12.2021
- Wossner, W; Stoll, J; Flammer, M. O; Wurster, P; Peter, M; Fleischer, J.:** *Intelligent Rotor Assembly Enabling Positive Balancing Concepts for High-Performance Permanent Magnet Rotors* 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC), 2018
- Zerbe, J.:** *Innovative Wickeltechnologien für Statorspulen zur Erhöhung des Füllfaktors und Reduzierung der Beanspruchungen im Wickelprozess:* Universitätsverlag der TU Berlin, 2019

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Produktionsverfahren in der Leistungselektronik

18

Rik W. De Doncker, Isabel Austrup, Sven Kalker und
Lukas Ruppert

Im folgenden Kapitel werden der Aufbau und potenzielle Produktionsausführungen der verschiedenen leistungselektronischen Komponenten erläutert. Dabei wird auf die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) von Leistungshalbleitern, auf die verschiedenen Optionen der Kühlung sowie auf die potenziellen Ausführungen von passiven Bauelementen und Treiberschaltungen eingegangen. Zuletzt werden Maßnahmen zum Schutz vor elektrostatischer Entladung während der Produktion vorgestellt.

R. W. De Doncker (✉)

Universitätsprofessor, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: post@isea.rwth-aachen.de

I. Austrup

Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: post@isea.rwth-aachen.de

L. Ruppert

Gruppenleiter, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: post@isea.rwth-aachen.de

S. Kalker

Oberingenieur, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: post@isea.rwth-aachen.de;

© Der/die Autor(en) 2024

A. Kampker, H. H. Heimes (Hrsg.), *Elektromobilität*,

https://doi.org/10.1007/978-3-662-65812-3_18

313

18.1 Aufbau- und Verbindungstechnik von Leistungshalbleitern

Die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) ermöglicht die elektrische sowie thermische Anbindung des Halbleiters und schützt ihn vor Umgebungseinflüssen.

In Leistungsmodulen stellt die Chip-Anbindung gleichzeitig den thermischen und den elektrischen Pfad dar. Für die elektrische Anbindung können an der Oberseite Bonddrähte und an der Unterseite eine Lotschicht verwendet werden. Das Substrat ermöglicht die thermische Anbindung und ist gleichzeitig elektrisch isolierend. Häufig wird ein „Direct-Copper-Bonded“ (DCB)-Substrat verwendet, das aus einer Keramikschicht mit einer Kupfermetallisierung auf der Ober- und Unterseite besteht. So wird der thermische Pfad vom elektrischen getrennt. Eine Grundplatte sorgt für eine möglichst homogene Verteilung der Wärme im Modul. Das „Thermal Interface Material“ (TIM) zwischen Grundplatte und Kühlkörper sorgt für eine gute thermische Anbindung.¹

Der Aufbau eines beispielhaften Leistungsmoduls ist in Abb. 18.1 zu sehen.

Die zahlreichen einzelnen Komponenten des Leistungsmoduls werden im Folgenden näher betrachtet und beschrieben.

Gehäuse

Einflüsse aus der Umgebung – etwa Feuchtigkeit, Staub, Gase und Strahlung – können unter anderem zu Korrosion und Spannungsüberschlägen führen. Aus diesem Grund werden die Leistungshalbleiter durch ein Gehäuse geschützt. Dabei kommen in der Leistungselektronik verschiedene Gehäusearten zum Einsatz. Bei einem diskreten Aufbau wird ein Halbleiter von einer Vergussmasse umschlossen, die gleichzeitig als Gehäuse dient. Diese Technik wird hauptsächlich bei niedrigen Leistungen verwendet und kommt bei Elektrofahrzeugen zum Beispiel in Nebenaggregaten zum Einsatz. Für größere Leistungsklassen, wie beispielsweise im Fall von Antriebsumrichtern, werden zumeist Leistungsmodulare verwendet. Dabei werden mehrere miteinander verschaltete Halbleiter durch ein gemeinsames Gehäuse geschützt. Der Aufbau wird in der Regel in ein Plastikgehäuse integriert, das mit elektrisch isolierendem Silikon gel gefüllt ist.²

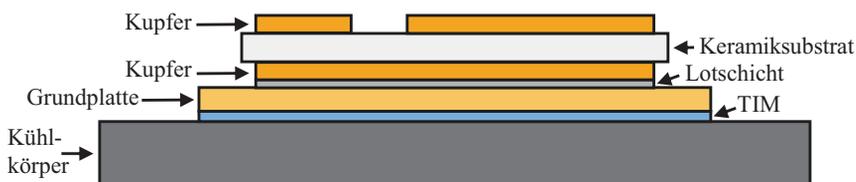


Abb. 18.1 Schematischer Aufbau eines beispielhaften Leistungsmoduls

¹Vgl. Broughton et al. 2018.

²Vgl. Finis 2005; Vgl. Yang et al. 2013.

Chip-Anbindung

Um den Halbleiterchip elektrisch kontaktieren zu können, müssen die Anschlüsse aus dem Gehäuse herausgeführt werden. Dabei bilden das Löten, das Sintern und das Drahtbonden drei wichtige Technologien. Beim Löten werden zwei metallische Werkstoffe über ein Füllmetall miteinander verbunden. Dieses Füllmetall dringt in die Oberfläche der zu verbindenden Werkstoffe ein und bildet eine Legierung, die die elektrische Verbindung sicherstellt.³ Über eine Lötstichschicht wird beispielsweise häufig die Unterseite des Chips kontaktiert. Alternativ erfolgt die Kontaktierung der Chipunterseite durch Sintern – ein Verfahren, bei dem die Kontaktflächen über ein metallisches oder keramisches Pulver mit Hilfe von Zeit, Temperatur und gegebenenfalls Druck verbunden werden.⁴ Das Drahtbonden wiederum kommt bei der Kontaktierung der Oberseite des Chips zur Anwendung. Die Kontaktflächen werden dabei mittels kleiner Drähte aus Kupfer oder Aluminium – sogenannte Bonddrähte – verbunden.⁵ Um die Stromtragfähigkeit zu erhöhen, können mehrere Bonddrähte parallelgeschaltet werden.

Isolationsmaterial

Um den Kühlkörper elektrisch von den stromführenden Komponenten zu isolieren, wird bei leistungselektronischen Modulen in der Regel ein keramisches Substrat verwendet. Keramik eignet sich besonders, da es sowohl eine hohe elektrische Isolationsfestigkeit als auch einen vergleichsweise niedrigen thermischen Widerstand besitzt. So kann die durch Verluste im Halbleiter generierte Wärme über das Substrat an den Kühlkörper weitergegeben werden. Auf der Oberseite des Substrats befindet sich eine Metallschicht, die die elektrische Kontaktierung des Halbleiters ermöglicht. Eine weitere Metallschicht auf der Unterseite des Substrats verbessert die Wärmeverteilung und ermöglicht eine Verbindung mit der Grundplatte.⁶

Kühlanbindung

Unterhalb des Substrats wird häufig eine Grundplatte aus Kupfer oder Aluminium angebracht.⁷ Sie sorgt für eine Erhöhung der effektiven Wärmeabgabe, da sich durch die hohe thermische Leitfähigkeit des Kupfers ein lateraler Wärmefluss ergibt.⁸ So kann die gesamte Fläche des Kühlkörpers (siehe Abschn. 18.2) für die Wärmeabgabe an die Umgebung genutzt werden. Teilweise wird auf eine Grundplatte verzichtet und das Substrat direkt gekühlt. Dies reduziert die Anzahl der Materialübergänge und somit den thermischen Widerstand.⁹

³Vgl. Vianco 2019.

⁴Vgl. Beiss 2013.

⁵Vgl. Ding et al. 2006.

⁶Vgl. Broughton et al. 2018.

⁷Vgl. Broughton et al. 2018.

⁸Vgl. Becker 2015.

⁹Vgl. Broughton et al. 2018.

Sensorik

Im Leistungsmodul integrierte oder externe Sensoren können Ströme und Temperaturen messen, um unter anderem das Modul vor Überlast zu schützen oder Messwerte für einen Regelalgorithmus zu extrahieren. Eine kostengünstige und robuste Methode, den Strom zu messen, besteht darin, den Strompfad zu trennen und einen sogenannten Shunt-Widerstand einzufügen. Als Nachteile des Shunt-Widerstands gelten die große benötigte Fläche auf dem DCB, die notwendige galvanische Isolierung zwischen den leistungsführenden Komponenten und der Messschaltung sowie die im Widerstand umgesetzten Verluste, die das Bauteil auch bei kleinen Strömen aufheizen.¹⁰ Ist eine galvanisch isolierte Strommessung etwa aufgrund von hohen Strömen oder Spannungen gewünscht, kommen beispielsweise Hall-Sensoren und Stromtransformatoren zum Einsatz.¹¹ In vielen Leistungsmodulen sind Widerstände mit einem negativen Temperaturkoeffizienten (NTC) als Temperatursensoren integriert, da sie kostengünstig sind und sich mit einer einfachen Messschaltung auswerten lassen. Allerdings können Temperaturen nur mit einer geringen Bandbreite gemessen werden, so dass eine Detektionsmessung transients Vorgänge, zum Beispiel bei kurzzeitigen Überlastungen, nicht möglich ist.¹² Für eine Temperaturmessung mit höherer Bandbreite eignet sich die Auswertung temperatursensitiver elektrischer Parameter (TSEP). Dabei werden temperaturabhängige Eigenschaften des Halbleiters verwendet, für deren Bestimmung lediglich Strom- und/oder Spannungsmessungen benötigt werden – zum Beispiel die Schwellenspannung oder die Drain-Source-Spannung eines MOSFETs. Bei der Auswertung muss jedoch darauf geachtet werden, dass die betrachtete Größe häufig nicht nur temperatur-, sondern auch alterungsabhängig ist.¹³

Parallelisierung

Um die Stromtragfähigkeit zu erhöhen, können Leistungshalbleiter parallelisiert werden. Dies kann in Form von parallelgeschalteten Chips innerhalb eines Moduls sowie in Form von parallelgeschalteten Modulen erfolgen. Aufgrund von beispielsweise Fertigungstoleranzen, Inhomogenität der Dotierung oder Alterung weisen die Bauteile jedoch Unterschiede etwa in der Schwellenspannung, der Vorwärtsspannung oder den parasitären Komponenten auf. Dies führt dazu, dass sich der Strom und damit auch die Verluste in der Realität nicht gleichmäßig aufteilen. Die Schaltung sollte deshalb so ausgelegt werden, dass der jeweilige Bauteilstrom trotz der Bauteilvariation unterhalb des im Datenblatt angegebenen Maximalstroms liegt.¹⁴

¹⁰Vgl. Ripka 2010.

¹¹Vgl. Ripka 2019.

¹²Vgl. Kalker et al. 2021.

¹³Vgl. Avenas et al. 2012.

¹⁴Vgl. Lüdecke et al. 2020.

18.2 Kühlung

Die in Form von Wärme auftretende Verlustleistung muss mit einem möglichst hohen Wirkungsgrad an die Umgebung abgegeben werden, da die Sperrschichttemperatur der verwendeten Halbleiter die physikalische Variable ist, die Wirkungsgrad, Leistungsdichte und Zuverlässigkeit am stärksten beeinflusst. Das Überschreiten der maximalen Sperrschichttemperatur kann zu einem sofortigen Ausfall des Bauteils führen.¹⁵

Zur Abführung der Wärmeenergie an die Umgebung kommen Kühlkörper zum Einsatz, die mit den Modulen thermisch verbunden werden. Als Kühlmittel wird in der Regel die Umgebungsluft oder eine Kühlflüssigkeit verwendet.

Thermal Interface

Bei der Verbindung des Leistungsmoduls mit dem Kühlkörper entstehen Leerstellen, da selbst polierte Oberflächen nicht ideal glatt sind. Derartige Luftpinschlüsse erhöhen den thermischen Widerstand zwischen Halbleiter und Kühlkörper und führen somit zu einer verringerten Wärmeabfuhr. Zur Verbesserung der thermischen Anbindung wird daher ein „Thermal Interface Material“ (TIM) zwischen der Grundplatte und dem Kühlkörper eingesetzt.¹⁶ Häufig verwendete TIM sind thermische Fette auf Polymerbasis mit keramischem oder metallischem Füllstoff, Gele aus Silikonen mit eingebetteten Keramik- oder Metallpartikeln sowie „Phase Change Material“ (PCM). PCM sind bei Raumtemperatur fest und deshalb einfach aufzutragen. Bei Werten unterhalb der Betriebstemperatur der Halbleiter schmilzt das Material und füllt die Leerstellen, so dass die thermische Leitfähigkeit verbessert wird.¹⁷ Das „Thermal Interface Material“ ist die größte Limitierung bei der Reduktion des thermischen Widerstands. Aus diesem Grund werden mitunter Module mit direkt gekühltem Substrat verwendet.¹⁸

Luftkühlung

Dient die Umgebungsluft als Kühlmedium, wird zwischen der natürlichen und der forcierten Luftkühlung unterschieden. Bei der natürlichen Luftkühlung ist das Kühlmedium in Bezug auf den Kühlkörper ruhend.¹⁹ Die natürliche Luftkühlung kommt überwiegend bei kleinen Leistungen zum Einsatz. Um die Wärmeabgabe zu verbessern, zirkuliert die Umgebungsluft bei der forcierten Luftkühlung, zum Beispiel durch die Verwendung eines Lüfters. Aufgrund des dadurch verbesserten Wärmeübergangs zwischen Kühlkörper und Umgebungsluft ist die Wahl eines kompakteren Kühlkörpers möglich.

¹⁵Vgl. Kuprat et al. 2021.

¹⁶Vgl. Sewergin 2021.

¹⁷Vgl. Broughton et al. 2018.

¹⁸Vgl. Broughton et al. 2018.

¹⁹Vgl. Specovius 2013.

Wasserkühlung

Durch die Verwendung eines flüssigen Kühlmediums lässt sich die Größe des Kühlkörpers weiter reduzieren, da der thermische Widerstand zwischen Kühlkörper und Kühlmedium um 80 bis 90 % kleiner ist als bei der forcierten Luftkühlung.²⁰ Aus diesem Grund eignet sich die Wasserkühlung für Anwendungen mit hohen Leistungen und wird häufig im Bereich der Elektromobilität verwendet.²¹ Besonders effektiv sind Kühlkörper, die derart geformt sind, dass es zu einer turbulenten Strömung kommt, da sie die Wärmeübertragung gegenüber einer laminaren Strömung verbessert.²² Wird ein elektrisch leitfähiges Kühlmedium verwendet, muss der Kühlkreislauf vollständig leckfrei und von spannungsführenden Komponenten galvanisch getrennt sein.

18.3 Passive Bauelemente

Passive Bauelemente wie Kondensatoren, Induktivitäten und Transformatoren bilden essenzielle Komponenten in fast allen leistungselektronischen Systemen. Je nach Anwendung stehen verschiedene Bauteile mit unterschiedlichen Bauformen und Materialien zur Verfügung, aus denen sorgfältig ausgewählt werden muss. Es folgt daher ein kurzer Überblick zu den wichtigsten Ausführungsformen sowie zu deren Eigenschaften und Einsatzgebieten.

18.3.1 Kondensatoren

Kondensatoren sind in der Leistungselektronik unverzichtbar und werden unter anderem in Filtern, im DC-Zwischenkreis und in Snubber-Schaltungen eingesetzt. Je nach Anwendung und Anforderungen kommen dabei verschiedene Materialien und Bauformen infrage.

Eine Form von Kondensatoren in der Leistungselektronik sind Elektrolytkondensatoren. Sie unterscheiden sich durch das verwendete Elektrodenmaterial – etwa Aluminium, Tantal oder Niob – und den Elektrolyten, der flüssig oder fest sein kann. Elektrolytkondensatoren sind in der Regel polarisiert, wodurch die Einbaurichtung relevant ist. Aufgrund des relativ hohen äquivalenten Serienwiderstands werden Elektrolytkondensatoren heutzutage vor allem bei Hochfrequenzanwendungen häufig durch andere Kondensatortypen ersetzt. Darüber hinaus haben Elektrolytkondensatoren mit flüssigem Elektrolyten aufgrund des kontinuierlichen Elektrolytverlustes, zum Beispiel durch Austrocknung, meist eine kürzere Lebensdauer als andere Varianten. Aufgrund ihrer hohen Kapazitätsdichte und geringer Kosten finden sie jedoch weiterhin Anwendung.²³

²⁰ Vgl. Kang 2012.

²¹ Vgl. Broughton et al. 2018.

²² Vgl. ir. Tijds Van Oevelen.

²³ Vgl. Wang und Blaabjerg 2014.

In Folienkondensatoren besteht das Dielektrikum aus Kunststoffolie. Die Elektroden werden entweder durch eine Metallfolie oder durch eine auf das Dielektrikum aufgebrachte Metallisierung gebildet. Wird eine metallisierte Kunststoffolie verwendet, weisen Folienkondensatoren selbstheilende Eigenschaften auf, was ihre Lebensdauer deutlich erhöht. Im Gegensatz zu Elektrolytkondensatoren sind Folienkondensatoren nicht polarisiert. Aufgrund der hohen Kapazitätsstabilität, der langen Lebensdauer sowie der potenziell hohen Spannungsfestigkeit eignen sie sich sehr gut für den Einsatz als Zwischenkreiskondensatoren und für Snubber-Schaltungen.^{24,25}

Keramikkondensatoren verwenden im Gegensatz zu den eben genannten Beispielen Keramik als Dielektrikum. Wie Folienkondensatoren, sind auch Keramikkondensatoren üblicherweise nicht polarisiert. Sie sind heutzutage in der Regel aus mehreren Schichten aufgebaut und werden in diesem Fall als „Multilayer Ceramic Capacitor“ (MLCC) bezeichnet. Je nach verwendeter Keramik werden Kondensatoren in vier Klassen eingeteilt, wobei derzeit nur noch die Klassen 1 und 2 relevant sind. Kondensatoren der Klasse 1 – zum Beispiel NPO/COG – weisen eine lineare Temperaturabhängigkeit, einen hohen Isolationswiderstand und eine geringe Selbstentladung auf, erreichen aber aufgrund der niedrigen Permittivität nur geringe Kapazitätswerte. Im Gegensatz dazu erreichen Klasse-2-Kondensatoren wie X7R höhere Kapazitätswerte, bringen aber gleichzeitig höhere Toleranzen, höhere Verluste und eine nicht lineare Temperaturabhängigkeit mit sich. Neben linearen (Klasse 1) und ferroelektrischen (Klasse 2) sind in den vergangenen Jahren auch Kondensatoren mit antiferroelektrischen Keramiken aufgekommen, die sich besonders für leistungselektronische Anwendungen eignen. Aufgrund der stark nicht linearen Spannungsabhängigkeit kann der Kapazitätswert bei der gewünschten Nennspannung deutlich höher liegen als bei geringen Spannungen. Sie können daher beispielsweise als Zwischenkreiskondensatoren verwendet werden.²⁶

18.3.2 Magnetika

Neben Kondensatoren sind auch Magnetika, beispielsweise Induktivitäten und Transformatoren, essenziell für die meisten leistungselektronischen Systeme. Auch Magnetika müssen individuell für die vorgesehenen Anwendungen ausgewählt und ausgelegt werden. Dafür stehen verschiedene Magnetkernformen und -materialien sowie unterschiedliche elektrische Leiter zur Verfügung.

Die Leiterwicklungen der Magnetika werden entweder als Luftspulen oder um einen Kern gewickelt. Zu den bekanntesten Kernformen gehören Toroid, zylindrischer Stab, I-, U- oder E-Kern sowie Topf- oder Planarkerne. Je nach Anforderung können in geeigneten Kernen Luftspalte eingearbeitet werden, um die effektive Permeabilität und das Sättigungs-

²⁴Vgl. Ramos 2018.

²⁵Vgl. Wang und Blaabjerg 2014.

²⁶Vgl. Wang und Blaabjerg 2014.

verhalten zu beeinflussen. Zu den gängigsten Kernmaterialien gehören Ferrite, Eisen oder Eisenlegierungen sowie amorphe und nanokristalline Legierungen. Die Kernmaterialien werden zu einem Kern in Form von Vollmaterial, laminierten Platten oder Pulver verarbeitet. Die Auswahl der Kernform, des Materials und der Verarbeitungsform des Materials beeinflusst die Größe, das Gewicht, die Verluste, das Sättigungsverhalten und die Kosten der magnetischen Komponenten und muss daher sorgfältig vorgenommen werden.^{27,28}

Für die Wicklungen werden elektrische Leiter in Form von Volldraht, Litzen und Metallfolien verwendet. Die Optionen unterscheiden sich in Bezug auf Kosten, Platzbedarf und den geeigneten Frequenzbereich. Volldraht ist in der Regel kostengünstiger in der Anschaffung, jedoch aufgrund der erhöhten Skin-Effekt-Verluste bei höheren Frequenzen den Litzen unterlegen. Kupferfolie kann insbesondere bei leistungselektronischen Anwendungen mit Frequenzen von mehreren hundert Kilohertz vorteilhaft gegenüber Litze sein. Sie ist kostengünstiger in der Anschaffung und ermöglicht außerdem Magnética mit niedrigen Verlusten in einem weiten Frequenzbereich und geringerem Kupferbedarf.²⁹ In Abb. 18.2 ist beispielhaft eine Induktivität mit Kupferfolie, Planarkern und 3-D-gedruckten Wickelkörpern zu sehen.^{30,31}

18.4 Treiberschaltung

In leistungselektronischen Applikationen werden die Halbleiterschalter – wie MOSFET oder IGBT – in Abhängigkeit von Signalen der übergeordneten Controller-Einheit ein- und ausgeschaltet, um die gewünschte Spannung am Ausgang des Umrichters zu stellen. Zum Ein- und Ausschalten muss ein Spannungslevel oberhalb beziehungsweise unterhalb der Schwellspannung an den Gate-Kontakt des Halbleiterschalters angelegt werden, zum Beispiel 15 V für den eingeschalteten und -10 V für den ausgeschalteten Zustand in typischen IGBT-Anwendungen. Während des Wechsels dieser beiden Zustände werden jedoch kurzzeitige hohe Ströme benötigt, um parasitäre Kapazitäten der leistungselektronischen Schalter schnell umladen zu können. Da die übergeordnete Controller-Einheit – etwa Mikrocontroller oder FPGA – weder solch hohe Ströme noch die erforderlichen Spannungslevel liefern kann, wird eine sogenannte Treiberschaltung – auch als „Gate-Treiberschaltung“ bekannt – benötigt, die die Steuersignale der Controller-Einheit verstärkt und ein möglichst schnelles Umschalten gewährleistet.

Der wesentliche Aufbau einer typischen Treiberschaltung ist in Abb. 18.3 dargestellt. Das Kernelement bildet ein Gate-Treiber-IC (häufig eine Push-Pull-Stufe), der das

²⁷Vgl. McLyman 2004.

²⁸Vgl. van den Bossche und Valchev 2018.

²⁹Vgl. Wienhausen 2019.

³⁰Vgl. McLyman 2004.

³¹Vgl. van den Bossche und Valchev 2018.

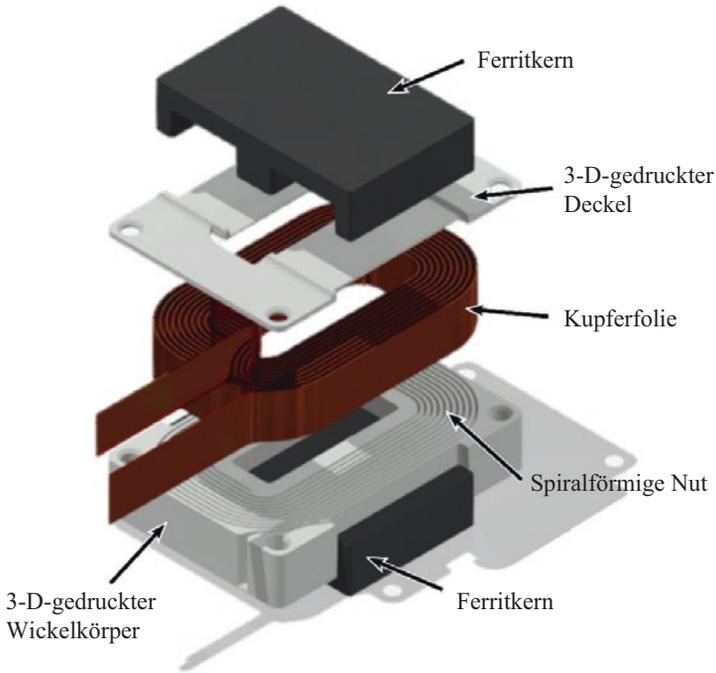


Abb. 18.2 Beispielhafter Aufbau einer Leistungsinduktivität mit Kupferfolie, 3-D-gedrucktem Wickelkörper und planarem Ferritkern. (vgl. Wienhausen 2019)

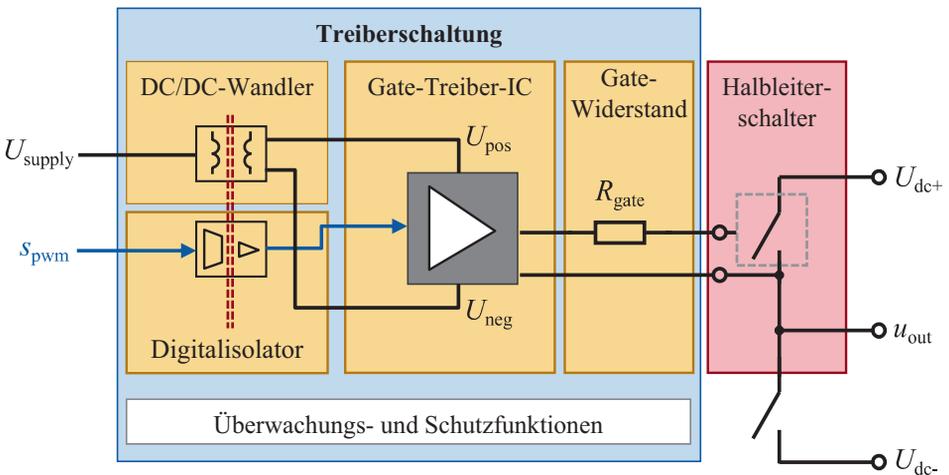


Abb. 18.3 Schematische Darstellung der Bausteine und Funktionen einer typischen Treiberschaltung

Steuerungssignal s_{pwm} der übergeordneten Controllereinheit als Input erhält und in Abhängigkeit von diesem Signal entweder das positive oder das negative Spannungslevel an das Gate des leistungselektronischen Schalters anlegt.³² Zur Generierung der Versorgungsspannungen U_{pos} und U_{neg} werden normalerweise galvanisch isolierte DC/DC-Wandler verwendet – zum Beispiel Sperrwandler. Die galvanische Isolierung ist in zahlreichen Applikationen erforderlich, um eine Trennung der Niedervolt- und Hochvoltelektronik zu gewährleisten und Sicherheitsstandards zu erfüllen. Aus demselben Grund wird das Steuerungssignal über einen Digitalisolator an den Verstärker-IC übertragen. Ein weiterer wichtiger Bestandteil einer Treiberschaltung ist der Gate-Widerstand, über dessen Dimensionierung sich die Dauer der Umschaltvorgänge bestimmen lässt. Grundsätzlich ist es vorteilhaft, möglichst schnell zu schalten, also geringe Gate-Widerstände zu verwenden, um die Schaltverluste der Halbleiterschalter geringzuhalten. Jedoch steigt mit sinkendem Gate-Widerstand die Steilheit der Spannungs- und Stromflanken am Ausgang des Umrichters – insbesondere bei Umrichtern mit schnellschaltenden Wide-Bandgap-Halbleitern wie Siliziumcarbid.³³ Da steile Spannungs- und Stromflanken zu einer starken Belastung passiver Komponenten – etwa des Zwischenkreiskondensators – sowie der elektrischen Maschine führen und die elektromagnetische Verträglichkeit des leistungselektronischen Systems beeinträchtigen können, muss die Steilheit dieser Flanken durch eine geeignete Dimensionierung des Gate-Widerstandes limitiert werden.³⁴

Um einen sicheren Betrieb des leistungselektronischen Systems zu gewährleisten und kritische Zustände zu erkennen, sind Treiberschaltungen mit Überwachungs- und Schutzfunktionen ausgestattet. Dazu zählt insbesondere die Detektion von Kurzschlüssen, die nicht nur die leistungselektronischen Halbleiterschalter, sondern auch die angeschlossene Last – etwa eine elektrische Maschine – schädigen können. Ein weitverbreitetes Konzept für eine solche Detektion ist eine sogenannte Desaturierungserkennung (auch DESAT-Erkennung), die in der Lage ist, innerhalb kurzer Zeit sowohl Halbbrücken- als auch Lastkurzschlüsse zu detektieren, um in einem solchen Fall den Umrichter in einen sicheren Zustand zu überführen und somit die Leistungshalbleiter vor einer Beschädigung zu schützen. Eine weitere wichtige Funktion von Treiberschaltungen ist der Schutz vor parasitärem Einschalten der Halbleiterschalter, was zum Beispiel aus elektromagnetischen Störungen oder steilen Spannungsflanken des Umrichters resultieren kann. Um eine hohe Robustheit gegenüber solchen Störeinflüssen zu erzielen, werden üblicherweise negative Ausschaltspannungslevel mit einem hinreichenden Abstand zur Schwellspannung oder eine sogenannte aktive Miller-Clamp-Funktionalität verwendet.³⁵

Neben diesen Grundfunktionalitäten bieten fortschrittliche, intelligente Treiberschaltungen die Möglichkeit, den Betrieb von Umrichtern weiter zu optimieren.³⁶ Durch

³² Vgl. Erickson und Maksimović 2004.

³³ Vgl. Lüdecke et al. 2020.

³⁴ Vgl. Grau und De Doncker 2019.

³⁵ Vgl. Wintrich et al. 2015.

³⁶ Vgl. Henn et al. 2022.

die Gateshaping-Technik lassen sich beispielsweise die Lade- und Entladevorgänge des Gates so modifizieren, dass Spannungs- und Stromverläufe mit optimaler Effizienz bei geringen elektromagnetischen Störaussendungen generiert werden.³⁷ Darüber hinaus ermöglichen Treiberschaltungen mit zusätzlicher Sensorik eine präzise Zustandsüberwachung der Leistungshalbleiter, indem sie deren Temperatur – basierend auf temperatur-sensitiven elektrischen oder optischen Parametern – hochdynamisch messen.³⁸

18.5 Produktionsumgebung und ESD-Schutz

Die Potenzialdifferenz zwischen einem Menschen und seiner Umgebung kann aufgrund des triboelektrischen Effekts bis zu 15 kV betragen.³⁹ Um leistungselektronische Bauteile vor einer elektrostatischen Entladung (ESD) zu schützen, die zum Beispiel zu einer Zerstörung des Gate-Oxids führen kann, sind im Zuge der Fertigung Schutzmaßnahmen einzuhalten. Diese umfassen unter anderem die Verwendung von ESD-Bekleidung sowie das Arbeiten an ESD-Arbeitsplätzen. Auch die Verpackungen sollten einen ESD-Schutz aufweisen, um entsprechende Schäden während des Transports zu verhindern.⁴⁰

Literatur

Teil III: Produktion von elektrofahrzeugspezifischen Systemen

Avenas, Y; Dupont, L; Khatir, Z.: *Temperature Measurement of Power Semiconductor Devices by Thermo-Sensitive Electrical Parameters – A Review*. In: IEEE Trans. Power Electron., Jg. 27, 2012, Nr. 6, S. 3081–3092

Becker, M.: *Neue Technologien für hochzuverlässige Aufbau- und Verbindungstechniken leistungselektronischer Bauteile*. Chemnitz: Universitätsbibliothek Chemnitz, 2015

Beiss, P.: *Pulvermetallurgische Fertigungstechnik*. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013

Broughton, J; Smet, V; Tummala, R. R; Joshi, Y. K.: *Review of Thermal Packaging Technologies for Automotive Power Electronics for Traction Purposes*. In: Journal of Electronic Packaging, Jg. 140, 2018, Nr. 4

Ding, Y; Kim, J.-K; Tong, P.: *Numerical analysis of ultrasonic wire bonding: Effects of bonding parameters on contact pressure and frictional energy*. In: Mechanics of Materials, Jg. 38, 2006, Nr. 1–2Nr., S. 11–24

Engelmann, G.: *Reducing device stress and switching losses using active gate drivers and improved switching cell design*: RWTH Aachen University, 2018

Erickson, R. W; Maksimović, D.: *Fundamentals of power electronics*. 2. Aufl. Norwell, Mass.: Kluwer Acad. Publ, 2004

³⁷Vgl. Engelmann 2018.

³⁸Vgl. van der Broeck 2019; Vgl. Kalker et al. 2021.

³⁹Vgl. Kugler et al.

⁴⁰Vgl. Kampker et al. 2018.

- Finis, G.:** *Das Verhalten von Silikongel unter hohen elektrischen Feldstärken*: Universität Kassel, 2005
- Grau, V; De Doncker, R. W.:** *The Effects of Steep Voltage Slopes on Insulation Systems of Coil Windings caused by Next Generation Power Semiconductor Devices*: IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2019, S. 26–29
- Henn, J; Ludecke, C; Laumen, M; Beushausen, S; Kalker, S; van der Broeck, C. H; Engelmann, G; Doncker, R. W. de:** *Intelligent Gate Drivers for Future Power Converters*. In: IEEE Trans. Power Electron., Jg. 37, 2022, Nr. 3, S. 3484–3503
- Van Oevelen, T.:** *Optimal Heat Sink Design for Liquid Cooling of Electronics*: KU Leuven, 2014
- Kalker, S; Ruppert, L. A; van der Broeck, C. H; Kuprat, J; Andresen, M; Polom, T. A; Liserre, M; de Doncker, R. W.:** *Reviewing Thermal Monitoring Techniques for Smart Power Modules*. In: IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron. 2021, S. 1
- Kampker, A; Vallée, D; Schnettler, A. (Hrsg.):** *Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. 2. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018
- Kang, S. S.:** *Advanced cooling for power electronics*, In: *2012 7th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (cips)*. IEEE, 2012. S.1-8.
- Kugler, F; Albach, M; Schuh, S; Kuebrich, D.:** *ESD laboratory for power electronics students*: 2005 IEEE 11th European Conference on Power Electronics and Applications
- Kuprat, J; van der Broeck, C. H; Andresen, M; Kalker, S; Doncker, R. W. de; Liserre, M.:** *Research on Active Thermal Control: Actual Status and Future Trends Special Issue Commemorating 40 years of WEMPEC, 2021*. In: IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron. 2021, S. 1
- Lüdecke, C.:** *Compensating asymmetries of parallel-connected SiC MOSFETs using intelligent gate drivers*: RWTH Aachen University, 2022
- McLyman, C. W. T.:** *Transformer and Inductor Design Handbook*: CRC Press, 2004
- Ramos, R.:** *Film Capacitors in Power Applications: Choices and Particular Characteristics Needed*. In: IEEE Power Electron. Mag. 2018, Nr. 5, S. 45–50
- Ripka, P.:** *Electric current sensors: a review*. In: Meas. Sci. Technol., Jg. 21, 2010, Nr. 11, S. 112001
- Ripka, P.:** *Contactless measurement of electric current using magnetic sensors*. In: tm – Technisches Messen, Jg. 86, 2019, Nr. 10, S. 586–598
- Sewergin, A.:** *Design challenges and solutions for the practical application of SiC power modules exemplified by an automotive dc-dc converter*: RWTH Aachen University, 2021
- Specovius, J.:** *Grundkurs Leistungselektronik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013
- van den Bossche, A; Valchev, V. C.:** *Inductors and Transformers for Power Electronics*. 1. Aufl.: CRC Press, 2018
- van der Broeck, C. H.:** *Verfahren zur thermischen Modellierung, Überwachung und Regelung von Leistungsmodulen*: RWTH Aachen University, 2019
- Vianco, P. T.:** *A Review of Interface Microstructures in Electronic Packaging Applications: Soldering Technology*. In: JOM, Jg. 71, 2019, Nr. 1, S. 158–177
- Wang, H; Blaabjerg, F.:** *Reliability of Capacitors for DC-Link Applications in Power Electronic Converters – An Overview*. In: IEEE Trans. on Ind. Applicat. 2014, Nr. 50, S. 3569–3578
- Wienhausen, A. H.:** *High integration of power electronic converters enabled by 3D printing*: RWTH Aachen University, 2019
- Wintrich, A; Nicolai, U; Tursky, W; Reimann, T. (Hrsg.):** *Applikationshandbuch Leistungshalbleiter*. 2., überarbeitete Aufl., Ilmenau: ISLE Verlag, 2015
- Yang, L; Agyakwa, P. A; Johnson, C. M.:** *Physics-of-Failure Lifetime Prediction Models for Wire Bond Interconnects in Power Electronic Modules*. In: IEEE Trans. Device Mater. Reliab., Jg. 13, 2013, Nr. 1, S. 9–17

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.



Technische und regulatorische Rahmenbedingungen der Elektromobilität

Bei Betrachtung des Entwicklungsprozesses eines Fahrzeugs lassen sich gravierende Unterschiede zwischen den Automobilherstellern – den „Original Equipment Manufacturers“ (OEMs) – feststellen. Wohingegen konventionelle Automobilhersteller mehrere Jahre für den Entwicklungs- und Zulassungsprozess einkalkulieren, schaffen es neu auf den Markt drängende Automobilhersteller aufgrund ihrer Agilität innerhalb weniger Jahre, diesen Prozess zu vollziehen. Das folgende Kapitel wirft einen genaueren Blick auf jene Prozesse.

In der Automobilindustrie wird die Erhöhung des Profits häufig mit der Produktion und deren Skaleneffekten oder der Produktivitätssteigerung durch Lerneffekte in Zusammenhang gebracht. In den vergangenen Jahren und insbesondere durch den Technologiewandel hin zur Elektromobilität hat sich die schnelle Marktreife neuer Modelle zu einem wesentlichen Wettbewerbsvorteil entwickelt. Demnach muss der Produktentstehungsprozess im Detail betrachtet, analysiert und hinsichtlich der Kosten und des Zeitaufwands optimiert werden. Dazu bedarf es geeigneter Lösungsstrategien zur Adressierung dieser Herausforderungen, die in Kap. 19 beschrieben werden. Dazu werden unter anderem das Lösungsraum- und Spezifikationsmanagement, das Front- und Side-Loading, eine frühzeitige Validierung, agile Methoden sowie die Schaffung skalierbarer Montagestrukturen vorgestellt.

Zum weiteren Verständnis wird in Kap. 20 der zugrundeliegende Produktentwicklungsprozess definiert. Er bildet die Basis für das Projektmanagement und orientiert sich an verschiedenen Methoden. Die Ausführungen gliedern sich in die Schritte des Produktentwicklungsprozesses, die grundsätzlichen Entwicklungsmodelle inklusive der Ansätze des V-Modells und der agilen Entwicklung mittels Scrum sowie die integrierte Produktentwicklung.

Die entscheidenden Instrumente zur Zulassung und damit zur Verwendung des Produkts sind die gesetzlichen Anforderungen und damit die regulatorischen Vorgaben, die am Ende des Produktentwicklungsprozesses geprüft werden müssen. Sie tragen wesentlich dazu bei, ein sicheres Produkt zu gewährleisten. Nur mit Hilfe der regulatorischen

Vorgaben lässt sich eine breite Akzeptanz in der Gesellschaft erreichen, da auch heutzutage der Aspekt der Sicherheit einen wesentlichen Anteil am Kaufentscheidungsprozess ausmacht. Vor diesem Hintergrund widmet sich Kap. 21 den technischen Prüfstellen und dem technischen Dienst, den verschiedenen Fahrzeugklassen, den Zulassungsarten, Normen und Standards sowie weiteren Aspekten. Abschließend werden die Zulassung und die Zertifizierung von Batteriesystemen betrachtet, die das sicherheitskritischste Bauteil im Elektrofahrzeug darstellen.



Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns,
Konstantin Sasse, Jonas Gorsch, Kai Kreisköther,
Ruben Förstmann und Carsten Nee

Kostensenkungen in der Automobilindustrie werden häufig durch das Generieren von Skaleneffekten oder Produktivitätssteigerungen durch Lerneffekte erzielt. Angesichts bereits hocheffizienter Produktionsprozesse in der Automobilindustrie ist das darin liegende Potenzial heute jedoch für den Durchbruch der Elektromobilität nicht ausreichend. Effizienzsteigerungen sind deshalb auch in den vorgelagerten Bereichen der Entwicklung notwendig, um Elektrofahrzeuge wirtschaftlich herstellen zu können. Dies beginnt mit

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

C. Offermanns

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: c.offermanns@pem.rwth-aachen.de

K. Sasse

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: k.sasse@pem.rwth-aachen.de

J. Gorsch (✉)

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: j.gorsch@pem.rwth-aachen.de



Abb. 19.1 Lösungsstrategien der Produktentstehung in der Elektromobilität

einem gezielten Kompetenzaufbau, bezogen auf die Komponententechnologie sowie deren Fertigung. Dafür bietet es sich an, Zulieferer mit den entsprechenden Kompetenzen in die Spezifikation und die Gestaltung des Produkts einzubinden und Wertschöpfungsbeiträge entsprechend zu vernetzen. Hinsichtlich der Prozessgestaltung ist für die Elektromobilproduktion von besonderer Bedeutung, dass Skalierungsmöglichkeiten für die Produktionsprozesse vorgehalten werden. Ziel dabei ist es, im Verlauf der Serienfertigung auf Stückzahlsteigerungen reagieren zu können. Damit diese Herausforderungen gelöst werden können, bedarf es Lösungsstrategien in der Produktentstehung der Elektromobilität. Diese werden in den folgenden Kapiteln erläutert. Ziel dabei ist es, durch erhöhte Systemkompetenz, Reaktionsfähigkeit auf Marktentwicklung und flexible Skalierbarkeit auf Technologieebene künftige Elektromobile immer effizienter zu entwickeln (vgl. Abb. 19.1).

19.1 Lösungsraum- und Spezifikationsmanagement als Kernkompetenz des Systemintegrators

Gezieltes Lösungsraum- und Spezifikationsmanagement bezieht die Produkt- und die Prozessseite von Beginn an systematisch in den Produktentstehungsprozess ein. Ziel dabei ist es, die Freiheitsgrade des Lösungsraums in der Produktentstehung durch fortlaufende

K. Kreisköther
 Ducktrain, Aachen, Deutschland
 E-Mail: Kai.kreiskoether@ducktrain.io

R. Förstmann
 Projektleiter, TQ-Systems GmbH, Wetter, Deutschland
 E-Mail: ruben.foerstmann@tq-group.com

C. Nee
 McKinsey & Company Inc., Hamburg, Deutschland
 E-Mail: Carsten_Nee@mckinsey.com

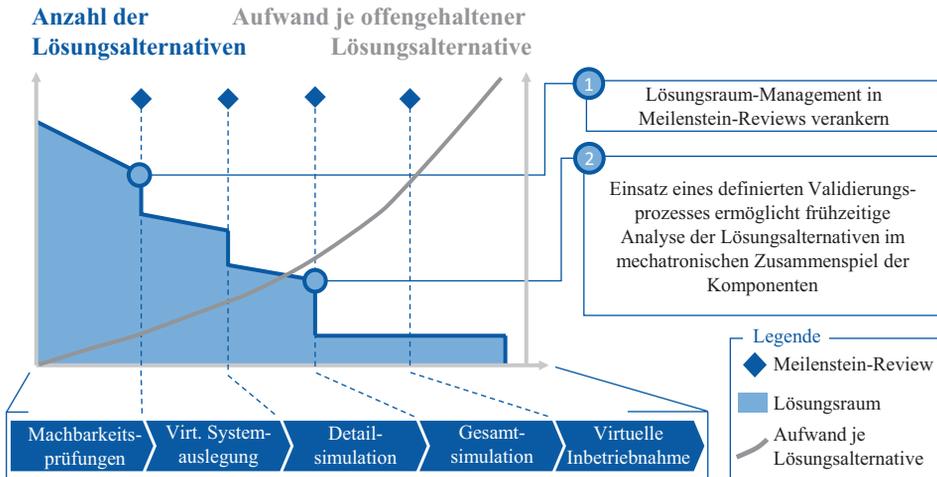


Abb. 19.2 Kontinuierliche Eingrenzung des Lösungsraums durch einen systematischen Validierungsprozess. (vgl. Schuh 2013)

Validierung der Produkt- und Prozessanforderungen effizient einzugrenzen (vgl. Abb. 19.2). Bei fortschreitender Produktentwicklung nehmen die Aufwände für etwaige Änderungen auf Produkt- und Prozessseite stark zu. Dies sorgt dafür, dass Unternehmen mit effizientem Lösungsraum und Spezifikationsmanagement deutlich geringere Entwicklungskosten realisieren können. Ermöglicht wird dies durch den frühzeitigen Einsatz virtueller Tools, mit denen die Produkte und Prozesse im Detail und später gesamt simuliert werden. Wenn hier frühzeitig konstruktive Änderungen identifiziert werden können, die den Prozess vereinfachen, lassen sich langfristig enorme Kostensenkungspotenziale heben. Unterstützt werden kann diese Eingrenzung des Lösungsraums durch Labor und Pilotanlagen auf Prozessseite sowie Prototypen auf Produktseite (siehe Abschn. 19.3). Relevanz gewinnt dieses Vorgehen im disruptiven Umfeld der Elektromobilität vor allem durch die zunehmende Produkt- und Prozesskomplexität bei gleichzeitigem Anspruch, kürzere Produktentwicklungszyklen zu erreichen.¹

19.2 Front- und Side-Loading für eine kurze Time-to-Market

Auch beim Konzept des Front-Loadings, der raschen Einbindung der Produktion in den Produktentwicklungsprozess, steht ein früher Erfahrungs- und Anforderungsaustausch im Fokus. In Ergänzung zu den durch Lösungsraum- und Spezifikationsmanagement festgelegten Freiheitsgraden werden beim Front-Loading in frühen Entwicklungsphasen die

¹Vgl. Hehl 2021.

technischen Anforderungen aus der Fertigung in den Produktkonzepten verankert.² Diese frühe Einbeziehung jener Produkthanforderungen aus der Herstellung verfolgt das Ziel, Anlaufzeiten zu verkürzen und Produktionsschwierigkeiten zu minimieren, um somit letztlich die „Time-to-Market“ zu verkürzen.

Angesichts der großen Freiheitsgrade zu Beginn von Entwicklungsprojekten reichen Lösungsraum-Management und Front-Loading alleine – insbesondere bei geringen Vorerfahrungen und neuen Technologien, wie dies bei Elektrofahrzeugen der Fall ist – jedoch nicht aus. Hinzu kommt, dass Freiheitsgrade im Produktdesign, vor allem von „Purpose-Design“-Fahrzeugen, entsprechend große Lösungsräume für die Produktionsplanung hervorrufen.

Um diesen Herausforderungen in der Elektromobilitätsentwicklung zu begegnen, ist die Einführung einer übergeordneten Entwicklungsinanz im Zuge des sogenannten Side-Loadings notwendig. Die Entwicklungsergebnisse des Side-Loadings werden den Konstrukteuren und Planern etwa in Form von Katalogen beziehungsweise Modulbaukästen angeboten oder vorgeschrieben, aus denen sie sich für ihre jeweiligen konkreten Entwicklungsaufgaben bedienen können. Neben der Entwicklung der Modulfunktionen kommt dabei auch der Berücksichtigung der erforderlichen Schnittstellen zwischen einzelnen Modulen eine besondere Bedeutung zu, um die Adaptierbarkeit der Baukastenmodule für die einzelnen Entwicklungsprojekte sicherzustellen beziehungsweise die Adaptionaufwände so gering wie möglich zu halten. Insofern handelt es sich beim Side-Loading um eine Trennung der Modulentwicklung von spezifischen Produktentwicklungsprojekten. Ein Monitoring der jeweiligen Baukästen über Produktentwicklungsprojekte hinweg gewährleistet dabei, dass sich hohe Einhaltegrade der Baukastenlösungen einstellen und die Potenziale wie Skaleneffekte durch eine hohe Einheitlichkeit der Produkte und Prozesse tatsächlich Einzug in die Produkte halten. Mit der Kombination des Front- und Side-Loadings in der Elektromobilitätsentwicklung werden Potenziale erschlossen, die eine Verkürzung der Entwicklungszeit und eine Reduzierung der Entwicklungs- und Herstellungskosten bei gesicherter Produktqualität ermöglichen. Bedingung für eine vollständige Zielerreichung ist ein hohes Maß an Kommunikation zwischen den beteiligten Teams und mit den übergeordneten Entwicklungsinstanzen.³

19.3 Frühzeitige Validierung mittels früher Prototypen

Für einen schnellen Erfahrungsaufbau bei der Entwicklung von Elektromobilen wie auch in Bezug auf die entsprechenden Produktionstechnologien ist ein gezielter Einsatz von Hardware-Prototypen von besonderer Bedeutung. Ziel ist dabei, nicht nur die Planstände der Produkt- und der Produktionsplanung mit physischen Prototypen zu validieren, die gemäß der als geeignet identifizierten Produktlösungen, Fertigungs-

²Vgl. Carsten Hass et al. 2015.

³Vgl. Kampker et al. 2017.

folgen und -technologien aufgebaut werden. Vielmehr können frühe Prototypen auch dazu genutzt werden, hardwarebasierte Lernprozesse und Erfahrungsaufbau zu ermöglichen. Von grundlegender Bedeutung ist dabei, dass ein Prototyp in diesem Konzept nicht zwangsläufig voll funktional umgesetzt sein muss, sondern auch dazu dienen kann, Teillösungen zu testen und anhand der Versuchsergebnisse zu lernen. Auf diese Weise werden Erfahrungen gesammelt sowie Konzepte validiert, und es entsteht ein Modell des Produkts, das dem späteren Serienstand in Bezug auf die mit den jeweiligen Prototypen betrachteten Aspekte so früh wie möglich nahekommt. Für die Realisierung sind Fertigungsmittel, Material und Personalkapazitäten notwendig, was Prototypen in der Herstellung mitunter teuer und aufwendig werden lässt. Eine günstigere, aber weniger realitätsnahe Option mit eingeschränkten Rückschlussmöglichkeiten auf das reale Produkt bilden digitale Prototypen durch Simulationen.⁴ Hilfestellung bieten dabei Rapid-Prototyping-Technologien, mit denen physische Prototypen bei einem geringen Zeit- und Kostenaufwand schon in frühen Phasen entwicklungsbegleitend erstellt werden können. Damit wird eine frühe Abstimmung mit Kunden, weiteren externen Stakeholdern und anderen Unternehmensbereichen ermöglicht. Zusätzliche Iterationsschleifen in späteren Phasen der Produktentwicklung, die dann aufgrund geringerer Freiheitsgrade höhere Änderungsaufwände verursachen, lassen sich somit vermeiden. Dies gilt beispielsweise auch für Rapid-Tooling-Technologien, mit denen Werkzeuge für Kleinserien zu geringen Kosten erstellt werden können.⁵ Gerade der Einsatz unterschiedlicher und neuer Technologien im Elektrofahrzeug – bei simultanem Anspruch von kurzen Produktentwicklungszyklen – macht eine frühzeitige Validierung der Entwicklungsstände notwendig.

19.4 Agile Methoden für eine hohe Reaktionsfähigkeit und kurze Time-to-Market

Insbesondere in etablierten Unternehmen mit historisch gewachsenen, funktional stark ausdifferenzierten Organisationseinheiten stellen die internen Strukturen eine Hürde dar, wenn es darum geht, flexibel und schnell auf disruptive Trends wie die Elektromobilität zu reagieren. Gerade die von Start-ups und Software-Unternehmen vorgezeigte Agilität ist für „gestandene“ Unternehmen ein erstrebenswertes Vorbild, da es scheint, dass die Erstgenannten flexibler und schneller auf kurzfristige Marktnachfragen reagieren können. Deutlich wird dies in der Management-Literatur, in der eine steigende Anzahl von Werken Einzug hält, die agile Methoden und ihre Anwendbarkeit in etablierten Strukturen erläutert.

Unter den diversen agilen Methoden ist der Scrum-Ansatz einer der geläufigsten. Diesem Ansatz folgend, wird ein Entwicklungsprojekt in eine Vielzahl sogenannter Sprints

⁴Vgl. Kampker et al. 2016.

⁵Vgl. Kampker et al. 2019.

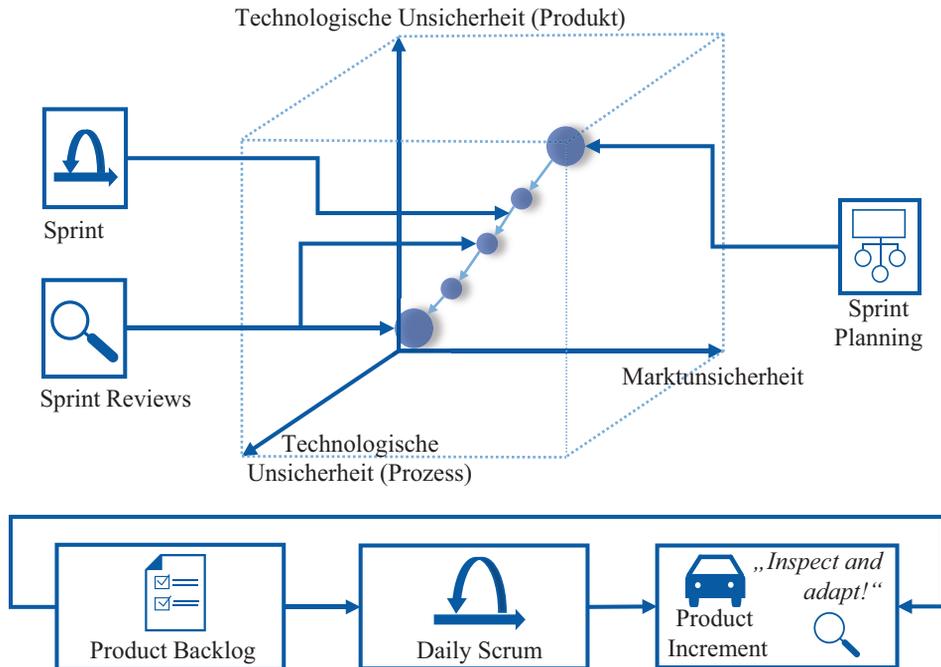


Abb. 19.3 Scrum im Kontext physischer Produktentwicklung. (vgl. Gartzten et al. 2016)

zerlegt, die nacheinander durchlaufen werden. Ausgangspunkt eines Sprints ist dabei das „Sprint Planning“, in dem die Merkmale des „Product Backlogs“ definiert werden. Das „Product Backlog“ wiederum ist eine Beschreibung der Funktionen des Sprint-Ergebnisses (vgl. Abb. 19.3).⁶ Die Summe aller dieser „Product-Backlog“-Einträge bildet das „Product Increment“, das am Sprint-Ende einer Feedback-Schleife mit allen relevanten Stakeholdern unterzogen wird. Im Gegensatz zu Software-Entwicklungsprojekten besteht bei physischen Engineering-Projekten die Herausforderung, dass einzelne „Product Increments“ für sich genommen nicht notwendigerweise die gleichen Funktionen abbilden wie beim späteren Endprodukt im Zusammenspiel aller Funktionen.⁷

Bei disruptiven Produktinnovationen wie der Elektromobilität können diese Ansätze einen Beitrag dazu leisten, schnell Erfahrungen aufzubauen und zu validieren. Entscheidend ist dabei der Grundgedanke der Zerlegung des Entwicklungsobjekts in Teilbereiche, in denen in parallelen Sprints auf Zwischenziele hingearbeitet wird, um einen schnellen Erfahrungsaufbau sicherzustellen.

⁶Vgl. Gartzten et al. 2016.

⁷Vgl. Schuh et al. 2016.

19.5 Möglichkeiten zur Integration der Montage eines „Conversion-Design“-Fahrzeuges in bestehende Montagestrukturen

Während das „Purpose Design“ gegenüber dem „Conversion Design“ durch die Entwicklung der Fahrzeuge hinsichtlich E-Mobil-spezifischer Anforderungen einige Vorteile aufweist, hat es den Nachteil, dass der notwendige Aufbau der Fertigungsinfrastruktur zunächst hohe Investitionen hervorruft. Insbesondere die klassischen Automobilhersteller verfügen jedoch bereits über funktionierende Montagestrukturen mit hohem Auslastungsgrad, in die „Conversion-Design“-Fahrzeuge integriert werden können. Voraussetzung dafür ist, dass das Fahrzeugkonzept bei der Umgestaltung auf die Integration in das Montagesystem ausgelegt wurde und die Fertigungsinfrastruktur über die notwendige Flexibilität verfügt. Damit bestehen für die Montage von Elektrofahrzeugen in bestehenden Strukturen drei grundlegende Ansätze. Auch wenn im Markt „Purpose-Design“-Fahrzeuge eine immer größere Rolle spielen, setzen einige Hersteller übergangsweise immer noch auf „Conversion-Design“-Ansätze.⁸

Die Voraussetzung einer vollständigen Integration in eine bestehende Linie (vgl. Abb. 19.4) ist ein Basisfahrzeugkonzept, aus dem sich die unterschiedlichen Varianten ableiten lassen. Damit können die Investitionsvolumina reduziert und bis in eine hohe Leistungstiefe Skaleneffekte ausgenutzt werden. Dies bedeutet, dass die Betriebsmittel und Vorrichtungen sowohl für konventionelle als auch für elektrische Antriebe ausgelegt sein müssen. Eine Modifikation einzelner bestehender Arbeitsstationen kann dabei notwendig sein. Die Vollintegration in bestehende Linien bietet insbesondere für kleine Stückzahlen die Möglichkeit, mit geringen Investitionen eine hohe Mengenflexibilität zu erreichen. Mit zunehmenden Volumina geht dieser Vorteil jedoch gegenüber den Nachteilen geringer Anpassungsmöglichkeiten des elektrifizierten Fahrzeugs sowie steigender Komplexität der Montagestationen verloren.

Der zweite Ansatz besteht in der Entwicklung einer sogenannten Bypass-Montage (vgl. Abb. 19.4). Dabei werden einzelne Arbeitsschritte zu Modulen zusammengefasst und von der Hauptmontagelinie ausgegliedert. An Stellen, wo die Variantenflexibilität nicht ausreicht, um die erforderlichen Arbeitsschritte am Elektrofahrzeug vorzunehmen, findet die Umgehung durch den Bypass statt. Dies bedeutet, dass einige Montageschritte modularisiert werden müssen, wie zum Beispiel der Einbau der Batterie samt Vorrichtungen. So lassen sich bei Gleichteilumfängen Synergien nutzen. Montagefolgen müssen bei Bedarf verändert werden, was gleichzeitig erhöhte Investitionen und ein Risiko zur Zeitspreizung bedeutet. Bei steigenden Stückzahlen verliert diese Variante daher zunehmend an Wirtschaftlichkeit.

Eine parallele, separate Montagelinie (vgl. Abb. 19.4) weist aufgrund der parallel vorgehaltenen Fertigungsinfrastruktur ein im Vergleich zur Vollintegration deutlich höheres Investitionsvolumen auf. Sie ermöglicht jedoch eine sukzessive Entwicklung des Elektro-

⁸Vgl. Elektroauto-News.net 2020.

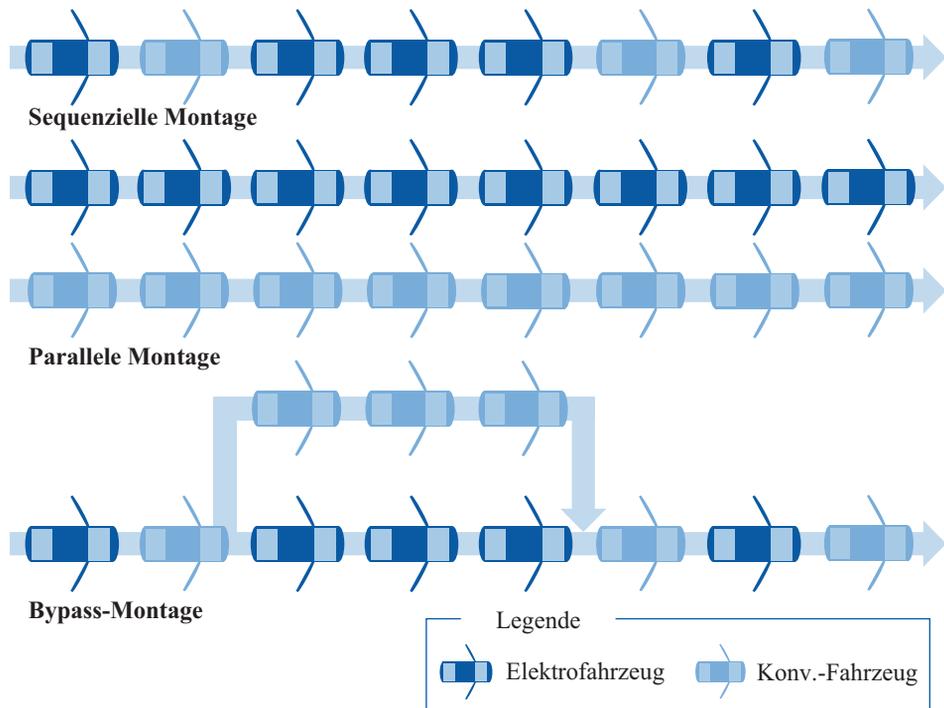


Abb. 19.4 Möglichkeiten der Fertigung eines „Conversion-Design“-Fahrzeugs

fahrzeugs weg von einem „Conversion-Design“-Fahrzeug hin zu einem auf die speziellen Anforderungen und Möglichkeiten ausgerichteten Fahrzeug des „Purpose-Design“-Konzepts. Ein weiterer Vorteil einer parallelen Linie liegt in der Entlastung der konventionellen Linie begründet, die durch steigende Produktionsvolumina der Elektrofahrzeuge unter einer wachsenden Belastung stehen kann.⁹

19.6 Schaffung skalierbarer Montagestrukturen

Aufgrund der aufgezeigten volatilen Stückzahlen ist es notwendig, dass Hersteller von Elektrofahrzeugen den Betriebspunkt ihrer Produktionslinien regelmäßig in kleinen Zeitintervallen anpassen können. Dabei liegt der Anpassungsbedarf weit über dem Niveau, das sich durch Arbeitszeitmodelle erreichen lässt. Die Kernherausforderungen bestehen unter anderem darin, zum einen die hochautomatisierten Produktionslinien der Komponentenproduktion (Elektromotor und Batterie) an volatile Stückzahlen anpassbar zu gestalten, und zum anderen darin, die Montagelinien der Gesamtfahrzeuge durch innovative Montagekonzepte flexibler auszulegen. Bis sich stabilere Stückzahlen von Elektrofahr-

⁹Vgl. Karle 2017.

zeugen eingestellt haben, sind im Hinblick auf die Montagelinien strukturell andere Konzepte notwendig. Diese müssen Anpassungen der Stückzahlen ermöglichen, die bei konventionellen Linienkonzepten und ihren aufgrund von Betriebsmitteln und Fördertechnik starrer, unflexibler Infrastruktur nur mit hohem Aufwand möglich sind.

Während der Betriebspunkt der heute üblichen, starren Linienstrukturen bei annähernd konstanten, hohen Stückzahlen liegt, wobei die Fahrzeugproduktion hocheffizient möglich ist, liegt das Ziel einer skalierbaren Montage darin, den Betriebspunkt flexibel anpassen zu können (vgl. Abb. 19.5). So wird ermöglicht, den Korridor, in dem kostengünstig produziert werden kann, gemäß der jeweils herrschenden Marktnachfrage zu verschieben. Dies führt einerseits zu einer jederzeit kostengünstigen Montage trotz sich verändernder Marktforderungen. Andererseits hat es den Effekt, dass sich die Gesamtinvestitionen über einen größeren Zeitraum erstrecken, die Zinslast verringert und das Investitionsrisiko reduziert wird, das durch im Voraus zu groß geplante Anlagen und eine gegebenenfalls ausbleibende Marktentwicklung entsteht. Im Gegensatz zum starren

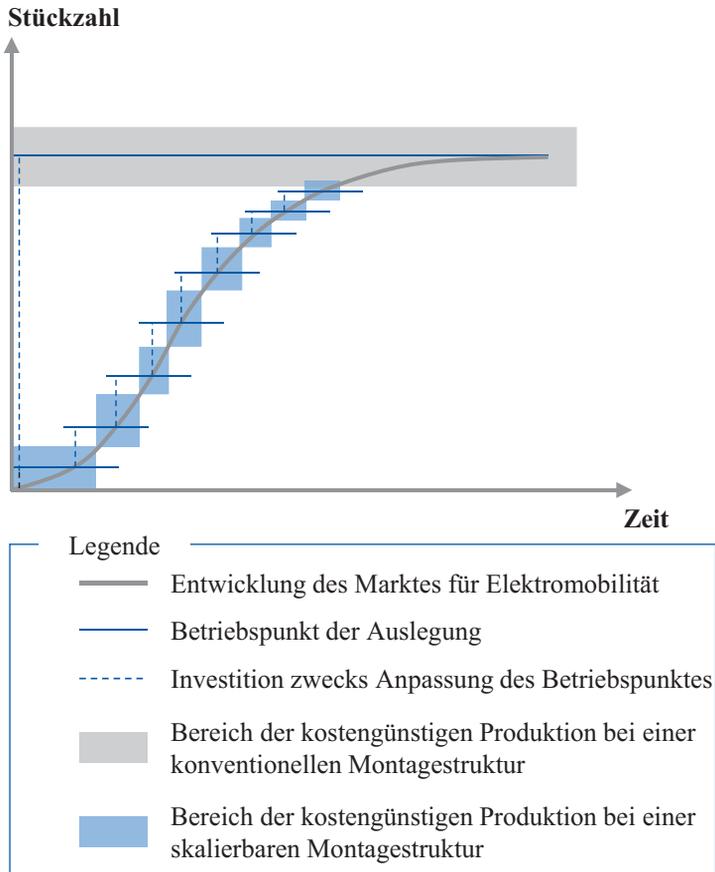


Abb. 19.5 Skalierbare Montagestrukturen

Linienkonzept der konventionellen Fahrzeugmontage werden skalierbare Montagestrukturen unter Berücksichtigung einer schrittweisen, betriebspunktabhängigen Erweiterung der Montage ausgelegt. Dies ermöglicht eine kostengünstige Montage in einem breiten Stückzahlkorridor. Mit ansteigender Stückzahl können diese Systeme bedarfsorientiert entlang vordefinierter Migrationspfade mit teil- oder vollautomatisierten Lösungen aufgerüstet werden, die eine entsprechend höhere Produktivität gewährleisten. Im Falle von Produktionslinien für die Komponenten kann dabei eine Skalierung etwa eines E-Motors und im Bereich des Gesamtfahrzeugs beispielsweise durch die Reduktion der Taktzeit erfolgen. In beiden Fällen ist darauf zu achten, dass das Produktions-beziehungs-weise Montagesystem von vornherein auf die Erfordernisse der Skalierung ausgelegt ist. Dies kann dadurch erfolgen, dass zum Beispiel der Platz und die notwendigen Anschlüsse für Automatisierungsequipment vorgehalten werden oder indem die Montageplanung bei der Zuordnung von Arbeitsinhalten zu Arbeitsstationen berücksichtigt, dass die Inhalte von einem Mitarbeitenden oder auch parallel von zweien für eine Taktzeitreduktion abgearbeitet werden können.

Von zunehmender Relevanz werden künftig auch Montagesysteme ohne starre Linienstruktur sein, die durch die geringen Fixpunkte in Bezug auf die Infrastruktur besonders leicht skaliert werden können.¹⁰ Derartige Montagesysteme lassen sich einerseits mit Hilfe von fahrerlosen Skids als autonome, flexibel einsetzbare Warenträgersysteme realisieren, auf denen die Fahrzeuge automatisiert durch die Montage bewegt werden. Andererseits ist denkbar, dass die Fahrzeuge frühzeitig in Betrieb genommen werden und autonom mit dem eigenen Antriebs- und Steuerungssystem die Montagestationen erreichen.¹¹ Aktuell gibt es Bemühungen in der Forschung, innovative und flexible Montagesysteme zu entwickeln und zu erproben. Kernfrage ist dabei, wie alternative Montagestrukturen gestaltet sein können, die es ermöglichen, mit geringen Infrastrukturinvestitionen eine Elektro-Fahrzeug-Fertigung zu errichten und wirtschaftlich zu betreiben. Wesentliche Befähiger für dieses Konzept sind die Kernelemente Resequenzierung in der Linie durch selbstfahrende Chassis, innovative Justageprozesse, ein flexibler Vorrichtungsbau, remanufacturingfähige Anbindungsmechanismen für Außenhautteile sowie ein zentrales Steuerungs-Cockpit.¹²

Literatur

Teil IV: Technische und regulatorische Rahmenbedingungen der Elektromobilität

Carsten Hass; Rudolf Herden; Kai Schmidtchen; Sven Schumacher: *Frontloading*. In: Dombrowski, U. (Hrsg.): *Lean Development: Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen* (Reihe: VDI-Buch). 1. Aufl. 2015 Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015

¹⁰ Vgl. Kropik 2021.

¹¹ Vgl. Kampker et al. 2016.

¹² Vgl. Kampker et al. 2017.

- Elektroauto-News.net:** *VW-Designchef: Mehrere Antriebe auf einer Plattform wäre „die falsche Entscheidung“*. <https://www.elektroauto-news.net/2020/vw-designchef-mehrere-antriebe-eine-plattform-falsche-entscheidung>. Abruf 20.08.2021
- Gartzen, T; Brambring, F; Basse, F:** *Target-oriented Prototyping in Highly Iterative Product Development*. In: *Procedia CIRP*, Jg. 51, 2016, Nr. 6, S. 19–23
- Hehl, M.:** *Lösungsraum-Management für die Produktionsplanung im Disruptiven Umfeld* (Ergebnisse aus der Produktionstechnik). 1. Auflage Aufl. Aachen: Apprimus Verlag, 2021
- Kampker, A; Bartl, M; Bertram, S; Burggräf, P; Dannapfel, M; Fischer, A; Grams, J; Knau, J; Kreisköther, K. D; Wagner, J.:** *Agile Low-Cost Montage*. In: Brecher, C; Klocke, F; Schmitt, R; Schuh, G. (Hrsg.): *Internet of Production für agile Unternehmen: AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2017, 18. bis 19. Mai*. 1. Auflage Aufl. Aachen: Apprimus Verlag, 2017
- Kampker, A; Förstmann, R; Ordnung, M; Haunreiter, A.:** *Prototypen im agilen Entwicklungsmanagement*. In: *ATZ Automobiltech Z*, Jg. 118, 2016, Nr. 7–8Nr., S. 72–77
- Kampker, A; Gerdes, J; Schuh, G. (Hrsg.):** *Think Big, Start Small. Streetscooter – die e-mobile Erfolgsstory: Innovationsprozesse radikal effizienter*. 1. Auflage Aufl., Berlin: Springer, 2017
- Kampker, A; Kreisköther, K; Hollah, A; Wagner, J; Fluchs, S.:** *Kleinserien- und releasefähige Montagesysteme*. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 111, 2016, Nr. 10, S. 608–610
- Kampker, A; Triebs, J; Kawollek, S; Ayvaz, P; Beyer, T.:** *Direct polymer additive tooling – effect of additive manufactured polymer tools on part material properties for injection moulding*. In: *RPJ*, Jg. 25, 2019, Nr. 10, S. 1575–1584
- Karle, A.:** *Elektromobilität. Grundlagen und Praxis*. 2., aktualisierte Auflage Aufl. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2017
- Kropik, M.:** *Produktionsleitsysteme für die Automobilindustrie. Digitalisierung des Shop-Floors in der Automobilproduktion*. 2. Auflage 2021 Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021
- Schuh, G.:** *Lean Innovation*. Berlin: Springer, 2013
- Schuh, G; Rudolf, S; Kantelberg, J. E; Riesener, M.:** *Application of Highly-Iterative Product Development in Automotive and Manufacturing Industry* (Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen), 2016

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Fabian Schmitt
und Michael Demming

Im Produktentwicklungsprozess wird das methodische Vorgehen der Produktenwicklung definiert. Sie wird in der Regel in einem Projektumfang durchgeführt. Dabei bildet der Produktentwicklungsprozess die Grundlage für das Projektmanagement.¹ Im Bereich der Fahrzeugentwicklung können diese Projekte eine neue Baureihe, eine neue Fahrzeuggeneration oder eine Modellpflege sein.

Bei der Definition des Produktentwicklungsprozesses von Elektrofahrzeugen orientiert man sich an bewährten Methoden zur Lösung von komplexen Aufgabenstellungen. Diese

¹ Vgl. Bender et al. 2021, S. 57.

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

F. Schmitt

Bereichsleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland
E-Mail: f.schmitt@pem.rwth-aachen.de

M. Demming (✉)

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: m.demming@pem.rwth-aachen.de

Methoden umfassen die iterative Lösungsfindung auf Basis des neu gewonnenen Kenntnisstandes, die Zerteilung einer Gesamtaufgabe in mehrere Teilaufgaben und das anschließende Zusammenfügen zu einer Gesamtlösung (Dekomposition) sowie die systematische Erweiterung des Lösungsraums (Divergenz) und die anschließende Selektion möglicher Lösungsvorschläge auf eine handhabbare Anzahl (Konvergenz). Zur Lösung der komplexen Aufgaben sind Fachkenntnisse unterschiedlicher Disziplinen im Produktentwicklungsprozess zu berücksichtigen.²

Zur Erfüllung des Projektziels bedarf es einer transparenten Prozessplanung. Darin müssen Meilensteine definiert werden, an denen sich der qualitative Fortschritt des Projekts nachvollziehen lässt.³ Im Rahmen der Planung der Produktentwicklung müssen die Aspekte der inhaltlichen Planung, der zeitlichen Planung, der Budgetplanung des zu entwickelnden Produkts und des damit verbundenen Entwicklungsprozesses adressiert werden. Während der Entwicklung muss das Projektziel kontinuierlich entsprechend dem aktuellen Kenntnisstand neu justiert werden. Dazu muss ein Entwicklungsprozess Iterationen vorsehen, in denen die neuen Erkenntnisse berücksichtigt werden können. Diese Iterationen erschweren jedoch die detaillierte Planung des Entwicklungsprozesses. Dennoch ist die Unterteilung in Hauptphasen für die Planung und Steuerung des Entwicklungsprozesses bedeutsam.⁴

20.1 Schritte des Produktentwicklungsprozesses

In der Praxis der Fahrzeugentwicklung hat sich eine Aufteilung in die **Konzeptphase** und die **Serienentwicklungsphase** etabliert (vgl. Abb. 20.1).⁵

Basis für die Konzeptphase bildet die Produktdefinition, in der die Ziele der Entwicklung in einem Anforderungskatalog festgehalten werden. In vielen Entwicklungsmodellen, wie beispielsweise dem V-Modell, werden die Anforderungen aufgrund ihrer

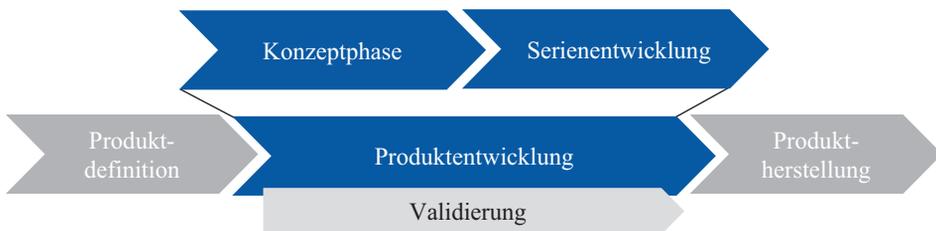


Abb. 20.1 Phasen des Produktentwicklungsprozesses im Produktentstehungsprozess

²Vgl. Bender et al. 2021, S. 42ff.

³Vgl. Pischinger et al. 2021, S. 1272.

⁴Vgl. Bender et al. 2021, S. 57ff.

⁵Vgl. Pischinger et al. 2021, S. 1292.

Relevanz mit in den Entwicklungsprozess integriert. Eine begleitende Produktvalidierung gibt Aufschluss über die Zielerreichung der Entwicklung.

Der Produktentwicklungsprozess sollte auf die Bedürfnisse des einzelnen Projekts und des Unternehmens, in dem er Anwendung finden soll, angepasst sein.⁶ Er ist Teil des Produktentstehungsprozesses. Die Phasen Produktdefinition, Produktentwicklung und Produktherstellung bilden zusammen den Prozess von der Planung bis zum kundenfähigen Produkt.⁷

Auch wenn die Produktherstellung der Produktentwicklung nachgestellt ist, ist eine Rückführung von Erkenntnissen und Anforderungen aus der Produktion in die Entwicklung äußerst wichtig. Zunehmend findet die Prozess- und Produktionsplanung parallel zur Produktentwicklung statt. In diesen Fällen spricht man von Produktionsentwicklung.⁸ Durch die Reduktion der Komplexität von rund 2500 Teilen bei Verbrennungsmotoren auf etwa 200 Teile bei Elektromotoren haben sich die Anforderungen an die Produktion stark geändert. Diese veränderten Umstände müssen im Entwicklungsprozess von Elektrofahrzeugen berücksichtigt werden.⁹

20.1.1 Konzeptphase

Die Konzeptphase ist ein iterativer Lösungsprozess zur Erfüllung der Entwicklungsaufgabe auf Basis der Produktdefinition. Meist existieren bereits erste Konzeptideen aus der Produktdefinition auf der Grundlage von Markt- und Benchmark-Analysen. Ergebnisse der Konzeptphase sind das Gesamtfahrzeugkonzept und dessen Anforderungen. Während dieser Phase werden Lösungsalternativen erarbeitet und hinsichtlich der Zielsetzung miteinander verglichen. Zur Erarbeitung des Gesamtfahrzeugkonzepts werden Teilkonzepte gegenübergestellt sowie zu einer Gesamtlösung integriert und adaptiert. Diese Teilkonzepte können bereits vorhandene Konzepte oder Modifikationen bewährter Standardkonzepte sein. Auf eine genaue Analyse des Gesamtfahrzeugkonzeptes ist großer Wert zu legen. Konzeptänderungen, die in der Konzeptphase mit geringem Aufwand verbunden sind, führen in der späteren Serienentwicklung zu einem hohen zeitlichen und finanziellen Zusatzaufwand. Erzeugnis der Konzeptphase ist das Projektlastenheft. Neben den technischen Produkteigenschaften, die das Gesamtfahrzeugkonzept beschreiben, beinhaltet das Projektlastenheft finanzielle und terminliche Maßgaben sowie Anforderungen an die Qualität und den Service.¹⁰

Der Wandel von konventionellen zu elektrischen Antriebssystemen stärkt die Bedeutung der Konzeptphase im Fahrzeugentwicklungsprozess. Aggregate und Antriebs-

⁶Vgl. Bender et al. 2021, S. 57.

⁷Vgl. Bender et al. 2021, S. 57.

⁸Vgl. Vajna et al. 2018, S. 28.

⁹Vgl. Schuh et al. 2019, S. 3.

¹⁰Vgl. Pischinger et al. 2021, S. 1281ff.

strangkomponten stellen die entscheidenden Vorgaben für die Konzepterstellung und die Package-Auslegung dar. Durch die vergleichsweise flexiblere Gestaltung elektrischer Antriebssysteme, die geringen Abmessungen elektrischer Maschinen und die deutlich niedrigere Energiedichte der Traktionsbatterien im Vergleich zu fossilen Energieträgern haben sich die Restriktionen an die Raumgestaltung stark geändert.¹¹ Durch diese Veränderung müssen bestehende Fahrzeugkonzepte neu durchdacht werden, um die Chancen der elektrischen Antriebssysteme für eine verbesserte Raumgestaltung zu nutzen.

20.1.2 Serienentwicklung

In der Phase der Serienentwicklung wird das vorher definierte Konzept umgesetzt. Während in der Konzeptphase noch Eigenschaften und Funktionen des Fahrzeugs systemübergreifend betrachtet wurden, werden in der Serienentwicklung Module und Komponenten erarbeitet. Durch die Modulspezifikation geschieht dies in der Regel domänenspezifisch mit den bekannten Werkzeugen des Maschinenbaus, der Elektrotechnik und der Informationstechnik.¹²

Die Phase der Serienentwicklung beginnt mit dem Abschluss der Konzeptphase sowie der Definition des Gesamtfahrzeugkonzepts und endet mit dem ersten kundenfähigen Fahrzeug, das mit der Serienproduktionsanlage gebaut wurde.¹³

Der Schwerpunkt der Serienentwicklung hat sich mit der Elektromobilität stark verändert. Der Fokus – und damit auch das hauptsächliche Differenzierungsmerkmal – lag in der Vergangenheit auf der Entwicklung konventioneller Antriebsmotoren. Durch die geringere Komplexität von Elektromotoren fällt in der E-Mobilität das erarbeitete Know-how zu komplexen Verbrennungsmotoren weg. Anstatt auf den Antriebsstrang, wird die Entwicklung zunehmend auf Digitalisierung und Vernetzung fokussiert.¹⁴

20.1.3 Validierung

Bei der Validierung werden die Produkteigenschaften mit den Produktanforderungen verglichen. Durch eine Validierung in frühen Entwicklungsphasen lassen sich rasche Rückschlüsse auf das Produkt ziehen. Dadurch können bereits in frühen Phasen zahlreiche Konzeptalternativen betrachtet und dadurch der Lösungsraum erweitert werden. Gleichzeitig ist eine frühzeitige Reaktion auf Fehler und damit eine Einsparung von Kosten und Zeit möglich.¹⁵

¹¹ Vgl. Pischinger et al. 2021, S. 145ff.

¹² Vgl. Vajna et al. 2018, S. 39f.

¹³ Vgl. Pischinger et al. 2021, S. 1292.

¹⁴ Vgl. Schuh et al. 2019, S. 3f.

¹⁵ Vgl. Schuh 2012, S. 211ff.

„Design Reviews“

Das „Design Review“ ist ein methodischer Ansatz zur Analyse möglicher Risiken auf Basis von Erfahrungswerten in den Bereichen Fertigung, Montage und Produkteinsatz. Beim „Design Review“ werden Entwürfe und Konzepte bereits in frühen Phasen der Entwicklung hinsichtlich ihrer Erfüllung der Produkthanforderungen bewertet. „Design Reviews“ können praktisch zu jedem Zeitpunkt der Entwicklung vorgenommen werden. Meistens werden sie zur Freigabe zum Abschluss einer Entwicklungsphase gefordert.¹⁶

Virtuelle Validierung

Methoden der virtuellen Validierung ermöglichen bereits in frühen Phasen der Entwicklung die Bewertung verschiedener Lösungskonzepte.¹⁷ Aufgrund des wesentlich geringeren Kosten- und Zeitaufwands im Vergleich zu physischen Prototypen bieten virtuelle Prototypen bereits in der Konzeptphase die Möglichkeit zum Abgleich verschiedener Lösungsvarianten mit den Produkthanforderungen. Dadurch lässt sich das Lösungsspektrum erweitern und begleitend zur Entwicklung die Zielerreichung überprüfen, was zu einer steigenden Kundenzufriedenheit und einer verbesserten Qualität führt. Vor allem im Entwicklungsumfeld der Elektromobilität nehmen virtuelle Validierungsmethoden eine zentrale Rolle dabei ein, frühzeitig Wissen aus verschiedenen Konzepten zu gewinnen, die sich durch den geänderten Antriebsstrang und die geänderten Restriktionen ergeben.

Ein Werkzeug der virtuellen Validierung ist das „Digital Mock-up“ (DMU; Digitales Versuchsmodell). DMUs sind rechnergestützte virtuelle Prototypen, an denen vor allem Package-Anforderungen wie Kollisionen überprüft werden können. Analysewerkzeuge wie die Finite-Elemente-Methode (FEM) erlauben genaue Aussagen beispielsweise über die Steifigkeit und die Dauerhaltbarkeit einzelner Bauteile oder ganzer Fahrzeuge. Durch die Entwicklung der Rechenleistungen in den vergangenen Jahren lassen sich komplexe Simulationen parallel zur Entwicklung vornehmen und Ergebnisse direkt in die Entwicklung einbeziehen. Die gestiegene Genauigkeit virtueller Validierungsmethoden erlaubt es Unternehmen, die physischen Prototypen auf eine Baustufe zu reduzieren. Mittels der Prototypenbaustufe werden die simulativen Ergebnisse anhand von physischen Prototypentests verifiziert. Gleichzeitig helfen physische Testergebnisse bei der Verfeinerung des Simulationsmodells.¹⁸

Hardware-Validierung

Trotz der Verschiebung des Validierungsumfangs hin zu virtuellen Methoden bilden die physischen Erprobungen die entscheidenden Tests zur Validierung der Produkteigenschaften. Besonders bei Fahrerprobungen und Dauerhaltbarkeitstests sind physische Prü-

¹⁶Vgl. Schuh 2012, S. 207f.

¹⁷Vgl. Schuh 2012, S. 210f.

¹⁸Vgl. Pischinger et al. 2021, S. 1287ff.

fungen unersetzbar. Auch die Dokumentation und Nachweisführung der Fahrzeugeigenschaften gegenüber dem Gesetzgeber erfolgt auf Basis von Vorserienfahrzeugen.¹⁹

Neben der finalen Absicherung der Eigenschaften und der Bestätigung der Simulationsergebnisse während der Serienentwicklung lassen sich physische Modelle auch bereits in der Konzeptphase zur Konzeptvalidierung nutzen. Dies ist vor allem bei subjektiven Eigenschaften sinnvoll, die sich durch virtuelle Modelle schwierig bewerten lassen. Dabei können für den Prüfzweck aufgebaute Funktionsmuster bereits in der Konzeptphase Erkenntnisse generieren.²⁰ Ein Beispiel hierfür sind Sitzkisten zur Bewertung der Fahrerplatzgestaltung und der Sitzposition bei neuen Package- und Fahrerplatzkonzepten elektrischer Fahrzeuge.

20.2 Entwicklungsmodelle

In der Fahrzeugentwicklung hat nahezu jedes Unternehmen seinen eigenen Entwicklungsprozess definiert, der an das zu entwickelnde Produkt und die Unternehmensstruktur angepasst ist. Grundlage für die Entwicklungsprozesse bilden meist standardisierte Entwicklungsmodelle. Im Zuge der Entwicklung elektrischer Antriebssysteme ist eine Abkehr von klassischen sequenziellen Entwicklungsmodellen hin zu agilen Entwicklungsmodellen sichtbar, die durch ihre schnelle Rückführung von Ergebnissen den Betrachtungsraum erweitern und damit innovative Ideen der Package- und Antriebsgestaltung fördern. Dennoch sind sequenzielle Modelle vor allem bei der Entwicklung mechanischer Komponenten unerlässlich. Die folgenden Ausführungen erläutern das V-Modell, das W-Modell und die agile Fahrzeugentwicklung.

20.2.1 V-Modell

Das in der Entwicklung von Fahrzeugen am weitesten verbreitete Modell stellt das V-Modell dar. Es beschreibt in seinem absteigenden Schenkel die Detaillierung von Anforderungen von der Gesamtfahrzeugebene hin zu Modulanforderungen und auf dem aufsteigenden Schenkel die Validierung der Anforderungen von einem Modultest hin zu einem Gesamtfahrzeugtest.

Das V-Modell ist ein sequenzielles Modell und erweitert das Wasserfallmodell durch Validierungsschritte und die direkte Rückkopplung der Validierungsergebnisse in den Entwurfsprozess. Dadurch bindet das V-Modell die Qualitätssicherung direkt mit in die Entwicklung ein.²¹

¹⁹Vgl. Pischinger et al. 2021, S. 1288f.

²⁰Vgl. Kampker et al. 2017, S. 108.

²¹Vgl. Schuh 2012, S. 170.

Ursprünglich stammt das V-Modell aus der Softwareentwicklung. Durch seine Bewährung in der Bewältigung komplexer Herausforderungen wurde es für weitere Entwicklungsaufgaben adaptiert. So hat der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) einen Produktentwicklungsprozess ins Leben gerufen, der auf Basis des V-Modells eine domänenübergreifende Methode zur Entwicklung von komplexen mechatronischen Systemen bietet (vgl. Abbildung 20.2). Das Modell bezieht explizit die Entwicklung von mechanischen und elektrotechnischen Elementen mit in den eigentlich aus der Informationstechnik stammenden Prozess ein. Veröffentlicht wurde das Modell in der VDI-Richtlinie 2206.²²

Grundlage für den Entwicklungsprozess nach VDI 2206 bildet eine Anforderungsliste, die den konkreten Entwicklungsauftrag beschreibt. Im Schritt des Systementwurfs wird im Vorfeld der domänenspezifischen Umsetzung – basierend auf den Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt – ein übergreifendes Systemkonzept und eine Systemarchitektur ermittelt. Die eigentliche Umsetzung der Entwicklungstätigkeit bleibt im V-Modell nach VDI domänenspezifisch. So können die Bereiche Elektrotechnik, Informationstechnik und Maschinenbau gemäß den bekannten Methoden entwickelt werden. Auf Basis des Systementwurfs werden dafür spezifische Anforderungen hergeleitet, die den Bereichen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik als Grundlage dienen. Auf den domänenspezifischen Entwurf folgt eine Systemintegration, in der die Ergebnisse der vorangegangenen Entwicklung zu einem Gesamtsystem zusammengefasst werden. Durch die Eigenschaftsabsicherung

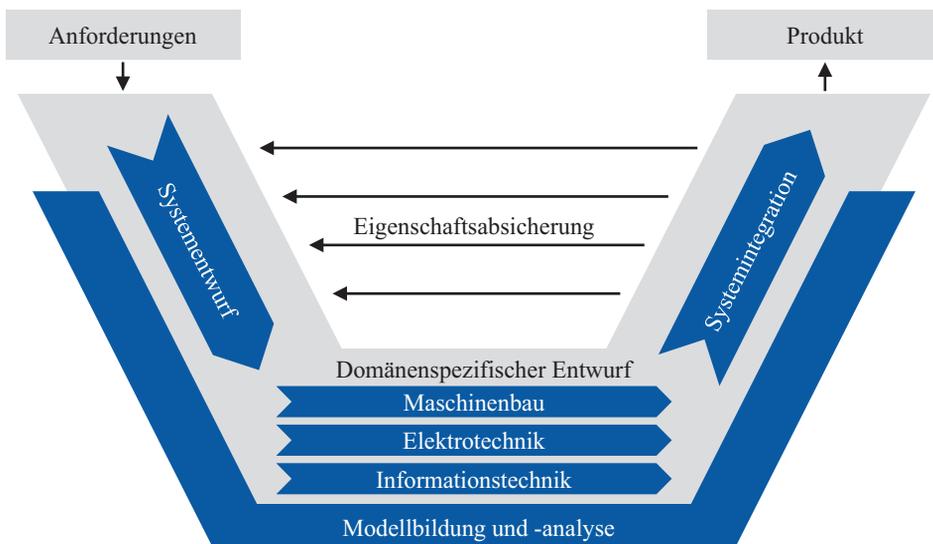


Abb. 20.2 Produktentwicklungsprozess nach VDI 2206. (vgl. Bender et al. 2021)

²²Vgl. Vajna et al. 2018, S. 38.

wird während der Integration fortlaufend die Erfüllung der Anforderungen überprüft. Begleitend dazu wird während der Modellbildung und -analyse mit Hilfe von Modellen und Berechnungen eine frühzeitige Darstellung der Eigenschaften ermöglicht. Der Entwicklungsprozess des V-Modells kann mehrfach durchlaufen werden.^{23,24}

20.2.2 W-Modell

Eine Ergänzung des V-Modells liefert das W-Modell. Sein Ziel ist eine frühzeitige Entdeckung möglicher Fehler, um somit späte und kostspielige Änderungen zu vermeiden. Dazu findet bereits während der Entwicklung eine domänenübergreifende Integration und Validierung der Anforderungen mit Hilfe von digitalen Modellen und Analysewerkzeugen statt. Dafür werden die digitalen Modelle der verschiedenen Domänen schon während der Entwicklung zu einem Gesamtmodell integriert. Der Systementwurf und die abschließende Systemintegration gemäß V-Modell finden dabei unverändert statt. Dies soll vor allem einer fehlenden Kommunikation zwischen den einzelnen Domänen entgegenwirken und somit mehrere Iterationen in der Integrationsphase verhindern. Für die Umsetzung des W-Modells ist ein spezielles Datenmanagement notwendig, das die Analyse und die Synchronisierung der übergreifenden Datensätze ermöglicht, um frühzeitig eine Bewertung der Eigenschaften des aktuellen Entwicklungsstandes zu ermöglichen.^{25,26}

20.2.3 Agile Fahrzeugentwicklung

Software hat sich in den vergangenen Jahren zum größten Bestandteil der technologischen Innovationen und Kundenfunktionen von Fahrzeugprojekten entwickelt. Gleichzeitig haben sich die Lebenszyklen von Software verkürzt und geltende Sicherheitsanforderungen sind gestiegen.²⁷

Lange Zeit existierte kein geeigneter Prozess, um diesen wachsenden Anforderungen gerecht zu werden. Das vom Taylorismus adaptierte „Software Engineering“ kann vor allem die kürzeren Entwicklungszeiten sowie den Preisdruck nicht erfüllen. Das führte zum Siegeszug der agilen Bewegung in der Softwareentwicklung.²⁸

Die agile Entwicklung, die sich seit mehreren Jahren als Standard in der Softwareentwicklung etabliert, wird zunehmend auch in anderen Bereichen der Fahrzeugentwicklung

²³ Vgl. Vajna et al. 2018, S. 39f.

²⁴ Vgl. Schuh 2012, S. 174.

²⁵ Vgl. Anderl et al.

²⁶ Vgl. Krüger 2019.

²⁷ Vgl. Bargende et al. 2020, S. 575.

²⁸ Vgl. Friedrichsen et al. 2015, S. 2f.

angewendet. Durch übergreifend arbeitende Teams lassen sich neue Ansätze schnell und kostengünstig herleiten und validieren. Die Verbreitung agiler Entwicklung wurde stark durch die Definition des „Agilen Manifests“ beschleunigt. Es beinhaltet vier Werte und zwölf Prinzipien, die allesamt Grundlagen der agilen Entwicklung sind. Einen dieser Werte bildet beispielsweise die höhere Bedeutung der Kundenbeziehung gegenüber Vertragsverhandlungen.²⁹

Als weitverbreitete agile Entwicklungsmethode ist Scrum zu nennen. Dabei handelt es sich um ein iteratives Verfahren, das ein Gesamtprojekt in einzelne Teilaufgaben gliedert. Diese Teilaufgaben werden durch selbstorganisierte Teams von fünf bis zehn Mitarbeitenden in zeitlich definierten Schleifen (Sprints) bearbeitet. Durch die frühzeitige Bewertung von Zwischenergebnissen und die direkte Integration von Feedback kann besser auf die Wünsche des Kunden eingegangen und flexibler auf mögliche Änderungen reagiert werden.³⁰

20.3 Integrierte Produktentwicklung

In der Fahrzeugentwicklung kommen agile Entwicklungsprozesse vermehrt zur Anwendung. Aufgrund der verkürzten Entwicklungszyklen, der möglichen Reaktion auf geänderte Anforderungen, eines schlankeren Prozessmodells und flacherer Hierarchien bietet agile Entwicklung viele Vorteile im Vergleich zu sequenziellen Prozessen wie dem V-Modell.³¹

Allerdings lassen sich agile Methoden nicht in allen Bereichen der Fahrzeugentwicklung sinnvoll anwenden. Durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs gewinnt vor allem die Betrachtung der funktionalen Sicherheit an Bedeutung, um ungewolltes Verhalten des Antriebs zu vermeiden. Die zugrundeliegende ISO 26262 bedarf sequenzieller Entwicklungsschritte und basiert auf dem V-Modell.³² Gleichzeitig erfordern beispielsweise lange Entwicklungszeiten von Werkzeugen – etwa über mehrere Monate bis Jahre hinweg – eine frühe detaillierte Planung vor allem in der mechanischen Entwicklung. Das macht die agile Entwicklung eines gesamten Fahrzeugs nicht sinnvoll möglich.

Dennoch können agile Methoden in die Entwicklung integriert werden und zur Verbesserung des Entwicklungsprozesses beitragen. Vor allem während der Konzeptphase helfen agile Methoden bei der Findung innovativer Lösungen auf Basis nicht vollständig festgeschriebener Anforderungen oder bei Neuentwicklungen ohne die Verwendung bestehender Strukturen. Als bekanntes Beispiel für eine agile Konzepterarbeitung gilt die Entwicklung des Elektrofahrzeugs „StreetScooter“. Um ein Produkt ins Leben zu rufen, das auf die individuellen Anforderungen eines Kunden maßgeschneidert wurde, gleich-

²⁹ Vgl. Winkelhake 2017, S. 204.

³⁰ Vgl. Winkelhake 2017, S. 209f.

³¹ Vgl. Friedrichsen et al. 2015, S. 3.

³² Vgl. International Organisation for Standardization (IOS) 2018.

zeitig aber unter strikten Kostenzielen stand, wurde die Entwicklung auf einem weißen Blatt Papier begonnen.^{33,34}

Die Integration agiler Methoden in weitere Bereiche der Fahrzeugentwicklung wird durch virtuelle Validierungsmethoden unterstützt. Während in der Softwareentwicklung das mehrfache Durchlaufen von Applikationslebenszyklen gängige Praxis ist, wird im Maschinenbau ein Produktlebenszyklus in der Regel nur einmal absolviert. Durch leistungsstarke Rechner können aussagekräftige „Digital Mock-ups“ (DMU) sowie FEM-Berechnungen oder Prozesssimulationen über Nacht erzeugt werden, so dass sich frühzeitig Rückschlüsse auf die Produkteigenschaften treffen und in die Entwicklung zurückführen lassen. Das macht ein iteratives Durchlaufen der Entwicklung auch bei mechanischen Komponenten möglich.³⁵

Um die neuen Werkzeuge – wie einen domänenübergreifenden Entwurf durch agile Konzeption und die Evolution der virtuellen Validierungsmethoden – effektiv nutzen zu können, ist eine weitere Zusammenführung von PLM („Product Lifecycle Management“ – Produkt-Lebenszyklusverwaltung) und ALM („Application Lifecycle Management“ – Applikations-Lebenszyklusverwaltung) notwendig. Dies verbessert die Kollaboration bei der Entwicklung von Anforderungen, Funktionen und Testfällen sowie das Varianten- und Konfigurationsmanagement und unterstützt bei der Umsetzung von Qualitätsstandards.³⁶ Damit wird einem der Hauptprobleme entgegengewirkt: der fehlenden Kommunikation zwischen den einzelnen Domänen während der Entwicklung. Gleichzeitig ermöglicht das die Nachverfolgbarkeit von Produktanforderungen bis zur Stückliste oder zu Softwarekomponenten im Quellcode. Auf diese Weise lässt sich die Erfüllung der Anforderungen sicherstellen und die Produktqualität steigern.³⁷

Literatur

Teil IV: Technische und regulatorische Rahmenbedingungen der Elektromobilität

- Anderl, R; Nattermann, R; Rollmann, T.:** *Das W-Modell – Systems Engineering in der Entwicklung aktiver Systeme*
- Bargende, M; Reuss, H.-C; Wagner, A. (Hrsg.):** 20. Internationales Stuttgarter Symposium. ATZ live, Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2020
- Bender, B; Gericke, K.:** *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021

³³ Vgl. Winkelhake 2017, S. 210f.

³⁴ Vgl. Kampker et al. 2017, S. 115ff.

³⁵ Vgl. Pischinger et al. 2021, S. 1294.

³⁶ Vgl. Ebert 2013, S. 445.

³⁷ Vgl. Deuter et al. 2018, S. 108.

- Deuter, A; Otte, A; Ebert, M; Possel-Dölken, F.:** *Developing the Requirements of a PLM/ALM Integration: An Industrial Case Study.* In: *Procedia Manufacturing*, Jg. 24, 2018, S. 107–113
- Ebert, C.:** *Improving engineering efficiency with PLM/ALM.* In: *Softw Syst Model*, Jg. 12, 2013, Nr. 3, S. 443–449
- Friedrichsen, U; Wolf, M.:** *Die Reise nach DevOps: Auf dem Weg zu einer bedarfsgerechten IT* 2015.
- International Organisation for Standardisation (IOS):** ISO 26262:2018-12 Straßenfahrzeuge – Funktionale Sicherheit. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2018-12
- Kampker, A; Gerdes, J; Schuh, G. (Hrsg.):** *Think Big, Start Small. StreetScooter die e-mobile erfolgsstory: Innovationsprozesse radikal effizienter/StreetScooter the e-mobile success story: radically more efficient innovation processes.* 1. Auflage Aufl., Berlin: Springer Vieweg, 2017
- Krüger, J.:** *Entwicklungsmethoden für autonomes Fahren.* In: *ProduktDatenJournal* 2019.
- Pischinger, S; Seiffert, U.:** *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (Springer eBook Collection). 9., erweiterte und ergänzte Auflage Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021
- Schuh, G.:** *Innovationsmanagement.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012
- Schuh, G; Zeller, P; Scholz, P; Krebs, L; Studerus, B.:** *Eine Branche im Umbruch – Den technologischen Wandel in der Automobilindustrie gestalten.* In: *Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT* 2019.
- Vajna, S; Weber, C; Zeman, K; Hehenberger, P; Gerhard, D; Wartzack, S.:** *CAX für Ingenieure.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018
- Winkelhake, U.:** *Die digitale Transformation der Automobilindustrie.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Gesetzliche Anforderungen

21

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns,
Mario Kehrer, Konstantin Sasse, Simon Dünnwald,
Janis Vienenkötter, Amira Meyer, Moritz Frieiges,
Merlin Frank, Björn Vetter, Dirk-W. Morche,
Klaus Genuit und Olaf Elsen

Regulatorische Vorgaben dienen sowohl der Nutzergruppe als auch dem produzierenden Unternehmen. Da zum Erfolg der Elektromobilität die breite Akzeptanz in der Gesellschaft essenziell ist, schaffen gesetzliche Anforderungen einen Rahmen, um die Funktionalität, die Kompatibilität und die Sicherheit des Produktes zu gewährleisten. Gleichzeitig wird den Unternehmen durch Marktharmonisierung und Konformitätsvorgaben der Rahmen zur erfolgreichen Teilhabe an der Elektromobilität vorgegeben. Diese sind entsprechend verpflichtet, einen Nachweis gegenüber Technischen Prüfstellen und

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

C. Offermanns · M. Kehrer

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: c.offermanns@pem.rwth-aachen.de; m.kehrer@pem.rwth-aachen.de

K. Sasse (✉) · S. Dünnwald · J. Vienenkötter · M. Frieiges

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: k.sasse@pem.rwth-aachen.de; s.duennwald@pem.rwth-aachen.de; j.vienenkoetter@pem.rwth-aachen.de; m.frieiges@pem.rwth-aachen.de

Diensten zu erbringen. Je nach Fahrzeugklasse und Zulassungsart können die Vorgaben variieren. Dabei gilt es, verschiedene Normen und Standards zu erfüllen, die aus dem unabdingbaren, interdisziplinären Austausch zwischen den Domänen Automobiltechnik, Elektro- und Energietechnik sowie Informations- und Kommunikationstechnik hervorgehen. Durch elektromobilitätsspezifische Systemkomponenten und der Hochvolt-Spannungsebene im Fahrzeug legen die Vorschriften ein besonderes Augenmerk auf deren sicherheitstechnische Erfüllung. Bekannte Themenfelder – etwa wie Noise, Vibration und Harshness (NVH) oder die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – stellen die Entwicklungsabteilungen aufgrund der „lautlosen“ Elektromobilität und der hohen Spannungsebene vor Herausforderungen. Neben den Regelungen auf Gesamtfahrzeugebene liegt in der Elektromobilität der Fokus vor allem auf den Einzelkomponenten, beispielsweise der Antriebsbatterie oder den Hochvolt-Steckverbindungen. Insbesondere wegen der hohen Energiedichten gelten für die Antriebsbatterien strenge, länderspezifische Vorgaben, die für die Zulassung notwendig sind. Nur durch eine enge entwicklungsbegleitende Absicherung kann die Antriebsbatterie den gesetzlichen Anforderungen entsprechend auf den Markt gebracht werden.

A. Meyer

Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: a.meyer@pem.rwth-aachen.de

M. Frank

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: m.frank@pem.rwth-aachen.de

B. Vetter

Commissioning Engineer, Siemens Mobility, Berlin, Deutschland
E-Mail: bjoern.Vetter@rwth-aachen.de

D.-W. Morche

Gründer und Leiter DWM Beteiligungs- und Beratungsgesellschaft mbH,
Wunstorf, Deutschland
E-Mail: info@dwm.capital

K. Genuit

HEAD acoustics GmbH, Herzogenrath, Deutschland
E-Mail: Klaus.Genuit@head-acoustics.com

O. Elsen

Senior Projektmanager, FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland
E-Mail: elsen@fev.com

21.1 Technische Prüfstellen und Technische Dienste

Bevor ein Fahrzeug eine Zulassung für den Straßenverkehr erhält, muss es von einer zugelassenen Organisation überprüft werden. Gerade im Fall von Innovationen wie der Elektromobilität oder bei neuen Fahrzeugherstellern, die ausschließlich mit der neuen Technologie am Markt agieren wollen, werden häufig zunächst kleine Stückzahlen von Fahrzeugen zur Teilnahme am Straßenverkehr zugelassen. Bei dieser Art von Neufahrzeugen, die weder eine EG-Typgenehmigung noch eine EG-Kleinserien-Typgenehmigung vorweisen können, bedarf es einer Einzelgenehmigung nach § 13 EG-FGV. Bis 2009 war das Ausstellen einer solchen Einzelgenehmigung nur durch Sachverständige von Technischen Prüfstellen gestattet (TÜV in Westdeutschland beziehungsweise DEKRA in Ostdeutschland). Mit Inkrafttreten der EG-FGV vom 21. April 2009 dürfen inzwischen auch Sachverständige der beim Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) akkreditierten Technischen Dienste entsprechende Gutachten nach § 13 EG-FGV erstellen. Anhand dieser Gutachten kann ein Antrag zur Genehmigung bei der Genehmigungsbehörde vorgelegt werden.

Die ausübende Organisation einer Technischen Prüfstelle für den Kraftfahrzeugverkehr wird nach § 10 KfSachvG durch die Landesregierung oder eine von ihr bestimmte Behörde dazu beauftragt. Sowohl die Technischen Prüfstellen als auch die akkreditierten Technischen Dienste sind dafür verantwortlich, dass durch die Einhaltung der Qualitätssicherung die Verkehrssicherheit gesteigert wird.

Sofern bei einem gleichbleibenden Fahrzeugtyp die 20-Prozent-Grenze einer im Anhang XII Teil A Nummer 2 der Richtlinie 2007/46/EG bezifferte Höchstzulassungszahl überschritten wird, ist je nach Erfüllung von technischen Anforderungen eine EG- oder nationale Kleinserien-Typgenehmigung notwendig. Darüber ist es Herstellern möglich, eine EG-Typgenehmigung beim KBA zu beantragen, die auf Basis eines vollumfänglichen Prüfberichts eines Technischen Dienstes über die Erfüllung der Bedingungen zur Erteilung genehmigt werden kann. Um den Zulassungsprozess möglichst einfach und einheitlich zu halten, sind die ausgestellten Gutachten sowohl national als auch innerhalb der gesamten EU gültig. Technische Prüfstellen und Technische Dienste spielen somit bei der Genehmigung eines Fahrzeugtyps eine essenzielle Rolle. Durch die Sachverständigen werden die technischen Konformitäten mit den gültigen gesetzlichen Anforderungen abgeprüft und in entsprechenden Prüfberichten dokumentiert. Dadurch wird der technische Sachverstand mit Hilfe von Fachexperten im administrativen Genehmigungsverfahren sichergestellt.

21.2 Fahrzeugklassen

Regierungen und private Organisationen haben für Fahrzeuge Klassifizierungssysteme entwickelt, die zu verschiedenen Zwecken verwendet werden – beispielsweise zur Regulierung, Beschreibung oder Kategorisierung von Fahrzeugen. Mit Hilfe dieser Klassi-

fizierungssysteme lassen sich Fahrzeuge in sogenannte Fahrzeugklassen unterteilen. Eine Fahrzeugklasse bezeichnet eine abgegrenzte Gruppe von Fahrzeugmodellen, die sich in ihrer Form, ihrer Größe oder ihren technischen Spezifikationen unterscheiden können.

Auf nationaler und internationaler Ebene existieren verschiedene Regulierungen und Klassifizierungssysteme von Fahrzeugen. Die bekannteste internationale Richtlinie ist die ISO 3833:1977 Road vehicles – Types – Terms and Definitions.¹ In Deutschland sowie in Europa werden meist die EG-Fahrzeugklassen basierend auf der Verordnung (EU) 2018/858 verwendet.

21.2.1 Internationale Regelung der Fahrzeugklassen

Als Referenz für die Einteilung der Fahrzeugklassen gilt in nahezu allen Ländern die Richtlinie ISO 3833:1977 Road vehicles – Types – Terms and Definitions.² Diese Richtlinie ist der ISO-Standard für Straßenfahrzeuge, deren Typen, Begriffe und Definitionen. Die Richtlinie definiert Bezeichnungen nach bestimmten Konstruktionsmerkmalen und technischen Eigenschaften im Zusammenhang mit den Arten von Straßenfahrzeugen. Sie gilt dementsprechend ausdrücklich für Fahrzeuge, die für den Straßenverkehr bestimmt sind. Ausgenommen sind landwirtschaftliche Zugmaschinen, die nur gelegentlich für die Beförderung von Personen oder Gütern auf der Straße zum Einsatz kommen.³

Grundsätzlich werden Fahrzeuge nach Richtlinie ISO 3833:1977 in die Klassen „Kraftfahrzeug“, „gezogene Fahrzeuge“, „Kombination von Fahrzeugen“, „Moped“ und „Motorrad“ unterteilt. Kraftfahrzeuge sind motorgetriebene Straßenfahrzeuge mit vier oder mehr Rädern, die nicht schienengebunden sind und üblicherweise für die Beförderung von Personen oder Gütern eingesetzt werden. Fahrzeuge, die an eine elektrische Leitung angeschlossen sind, oder dreirädrige Fahrzeuge mit einem Gesamtleergewicht von mehr als 400 kg sind in der Klasse „Kraftfahrzeuge“ inbegriffen. Die Klasse „gezogene Fahrzeuge“ beschreibt nicht motorgetriebene Straßenfahrzeuge, die aufgrund ihrer Bauart und Ausstattung zur Beförderung von Personen und Gütern dienen und dazu bestimmt sind, von einem Kraftfahrzeug gezogen zu werden. Die Kombination von Fahrzeugen umfasst ein Kraftfahrzeug, das mit einem oder mehreren Zugfahrzeugen gekoppelt ist.⁴

21.2.2 Nationale und europäische Regelung der Fahrzeugklassen

Das jährlich vom Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) herausgegebene „Verzeichnis zur Systematisierung von Kraftfahrzeugen und ihren Anhängern“ umfasst folgende Gliederung:

¹Vgl. International Organisation for Standardization (IOS) 1977.

²Vgl. International Organisation for Standardization (IOS) 1977.

³Vgl. International Organisation for Standardization (IOS) 1977.

⁴Vgl. International Organisation for Standardization (IOS) 1977.

• Teil A 1A	EG-Fahrzeugklassen
• Teil A 1B	Fahrzeug- und Aufbauarten (national)
• Teil A 2	Emissionsklassen
• Teil A 3	Kraftstoffarten beziehungsweise Energiequellen

In Teil B dieses Verzeichnisses werden jeweils analog zur Gliederung die auslaufenden Bezeichnungen gelistet. Die gültigen Bezeichnungen basieren auf der Verordnung (EU) 2018/858. Die EG-Fahrzeugklassen unterteilen Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger in neun große Hauptklassen mit jeweiligen Untergruppen, wovon die Hauptklassen in Tab. 21.1 aufgeführt sind.⁵

21.2.3 Fahrzeugunterklassen

Fahrzeugunterklassen beschreiben Fahrzeuge, die vom Aufbau oder Bestimmungszweck her nicht eindeutig einer der vier Hauptklassen zugeordnet werden können. Die Verordnung (EU) 2018/858 führt die folgenden drei verschiedenen Fahrzeugunterklassen auf.⁶

Tab. 21.1 Übersicht der EG-Fahrzeugklassen^a

Klasse	Unterklasse	Beschreibung
L		Zweirädrige oder dreirädrige Kraftfahrzeuge sowie vierrädrige Kraftfahrzeuge
M	M1 und M1G	Fahrzeuge, die für die Personenbeförderung ausgelegt und gebaut sind, mit mindestens vier Rädern und höchstens acht Sitzplätzen außer dem Fahrersitz
	M2, M2G, M3 und M3G	Fahrzeuge, die für die Personenbeförderung ausgelegt und gebaut sind, mit mindestens vier Rädern und mehr als acht Sitzplätzen außer dem Fahrersitz
N	N, N1, N1G, N2, N2G, N3 und N3G	Fahrzeuge der Klassen N1, N1G, N2, N2G, N3 und N3G, die vorwiegend für die Beförderung von Gütern ausgelegt und gebaut sind, mit mindestens vier Rädern – sowie Fahrzeuge der Klasse N mit besonderer Zweckbestimmung, auch wenn sie nicht für die Güterbeförderung ausgelegt und gebaut sind
O		Anhänger, die sowohl für die Beförderung von Gütern und Fahrgästen als auch für die Unterbringung von Personen ausgelegt und gebaut sind
R		Land- oder forstwirtschaftliche Anhänger (LOFANH)
S		Gezogene auswechselbare Geräte für die Land- oder Forstwirtschaft (LOFGaG)
T		Land- oder forstwirtschaftliche Zugmaschinen auf Rädern
C		Zugmaschinen auf Gleisketten (GLK) oder einer Kombination aus Rädern und Gleisketten

^aVgl. Kraftfahrt-Bundesamt 2021.

⁵Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt 2021.

⁶Vgl. Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union 2021.

Geländefahrzeuge

Hierbei handelt es sich um Fahrzeuge, die entweder der Klasse M oder N angehören und spezifische technische Merkmale aufweisen, die eine Verwendung im Gelände ermöglichen. Für diese Fahrzeugklassen muss der Buchstabe „G“ dem Buchstaben und der Zahl hinzugefügt werden, mit denen die Fahrzeugklasse bestimmt wird. Im Anhang I Teil A Abschn. 4 der Verordnung (EU) 2018/858 werden Kriterien für die Einteilungen von Fahrzeugen in die Unterklasse der Geländefahrzeuge aufgeführt.

Fahrzeuge mit besonderer Zweckbestimmung

Diese Fahrzeuge zählen zu den Klassen M, N oder O und weisen spezifische technische Merkmale auf, mit denen eine Funktion erfüllt werden soll, für die spezielle Vorkehrungen erforderlich sind beziehungsweise eine besondere Ausrüstung benötigt wird. Für unvollständige Fahrzeuge, die der Unterklasse der Fahrzeuge mit besonderer Zweckbestimmung zugeordnet werden sollen, ist der Buchstabe „S“ dem Buchstaben und der Zahl hinzuzufügen, mit denen die Fahrzeugklasse bestimmt wird. Beispiele für Fahrzeuge mit besonderer Zweckbestimmung sind Wohnmobile, Krankenwagen, Leichenwagen oder Anhänger für Schwerlasttransporte.

Geländefahrzeug mit besonderer Zweckbestimmung

Hierbei geht es um Fahrzeuge, die entweder der Klasse M oder N angehören. Sie weisen spezifische technische Merkmale auf, die eine Verwendung im Gelände ermöglichen und gleichzeitig eine Funktion erfüllen, für die spezielle Vorkehrungen erforderlich sind beziehungsweise eine besondere Ausrüstung benötigt wird. Für diese Fahrzeugklassen ist der Buchstabe „G“ dem Buchstaben und der Zahl hinzuzufügen, mit denen die Fahrzeugklasse bestimmt wird. Ferner ist bei unvollständigen Fahrzeugen, die der Unterklasse der Fahrzeuge mit besonderer Zweckbestimmung zugeordnet werden sollen, zusätzlich der Buchstabe „S“ hinzuzufügen.

21.2.4 Fahrzeugklasse L

Eine Besonderheit stellt die Fahrzeugklasse L dar. Grundlage dafür ist die Verordnung (EU) Nr. 168/2013 vom 15. Januar 2013 über die Genehmigung und Marktüberwachung von zwei- oder dreirädrigen und vierrädrigen Fahrzeugen. Durch diese Verordnung sollen harmonisierte Vorschriften für die Typgenehmigung von Fahrzeugen der Klasse L festgelegt werden, um das Funktionieren des Binnenmarktes zu gewährleisten. Außerdem sollen mit dieser Verordnung der Rechtsrahmen vereinfacht, Emissionen von Fahrzeugen der Klasse L verringert, die Sicherheit erhöht, zur Anpassung an den technischen Fortschritt beigetragen und die Vorschriften für die Marktüberwachung gestärkt werden. Fahrzeuge der Klasse L sind zwei-, drei- oder vierrädrige Kraftfahrzeuge, wozu Fahrräder mit Antriebssystem, zweirädrige und dreirädrige Kleinkrafträder, zweirädrige und dreirädrige Krafträder, Krafträder mit Beiwagen, leichte und schwere Straßen-Quads sowie leichte

Tab. 21.2 Übersicht der Fahrzeugklasse L^a

Klasse	Beschreibung
L1e	Zweirädriges Kraftfahrzeug (Kleinkraftrad) mit einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit bis zu 45 km/h und einem Hubraum von bis zu 50 cm ³ bei Verbrennungsmotoren oder einer Leistung bis zu 4 kW bei Elektromotoren.
L2e	Dreirädriges Kraftfahrzeug (Kleinkraftrad) mit einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit bis zu 45 km/h und einem Hubraum bis zu 50 cm ³ bei Verbrennungsmotoren oder einer Leistung bis zu 4 kW bei Elektromotoren.
L3e	Zweirädriges Kraftfahrzeug (Kraftrad) ohne Beiwagen und mit einem Hubraum über 50 cm ³ bei Verbrennungsmotoren und/oder einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von mehr als 45 km/h. Dazu zählt das Leichtkraftrad mit einem Hubraum bis zu 125 cm ³ und einer Leistung bis zu 11 kW.
L4e	Zweirädriges Kraftfahrzeug (Kraftrad) mit Beiwagen und mit einem Hubraum von über 50 cm ³ bei Verbrennungsmotoren und/oder einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von mehr als 45 km/h. Dazu zählt das Leichtkraftrad mit einem Hubraum bis zu 125 cm ³ und einer Leistung bis zu 11 kW.
L5e	Dreirädriges Fahrzeug, d. h. mit drei symmetrisch angeordneten Rädern ausgestattete Fahrzeuge mit einem Hubraum von mehr als 50 cm ³ bei Verbrennungsmotoren und/oder bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von mehr als 45 km/h.
L6e	Vierrädrige Leichtkraftfahrzeuge mit einer Leermasse von bis zu 350 kg, ohne Masse der Batterien im Falle von Elektrofahrzeugen, mit einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von bis zu 45 km/h und Hubraum von bis zu 50 cm ³ bei Verbrennungsmotoren oder einer Leistung bis zu 4 kW bei Elektromotoren.
L7e	Vierrädrige Kraftfahrzeuge, die nicht unter Klasse L6e fallen, mit einer Leermasse von bis 400 kg (bis 550 kg im Falle von Fahrzeugen für Güterbeförderung), ohne Masse der Batterien bei Elektrofahrzeugen, und mit einer Leistung bis zu 15 kW.

^aVgl. Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union 2013.

und schwere Vierradmobilien gehören. Aufgrund der besonderen Rahmenbedingungen dieser Fahrzeugklasse können hier vereinfacht Fahrzeuge mit Elektroantrieb hergestellt und genehmigt werden.

Tab. 21.2 gibt eine Übersicht der Fahrzeugklasse L nach Richtlinie 2002/24/EG.^{7,8}

21.2.5 Fahrzeugklassen für Elektrofahrzeuge

Die Verordnung über die Zulassung von Fahrzeugen zum Straßenverkehr und das Kraftfahrt-Bundesamt definieren beide keine eigene Klasse für E-Mobile. Die heute am Markt erhältlichen Elektrofahrzeuge sind daher bislang hauptsächlich in den „klassischen“ Fahrzeugklassen M1 für Pkw zu finden oder in der Klasse N1 für kleine Nutzfahrzeuge bis

⁷Vgl. Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union 2013.

⁸Vgl. Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union 2002.

3,5 t. Zusätzlich können Elektrofahrzeuge den Klassen M2, M3, N2 und N3 sowie der Fahrzeugklasse L angehören.⁹

Mit der Fahrzeugklasse L wurden Fahrzeugklassen geschaffen, die erstmals explizit die Möglichkeit eines Elektroantriebs mit einer maximalen Nutzleistung von bis zu 15 kW beinhalten. Leichte zwei- oder dreirädrige Kleinkrafträder mit bis zu vier Kilowatt elektrischer Antriebsleistung im Rahmen der Bestimmungen der Fahrzeugklassen L1e und L2e sind problemlos und zuverlässig zu realisieren. Den Fahrzeugklassen L6e und L7e sollte hingegen eine zusätzliche Betrachtung zukommen, da sie je nach Ausführung und Tests sicherheitskritisch sein können.

Ein besonderes Augenmerk sollte auf die Fahrzeugklasse L7e gelegt werden, denn diese Fahrzeugklasse sieht eine Begrenzung der Fahrzeugmasse (Leergewicht ohne Batterien 400 kg beziehungsweise 550 kg) und der Motorleistung (15 kW) vor, aber keine Begrenzung der Höchstgeschwindigkeit. Ein Rechenbeispiel zeigt, inwiefern die passive Sicherheit der Fahrzeugklasse L7e bei ungünstigen Bedingungen beeinträchtigt werden kann. Geht man beispielsweise von einer Lithium-Ionen-Batterie mit zehn Kilowattstunden Leistung aus, ergibt sich für ein solches Fahrzeug bei einem Batteriegewicht von rund 100 kg zuzüglich Fahrer (75 kg) eine Gesamtfahrzeugmasse (Gesamtgewicht) von weniger als 800 kg. Bei einer Motorleistung von 15 kW kann dieses Fahrzeug innerhalb von fünf bis sechs Sekunden auf 50 km/h beschleunigen und eine Höchstgeschwindigkeit von mehr als 100 km/h erreichen. Würde es in diesem Szenario zu einem Unfall kommen, müsste von einem erhöhten Risiko ausgegangen werden. Zusätzlich sind die Prüfumfänge und -nachweise für Fahrzeuge der Klasse L im Vergleich zu einem klassischen Pkw (Fahrzeugklasse M1) geringer.¹⁰

Auch für Elektrofahrzeuge besteht die Möglichkeit, die Fahrzeuge so zu designen beziehungsweise auszulegen, dass sie in die Kategorie L7e fallen. Da an diese Fahrzeuge der Klasse L keine gesetzlichen Anforderungen für Crash-Sicherheitsnachweise gestellt werden, ergaben Untersuchungen, dass die passive Sicherheit der Fahrzeugklasse L im Durchschnitt geringer ausfällt als die der Fahrzeugklasse M. Deshalb fordert die Unfallforschung der Versicherer, dass die Sicherheitsstandards von Leichtkraftfahrzeugen an die von Pkw angepasst werden.¹¹ Leichtfahrzeuge sollten darüber hinaus serienmäßig mit aktiven und passiven Sicherheitselementen ausgerüstet werden. Bei der Bewertung der Sicherheit der Fahrzeugklasse L muss jedoch beachtet werden, in welchem Umfeld die Fahrzeuge eingesetzt werden und womit die Fahrzeuge verglichen werden (zum Beispiel Pkw oder Roller). So ist das Sicherheitsrisiko meist nur bei hohen Geschwindigkeiten und etwa auf Bundesstraßen erhöht. Außerdem werden teilweise auch Crashtests mit Fahrzeugen der Klasse L vorgenommen, um die passive Sicherheit zu erhöhen.¹²

⁹Vgl. Kätzel 2021.

¹⁰Vgl. Morche et al. 2018.

¹¹Vgl. Schwark 2006.

¹²Vgl. Brost et al. 2019.

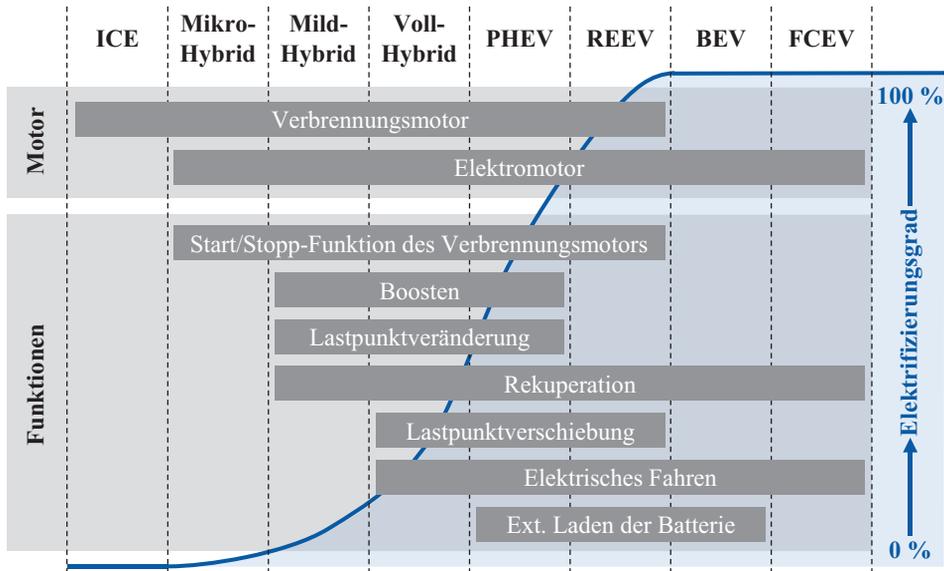


Abb. 21.1 Übersicht verschiedener Antriebskonzepte und deren Funktionen

21.2.6 Klassifizierung elektrifizierter Antriebskonzepte

Neben konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor und alternativen Kraftstoffen etablieren sich zunehmend elektrifizierte Antriebskonzepte. Sie lassen sich – abhängig vom Elektrifizierungsgrad, der das Verhältnis der elektrischen Antriebsleistung zur gesamten Antriebsleistung beschreibt – in unterschiedliche Kategorien klassifizieren. Es wird zwischen Mikro-Hybriden, Mild-Hybriden, Voll-Hybriden, Plug-in-Hybriden (PHEV), Elektrofahrzeugen mit „Range Extender“ (REEV), rein batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) sowie Elektrofahrzeugen mit Brennstoffzelle (FCEV) unterschieden. Abb. 21.1 zeigt die verschiedenen elektrifizierten Antriebskonzepte im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (ICE) und differenziert diese nach Fahrzeugtyp, Motor sowie Funktion. Zusätzlich wird der Elektrifizierungsgrad der Antriebskonzepte dargestellt.^{13,14,15}

Als Hybrid gilt ein Fahrzeug, das mit mindestens zwei Energiewandlern und zwei im Fahrzeug eingebauten Energiespeichersystemen ausgestattet ist.¹⁶ Grundsätzlich wird bei Hybriden zwischen seriellen, parallelen und leistungsverzweigten Hybridantrieben unterschieden. Beim seriellen Hybrid sind Verbrennungsmotor, Generator, Batterie und Elektromotor in Reihe geschaltet und es besteht keine direkte Verbindung zwischen dem Ver-

¹³Vgl. Wallentowitz und Freialdenhoven 2011.

¹⁴Vgl. Bertram und Bongard 2014.

¹⁵Vgl. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz.

¹⁶Vgl. Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union 2007.

brennungsmotor und den Rädern. In Pkw wird eine zusätzliche Batterie verbaut, welche die Energie zwischenspeichern kann. Bei parallelen Hybridantrieben ist ein direkter, mechanischer Durchtrieb vom Verbrennungsmotor bis zum Rad möglich. Zusätzlich lässt sich die Aufteilung von Drehmoment und Leistung zwischen Elektromotor und Verbrennungsmotor beliebig einstellen. Der leistungsverzweigte Hybridantrieb stellt eine Kombination des seriellen und parallelen Antriebs dar. Dabei wird die Leistung des Verbrennungsmotors in einen mechanischen und einen elektrischen Leistungspfad aufgeteilt.¹⁷

Der Mikro-Hybrid stellt das elektrische Antriebskonzept mit dem geringsten Elektrifizierungsgrad dar. Er zeichnet sich dadurch aus, dass er mit einer Start-Stopp-Automatik ausgestattet ist und damit in kleinem Umfang von der Rekuperation der Bremsenergie mit Hilfe eines intelligenten Generatormanagements profitieren kann. Die Start-Stopp-Automatik ermöglicht, dass der Verbrennungsmotor beim Stillstand des Mikro-Hybrids abgeschaltet wird. Da beim Mikro-Hybrid die Antriebsleistung des Verbrennungsmotors nicht elektrisch unterstützt werden kann, entspricht dieser nicht der Definition eines Hybridantriebs.¹⁸

Mild-Hybride zeichnen sich durch einen höheren Elektrifizierungsgrad als Mikro-Hybride aus. Sie können den Verbrennungsmotor in Anfahr- oder Beschleunigungsphasen elektrisch unterstützen. Diese Funktion wird „Boosten“ genannt und kann durch eine höhere Systemspannung von 48 V sowie den Einsatz kleiner Hochspannungsbatterien erreicht werden. Die elektrische Leistung eines Mild-Hybrids liegt bei etwa sechs bis 20 kW. Neben dem Boosten besitzen Mild-Hybride die Funktion der Lastpunktverschiebung, die eine Lastpunktanhebung und Lastpunktabsenkung beinhaltet.¹⁹

Voll-Hybride können im Gegensatz zu Mild-Hybriden kurze Strecken mit geringen Geschwindigkeiten durch den elektrischen Antrieb und ohne Hilfe des Verbrennungsmotors fahren. Dazu sind sie mit einer größeren Hochvoltbatterie sowie einem leistungsfähigeren Elektromotor ausgestattet. Der Ladevorgang der Batterie erfolgt über den Verbrennungsmotor sowie durch Rekuperation. Demnach kann die Batterie von Voll-Hybriden auch nicht über das Stromnetz aufgeladen werden.²⁰

Durch Nutzung von zwei Energiequellen – nämlich Batterie und Benzin – können Plug-in-Hybride höhere Energieeffizienzen als konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren erreichen, ohne die Leistung zu verringern. Sie vereinen dabei die Vorteile von batterieelektrischen Fahrzeugen mit denen von Voll-Hybriden. So können sie etwa in städtischen Gebieten vollelektrisch fahren und auf Autobahnen große Reichweiten realisieren. Die Hochvoltbatterie von Plug-in-Hybriden kann sowohl über einen Stecker

¹⁷Vgl. Doppelbauer 2020.

¹⁸Vgl. Albers et al. 2011.

¹⁹Vgl. Doppelbauer 2020.

²⁰Vgl. Bertram und Bongard 2014.

am Stromnetz als auch über Rekuperation im Fahrbetrieb geladen werden. Außerdem lassen sie sich selbst bei höheren Geschwindigkeiten rein elektrisch betreiben.²¹

Elektrofahrzeuge mit Range Extender sind Elektrofahrzeuge mit Antrieb über den Elektromotor, wobei zusätzlich zur Erhöhung der Reichweite eine Nachladeeinheit vorgesehen ist. Sie wird meist als serieller Hybrid ohne mechanischen Durchtrieb ausgeführt. Es wird also ein konventioneller Verbrennungsmotor – betrieben in einem Optimum – zur Erhöhung der Reichweite eingesetzt. Dieser wird bei niedrigem Ladezustand der Hochvoltbatterie hinzugeschaltet, um den Akku elektrisch zu laden. Elektrofahrzeuge mit Range Extender zählen daher zu den Hybriden und stellen eine spezielle Form des Plug-in-Hybriden mit hohem Elektrifizierungsgrad dar.²²

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Antriebskonzepten werden batterieelektrische Fahrzeuge ausschließlich von Elektromotoren angetrieben. Um die gewünschten Reichweiten zu erzielen, wird die Batteriekapazität meist größer ausgelegt und beträgt mindestens 15 Kilowattstunden. Die benötigte Energie wird vollständig aus dem Stromnetz bezogen, weshalb batterieelektrische Fahrzeuge ein hohes Potenzial zur CO₂-Reduktion im Straßenverkehr aufweisen, sofern die Energieerzeugung auf erneuerbare Ressourcen zurückzuführen ist.²³

Bei batterieelektrischen Fahrzeugen mit Brennstoffzellen wird die gespeicherte Energie im Brennstoff – meist Wasserstoff – mit Hilfe von Sauerstoff und unter Abgabe von Wasser in elektrische Energie umgewandelt. Dabei kann auf einen Verbrennungsmotor verzichtet werden. Stattdessen ist eine Puffer-Batterie mit geringer Kapazität notwendig, um die bedarfsgerechte Verfügbarkeit von elektrischer Energie zu gewährleisten. Die Batterie ist in ihrer Kapazität und Funktion vergleichbar mit derjenigen eines Mild-Hybrids und wird durch die gewonnene Energie mit Hilfe der Rekuperation sowie der Brennstoffzellen geladen.²⁴

21.3 Zulassungsarten

Die Voraussetzung für die Zulassung von Kraftfahrzeugen ist entweder eine Typgenehmigung oder eine Einzelbetriebserlaubnis. Die Zulassungsarten sind in der Verordnung (EU) 2018/858 über die Genehmigung und die Marktüberwachung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge geregelt. Die Verordnung gilt als Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 715/2007 und (EG) Nr. 595/2009. Sie ersetzte mit Wirkung vom 1. September 2020 die Richtlinie 2007/46/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Ge-

²¹ Vgl. Taghavipour et al. 2019.

²² Vgl. Hofmann 2014.

²³ Vgl. Bertram und Bongard 2014.

²⁴ Vgl. Noreikat 2013.

nehmung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge.²⁵

Die EU-Kommission nahm 2013 eine Bewertung des Rechtsrahmens der Richtlinie 2007/46/EG vor und stellte fest, dass die Hauptziele der Harmonisierung – ein reibungsloses Funktionieren des Binnenmarktes und ein fairer Wettbewerb – erfüllt wurden. Bei der Bewertung wurde auch gezeigt, dass Bedarf an der Einführung von Marktüberwachungsbestimmungen zur Ergänzung der Typgenehmigungsanforderungen besteht. Außerdem wurde festgestellt, dass zusätzliche Schutzmechanismen notwendig waren, um den künftigen Missbrauch des Genehmigungsverfahrens zu vermeiden und um zu gewährleisten, dass die EU-Typgenehmigung stabil, transparent, vorhersehbar sowie nachhaltig ist und dass sie ein hohes Maß an Sicherheit wie an Gesundheits- und Umweltschutz bietet.²⁶ Daher war die Einführung der Verordnung (EU) 2018/858 notwendig.

Spezielle Anforderungen für den Bau und den Betrieb von Fahrzeugen sind derzeit in zusätzlichen Rechtsakten festgelegt, die sich je nach Fahrzeugklasse und Genehmigungsart unterscheiden. Sie betreffen beispielsweise Grenzwerte für Schadstoffemissionen und den Geräuschpegel oder Anforderungen an die allgemeine Sicherheit. Anhang II von (EU) 2018/858 enthält eine Auflistung dieser Rechtsakte.

21.3.1 Typgenehmigung

Mit der Typgenehmigung wird durch eine Genehmigungsbehörde bestätigt, dass ein in größerer Anzahl hergestellter Typ gleichartiger Fahrzeuge, Systeme, Bauteile oder selbstständiger technischer Einheiten den Verwaltungsvorschriften und technischen Anforderungen entspricht. In Deutschland ist das Kraftfahrt-Bundesamt die zuständige Behörde für die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen sowie Geräten und Baugruppen für diese Fahrzeuge und der Zulassung geeigneter Entwicklungsbetriebe gemäß § 2 EG-Fahrzeuggenehmigungsverordnung. Die Zulassungsarten der Typgenehmigungen sind in der Verordnung (EU) 2018/858 geregelt.

Um ein hohes Maß an Sicherheit und Umweltverträglichkeit zu gewährleisten, werden in der Verordnung (EU) 2018/858 die wesentlichen technischen und administrativen Typgenehmigungsanforderungen festgelegt – für Kraftfahrzeuge zur Beförderung von Fahrgästen (Klasse M) und Kraftfahrzeuge zur Beförderung von Gütern (Klasse N) und ihre Anhänger (Klasse O) sowie die für diese Kraftfahrzeuge bestimmten Systeme, Bauteile und selbstständigen technischen Einheiten. Die Verordnung regelt dabei die Pflichten für Mitgliedstaaten, Genehmigungsbehörden, Marktüberwachungsbehörden, Hersteller, Bevollmächtigte des Herstellers, Einführer und Händler.²⁷

²⁵ Vgl. Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union 2021.

²⁶ Vgl. Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union 2021.

²⁷ Vgl. Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union 2021.

Bei der Beantragung einer Gesamtfahrzeug-Typgenehmigung kann zwischen der Mehrphasen-Typgenehmigung, der Einphasen-Typgenehmigung und der gemischten Typgenehmigung gewählt werden. Für die Typgenehmigung eines Systems, eines Bauteils oder einer selbstständigen technischen Einheit kommt nur die Einphasen-Typgenehmigung zur Anwendung. Die Mehrstufen-Typgenehmigung wird für einen Typ eines unvollständigen oder vollständigen Fahrzeugs erteilt.

21.3.2 Einzelbetriebserlaubnis

Für die Zulassung eines Neufahrzeugs der Klasse M (Pkw, Wohnmobile und Busse), N (Lkw, Sattelzugmaschinen und Lieferwagen) oder O (Anhänger und Sattelanhänger) ohne EG-Typgenehmigung oder EG-Kleinserien-Typgenehmigung ist eine Einzelbetriebserlaubnis nach § 13 EG-Fahrzeugtypgenehmigungsverordnung oder (EU) 2018/858 erforderlich. Für die Zulassung aller übrigen oder gebrauchten Fahrzeuge, für die keine Typgenehmigung vorliegt, ist eine Betriebserlaubnis für Einzelfahrzeuge gemäß § 21 Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung zu beantragen. Mit Inkrafttreten der Verordnung (EU) 2018/858 kann entweder eine EU-Fahrzeug-Einzelbetriebserlaubnis oder eine nationale Fahrzeug-Einzelbetriebserlaubnis erteilt werden, wobei Letztgenannte nur für das Hoheitsgebiet des Mitgliedstaates gültig ist, der sie erteilt hat. In diesem Fall dürfen die Fahrzeuge zwar trotzdem im Ausland fahren, jedoch nur in dem Land zugelassen werden, in dem auch die Genehmigung erteilt wurde.^{28,29}

Die Fahrzeug-Einzelbetriebserlaubnis kann für ein Fahrzeug erteilt werden, das die Anforderungen des Anhangs II Teil I Anlage 2 der (EU) 2018/858 – beziehungsweise bei Fahrzeugen mit besonderer Zweckbestimmung die Anforderungen des Anhangs II Teil III der (EU) 2018/858 – erfüllt. Diese Anforderungen umfassen etwa die Einhaltung der Grenzwerte des zulässigen Geräuschpegels und der Auspuffemissionen sowie die Regelungen zu Schutzmaßnahmen und Ausführungen von Fahrzeugbauteilen wie beispielsweise Klimaanlage, Reifen, Scheinwerfer oder Lenkrad.³⁰

Weiteres Ziel der EU ist es, die Zahl der Einzelbetriebserlaubnisse bundesweit zu verringern, da für Einzelfahrzeuge zum Beispiel keine Crashtests absolviert werden müssen. Der Fahrzeughersteller muss ab einer bestimmten Anzahl jährlich produzierter Fahrzeuge diese im Wege der Kleinserien-Typgenehmigung in den Verkehr bringen. Die Anzahl der mit Einzelbetriebserlaubnis zugelassenen Pkw (M1-Fahrzeuge) baugleichen Typs wird damit auf 20 % der für die Kleinserien-Typgenehmigung zulässigen Höchstzahl begrenzt.³¹

²⁸ Vgl. [Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz](#).

²⁹ Vgl. [Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz](#).

³⁰ Vgl. Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union [2021](#).

³¹ Vgl. Morche et al. [2018](#).

21.4 Normen und Standards

Normen und Standards sind elementar für die Gewährleistung der Qualität, der Sicherheit und der Benutzbarkeit, der Effizienz und der Effektivität sowie valider technologischer Folgeabschätzungen entsprechender Mobilitätskonzepte.³²

Der Erfolg der Elektromobilität ist von mehreren Faktoren abhängig – unter anderem von der Weiterentwicklung der Elektrofahrzeuge, dem Ausbau der Ladeinfrastruktur und der Energieversorgung. Aufgrund der rasanten Entwicklung und des stetigen Fortschritts der Technik ist es wichtig, dass zur Gewährleistung von Sicherheit und Qualität gewisse Standards und Normen eingehalten werden. Diese stärken nicht nur das Vertrauen der Bevölkerung, sondern sind für einen erfolgreichen Markthochlauf der Elektromobilität unerlässlich.

Eine besondere Herausforderung ist die zunehmende Differenz zwischen der Entwicklung der Elektromobilität und den dazugehörigen Normen und Standards. Während die Elektromobilität rasant voranschreitet, eilt die Definition von übergreifenden Normen und Standards hinterher und bietet nur einen verhältnismäßig geringen Anspruch.

Deswegen ist es von enormer Bedeutung, dass die verschiedenen Branchen, die innerhalb der Elektromobilität aufeinandertreffen, insbesondere im Bereich der Normung und Standardisierung eng zusammenarbeiten. Normen und Standards müssen zum einen einheitlich und zum anderen kontinuierlich bedarfsorientiert weiterentwickelt werden, damit sowohl Hersteller als auch Kunden eine gewisse Investitionssicherheit haben.

Für eine entsprechend hohe Kundenakzeptanz muss ein Elektrofahrzeug außerdem die gleiche Sicherheit und Mobilität wie ein konventionelles Fahrzeug bieten – und das zu einem möglichst günstigeren Preis. Jedoch bilden sich aufgrund der regionalen Unterschiede Konflikte im Bereich der Zulassung von Elektrofahrzeugen. Dies ist auf verschiedene länderspezifische Normen und damit einhergehende unterschiedliche Zertifizierungswesen zurückzuführen.³³

Die folgenden Abschnitte widmen sich in erster Linie den sicherheitsrelevanten Aspekten im Bereich der Produkt- und Betriebssicherheit – mit Fokus auf die elektrische und funktionale Sicherheit. Außerdem steht die Entwicklung der Batteriebaukastensysteme und Ladeinfrastrukturen im Blickpunkt. Parallel dazu werden die aktuell wichtigsten Normen zu den jeweiligen Themengebieten aufgeführt und erläutert.

21.4.1 Produkt- und Betriebssicherheit

Die Batterie ist die zentrale und wichtigste Einheit im Elektrofahrzeug, wenn es um den breiten und flächendeckenden Einsatz der E-Mobilität geht. Der Trend immer weiter zu-

³²Vgl. Arbeitsgruppe 6 „Standardisierung, Normung, Zertifizierung und Typgenehmigung“ 2020, S. 8.

³³Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 2021.

nehmender Energiedichten der Batterien mündet in steigenden Sicherheitsrisiken, die von möglichen internen Fehlern oder externen Umwelteinflüssen ausgehen. Um sowohl die Produkt- als auch die Betriebssicherheit zu gewährleisten und potenzielle Schadensereignisse – etwa Ausfall oder Überhitzung – zu verhindern, ist es wichtig, die damit verbundenen Risiken zu minimieren.

Eine wichtige Grundlage dafür sind die bereits genannten einheitlichen Regelungen beispielsweise aus der ECE-R100³⁴ oder der GB 38031.³⁵ Normung und Standardisierung sind Kernelemente für die Entwicklung künftiger Mobilitätslösungen. Eine frühzeitige Adressierung und Umsetzung sind notwendig, damit die Systeme Marktreife erhalten und die positiven Effekte im großen Maßstab zur Entfaltung kommen. Normen bieten den Unternehmen Orientierung und Hilfe bei der Durchsetzung neuer Technologien. Produzenten und Nutzer können sich auf der Basis einheitlicher Standardisierungen und Normungen auf funktionierende und herstellerübergreifende Schnittstellen verlassen. Dadurch wird das notwendige Vertrauen und die gesellschaftliche Akzeptanz für neue Technologien geschaffen, die für eine Transformation des Mobilitätssystems notwendig sind.³⁶

Für eine hohe Produkt- und Betriebssicherheit werden die Tests für Lithium-Ionen-Batterien hinsichtlich des Prüfzweckes in zwei unterschiedliche Bereiche unterteilt. Dabei handelt es sich zum einen um Performance- und zum anderen um Sicherheitstests. Sie dienen dazu, mögliche Betriebs- und Schadensszenarien durch das Produkt abzusichern. Dabei wird neben der Simulation als elementarer Bestandteil der frühzeitigen Evaluierung von Sicherheit ein hoher Wert auf die reale Absicherung gelegt. Während der Performance-Tests findet eine Charakterisierung der Leistungsfähigkeit anhand definierter Belastungszyklen der Batterie statt. Dabei werden Messungen getätigt, um elektrische Eigenschaften wie Impedanz, Energieeffizienz und Ladezustand (State of Charge – SoC) zu bestimmen. Die Lebensdaueruntersuchung (kalendarisch beziehungsweise zyklisch) wird in Abhängigkeit von elektrischen und thermischen Umwelteinflüssen vorgenommen. Hinzu kommen Umwelttests, die Faktoren wie Temperatur, Feuchte, Betauung, Spritzwasser und Staub berücksichtigen. Die Durchführung der Versuche dauert mehrere Wochen bis Monate.

Im Rahmen weiterer Sicherheitstests der Lithium-Ionen-Batterie wird unter anderem die elektromagnetische Verträglichkeit untersucht. Verschiedene zerstörende („Abuse“-) Tests an dem zu prüfenden Objekt – zum Beispiel Nagelpenetration, Quetschen (Crush), Fall-/Stapeltest, Crash, Roll-over, Überladen, Tiefentladen, Schnellladen, externer Kurzschluss, thermische Stabilität oder Feuerbeständigkeit – gehören zu den standardisierten Prozeduren. Ebenfalls wird die Batterie auf Hochvoltsicherheit und Isolationsfestigkeit geprüft. Die Sicherheitstests führen im Gegensatz zu den Performance-Tests zu einer Zer-

³⁴Vgl. United Nations Economic Commission for Europe 2021.

³⁵Vgl. Standardization Administration of the People's Republic of China 2020.

³⁶Vgl. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität 2019, S. 99.

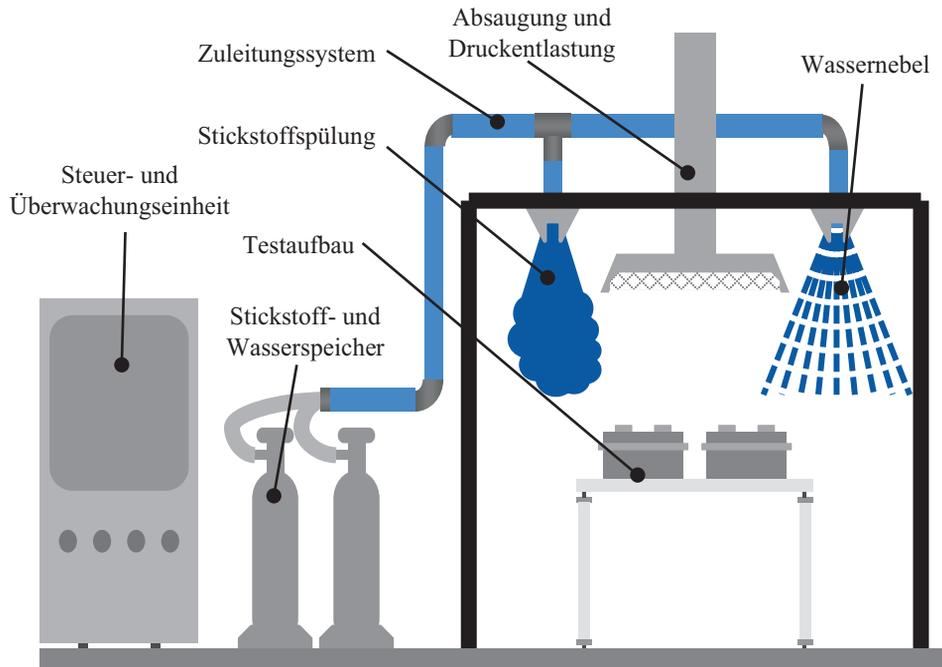


Abb. 21.2 Exemplarischer Aufbau eines Batterieprüfstandes

störung des Prüflings. Durch die vielfältigen Testverfahren kann der Hersteller letztlich eine hohe Produkt- und Betriebssicherheit gewährleisten.

Unabhängig vom vorzunehmenden Verfahren müssen bei Batterietests in Prüflaboren immer gewisse technische Sicherheitsmaßnahmen getroffen werden. Dabei handelt es sich zum Beispiel um eine Vorrichtung zur Stickstoffspülung und Wassernebel oder auch ein Ventil für einen Druckausgleich mit Absaugfunktion für giftige Gase (vgl. Abb. 21.2). Während der Prüfung werden die Batterien möglichst genau überwacht, um Fehler und Abweichungen vom Prüfprotokoll genauestens zu dokumentieren.

21.4.2 Elektrische Sicherheit

Im Gegensatz zu den ursprünglichen Bordnetzen (Zwölf-Volt-Batterie) eines herkömmlichen Verbrennungskraftfahrzeugs nutzen aktuelle Elektrofahrzeuge deutlich höhere Spannungsebenen. Durch die in Reihe geschalteten Batteriezellen innerhalb eines Moduls oder Packs sind üblicherweise Spannungen in Höhe von 400 bis 800 Volt sowohl in Personenkraftwagen (Pkw) als auch in Nutzkraftwagen (Nkw) zu finden. Teilweise reichen sie auch bis an 1000 V heran. Anhand dieser Größen wird im Automobilsektor zwischen zwei Systemen unterschieden: in das Niederspannungssystem und in das Hochspannungssystem. Innerhalb eines Niederspannungssystems dürfen nur Wechselspannungen von bis zu 30 V oder

Gleichspannung bis zu 60 V anliegen. Im Gegensatz dazu können Systeme im Hochvoltbereich mit einer Wechselfspannung bis einschließlich 1000 V und Gleichspannung bis einschließlich 1500 V gespeist werden.³⁷ Dies wirkt sich insbesondere auf die Wartung von Elektrofahrzeugen aus. Kfz-Mechatroniker-Gesellen oder -Meister dürfen aufgrund ihrer Ausbildung nur an Niederspannungssystemen arbeiten. Für Arbeiten an Systemen mit höheren Spannungen werden spezielle Zusatzqualifikationen benötigt, da es durch Unfälle zu einer erhöhten Gefährdung in Form von Körperdurchströmung und Lichtbogen kommen kann.³⁸

Für die Nutzung von Elektrofahrzeugen hat die elektrische Sicherheit gegenüber dem Menschen und der Umgebung den höchsten Stellenwert. Elektro- und Hybridfahrzeuge werden allesamt im Fahrbetrieb durch ein Hochvoltssystem – das sogenannte Bordnetz der Spannungsklasse B – mit Energie versorgt. Um ausgehende Gefahren von Hochspannungssystemen zu verringern, sind sämtliche Komponenten isoliert (Basisisolierung). Auf diese Weise lassen sich ungewollte Kontakte vermeiden. Dies allein reicht allerdings nicht aus, um dauerhaft einen unbedenklichen Betrieb im Sinne der elektrischen Sicherheit zu gewährleisten. Durch eindringende Verschmutzung, Feuchtigkeit oder mechanische Einwirkung kann die Isolation in kurzer Zeit oder über einen längeren Zeitraum hinweg beschädigt werden. Um dennoch eine vollständige Isolation zu jedem Zeitpunkt zu garantieren beziehungsweise zu bestätigen, wird ein sogenanntes Isolationsüberwachungsgerät (ISO-Wächter) eingesetzt. Es überwacht zyklisch oder permanent den Isolationswiderstand zwischen Karosserie (Bauteilgehäusen) und dem HV-Kreislauf. Die Überwachung des Geräts erfolgt über ein paralleles, unabhängiges Bordnetz. Sollte der ISO-Wächter einen Fehler feststellen, wird dies dem Fahrer automatisch mitgeteilt, so dass er Gegenmaßnahmen einleiten kann. Ein festgestellter Fehler muss umgehend behoben werden, da ein zweiter zusätzlicher Kontakt zwischen HV-Kreislauf und Karosserie zu einem ungewollten und gefährlichen Stromfluss (Kurzschluss) führen kann.

Festgehalten werden diese und weitere Anforderungen in der ISO 6469-3. Die Norm legt Richtlinien zur elektrischen Sicherheit von Stromkreisen der Spannungsklasse B fest. Die neueste Version wurde im Oktober 2021 veröffentlicht. Die darin vorgeschriebenen Maßnahmen dienen in erster Linie dem Schutz von Personen innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs gegenüber elektrischen Schlägen.³⁹ Eine weitere wichtige Norm im Zusammenhang mit der elektrischen Sicherheit von Fahrzeugen bildet die DIN IEC 60664. Darin werden Anforderungen für Luftstrecken, Kriechstrecken und feste Isolierungen von Betriebsmitteln gestellt.⁴⁰ Insbesondere das Einhalten von Luft- und Kriechstrecken ist bei nicht isolierten HV-Komponenten von enormer Bedeutung, damit im Falle von Verschmutzung keine ungewollte elektrische Leitung zwischen zwei Komponenten entsteht.

³⁷ Vgl. Kampker 2014., S. 32.

³⁸ Vgl. Kampker 2014., S. 264.

³⁹ Vgl. International Organisation for Standardization (IOS) 2021.

⁴⁰ Vgl. DIN e.V.

Unterdessen wird die Typprüfung nach ECE-R100 bereits verbindlich vom Gesetzgeber vorgeschrieben. Die Anforderungen innerhalb der ECE-R100 differenzieren sich in zwei Aspekte. Dabei wird zwischen „Anforderungen an ein Fahrzeug hinsichtlich seiner elektrischen Sicherheit“ und „Anforderungen an ein wiederaufladbares Energiespeichersystem hinsichtlich seiner Sicherheit“ unterschieden.⁴¹ Für die elektrische Sicherheit gilt allgemein, dass zu jedem Zeitpunkt sowohl ein Schutz gegenüber Stromschlägen als auch ein Schutz gegen direktes und indirektes Berühren vorhanden sein muss. Solange alle Schutzmaßnahmen gegen den elektrischen Schlag intakt sind, ist die Berührung eines Poles der Batteriespannung ungefährlich. Bei Wartungsarbeiten in der Werkstatt gilt es, den Wartungsmodus des Fahrzeugs zu aktivieren. Während der Verwendung von nicht isolierendem Werkzeug können unbeabsichtigte Kurzschlüsse entstehen. Die Aktivierung des Wartungsmodus reduziert das Risiko eines Kurzschlusses. Dieser Modus verhindert, dass im Wartungsfall die hohe Batteriespannung an den Anschlüssen der Batterie anliegt.⁴² Eine weitere Sicherheitsmaßnahme besteht in der einheitlichen farblichen Markierung von HV-Komponenten und HV-Kabeln. Sämtliche Kabel für Hochspannungssammelschienen, die nicht in Gehäusen verlegt sind, müssen eine orangefarbene Außenhülle haben. Außerdem müssen HV-Komponenten mit einem Warnzeichen für elektrische Spannung nach ISO 7010 versehen werden (vgl. Abb. 21.3).⁴³ Die farbliche, eindeutige Markierung soll visuell auf mögliche Gefahren und Risiken hinweisen.

Da die ECE-R100-Regelung nur innerhalb der EU beziehungsweise dem ECE-Abkommen beigetretenen Parteien rechtskräftig ist, gibt es bezüglich der elektrischen Sicherheit weitere international anerkannte Vorschriften. Dabei handelt es sich um die „Global Technical Regulations“ (GTR) Nummer 20. Diese Vorschrift legt die sicherheitstechnischen Eigenschaften von elektrisch angetriebenen Straßenfahrzeugen und ihren aufladbaren elektrischen Energiespeichern fest. Das Ziel dieser Vorschrift ist die Vermeidung von Personenschäden, die durch den elektrischen Antriebsstrang entstehen können. Im Gegensatz zur ECE-R100 setzt die GTR 20 sich auch mit der elektrischen Sicherheit nach einer Kollision auseinander. Die Unterteilung der Anforderungen zwischen der Sicherheit von Elektrofahrzeugen und der Sicherheit von Energiespeichersystemen bleibt auch in der GTR 20 bestehen. Der Fokus innerhalb der GTR 20 liegt bezüglich der Sicherheit von Elektrofahrzeugen auf dem Schutz vor Stromschlägen (im Betrieb und nach einer Kollision), auf dem Auslaufen von Elektrolyt nach einer Kollision und dem Feuerschutz. Defi-

Abb. 21.3 Warnzeichen für elektrische Spannung



⁴¹ Vgl. United Nations Economic Commission for Europe 2021.

⁴² Vgl. Korthauer 2013, S. 302.

⁴³ Vgl. DIN e. V. 2020.

nierte Anforderungen beziehungsweise Prüfungen für die Sicherheit von Energiespeichersystemen innerhalb der GTR 20 sind

- Temperaturschock und -wechsel
- Mechanischer Schock/Integrität/Vibration
- Feuerbeständigkeit
- Externer Kurzschluss-/Überstrom-/Überladungs-/Überentladungsschutz
- Schutz vor Übertemperaturen
- Thermische Ausbreitung
- Beständigkeit gegen Wassereinwirkung
- Gas-Management

Die meisten Anforderungen aus der GTR 20 sind auch in der ECE-R100 implementiert.⁴⁴

21.4.3 Funktionale Sicherheit

Neben der elektrischen Sicherheit ist die funktionale Sicherheit ein entscheidender Faktor für eine gefahrlose Umsetzung der Elektromobilität. Die funktionale Sicherheit schützt ein System vor einer Gefährdung durch Funktionsfehler oder Unterbrechungen seiner Funktionsfähigkeit. Dabei werden die Gefahren betrachtet, die sich aus den Funktionen eines Systems ergeben können. Somit ist die funktionale Sicherheit ein Teil der Gesamtsicherheit eines komplexen automatisierten Systems. Bereits in der Entwicklung eines Systems spielt die funktionale Sicherheit eine entscheidende Rolle. Ziel ist es, das System derart zu entwerfen, dass gefahrbringende Ausfälle verhindert werden oder sie sich beherrschen lassen, wenn sie auftreten. Gefahrbringende Ausfälle können zum Beispiel durch zufällige Hardware-Ausfälle, menschliches Versagen oder Umwelteinflüsse auftreten. Derzeit regelt die Norm ISO 26262 „Functional safety – Road vehicles“ die funktionale Sicherheit für Straßenfahrzeuge.⁴⁵

Wie bei allen Normen ist auch die ISO 26262 nicht verpflichtend für eine erfolgreiche Zulassung. Normen sind grundsätzlich freiwillig und nicht bindend, es sei denn, sie werden von Gesetzen oder Rechtsverordnungen vorgeschrieben. Allerdings sind Hersteller immer dazu verpflichtet, bei technischen Produkten einen Nachweis darüber zu erbringen, dass diese ausreichend sicher sind. Die explizite Betrachtung der korrekten und sicheren Funktion eines Produkts wird als „funktionale Sicherheit“ bezeichnet.⁴⁶ Anforderungen an die funktionale Sicherheit von elektrischen, elektronischen und programmierbaren elektronischen Systemen im Allgemeinen sind in der Norm IEC/EN 61508 festgehalten.⁴⁷ Spe-

⁴⁴ Vgl. United Nations 2018.

⁴⁵ Vgl. Winner et al. 2015, S. 86.

⁴⁶ Vgl. Börcsök 2021.

⁴⁷ Vgl. DIN e.V.

ziell für den automobilen Bereich wurde Mitte 2011 die ISO 26262 als ein neuer internationaler Standard veröffentlicht. Ähnlich wie in der vorherigen Norm IEC/EN 61508, orientiert sich auch die ISO 26262 am allgemeinen V-Modell der Produktentwicklung. Diese Methodik gewährleistet, dass die Integration von Sicherheitsanforderungen bereits zu Beginn des Entwicklungsprozesses beachtet werden.⁴⁸

Durch diese Norm sollen Fehlfunktionen, die aus einem elektrischen/elektronischen System entstehen (mechanische Fehler als Ursache für Risiken werden nicht berücksichtigt), auf ein tolerierbares Mindestmaß reduziert werden. Der Fokus liegt dabei auf sicherheitskritischen Komponenten.

2018 und damit sieben Jahre später wurde die Norm noch einmal überarbeitet: Bestand die ISO 26262:2011 noch aus zehn Teilen, wurde die ISO 26262:2018 um zwei Teile erweitert. Außerdem wurde darin das zulässige Gesamtgewicht von 3,5 t bei Personenkraftwagen aufgehoben. Dadurch lässt sich die ISO-Norm auf andere Straßenfahrzeuge wie schwerere Pkw, Lkw, Busse und Motorräder ausdehnen. Entwicklungsbedarf besteht indes jedoch auch in der Version aus dem Jahr 2018. So definiert die aktuelle Version zum Beispiel nicht, ob die Norm auch künstliche Intelligenz umfasst. Des Weiteren geht sie nicht auf zufällige sowie nicht systematische Sicherheitsprobleme ein, die bei autonomen Systemen mit neuronalen Netzen auftreten können.⁴⁹

21.4.4 Batteriebaukastensysteme

Ein wichtiger Schritt für die Etablierung von Elektrofahrzeugen auf dem Markt ist es, sie möglichst kosteneffizient entwickeln und produzieren zu können. Neben der Ladeinfrastruktur und der Reichweite spielt vor allem der Kaufpreis eine entscheidende Rolle bei der Anschaffung eines Elektrofahrzeugs. Die Traktionsbatterie ist ein entscheidender Kostenfaktor. Um ein Höchstmaß an Übertragbarkeiten in der Entwicklung und Produktion zu erreichen, setzen viele Hersteller auf die Verwendung von Baukastensystemen für die Traktionsbatterie. Damit der Kunde möglichst viel Einfluss auf die Eigenschaften des Fahrzeuges – Preis, Reichweite, Ladeleistung – nehmen kann, werden ihm verschiedene Konfigurationen von Batteriegrößen zur Auswahl gestellt. Dabei beziehen sich die Baukastensysteme lediglich auf den elektrifizierten Antriebsstrang und nicht auf die Karosserie. Bei der Verwendung eines Baukastensystems kann im Unterboden eine variable Anzahl von Energiespeichermodule untergebracht werden. Durch diese Standardisierung lassen Batteriesysteme sich äußerst effizient und flexibel produzieren sowie individuell an die Anforderungen und Wünsche der Kunden anpassen.

Automobilkonzerne entwickeln ihre Baukastensysteme für die Traktionsbatterien von Elektroautos übergreifend, so dass verschiedene Konzernmarken daran partizipieren können. Innerhalb eines modularen Batteriebaukastens wird eine individuelle Anzahl von Zel-

⁴⁸Vgl. Winner et al. 2015, S. 86.

⁴⁹Vgl. International Organisation for Standardization (IOS) 2018.

len zu einem Batteriemodul verschaltet. Dieses bildet zumeist eine standardisierte Baugruppe im System. Als Zellformate kommen sowohl Pouch- als auch prismatische Zellen infrage. Die Rundzelle eignet sich ebenfalls für einen modularen Ansatz, jedoch ist der Wechsel zwischen Pouch- und prismatischen Zellen innerhalb eines Moduls aufwandsärmer möglich. Die Anzahl der Module, die anschließend zu einem Batteriesystem zusammengesetzt werden, ist variabel. Je nach Baukastensystem werden unterschiedlich viele Module über Hochvoltverbinder zu einem Batteriesystem zusammengefügt. Je höher die vom Kunden gewünschte Reichweite ist, desto mehr Module werden im Batteriesystem verbaut. Das ermöglicht es dem Käufer, zwischen mehreren unterschiedlichen Varianten zu wählen und damit auch den Fahrzeugpreis zu beeinflussen. Die grundlegende Struktur bleibt jedoch stets gleich, und die verschiedenen Modelle entstehen erst später durch die unterschiedlichen Karosserien.⁵⁰ Innerhalb der Baukastensysteme eines Konzerns wird allerdings noch zwischen den verschiedenen Segmenten differenziert. Abhängig von der Markenpositionierung und dem damit verbundenen Leistungsanspruch werden Baukästen für das „Standard“-Segment und für das „Premium“-Segment von Elektrofahrzeugen entwickelt. Nichtsdestotrotz wird auch hierbei auf ein hohes Maß an Übertragbarkeit von Know-how gesetzt.

Auch in der Homologation lassen sich durch die Verwendung von Baukastensystemen Einsparungspotenziale erzielen. Je nach Norm können Tests auch komponentenbasiert vorgenommen werden. Der Hersteller kann somit die Funktion und die Sicherheit einzelner Komponenten – wie beispielsweise des Batteriemoduls – separat absichern. Dies führt zu geringeren Absicherungsaufwänden auf der Systemebene. Das Kosteneinsparpotenzial wird dabei umso größer, in je mehr Systemen die Einzelkomponente eingesetzt wird.

21.4.5 Kabel- und Steckverbindungen

Elektrofahrzeuge haben aufgrund ihres Antriebsstrangs einen deutlich höheren Bedarf an rein elektrischer Energie. Deswegen ist es ausschlaggebend, dass die verbauten Kabel- und Steckverbindungen den hohen Sicherheitsansprüchen gerecht werden. Wohingegen in den herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor die benötigte Energie über den zugeführten flüssigen Kraftstoff transportiert worden ist, geschieht dies im Elektrofahrzeug über Aluminium- und Kupferkabel.⁵¹

Der durch den Kunden am häufigsten genutzte Stecker ist der Ladestecker des Elektrofahrzeugs. Dabei wird zwischen vier Lademodi und verschiedenen Ladesteckertypen unterschieden. Diese werden in der Norm IEC 62196 und IEC 61851-1 festgelegt.⁵² Abb. 21.4 stellt die Lademodi anschaulich dar. Lademodus 1 bildet eine AC-Methode, die hauptsächlich für das Laden von leichten Fahrzeugen – etwa Elektrofahrrädern und -rol-

⁵⁰ Vgl. Paschek und Winterhagen 2019, S. 8ff.

⁵¹ Vgl. Beloufa 2019, S. 1020.

⁵² Vgl. DIN e.V. 2017.

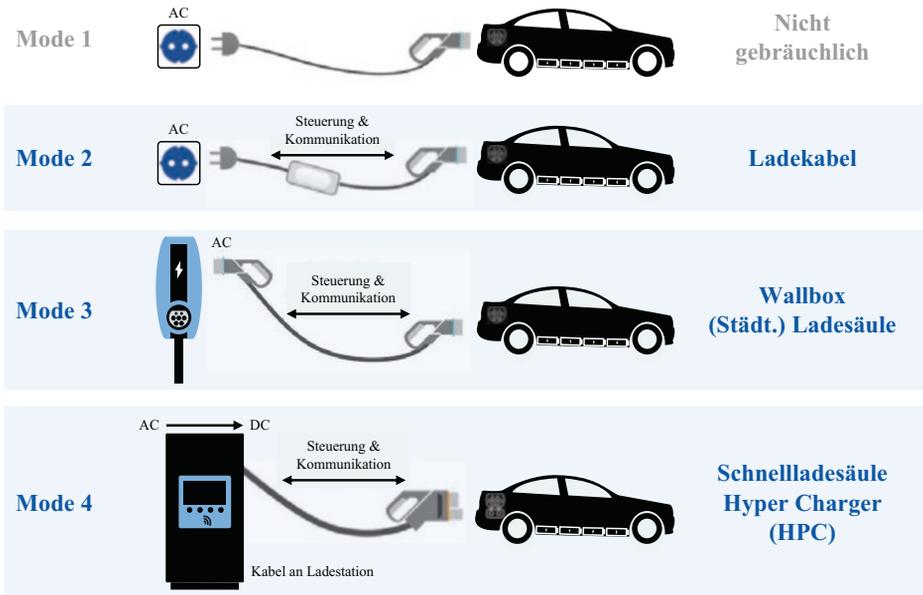


Abb. 21.4 Lademodi nach IEC 61851

lern – mit geringem Strombedarf verwendet wird. Der Ladeanschluss erfolgt über eine Schuko- oder eine CEE-Steckdose. Während des Ladevorganges steht das Fahrzeug in direktem Kontakt mit dem Stromanschluss. Aufgrund der nicht vorhandenen Steckerverriegelung sowie der fehlenden Kommunikation zwischen Fahrzeug und Stromanschluss ist die Verwendung des Lademodus 1 in einigen Ländern stark eingeschränkt (etwa in Deutschland, der Schweiz und in Dänemark) oder sogar komplett verboten (zum Beispiel in England, Israel und den USA).⁵³

Im Gegensatz zu Lademodus 1 erfordert Lademodus 2 das Vorhandensein eines speziellen Sicherheitssystems zwischen dem Punkt des Anschlusses an das elektrische Netz und dem zu ladenden Fahrzeug. Sowohl die Kommunikation als auch das Sicherheitssystem (Steuer- und Schutzeinrichtung) sind in das Ladekabel integriert. Ansonsten unterscheidet sich Lademodus 2 nicht von Lademodus 1. Der Ladevorgang findet gleichermaßen mit einer Schuko- oder CEE-Steckdose statt, und eine Verriegelung ist ebenfalls nicht möglich. Je nach Land unterliegt dieser Lademodus verschiedenen Einschränkungen.⁵⁴

Der dritte Lademodus ist ebenfalls eine AC-Lademethode – und der aktuelle Standard für das tägliche Laden. Dieser Modus beinhaltet wichtige intelligente Funktionen – beispielsweise eine Kommunikationsverbindung zwischen dem Fahrzeug und dem Ladegerät –, so dass die Ladeleistung sich während eines Ladevorgangs steuern lässt. Das Laden gemäß Modus 3 umfasst die Verwendung einer speziellen Ladestation oder

⁵³Vgl. Doppelbauer 2020, S. 297f.

⁵⁴Vgl. Doppelbauer 2020, S. 297f.

einer zu Hause montierten Wallbox für das Laden von Elektrofahrzeugen. Die Steckerarten (Typ 1 und Typ 2) bleiben wie auch bei den vorherigen Lademodi gleich. Sie können während des Ladevorgangs außerdem verriegelt werden, um auf diese Weise ungewolltes oder unautorisiertes Abstecken zu verhindern. Ladestationen, die in Lademodus 3 betrieben werden, erlauben in der Regel das Laden mit bis zu 32 A und 250 V im einphasigen Betrieb sowie mit bis zu 32 A und 480 V (normalerweise 22 kW) im dreiphasigen Betrieb.⁵⁵

Der vierte und letzte Lademodus ist die einzige Methode, die das Fahrzeug direkt mit Gleichstrom speist. Dieser Modus erfordert einen Stromwandler außerhalb des Fahrzeugs, an dem das Ladekabel angeschlossen wird. In der Regel sind die dafür benötigten Ladestationen viel größer als beispielsweise diejenigen für Lademodus 3.⁵⁶ Ein Grund dafür liegt in dem notwendigen Bauraum des (Hochleistungs-) Konverters. Dieser wandelt den Strom von netzseitig bereitgestelltem Wechselstrom in Gleichstrom um, bevor er durch das Ladekabel zum Elektroauto geleitet wird. Da die Ladeleistung mit Gleichstrom im Vergleich zu Wechselstrom erheblich höher ist, wird Lademodus 4 häufig als „DC-Schnellladen“ oder einfach als „Schnellladen“ bezeichnet.⁵⁷ Ein weiterer entscheidender Unterschied gegenüber den übrigen Lademodi ist die Verwendung anderer Stecker. Dabei kommen neben dem schon bekannten Typ 2-Stecker der CHAdeMO- oder der CCS-Stecker zum Einsatz. Eine Steckerverriegelung und die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladegerät ist indes wie schon bei Modus 3 gegeben.⁵⁸

Je nach geografischer Region und benötigten Ladeleistungen haben sich verschiedene Ladesteckertypen etabliert. Die geringste Ladeleistung weist Typ 1 auf, der hauptsächlich in den USA oder Japan verwendet wird und für einphasigen Drehstrom mit einer maximalen Ladeleistung von 7,4 kW ausgelegt ist. Bei Typ 2 hingegen handelt es sich um einen dreiphasigen Stecker, der sich als europäischer Standard durchgesetzt hat, da er eine höhere Leistung als der Typ- 1-Ladestecker bietet. Typischerweise werden an Heim- oder Unternehmensladestationen Leistungen von bis zu 22 kW erreicht. An öffentlichen Ladestationen hingegen kann auf eine Leistung von bis zu 43 kW zugegriffen werden, was als Schnellladung gilt. Der CCS-Ladestecker ist in Europa der etablierte Schnellladestandard und ermöglicht eine Ladeleistung von bis zu 350 kW.⁵⁹

Für das Erreichen solcher Ladeleistungen und darüber hinaus sind spezielle Modifikationen der Ladestecker notwendig. Neben integrierten Temperatursensoren und Leckage-Sensoren trägt auch die Verwendung von Kühlflüssigkeit innerhalb des Ladekabels einen essenziellen Beitrag zu einer erhöhten Ladeleistung bei. Die Kühlflüssigkeit transportiert die beim Ladevorgang entstehende Wärme ab und verhindert dadurch eine Überhitzung des Ladesystems. Unterstützt wird dies durch Temperatursensoren, die Infor-

⁵⁵ Vgl. Doppelbauer 2020, S. 297f.

⁵⁶ Vgl. Linnemann und Nagel 2020, S. 10.

⁵⁷ Vgl. Doppelbauer 2020, S. 302.

⁵⁸ Vgl. Doppelbauer 2020, S. 298ff.

⁵⁹ Vgl. Toth et al. 2012, S. 431f.

mationen über die Wärmeentwicklung liefern, sowie durch Leckage-Sensoren, die bei Austritt von Kühlflüssigkeit Alarm schlagen. Das asiatische Pendant zum europäischen Schnellladestecker bildet der CHAdeMO-Stecker mit bis zu 50 kW.

Unterstützt wird dies durch die Norm DIN EN ISO 17409. Sie legt Sicherheitsanforderungen für die kabelgebundene Energieübertragung an elektrische angetriebene Straßenfahrzeuge fest. Außerdem stellt sie Anforderungen für die Lademodi 2, 3 und 4 sowie die Rückspeisung. Die bis dato aktuellste Fassung wurde im Oktober 2020 veröffentlicht. Gegenüber der Vorgängerversion wurden unter anderem folgende Änderungen vorgenommen:⁶⁰

- Anforderungen für Lademodus 1 entfernt, weil nicht länger relevant für das Design
- Anforderungen an die Rückspeisung hinzugefügt
- Anforderungen für das Hochleistungsladen (HPC) mit Thermo-Management hinzugefügt
- Kurzschluss während des Gleichstromladens überarbeitet
- Anforderungen an das Pantographen-Laden hinzugefügt

Die weiteren HV-Steckverbindungen im HV-Bordnetz mit deutlich geringeren Steckzyklen als der Ladestecker müssen dennoch sicherheitsrelevante Funktionen erfüllen. Da stromführende Steckverbindungen in Gleichspannungsnetzen eine Gefahrenquelle darstellen, beinhalten HV-Stecker eine Pilotverbindung. Sie überwacht ein potenziell unbeabsichtigtes Öffnen einer Verbindung im aktiven Betrieb, so dass die Unterbrechung der Signalleitung, das sogenannte HV-Interlock, von der Fahrzeugsteuerung erfasst wird. Die Unterbrechung der Signalleitung muss nicht zwangsläufig einen Defekt bedeuten, sondern sie kann auch auf das Trennen einer Steckverbindung zurückzuführen sein. Falls es zu einer Unterbrechung der Signalleitung kommt, wird das HV-System zentral durch die Hauptschutzmechanismen spannungsfrei geschaltet, damit beim Auftrennen der Steckverbindung keine Gefahr in Form von Lichtbögen ausgehen kann.

Immer, wenn elektrische Energie erzeugt, verbraucht oder transportiert wird, entstehen elektrische und magnetische Felder. Diese können durch elektrische und magnetische Felder anderer Geräte beeinflusst werden. Für einen möglichst reibungslosen und störungsfreien Ablauf werden die Kabel mit einer speziellen EMV-Abschirmung elektromagnetisch isoliert. Diese wirken in der Regel wie ein Faradayscher Käfig und blockieren jegliche elektromagnetische Einflüsse. Im Umkehrschluss verursachen Leitungen mit Abschirmung auch weniger Störungen an anderen umliegenden Komponenten. Eine Richtlinie zur Einhaltung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) findet unter anderem in der Norm ECE R10 „Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit“ statt, die sich inzwischen in der fünften Revision befindet.⁶¹

⁶⁰Vgl. DIN e.V. 2020.

⁶¹Vgl. UN/ECE 2012.

Bei einer weiteren nennenswerten Norm im Bereich der Kabel- und Steckverbindungen handelt es sich um die ISO 6722. Während sich die ISO 6722-1 mit einadrigen Kupferleitungen zwischen 60 V und 600 V befasst, handelt die ISO 6722-2 von analogen Inhalten, allerdings mit Bezug auf Aluminium anstatt Kupfer als Leiter.⁶²

21.4.6 Ladeinfrastruktur

Die Schnittstelle zwischen Elektrofahrzeug und „Smart Grid“ sowie die entsprechende Infrastruktur bilden ein weitreichendes Themenfeld, das von essenzieller Bedeutung für den Erfolg der Elektromobilität ist. Neben den verschiedenen Ladeorten spielen der Energiefluss und die Kommunikation eine wichtige Rolle. Je nach Anwendungsgebiet gibt es kabelgebundene Ladestationen für Elektroautos in sämtlichen Preis- und Leistungsklassen. Grundsätzlich wird zwischen zwei Ladestationstypen unterschieden.

Zum einen gibt es die AC-Ladestationen (Normalladen). Sie nutzen die gängigste Lademethode für Elektrofahrzeuge mit einem Stecker. Beim Anschließen eines E-Mobils an eine normale AC-Ladestation wird der Wechselstrom im Fahrzeug durch den „On-Board-Charger“ (OBC) in Gleichstrom umgewandelt und fließt dann mit einer Ladeleistung von 3,7 bis 22 kW in die Hochvoltbatterie. Die Ladegeschwindigkeit ist im Wesentlichen von der Ausgangsleistung der Ladestation sowie von den Fähigkeiten des Umrichters zur Umwandlung des Stroms in Gleichstrom abhängig. Diese Ladestationen kommen etwa im privaten Bereich oder auf öffentlichen Parkplätzen zur Anwendung.

Zum anderen gibt es die DC-Ladestationen. Mit einer Ladeleistung von bis zu 350 kW liegt diese weit über der Leistung von AC-Ladesäulen. Dies ist vor allem darin begründet, dass der Strom bereits durch die Ladestation in Gleichstrom umgewandelt wird und der Strom dadurch direkt in die Batterie fließt, ohne vorher noch einmal vom OBC umgewandelt zu werden. Außerdem werden sie zumeist im Verbund direkt an eine höhere Ebene des Verteilnetzes über eine eigene Trafostation angeschlossen, so dass ihnen netzseitig eine höhere Anschlussleistung zur Verfügung steht. Die Anschaffungskosten solcher Ladestationen liegen jedoch deutlich über denen von AC-Ladestationen. Anwendung finden DC-Ladestationen vor allem im öffentlichen Raum, an denen Nutzer nur kurz halten – zum Beispiel an Autobahnraststätten oder auf Besucherparkplätzen.

Unabhängig vom Ladeprozess lässt sich die Verteilung der Ladevorgänge in zwei Kategorien unterscheiden: einerseits in private Aufstellorte, die 60 bis 85 % der Ladevorgänge abdecken, sowie andererseits in öffentlich zugängliche Aufstellorte, die 15 bis 40 % der Ladevorgänge ausmachen. An den privaten Aufstellorten handelt es sich um Ladevorgänge, die regelmäßig beziehungsweise in der Nacht erfolgen. Typische Standorte dafür sind etwa die Garage oder ein ähnlicher Stellplatz beim Eigenheim, Parkplätze (zum Beispiel in der Tiefgarage von Wohnanlagen, Mehrfamilienhäusern und Wohnblocks) oder

⁶²Vgl. International Organization for Standardization 2011; Vgl. International Organisation for Standardization (IOS) 2013.

Unternehmensparkplätze auf dem Gelände des Arbeitgebers. Bei den öffentlich zugänglichen Aufstellorten wird zudem zwischen Schnellladung und Zwischenladung unterschieden: Das Schnellladen findet an Ladestationen innerorts oder an Verkehrsknoten wie Autobahnen oder Bundesstraßen statt, wohingegen das Zwischenladen an Kundenparkplätzen beispielsweise von Einkaufszentren oder an öffentlichen Parkplätzen vorgenommen wird.⁶³

Neben der bereits beschriebenen Verteilung der Ladeprozesse spielt vor allem die Art des Ladevorgangs eine entscheidende Rolle in der Elektromobilität. In den meisten Fällen finden sie durch kabelgebundenes Laden statt. Um ähnlich wie bei einem konventionellen Verbrennerfahrzeug ein herstellerunabhängiges Laden/Tanken zu ermöglichen, ist ein international einheitliches Ladeanschlussystem für Elektrofahrzeuge zwingend erforderlich. Die DIN EN 62196 definiert dazu Steckertypen und Ladebuchsen für unterschiedliche Leistungsbereiche. Einzige Ausnahme bildet der CHAdeMO-Stecker, der in der DIN EN 62196 keine Erwähnung findet.⁶⁴ Er wird stattdessen in der Norm IEC 61851-23/24 referenziert.⁶⁵

Die alternative Möglichkeit des kabellosen, induktiven Ladens findet in der aktuellen Praxis der Elektromobilität noch keine (Serien-) Anwendung. Die Nischentechnologie wird weiterhin erprobt und weiterentwickelt, um beispielsweise die Effizienz und die Leistung zu verbessern.

Während bei den zuvor genannten Ladeoptionen immer davon ausgegangen wurde, mit ihrer Hilfe Elektrofahrzeuge mit Energie zu versorgen, liegt ein weiterer wesentlicher Aspekt der Ladeinfrastruktur in der Möglichkeit zur Rückspeisung des Stroms in das Versorgungsnetz. Erneuerbare Quellen bieten zwar den großen Vorteil, dass ihre Energie vollständig dekarbonisiert ist, allerdings bedeutet die Verwendung von Energie etwa aus Windkraftanlagen oder Solarfeldern auch, dass es zu stärkeren Schwankungen in der Erzeugungsleistung und -verfügbarkeit kommen kann. Um diese unkontrollierbare Volatilität zu kompensieren, können Elektrofahrzeuge beziehungsweise deren Traktionsbatterien als Puffersystem verwendet und somit als Regelleistung eingesetzt werden. Wichtig ist dabei vor allem die Norm IEC 62351, die sich mit der Sicherheit in Energiemanagementsystemen und dem zugehörigen Datenaustausch befasst, sowie die Norm ISO/IEC 15118 für den allgemeinen Ladevorgang. Dort werden Standards für die Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation definiert.⁶⁶

Bei der Rückspeisung des Stroms wird zwischen zwei Anwendungsfällen unterschieden: Vehicle-to-Home (V2H) und Vehicle-to-Grid (V2G). Bei V2H wird die Batterie zur Rückspeisung in ein lokales Gebäude oder lokales Netz hinter dem Netzanschlusspunkt genutzt. Der in der Batterie zwischengespeicherte Strom – etwa aus regenerativen

⁶³ Vgl. Arbeitsgruppe 5 „Verknüpfung der Verkehrs- und Energienetze, Sektorkopplung“ 2020, S. 13.

⁶⁴ Vgl. DIN e.V. 2015.

⁶⁵ Vgl. International Electrotechnical Commission 2014; Vgl. International Electrotechnical Commission 2014.

⁶⁶ Vgl. DIN e.V. 2021; Vgl. DIN e.V. 2019.

Energiequellen – kann zur Optimierung des Eigenstrombedarfs genutzt werden. Es erfolgt jedoch keine Rückspeisung in das öffentliche Stromnetz. Bei der V2G-Technologie wird ungenutzter Strom aus einem Elektrofahrzeug in das „Smart Grid“ eingespeist. Mit V2G und V2H ist es möglich, das Energienetz in Spitzenzeiten bei der Stromversorgung zu unterstützen und eine zusätzliche Stromquelle beziehungsweise ein Speichermedium für den Fall zu schaffen, dass wetterabhängige erneuerbare Energiequellen nicht verfügbar sind. So kann ein Haus, das Solarenergie nutzt, damit nachts keinen Strom erzeugen, aber ein Elektrofahrzeug könnte bei Bedarf eine sekundäre Stromquelle bereitstellen. Ermöglicht werden diese beiden Technologien durch bidirektionales Laden. Dadurch können Batterien von einem Elektrofahrzeug sowohl Strom beziehungsweise Energie aufnehmen als auch wieder abgeben. Die Verwendung bidirektionalen Ladens bringt für den Anwendenden viele Vorteile, aber auch Nachteile mit sich. Einerseits parkt ein durchschnittliches europäisches Auto insgesamt 92,4 % seiner Lebensdauer. In dieser Zeit benötigt das Auto keinerlei Energie und die überschüssige Energie, die sich zusätzlich etwa durch Solarenergie gewinnen lässt, kann an den Netzbetreiber verkauft werden. Andererseits wird die Batterie häufiger geladen und entladen – wodurch sich deren Lebensdauer erheblich verringert. Zusätzlich liegen die Anschaffungskosten für bidirektionales Laden höher als bei den konventionellen Lademöglichkeiten.⁶⁷

21.5 Noise, Vibration, Harshness (NVH)

Die zunehmende Verbreitung innovativer Lösungen für die Elektrifizierung des Antriebsstrangs und die stetige Optimierung von Prozessabläufen ermöglichen eine Produktion von Elektrofahrzeugen im Massensegment. Dabei werden die etablierten Fahrzeughersteller durch steigende Komfortansprüche sowie neue Vorgaben des Gesetzgebers vor neue Herausforderungen gestellt. Diese beziehen sich neben technischer Perfektion auch auf ästhetische sowie emotionale Kriterien. Der subjektive Komforteindruck des Fahrers wird dabei in direkter Weise und unterbewusst durch das Geräuschverhalten des Fahrzeugs beeinflusst. Die akustischen Phänomene im Fahrzeugbereich werden im Arbeitsfeld „NVH“ (Noise, Vibration, Harshness) untersucht. Durch den zunehmenden Wandel der Antriebsstränge in der Fahrzeugentwicklung haben sich auch die Anforderungen im NVH-Bereich verändert: Der akustischen und schwingungstechnischen Qualität der Fahrzeuge werden engere Grenzen gesetzt.⁶⁸ Das vorliegende Kapitel soll ein breites Verständnis der Grundlagen und der Optimierung des NVH-Bereichs vermitteln. Dazu werden zunächst die NVH-Schwerpunkte der Vergangenheit thematisiert, die sich auf die Reduzierung des Schalldruckpegels im Fahrzeuginnenbereich konzentrierten und das Ziel verfolgten, nicht lediglich festgelegte Normen, sondern Komfortansprüche der Fahrzeuginsassen zu erfüllen. Im Zuge dessen werden auch akustische Grundlagen vermittelt.

⁶⁷Vgl. Arbeitsgruppe 5 „Verknüpfung der Verkehrs- und Energienetze, Sektorkopplung“ 2020, S. 7f.

⁶⁸Vgl. Zeller 2018, S. 4.

Anschließend werden die künftigen Entwicklungen im NVH-Bereich vorgestellt, die sich auf neue Herausforderungen und Aufgaben der Fahrzeuggeräuschoptimierung beziehen. Danach werden die Methoden zur Analyse von Fahrzeuginnengeräuschen und -außengeräuschen erläutert. Der Fokus liegt dabei nicht alleine auf der Behebung von Störgeräuschen, sondern auch auf ihrer Identifizierung. Der Abschluss des Kapitels gilt einer tiefgehenden Betrachtung derjenigen Faktoren, die das Klangbild im Fahrzeug beeinflussen.

21.5.1 NVH-Aufgaben in den vergangenen Jahren

Die Akustik wird als die Lehre vom Schall und seiner Ausbreitung definiert. Diese bezieht sich auf das Verständnis seiner Entstehung, seines Verhaltens und seiner Vernichtung.⁶⁹ Schall kann sich in Gasen, Flüssigkeiten und festen Körpern in Form von Druckschwankungen und somit in Gestalt mechanischer Schwingungen in einem Wellenfeld fortpflanzen.

Eine Schallwelle resultiert aus lokalen Verdichtungen in elastischen Medien, die mit einer örtlichen Schwingung der Moleküle einhergeht. Diese entstehen bei äußerer Einwirkung und führen zu einer lokalen Kompression sowie zu einer Dekompression innerhalb des Mediums.⁷⁰ Die sich massentransportfrei ausbreitende Schwingung führt somit zu räumlichen und zeitlichen Druckänderungen im Fluid – definiert als Schalldruck p .

Schallfeldkenngrößen werden in der Akustik üblicherweise mit Hilfe von Pegeln beschrieben. Definitionsgemäß ist ein Pegel eine logarithmisch skalierte, bezogene Größe, welche die Maßeinheit „Bel“ besitzt. Eine weitere Kenngröße, die in der Akustik für die Schallabstrahlung von Festkörpern bedeutsam ist, stellt die Beschleunigung a dar. Sie bezieht sich auf die Schwingung der Moleküle um die eigene Ruhelage. Zur Identifizierung der Schwingungsbeschleunigung können aus der Kenngröße Vibrationen von Festkörpern quantifiziert werden.

Die vorgestellten Kenngrößen gehören zu den relevantesten, um Geräusch- und Vibrationscharakteristika sowie das akustische Verhalten aus menschlicher Wahrnehmung zu erfassen. Mit Hilfe des Schallintensitätspegels und der Schalleistung ist zudem die abgestrahlte Schallenergie bestimmbar. Bei der Schallentstehung wird zwischen zwei Transferpfaden zur Schwingungsausbreitung unterschieden. Dazu zählen der Luftschall und der Körperschall, wie Abb. 21.5 verdeutlicht. Die direkte Schallübertragung resultiert aus einem primären Luftschall, der eine aeroakustische Ursache hat – etwa ein Umströmungsgeräusch. Der Körperschallpfad wird hingegen als „sekundärer Luftschall“ bezeichnet und geht aus einer Kraftanregung hervor, die Vibrationen in Festkörpern auslöst. Das umgebende Fluid wird in Schwingungen versetzt, was als indirekter Schall wahrnehmbar ist.

⁶⁹Vgl. Sinambari und Sentpali 2020, S. 7.

⁷⁰Vgl. Möser 2015, S. 45.

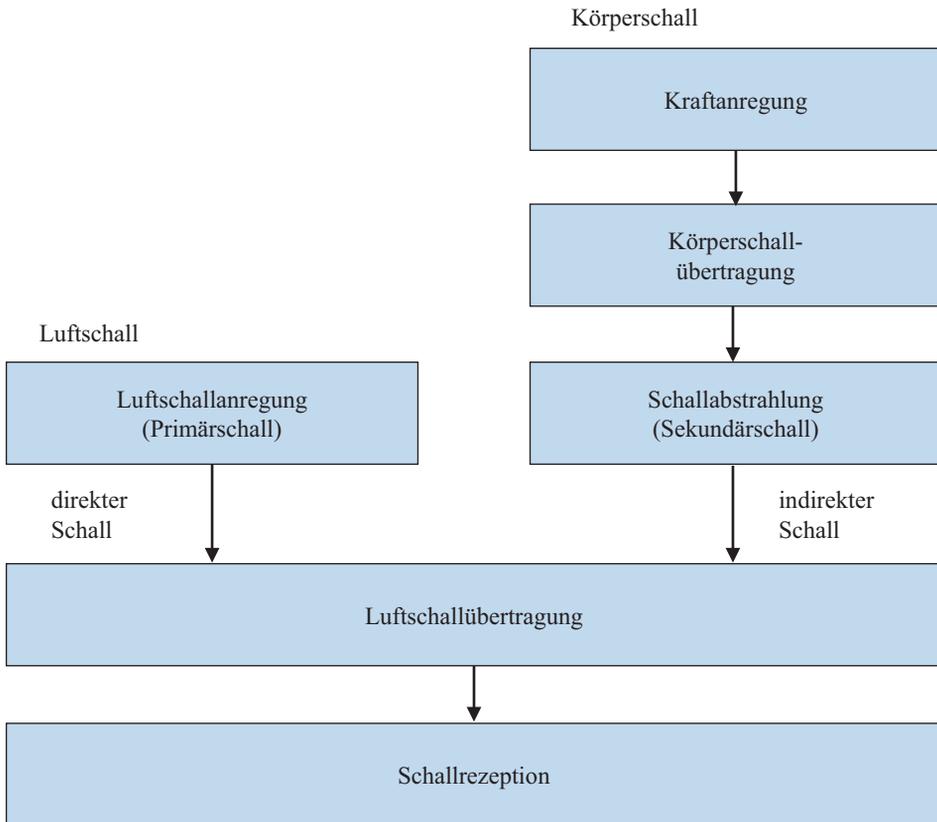


Abb. 21.5 Mechanismen der Schallentstehung und -übertragung. (vgl. Zeller 2018, S. 163)

Die Gesamtheit der Schwingungsphänomene, die für die menschliche Wahrnehmung identifizierbar sind, wird in der Fahrzeugakustik mit dem Akronym NVH („Noise, Vibration, Harshness“) definiert. Ihre Analyse hat sich in der Fahrzeugentwicklung als ein unentbehrlicher Baustein erwiesen, der vor dem Hintergrund zunehmender Elektrifizierung und neuer Herausforderungen weiter an Relevanz gewinnen wird.

Mit der sukzessiven Verringerung der verbrennungsmotorbedingten Innengeräusche in den vergangenen Jahrzehnten nahm ihre Bedeutung weiter zu. Mit Fahrzeuginnen-geräuschen werden Leidenschaft und Emotion vermittelt, die allgemeine Wertanmutung gesteigert und mitunter ein ganzes Produkt-Image inszeniert. Diese Möglichkeiten erkannten Automobilhersteller frühzeitig und entwickelten entsprechende Methoden sowie Werkzeuge zur NVH-Optimierung – denn positive Erlebnisse sind die Basis für Kundenzufriedenheit und Markentreue.

Im Allgemeinen interessieren Kunden sich nicht für Normen und Vorschriften im Bereich des Komforts, der während der Fahrt multisensuell empfunden und bewertet wird. Dementsprechend werden dem Produkt Attribute wie „billig“, „exklusiv“, „sportlich“

oder „luxuriös“ zugeordnet. Dabei ist für den akustischen Komfort nicht nur die Wechselwirkung von Hören und Schwingungsempfindung bedeutsam: Ebenso müssen der Kontext, die Erwartungshaltung der Zielgruppe, das Produkt-Image und die generellen Produktassoziationen einbezogen werden.

Anfangs bestand die wesentliche Arbeit des NVH-Bereichs darin, die akustische Belastung durch das Motorengeräusch für die Insassen zu verringern und auf ein zumutbares Niveau zu bringen – das heißt: den Schalldruckpegel deutlich zu reduzieren.

Das Thema „Geräuschqualität“ rückte Anfang der 1980er-Jahre zunehmend in den Fokus. Den Automobilherstellern wurde bewusst, dass Sounddesign mehr bedeutet als nur den Schalldruckpegel zu vermindern. Letztlich war zu konstatieren, dass viele Geräuschphänomene sich nicht mit einem Messmikrofon und reinen Schallpegelbetrachtungen identifizieren lassen. Die binaurale Messtechnik zur gehörrichtigen Aufnahme und Wiedergabe wurde somit ein fester Bestandteil im Prozess der Fahrzeugentwicklung.⁷¹ Auch die Psychoakustik wurde essenziell: Mit ihrer Hilfe wurden gehörbezogene Geräuschbewertungen vorgenommen, denn Phänomene wie Pfeifen, Brummen, Poltern, Wummern, Quietschen und Nageln können nicht auf der Grundlage zeitlich gemittelter Schalldruckpegel behandelt werden. Derartige Geräusche beeinflussen – ungeachtet ihres geringen energetischen Beitrags – die Gesamtbeurteilung des Fahrzeuginnenraums erheblich. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden umfangreiche Studien vorgenommen, die sich Aspekten der menschlichen Signalverarbeitung sowie der analytisch-physikalischen Bestimmung von Geräuschqualität unter zunehmender Berücksichtigung der Psychoakustik widmeten. Dass das Thema auch in Zukunft diskutiert werden muss, wie Abb. 21.6 schematisch verdeutlicht, liegt nicht nur an der Komplexität des Untersuchungsgegenstandes. Das menschliche Gehör ist adaptiv und kann sich dem aktuellen Geräuschniveau anpassen. Es weist eine hohe Sensitivität für zeitliche und spektrale Muster nahezu ungeachtet des Schalldruckpegels auf.

Nachteilige Geräusche wie das Heulen der Hinterachse wurden bereits vor mehr als einem Jahrzehnt erfolgreich um einige Dezibel reduziert. Damit konnte erreicht werden, dass dieses Geräusch durch andere maskiert und in der Folge nicht mehr beanstandet wurde. Das Problem schien gelöst zu sein. Nachdem die Geräuschqualität und Geräuschquellen im Fahrzeug jedoch immer weiter optimiert wurden, verminderte sich das Gesamtgeräusch – und das Hinterachsheulen war wieder verstärkt wahrnehmbar.

In der Folge entstand erneuter Bedarf nach Optimierung. Das betrifft alle Geräuschphänomene im Fahrzeuginnenraum. Die Reduzierung des akustischen Beitrags einer Geräuschquelle führt zur Hörbarkeit anderer Geräuschquellen, die dann unter Umständen ebenfalls der Optimierung bedürfen. Die für das menschliche Gehör wahrnehmbare Frequenzbandbreite reicht von 16 Hz bis etwa 16 kHz und wird als „Hörbereich“ bezeichnet.⁷² Vibrationen werden über die Kontaktstellen des menschlichen Körpers zum

⁷¹Vgl. Zeller 2018, S. 478.

⁷²Vgl. Zeller 2018, S. 267.

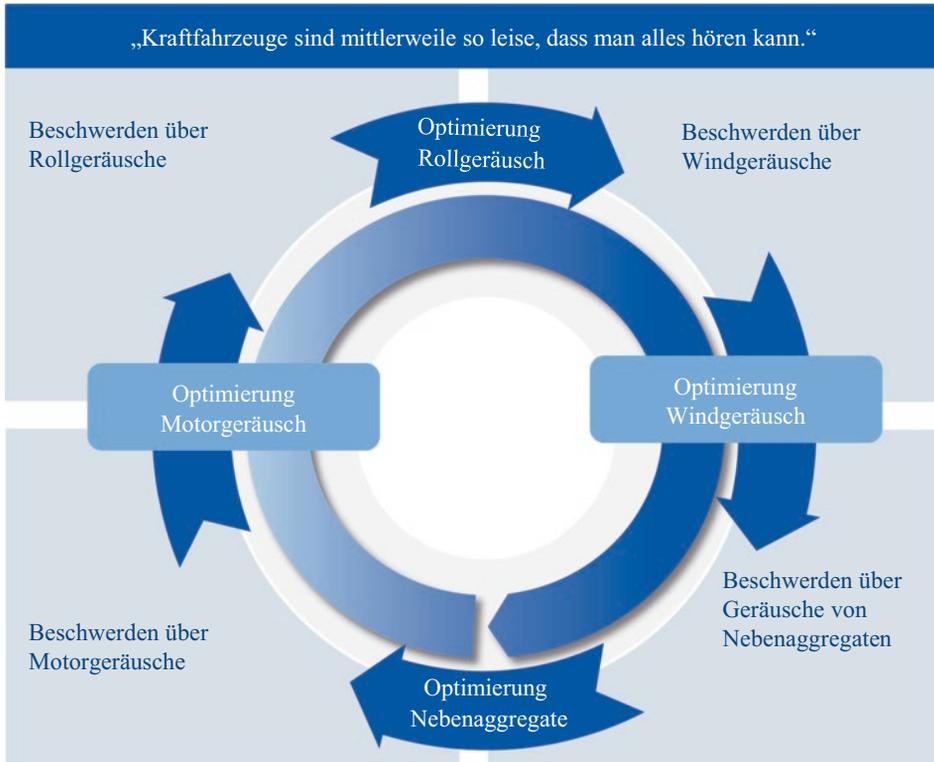


Abb. 21.6 Prozess der Fahrzeuggeräuschoptimierung. (vgl. Kampker et al. 2018, S. 196)

abstrahlenden System wahrgenommen und sind für einen Frequenzbereich von 20 bis etwa 100 Hz spürbar und hörbar.⁷³

Auf vorhandene ungewollte Geräusche zu reagieren und diese mittels „Trouble-shooting“ zu minimieren beziehungsweise zu beseitigen, hat die Arbeit im professionellen Akustikbereich in den vergangenen Jahrzehnten geprägt (vgl. Abb. 21.7). Als Störgeräusche empfindet das menschliche Ohr vor allem hohe Frequenzen. Diese Tatsache lässt sich nicht nur aus dem NVH-Bereich ableiten, sondern sie begegnet dem menschlichen Gehör auch im Alltag. Auch wenn der Geräuschpegel niedriger sein kann, über treffen die hohen Frequenzen den Komfortbereich und werden als störend wahrgenommen.⁷⁴ Die Modulationsfrequenz f_m gibt dabei die Schwankung der Hüllkurve eines harmonischen Schalldruckverlaufs an.⁷⁵ Während beim „Peifen“ keine Modulationsfrequenz festzustellen und somit kein Schwankungsanteil um den Mittelwert des Schallpegels vorhanden ist, weist das „Grollen“ eine hohe Modulationsfrequenz f_m auf, die un-

⁷³Vgl. Zeller 2018, S. 30.

⁷⁴Vgl. Sinambari und Sentpali 2020, S. 3.

⁷⁵Vgl. Sinambari und Sentpali 2020, S. 295.

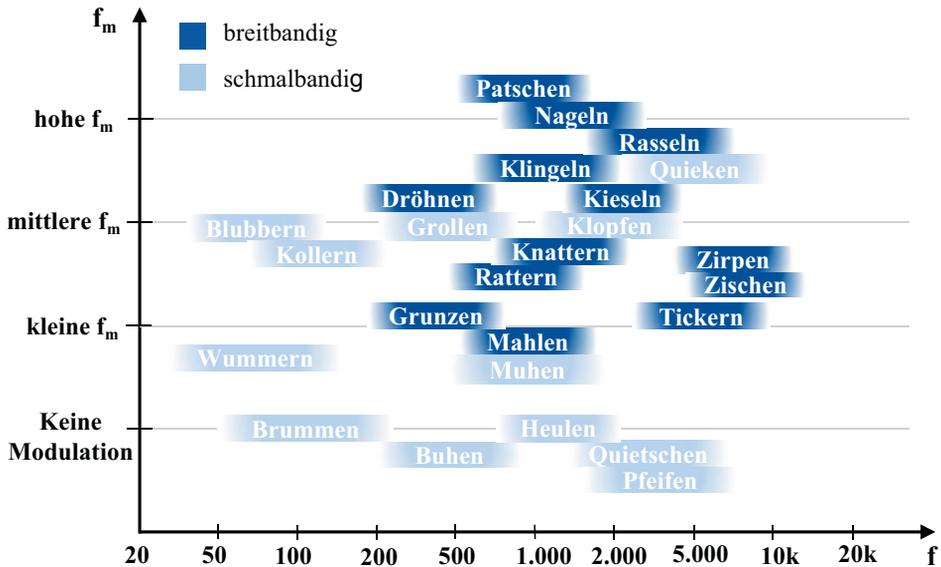


Abb. 21.7 Typische Störgeräusche im Bereich NVH und deren charakteristische Eigenschaften (Bandbreite, Modulationsfrequenz, spektrale Ausprägung). (vgl. Kampker et al. 2018, S. 197)

abhängig von der eigentlichen Frequenz ist (vgl. Abb. 21.7). Außerdem wird zwischen schmal- und breitbandigen Geräuschen unterschieden.

Aktuelle Anforderungen im Bereich des akustischen Komforts verlangen allerdings auch nach gestalterischen Überlegungen, es muss aktiv am resultierenden Geräuscherlebnis im Fahrzeug gearbeitet werden.

21.5.2 NVH in Zukunft

Obwohl die Prävention und Behandlung von Störgeräuschen nach wie vor zu den Kernaufgaben im NVH-Bereich zählt, rückt nun die aktive Gestaltung der Akustik in den Vordergrund. Durch den Wegfall des Verbrennungsmotors bei alternativen Antrieben kommt es zu einer signifikanten Reduktion der Lautstärke des Fahrzeuginnengeräusches.⁷⁶ Das hat auch die Anforderungen an das Sound-Engineering aus der Vergangenheit dramatisch verändert: Die sukzessive und stetige Optimierung des Verbrennungsmotors wird abgelöst. Das Fahrzeuginnengeräusch wird jetzt aktiv „komponiert“ und akustische Feedbacks werden vollkommen neu gestaltet. Dabei ist der Übergang von klassischen Aufgaben in den Bereichen „akustischer Komfort“, „NVH“ und „Sounddesign“ hin zu neuen Herausforderungen und Konzepten fließend.⁷⁷

⁷⁶Vgl. Siebenpfeiffer 2020, S. 5.

⁷⁷Vgl. Genuit 2019.

Grundsätzlich erfordern strengere EU-Abgasbestimmungen eine enge Zusammenarbeit mit Motorenherstellern. Gefordert werden Downsizing, kleinere und leichtere Fahrzeuge, hoch aufgeladene Motoren, Hybridantrieb und vollständige Elektrotraktion. Dabei wird mit dem Elektromobilitätsgesetz – dem Streben nach einer hohen Umweltverträglichkeit und einer Verringerung der CO₂-Emissionen – der Fokus auf vollkommen elektrifizierte Antriebe weiter verschärft.⁷⁸ Alle diese Entwicklungen werden neue NVH-Konfliktsituationen hervorrufen. So kann etwa die parallele Existenz des elektrischen und verbrennungsmotorischen Antriebs in Hybridfahrzeugen zu Geräusch- und Schwingungsproblemen führen, die aus herkömmlichen Automobilen nicht bekannt sind. Betriebsgeräusche der elektrischen Antriebskomponenten und das Betriebsverhalten des Verbrennungsmotors mit plötzlichem Starten und Abschalten sind ungewohnt. Auch rein elektrische Fahrzeuge, die zunehmend in den Fokus gelangen, stellen das Sound-Engineering vor neue Herausforderungen. Dabei rücken die psychoakustischen Effekte in den Vordergrund.⁷⁹ Die höhere Geräuschempfindlichkeit durch tonale Geräusche aufgrund des fehlenden Verbrennungsmotors und der höhere Belastungsfaktor durch unerwartete Geräusche sowie höhere Frequenzen angesichts hoher Drehmomente des Elektromotors fordern Weiterentwicklungen im Bereich des NVH.⁸⁰ Insgesamt sollte ein harmonisches, unauffälliges Zusammenspiel dieser Geräuschquellen erreicht werden, das auch die Betrachtungen von Vibrationsanregungen umfasst. Dabei ist es wichtig, dass das Hören stets als integrativer Bestandteil der Mess- und Analyseketten eingebunden wird. Nur so lässt sich sicherstellen, dass Maßnahmen und Modifikationen tatsächlich die beabsichtigte Wirkung entfalten. Daher ist der Einsatz binauraler Mess- und Wiedergabetechnik unverzichtbar. Daneben werden psychoakustische und weitere gehörbezogene Analysen benötigt, die wichtige Informationen über Intensität, Charakter, spektrale Verteilung und zeitliche Struktur spezieller Geräuschphänomene bereitstellen.

Für die Ableitung zielgerichteter konstruktiver Maßnahmen ist es zwingend erforderlich, Geräuschquellen und Übertragungswege detailliert zu kennen. Hier findet das Verfahren der Transferpfad-Analyse Anwendung.⁸¹ Durch die Trennung von Quelle und Übertragungsweg wird nicht nur eine zuverlässige Identifikation der Ursachen für akustische Konflikte ermöglicht, sondern mit Hilfe der binauralen Transferpfadsynthese (BTPS) sogar eine gehörmäßige Abschätzung des Potenzials simulierter Modifikationen.⁸² Damit lässt sich gewährleisten, dass vorgeschlagene Veränderungen hörbar den gewünschten Effekt erzielen. Erfolgreiches NVH und Sounddesign sind also nur zu erreichen, wenn vorhandene Methoden und Werkzeuge aufeinander abgestimmt und im Hinblick auf das Erlebnis des Gesamtfahrzeugs eingesetzt werden. Die Transferpfad-Analyse hat sich als ein bewährtes Werkzeug für die NVH-Analyse etabliert und wird in Zukunft insbesondere mit

⁷⁸ Vgl. Tschöke et al. 2020, S. 7.

⁷⁹ Vgl. Zeller 2018, S. 12.

⁸⁰ Vgl. Siebenpfeiffer 2020, S. 11.

⁸¹ Vgl. V. van der Seijs, Maarten et al. 2015, S. 68f.

⁸² Vgl. Vorländer und Fels 2016.

Desktop-Simulationen zum Einsatz kommen. Es wird erwartet, dass der Einsatz von Simulationsprogrammen weiter steigt und Ergebnisse sich somit analytisch auswerten lassen.⁸³ Mit Hilfe der virtuellen Fahrzeugumgebung von NVH-Simulationsmodellen lässt sich die Innengeräuschkulisse von Prototypen realitätsnah vorhersagen. Dafür werden neben der Betrachtung der Übertragungspfade auch die Quellenpfade mittels „Source Path Contribution“ (SPC) analysiert.⁸⁴ Sie ermöglichen frühzeitige Erkenntnisse und Informationen über die NVH-Analyse in der Fahrzeugentwicklung.

21.5.3 Fahrzeuginnengeräusche

Trotz einer deutlichen Reduktion des Innengeräuschpegels von Elektrofahrzeugen durch den Wegfall des Verbrennungsmotors können zahlreiche akustische Konfliktsituationen auftreten. Beispielsweise sind Geräusche des Stromrichters im hochfrequenten Bereich eine Erscheinung, deren Hörerlebnis für die Nutzer ungewohnt bis störend ist. Neben der konstanten Schaltfrequenz des Stromrichters entstehen drehzahlabhängige Seitenbänder. Das Resultat ist ein unangenehmer Klang, den es zu vermeiden gilt.

Weitere wesentliche Geräuschquellen sind der Elektromotor und das Getriebe. Die elektromagnetischen Ordnungen des E-Motors können deutlich wahrnehmbar sein („whine noise“). Dieses Geräuschmuster ist den meisten Menschen von Straßenbahnen bekannt, die einen ähnlichen Klang aufweisen können. Die Überlagerung der Phänomene im Elektroauto muss für effektive Verbesserungsmaßnahmen gesamtheitlich betrachtet werden.⁸⁵

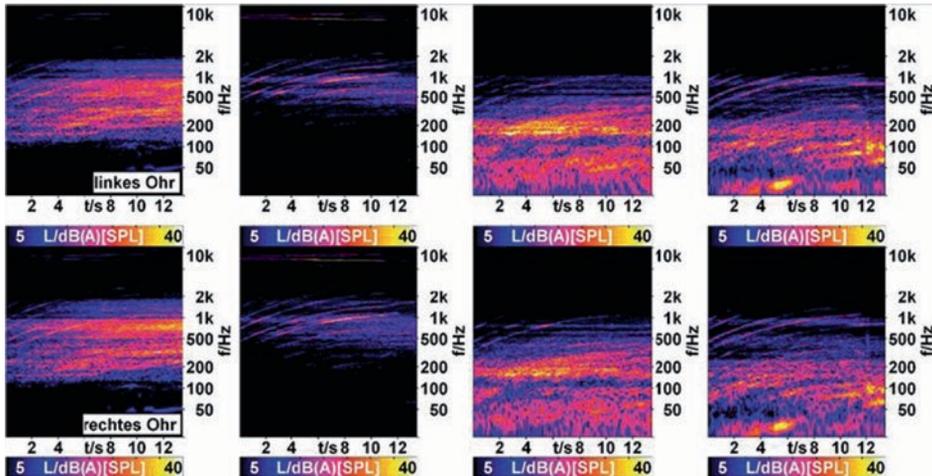
Im Folgenden werden die Ergebnisse aus einer Untersuchung an einem Hybridfahrzeug-Prototypen zur exemplarischen Illustration künftiger NVH-Themen vorgestellt. Mit Hilfe diverser Prüfstandsmessungen wurde ein integriertes Transferpfadmodell des untersuchten Fahrzeugs erstellt, in dem die einzelnen Geräuschpfade durch Übertragungsfunktionen beschrieben und die entsprechenden Geräuschbeiträge durch Filterung im Betrieb gemessener Quellsignale synthetisiert wurden. Auf diese Weise lassen sich die Geräuschanteile der einzelnen Quellen und die Übertragungswege separat analysieren. Das Transferpfadmodell wurde um die Synthetisierung von Vibrationen an den wesentlichen Kontaktstellen erweitert, um die Problematik von Geräusch- und Schwingungskonflikten bei Hybridfahrzeugen angemessen zu berücksichtigen und realistische Simulationen im Fahrsimulator zu ermöglichen.

Abb. 21.8 zeigt ein Teilergebnis der binauralen Transferpfad-Analyse in einer FFT-über-Zeit-Darstellung. Die Fast-Fourier-Transformation (FFT) erlaubt die Transformation aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich. Die ermittelten Frequenzspektren können über der Zeit dargestellt werden, wobei die Amplituden der Frequenzen farbkodiert wer-

⁸³ Vgl. Siebenpfeiffer 2020, S. 184.

⁸⁴ Vgl. V. van der Seijs, Maarten et al. 2015, S. 68f.

⁸⁵ Vgl. Kampker et al. 2018.



Messung bei einer Beschleunigung von 0 auf 50 km/h.

Von links nach rechts: Luftschallbeitrag des Elektromotors, Luftschallbeitrag des Umrichters, Körperschallbeitrag der Antriebswellen, Körperschallbeitrag des Elektromotors, FFT über Zeit

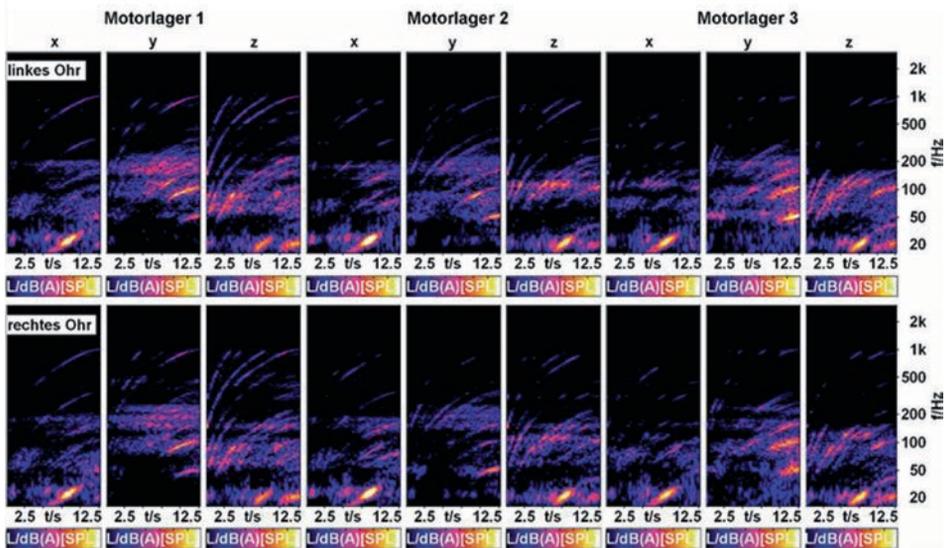
Abb. 21.8 Spektrogramme von den Geräuschanteilen des Elektroantriebs am Innengeräusch. (vgl. Kampker et al. 2018)

den. Zu sehen sind die Anteile des Elektroantriebs für den Luft- und Körperschall am Innengeräusch. Die Spektrogramme verdeutlichen bereits, dass die durch Magnetkräfte verursachten höheren Ordnungen des Elektromotors zwischen 500 Hz und 2 kHz nicht nur als Körperschall, sondern auch als Luftschall übertragen werden.⁸⁶

Derartige Geräuschkomponenten werden zusätzlich zu den erwartbaren Schaltfrequenzen ebenfalls vom Umrichter abgestrahlt – ein unerwarteter Effekt. Nähere Untersuchungen am Fahrzeug ergaben, dass die Ursache ein Verbindungskabel zwischen Umrichter und Elektromotor war. Dies wirkte als wesentliche Körperschallbrücke. Somit fungierte das Umrichtergehäuse als ein „Lautsprecher“ der Elektromotorgeräusche. Der Einsatz eines weniger steifen Kabels könnte diese Geräuschübertragung deutlich reduzieren.

Mit Hilfe der in Abb. 21.8 skizzierten Analysen lassen sich bereits erste Anforderungen für Maßnahmen zur Optimierung der Geräuschqualität ableiten. Die Geräuschanteile können für die Erarbeitung detaillierter Modifikationsvorschläge weiter spezifiziert werden. Abb. 21.9 schlüsselt beispielsweise die Geräuschanteile des Elektromotors, die über Körperschall in den Innenraum gelangen, für die entsprechenden Motorlager in x-, y- und z-Richtung auf. Somit können die relevanten Geräuschmuster unmittelbar einzelnen Pfaden beziehungsweise Koppelstellen zugeordnet werden. Die störenden höherfrequenten Ordnungen des Elektromotors („whine noise“) werden hauptsächlich über das Motorlager 1 übertragen – ersichtlich in Abb. 21.9. Weitere Auffälligkeiten sind ein merklicher

⁸⁶Vgl. Sellberbeck 2010.



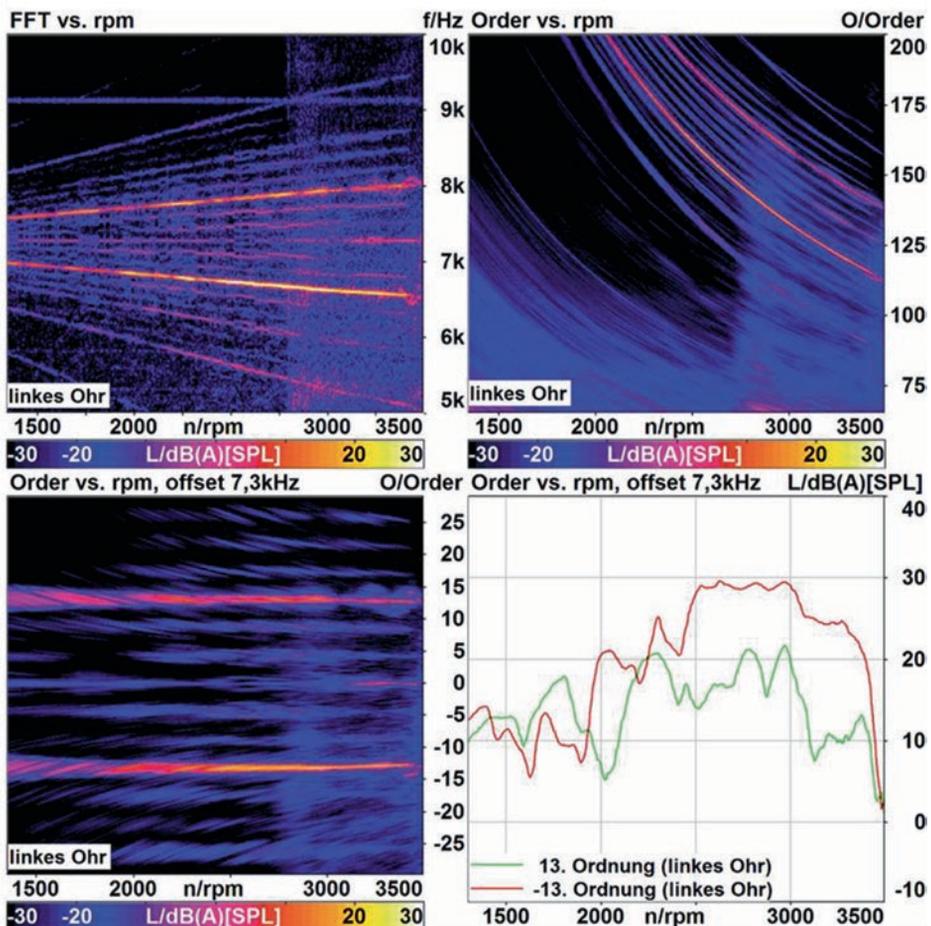
Messung bei einer Beschleunigung von 0 auf 50 km/h.

Von links nach rechts: Körperschall über Motorlager 1 bis 3, Achsdefinition entsprechend Kartesischem Koordinatensystem, FFT über Zeit

Abb. 21.9 Spektrogramme von den Geräuschanteilen des Elektromotors am Innengeräusch. (vgl. Kampker et al. 2018)

Schalleintrag um 50 Hz, übertragen in y-Richtung, sowie ein tieffrequentes Brummen im Bereich um 20 bis 30 Hz in x- und z-Richtung. Die Analyse des letztgenannten Phänomens ergibt eine Nickbewegung des gesamten Aggregats um die y-Achse.

Im zukünftigen Sound-Engineering wird es weiterhin erforderlich sein, den akustischen Beitrag des Umrichters detailliert zu analysieren, um einen hohen akustischen Komfort zu erreichen. Abb. 21.10 zeigt links oben den akustischen Hauptbeitrag des Umrichters am Ohr des Fahrers. Die erste Ordnungsanalyse verdeutlicht, dass für das Geräusch des Umrichters kein einfacher Zusammenhang zur Motordrehzahl besteht. Die fächerförmigen Ordnungen (Seitenbänder) um die Schaltfrequenz des Umrichters sind gut zu erkennen. Sie stellen ein Nebenprodukt der Pulsweitenmodulation dar. Die Ordnungen des Umrichters verlaufen nicht proportional zur Motordrehzahl ($n \cdot \text{Drehzahl}/60$), sondern erscheinen als geschwungene Kurvenverläufe im konventionellen Ordnungsspektrum. Eine weitere zielführende Auswertung der Phänomene ist eine Ordnungsanalyse, bei der die Schaltfrequenz des Umrichters als „Frequenzversatz“ eingestellt wird. Die Ordnungen können im Gegensatz zur Betrachtung ohne Versatz nun auch negativ sein, da einige Ordnungen mit steigender Drehzahl eine Abnahme der Frequenz aufweisen. Das Ordnungsspektrum mit einem Frequenzversatz von 7,3 kHz zeigt, dass die (um die Schaltfrequenz des Umrichters verschobenen) 13. Ordnungen am auffälligsten sind. Der Abstand der Seitenbänder (26. Ordnungen) entspricht der Polpaarzahl des verwendeten Elektromotors,



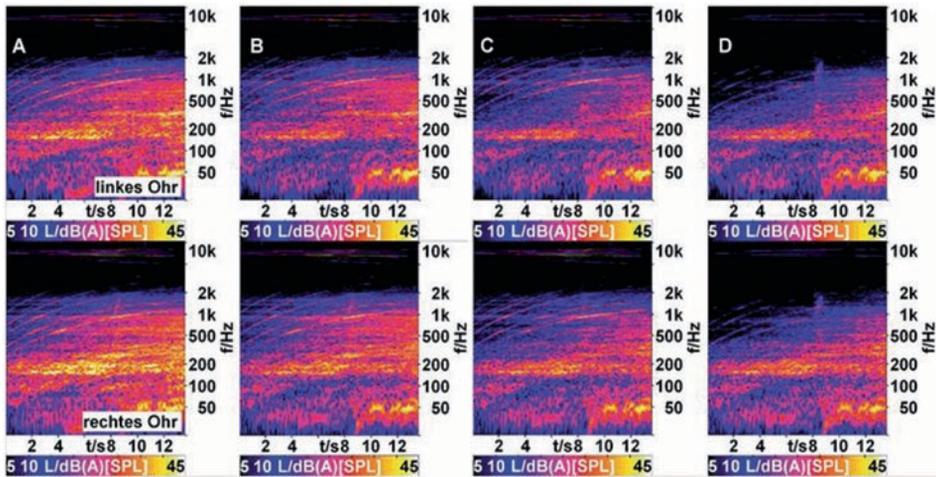
Zoom in den höherfrequenten Bereich für das linke Ohr;

Von oben links nach unten rechts: FFT über Drehzahl, Ordnungsspektrum über Drehzahl, Ordnungsspektrum mit Frequenzversatz (7,3 kHz) über Drehzahl, Ordnungspegel über Drehzahl (mit Frequenzversatz von 7,3 kHz)

Abb. 21.10 Spektrogramme zum Hauptbeitrag des Umrichters am originalen Innengeräusch. (vgl. Kampker et al. 2018)

was bedeutet, dass je Umdrehung 26 Polpaare durchlaufen werden. Die Darstellung der relevanten Ordnungspegel ermöglicht schließlich eine detaillierte Einschätzung der Bedeutung jener akustischen Beiträge.

Die Vorteile eines umfangreichen Transferpfadmodells liegen somit in der direkten technisch-analytischen sowie hörbaren Abschätzung der Auswirkungen bestimmter Modifikationen.



Von links nach rechts: Originales Innengeräusch (A), Optimierte Lagerung des Elektromotors (B), B und eine zusätzliche Luftschallkapselung des Elektromotors (C), B & C und eine zusätzliche Luftschallkapselung des Umrichters (D) für eine Beschleunigung von 0 auf 50 km/h, FFT über Zeit

Abb. 21.11 Spektrogramme vom originalen Innengeräusch und simulierten Optimierungen. (vgl. Kampker et al. 2018)

Abb. 21.11 zeigt eine sukzessive virtuelle Optimierung, in der zuerst die Entkopplung des Elektromotors unter Einbeziehung der Lager- und Struktursteifigkeiten verbessert wurde. Dadurch ließ sich bereits eine höhere Isolation in einem weiten Frequenzbereich erreichen. Ferner wurden Luftschallkapselungen von Elektromotor und Umrichter simuliert. Obwohl die Kapselung des Umrichters (Änderung von C zu D) nur zu einer Schalldruckpegelabnahme von 1 dB führte, zeigt das Spektrogramm die deutliche Reduzierung des Stromrichtergeräusches um 7 kHz, verbunden mit einer erheblichen hörbaren Verbesserung der Geräuschqualität.⁸⁷

Eine Herausforderung im Bereich des akustischen Komforts bei alternativen Antrieben besteht in der Entwicklung von Analysemethoden, die eine zuverlässige Identifikation von perceptiv auffälligen spektralen und zeitlichen Mustern erlauben. Psychoakustische Größen werden benötigt, die eng mit dem Geräuschqualitätsempfinden verbunden sind, da der Schalldruckpegel im Innenraum leiser Fahrzeuge als akustischer Indikator weiter an Bedeutung verlieren wird. Diese werden als Zielgrößen im Fahrzeugentwicklungsprozess stärkere Anwendung und Verbreitung finden. Die adäquate Analyse wahrgenommener Tonhaltigkeit wird aufgrund der höherfrequenten Beiträge von Elektromotor und Umrichter oder auffälliger Getriebegeräusche besonders relevant sein.

Neben der beschriebenen Vorgehensweise zur Verbesserung der Innengeräusche von Hybrid- und Elektrofahrzeugen durch die Reduktion von Störgeräuschen und un-

⁸⁷Vgl. Genuit und Fiebig 2011.

erwünschten Geräuschmustern ist die akustische Gestaltung von Innenraumgeräuschen (und Außenraumgeräuschen) eine Anforderung mit mindestens gleichwertiger Priorität. Konzeptionelle Fragestellungen prägen die Anforderung an das Sounddesign. Wie können Image und Markenkennwerte akustisch vermittelt werden? Soll nur der vorhandene Klang des Elektromotors optimiert oder sollen zusätzliche Geräusche simuliert werden?

Für Verbraucher wird es immer schwieriger, Produkte über Qualität und Eigenschaften zu unterscheiden. Die emotionale und erlebnisorientierte Differenzierung wird auf gesättigten Märkten mit ihren qualitativ austauschbaren Produkten daher zum entscheidenden Erfolgsmerkmal. Dementsprechend gewinnt das „Sound Branding“ der Innen- und Außen-geräusche von Elektroautos an Bedeutung. Dabei handelt es sich um akustische Reize, die gezielt für die Markenkommunikation verwendet werden.⁸⁸

Eine bloße Optimierung des vorhandenen „Elektro-Sounds“ erfüllt die Anforderungen an Markendifferenzierung, Emotionalisierung und Nutzererlebnis nicht. Weitergehende Methoden des aktiven Sounddesigns von Elektroautos sind erforderlich. Das Spektrum der Möglichkeiten reicht von der konstruktionsbedingten gezielten Einbringung spezieller Sounds und Geräuschkomponenten bis hin zum virtuellen Generieren von Geräuschen. Die Automobilhersteller begegnen der höchsten Gestaltungsfreiheit des Klangbildes zukünftiger Fahrzeuge in der Geschichte des Automobils hauptsächlich durch zwei Inspirationsquellen. Eine davon ist naheliegenderweise der Verbrennungsmotor; eine andere sind futuristisch musikalische Töne. Die Prämisse bei der Inspiration ist wiederum die Kodierung der Marken- und Produktwerte in Klang.⁸⁹

Der Stellenwert der Gestaltung und Auslegung der Innengeräusche von Elektrofahrzeugen ist für die Automobilbranche extrem hoch. So arbeitet beispielsweise ein deutscher Premiumhersteller für das Sounddesign von sportlichen elektrischen Modellen mit dem weltberühmten Komponisten Hans Zimmer zusammen. Der durch den Nutzer einstellbare Sound wurde bereits ein Jahr vor dem Produktionsstart des Fahrzeugs veröffentlicht – ein Umstand, der die Bedeutung des Sounddesigns als einen „Unique Selling Point“ verdeutlicht.⁹⁰

Die wesentlichen technischen Anforderungen an das aktive Sounddesign von Innengeräuschen für Elektrofahrzeuge sind Authentizität und Dauertauglichkeit. Gleichzeitig muss dem Fahrenden der Zustand des Fahrzeugs akustisch vermittelt werden, um die Wahrnehmung von Geschwindigkeit und Beschleunigung zu unterstützen. Dafür muss das Sounddesign komplexe Strukturen ausweisen. Die simple Kopplung einer Geräuschsynthese an den Parameter „Motordrehzahl“ beispielsweise wäre ungenügend. Daher ist die Erzeugung einer Vielzahl unterschiedlicher Geräusche ein elementarer Bestandteil des Sounddesigns. Die zu erzeugenden Geräusche stehen meist nur in geringem Zusammenhang mit der eigentlichen Funktionsweise des Fahrzeugs. Einflüsse auf das Design sind der Einklang mit der Psychoakustik, der Geräuschqualität, den „Sound Sca-

⁸⁸ Vgl. Steiner 2018.

⁸⁹ Vgl. De la Garza 2021.

⁹⁰ Vgl. BMW AG 2021.

pes“ und der Fahrdynamik des Fahrzeugs. Die regelbasierte flexible Generierung und Anpassung von Klängen ist beispielsweise mit dem Sound-Signatur-Konzept möglich. Dabei wird eine wiedererkennbare Basisgestalt verwendet, die den Klangcharakter prägt. Diese wird durch Verknüpfungen zu den dynamischen Fahrzeugparametern umgewandelt. Dies beinhaltet die Synthese der Basis-Signatur mit Hilfe von Mikrostrukturen des Sounds. Dieser Ansatz beruht auf der Tatsache, dass die Geräusche von Verbrennungsmotor-Fahrzeugen aufgrund der in verschiedenen Fahrsituationen unterschiedlichen Geräuscheigenschaften als dynamisch, interessant und abwechslungsreich wahrgenommen werden.⁹¹

Die Erarbeitung einer geeigneten Geräuschkulisse für Elektroautos bedarf Fahr-simulatoren zur Ermittlung der gewünschten Innengeräusche sowie die Anwendung kontext-sensitiver Methoden, die der Komplexität des Untersuchungsgegenstandes Fahrzeug gerecht werden.⁹² Beispielsweise erlaubt das Verfahren der „Explorative Vehicle Evaluation“ (EVE) eine kontextsensitive Datenerhebung sowie eine Ableitung kundenorientierter Zielgeräusche.⁹³ Dabei findet die Datenerhebung im realistischen Fahrzeug-Umfeld statt, wobei die Versuchsteilnehmenden frei und spontan Eindrücke, Impressionen, Empfindungen und Assoziationen äußern können. So werden verbalisierte Urteile mit den zugehörigen fahrzeugtechnischen und -akustischen Daten aufgezeichnet und zusammen mit weiteren Informationen aus zusätzlichen Interviews ausgewertet.⁹⁴

21.5.4 Fahrzeugaußengeräusche

Die Thematik zukünftiger Außengeräusche ist Bestandteil kontroverser Diskussionen und gesellschaftlich weitreichender Debatten. Grundsätzlich ist mit der Elektrifizierung des straßengebundenen Verkehrs die Hoffnung verbunden, innerstädtischen Verkehrslärm dauerhaft erheblich zu reduzieren. Die Gründe für diese Zielsetzung sind ernst. Aktuelle Studien der WHO zufolge geht jedes Jahr als Folge von gesundheitsschädlichen Auswirkungen durch Verkehrslärm europaweit eine Million Lebensjahre „verloren“, und 1,8 % aller Herzinfarkte sind ursächlich dem Verkehrslärm zuzurechnen.⁹⁵

Vor allem bei niedrigen Geschwindigkeiten ist eine Reduktion der akustischen Emission von Elektrofahrzeugen gegenüber Autos mit Verbrennungsmotor messbar. Beispielsweise ist der Schalldruckpegelverlauf bei einem Hybridfahrzeug (HEV) während des reinen Elektroantriebs im Vergleich zum verbrennungsmotorischen Antrieb um bis zu 10 dB niedriger. Bei höheren Geschwindigkeiten verringert sich der Unter-

⁹¹ Vgl. Vorländer und Fels 2016.

⁹² Vgl. Genuit 2008.

⁹³ Vgl. Schulte-Fortkamp et al. 2007.

⁹⁴ Vgl. Fastl et al. 2005.

⁹⁵ Vgl. Europe 2011.

schied erheblich, da das durch die Reifen verursachte Fahrbahngeräusch gegenüber den Emissionen des Antriebs dominant wird. In der Konstantfahrt ist der Unterschied des Schalldruckpegels beider Antriebstechnologien ab Geschwindigkeiten von 30 km/h äußerst gering.

Eine reine Pegelreduktion des Außengeräusches von Fahrzeugen bewirkt allerdings keine kausale Reduktion der durch sie empfundenen Störung. Die weiteren Eigenschaften der von Elektroautos emittierten Geräusche entscheiden über ihre Wahrnehmung durch den Menschen. Zur Analyse und Optimierung dieser Eigenschaften werden auffällige Geräuschkomponenten konstatiert, die lästig und störend sind. Abb. 21.12 zeigt beispielhaft das Außengeräusch eines Serienelektrofahrzeugs für eine Anfahrtsituation. Deutlich sind die durch die Magnetkräfte des Elektromotors emittierten höheren Ordnungen im Frequenzbereich zwischen 2 und 4 kHz zu erkennen. Außerdem ist ein Stromrichtergeräusch um 7 kHz vorhanden, das als störend empfunden wird. Die Ordnungen laufen auseinander, wodurch eine permanente Änderung der Modulation stattfindet. Dieses akustische Muster wiederholt sich um 14 kHz.

Die Messung zeigt, dass das Außengeräusch von Elektrofahrzeugen optimiert werden muss, um die hohen Erwartungen hinsichtlich ihrer reduzierten Lärmbelastigung gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor zu erfüllen.

Ein jahrelang heftig diskutiertes Thema ist die vermeintliche Gefahr, die etwa für Fußgänger oder Radfahrerende davon ausgehe, dass elektrifizierte Fahrzeuge aufgrund des sehr leisen Außengeräusches bei niedrigen Geschwindigkeiten überhört werden könnten. Die US-amerikanische Verkehrssicherheitsbehörde NHTSA, die im Zeitraum von 2000 bis 2007 sämtliche Unfallstatistiken auswertete, ermittelte ein erhöhtes Gefahrenpotenzial

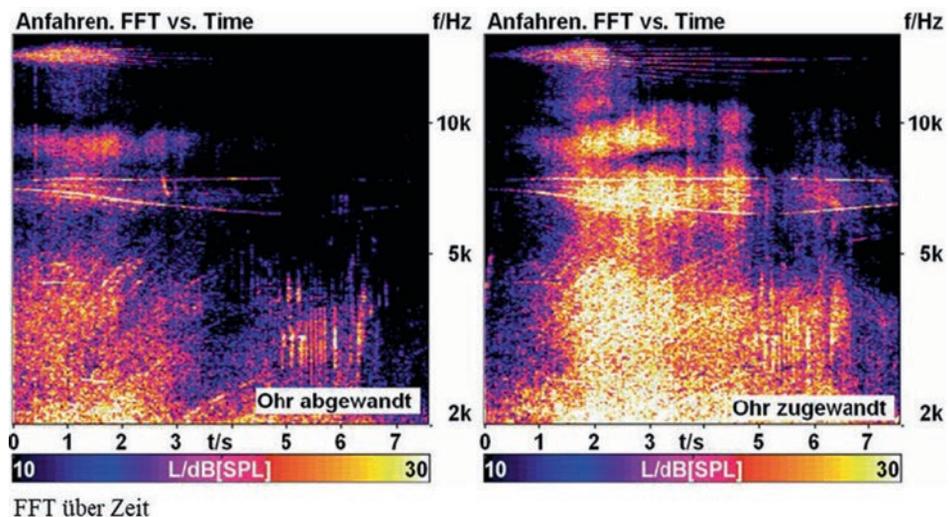


Abb. 21.12 Vorbeifahrtmessung einer Anfahrtsituation eines Elektrofahrzeugs (Serienfahrzeug). (vgl. Kampker et al. 2018)

von Elektrofahrzeugen für die Kollision mit Fußgängern.⁹⁶ Die Studie befürwortet akustische Warnsignale zur Gefahrenvermeidung als Konsequenz der Ergebnisse und erzeugte einen wegweisenden Impact. Die tatsächliche Aussagekraft dieser vielzitierten Studie ist allerdings kontrovers. Unter anderem sind methodische Schwächen ein häufig angemahnter Kritikpunkt.⁹⁷ Ungeachtet der Schwächen der Studie ist ein erhöhtes Risiko der Nichtwahrnehmung elektrischer Fahrzeuge bei niedrigen Geschwindigkeiten insbesondere für Menschen mit beeinträchtigtem Hörvermögen intrinsisch gegeben. Diese technische Besonderheit bedarf daher einer sicherheitssteigernden Reaktion.

Die Politik reagierte mit Gesetzen zur Gewährleistung von Mindestgeräuschpegeln. Primäres Ziel war es, die Vermeidung von Verkehrsunfällen und Todesfällen sicherzustellen. Die Details der gesetzlichen Anforderungen unterscheiden sich indes regional. In Europa wurde die Verordnung (EU) Nr. 540/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates über den Geräuschpegel von Kraftfahrzeugen und von Austauschschalldämpferanlagen am 16. April 2014 verabschiedet. Diese Verordnung verpflichtet die Hersteller zum Verbau eines akustischen Fahrzeug-Warnsystems („Acoustic Vehicle Alerting System“ – AVAS) in jedem Typ von Hybridelektro- und reinen Elektrofahrzeugen. Die Umsetzung wurde zum 1. Juli 2019 für neue Typen dieser Fahrzeuge und zum 1. Juli 2021 für alle Hybridelektro- und reinen Elektrofahrzeuge gefordert. Daraus resultierte eine Übergangszeit von zwei Jahren für bereits mit einer Typgenehmigung homologierte Hybridelektro- und reine Elektrofahrzeugtypen zur verpflichtenden Ausstattung mit AVAS.⁹⁸

Die Wirtschaftskommission für Europa bei den Vereinten Nationen (UNECE) veröffentlichte am 5. Oktober 2016 die Regelung Nr. 138 – „Einheitliche Bestimmungen für die Genehmigung geräuscharmer Straßenfahrzeuge hinsichtlich ihrer verringerten Hörbarkeit“ und damit ausführlichere Anforderungen an die Leistung von AVAS. Das System muss bei Rückwärtsfahrt und Vorwärtsfahrt bis 20 km/h einen Mindestschallpegel des Fahrzeugs gewährleisten. Der vom Terzband des Geräuschs abhängige Schallpegel beträgt mindestens 56 dB(A) und maximal 75 dB(A) bei Vorwärtsfahrt. Das System muss bei allen Fahrzeugen der Klassen M und N – Pkw, Lkw und Busse – verbaut werden, die in mindestens einem Gang vorwärts oder rückwärts ohne Verbrennungsmotor fahren können. Eine Möglichkeit der Deaktivierung des Systems durch den Fahrer ist ausdrücklich verboten.⁹⁹

In den USA wurde ein ähnliches Gesetz erlassen. Vergleichbar mit dem entsprechenden europäischen Gesetz trat es am 1. September 2019 in Kraft. Die wesentlichen Unterschiede zu den Anforderungen der UNECE liegen im Geltungsbereich des verpflichtenden Mindestgeräuschs, das für Fahrzeuge mit einem Gewicht von weniger als 4536 kg obligatorisch ist. Dementsprechend sind schwere Fahrzeuge – zum Beispiel Lkw und Busse – von dieser Regelung befreit. Der Geschwindigkeitsbereich der von der NHTSA (National

⁹⁶Vgl. National Highway Traffic Safety Administration 2014.

⁹⁷Vgl. U. Sandberg et al. 2010.

⁹⁸EUR-Lex – 32014R0540 – DE – EUR-Lex 2021.

⁹⁹UN Regulation No. 138 – Rev.1 – Amend.2|UNECE 2021.

Highway Traffic Safety Administration) definierten Anforderungen unterscheidet sich ebenso vom europäischen Pendant. In den USA muss das System bis zu einer Geschwindigkeit von 30 km/h aktiv sein. Gleiches gilt bei Stillstand und aktiver Fahrbereitschaft.¹⁰⁰

21.5.5 Ausblick

Akustikingenieurinnen und -ingenieure sehen sich mit neuen Herausforderungen bei steigenden Komfortansprüchen und zunehmendem Wettbewerbsdruck konfrontiert. Neben den notwendigen Bemühungen zur Emissionsreduktion im Prozess der Fahrzeugentwicklung wird weiterhin die Erfüllung emotionaler Bedürfnisse potenzieller Kunden und Kundinnen einen besonderen Stellenwert einnehmen. Dabei spielen der empfundene akustische Komfort und das Thema NVH eine essenzielle Rolle. Geräusche werden permanent bewusst oder unbewusst registriert und interpretiert. Bereits die ersten Empfindungen generieren unmittelbar einen kaum zu korrigierenden Qualitätseindruck. Daher ist das aktive Sounddesign ein elementarer Bestandteil bei der Entwicklung elektrischer Fahrzeuge. Denn ein Fahrzeug wird nicht nur gefahren, sondern es wird – auch oder gerade bei neuartigen Antrieben und innovativen Konzepten – multisensorisch erlebt und danach beurteilt.

Die einzelne Optimierung der Geräusche von Elektromotor, Umrichter oder Getriebe ist dafür unzureichend. Vielmehr muss die Gesamtkomposition harmonisch abgestimmt werden. Grundlegende Anforderungen wie die Vermeidung ungewollter Geräusche sind die Voraussetzung für ein gelungenes Sounddesign. Über Erfolg und Misserfolg entscheiden allerdings Begeisterungsfaktoren. Die Zusammenarbeit weltberühmter Komponisten mit Herstellern von Elektrofahrzeugen beim Sounddesign verdeutlicht den Stellenwert dieser Aufgabe in der Automobilindustrie. Sound Branding durch emotionale und erlebnisorientierte Differenzierung wird somit zu einer der Hauptaktivitäten der Akustikentwicklung von Elektrofahrzeugen.

Sobald der Großteil der innerstädtischen Mobilität durch elektrische Fahrzeuge erfolgt, werden Akustiker vor weiteren Herausforderungen stehen, da der Grundklang der Straßen dann die Komposition der individuell optimierten Fahrzeuge ist. Dabei gilt es, ein Durcheinander von Klängen zu verhindern, die zwar individuell optimiert sind, aber in ihrer Überlagerung nicht zusammenpassen.

Diese geschilderten Aspekte bedeuten eine Revolution in der Aufgabenstellung des Sounddesigns von Fahrzeugen. Nach einer mehr als 120-jährigen kontinuierlichen Entwicklung im Automobilbereich, in dem der Klang des Verbrennungsmotors schrittweise optimiert wurde, kommen innovative Antriebskonzepte, virtuelle Geräusche und steigende psychoakustische Anforderungen auf, die neue Betrachtungsweisen und Ansätze erfordern. Das Sounddesign von Elektrofahrzeugen ist eine Aufgabe, die die gezielte Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen erfordert.

¹⁰⁰Vgl. [Federal Register](#) 2019.

21.6 Elektromagnetische Verträglichkeit

Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) beschreibt im vorliegenden Fall das Zusammenwirken von E-Mobilen mit elektromagnetischen Störfaktoren. Zum Schutz der Umgebung darf ein Fahrzeug keine Störungen in Form von elektromagnetischer Strahlung abgeben. Zum eigenen Schutz muss das Fahrzeug zudem etwaigen Störfaktoren von außen gegenüber robust sein. Das bedeutet, dass seine Funktionsfähigkeit bei einwirkenden Störfrequenzen vollständig erhalten bleiben muss. Mit der steigenden Anzahl elektrischer und elektronischer Komponenten in den Fahrzeugen sowie dem Voranschreiten der Elektromobilität nehmen auch die Anforderungen an die EMV immer weiter zu.

21.6.1 Einführung

Für die Entwicklung von Elektrofahrzeugen ist der Aspekt der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) von großer Bedeutung. Neben dem konventionellen Bordnetz müssen Systeme zur Speicherung der elektrischen Energie, zur Steuerung und zum elektrischen Antrieb auf einer wesentlich höheren Spannungsebene in das Fahrzeug integriert werden. Die Kopplung zwischen den verschiedenen Netzwerken im Fahrzeug sowie der weiteren Umgebung führt zu anspruchsvollen Herausforderungen bei der Realisierung der EMV.

Damit ein Fahrzeug elektromagnetisch verträglich ist, darf es keine Störungen in seiner Umgebung freisetzen. Umgekehrt darf es auf Störungen aus der Umwelt nicht empfindlich reagieren. Ursächlich für elektromagnetische Störungen sind Ströme – beziehungsweise genauer: Stromänderungen – in den elektrischen Bauteilen und Baugruppen. Stromänderungen ergeben sich insbesondere bei plötzlichen starken Belastungen oder hohen Frequenzen im Stromfluss. Diese treten im Kontext von Elektrofahrzeugen speziell in denjenigen Komponenten auf, in denen Spannungen auf ein anderes Niveau oder zwischen Gleich- und Wechselspannung gewandelt werden. Elektrofahrzeuge weisen somit im Vergleich zu konventionellen Verbrennungsmotor-Fahrzeugen gravierende, bisher weniger stark zu berücksichtigende EMV-Aspekte auf. Der Fokus liegt dabei auf zwei Arbeitsfeldern: Störaussendung und Störfestigkeit der Elektrofahrzeuge.¹⁰¹

Ein elektrischer Antriebsstrang enthält einen Energiespeicher, der die Traktionsenergie bereitstellt. Die Spannung solcher Speicher beträgt bis zu 800 Volt in Anwendungen der L7e-Klasse bis zum 40-Tonner für den Langstreckentransport. Die Leistung für den Antrieb reicht dabei von 15 bis 800 kW – entsprechend hohe Ströme treten im Hochvolt-Bordnetz auf. Mit Blick auf EMV stellen unter anderem kurzfristige Stromspitzen eine Herausforderung dar. Die Steckersysteme für das Laden der Hochvoltbatterie ermöglichen heute Ladeleistungen von bis zu 500 kW, bei denen Ströme von bis zu 500 A auftreten.¹⁰²

¹⁰¹ Vgl. Guler et al. 2019.

¹⁰² Vgl. Ronanki et al. 2019.

Starke und schnell wechselnde elektromagnetische Felder können insbesondere im Bereich der Umrichter für den Elektromotor auftreten. Der Umrichter wandelt die Gleichspannung der Batterie in Drehstrom für den Antrieb um. Wechselspannungen existieren im Fahrzeug außerdem beim „Tanken“ an AC-Ladestationen. Die Wechselspannung von bis zu 400 V wird hier im „On-Board-Charger“ (OBC) zu Gleichstrom für die Batterie gewandelt. Eine noch größere Quelle für Störungen stellen unterdessen induktive Ladelösungen dar. Sie haben sich derzeit jedoch noch nicht durchsetzen können und bilden vergleichsweise kleine Ladeleistungen ab. Induktives Laden ist jedoch Gegenstand kontinuierlicher Forschungsaktivitäten. Ferner sind Gleichspannungswandler erforderlich, die die Batteriespannung in eine konventionelle Bordnetzspannung transferieren, über die die Fahrzeugkomponenten außerhalb des Antriebs versorgt werden. Neben Gleichspannungswandlern kommen – vor allem im Nutzfahrzeugbereich – auch Wechselrichter zum Einsatz, um AC-Nebenaggregate zu versorgen. Die internen Taktfrequenzen der Frequenzumrichter und Gleichspannungswandler sind Quellen für potenzielle elektromagnetische Störungen. Daher benötigt die Störfestigkeit gegen elektromagnetische Störstrahlung eine erhöhte Aufmerksamkeit.¹⁰³

Erfahrungen im Umgang mit derart hohen Gleich- und Wechselspannungen liegen in der Entwicklung konventioneller Fahrzeuge, die mit Nennbordspannungen von 12 V bei Pkw beziehungsweise 24 V bei Nutzfahrzeugen arbeiten, bisher nur begrenzt vor und werden im Zuge der Elektrifizierung kontinuierlich ausgebaut.

Da die in Elektrofahrzeugen geschalteten elektrischen Leistungen um einige Größenordnungen über den bisher im Auto auftretenden Leistungen liegen, verursachen sie auch wesentlich größere Störungen. Diese Störungen können bei fehlerhaften Entwicklungen interne Komfortfunktionen – etwa das Infotainmentsystem oder Sicherheitsfunktionen wie das Antiblockiersystem (ABS) und das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) – negativ beeinflussen und sind dementsprechend kritisch. Der Störeinfluss ist nicht auf das Fahrzeug begrenzt, sondern betrifft auch die Umgebung. Ohne geeignete EMV-optimierte Maßnahmen besteht die Gefahr, dass die gesetzlich zulässigen Grenzwerte, unter anderem für den Personenschutz, überschritten werden.

Als Schutzmaßnahme gegen Störungen und zur Erreichung einer elektromagnetischen Verträglichkeit müssen daher Maßnahmen auf sämtlichen Systemebenen getroffen werden. So werden störanfällige Systeme bereits auf Komponentenebene abgeschirmt und Leistungsleitungen sowie Stecker ebenfalls im Kabel geschirmt. Sämtliche Leitungen zwischen der Batterie und den Schaltteilen bis hin zum Motor müssen hochfrequenzdicht sein. Abschirmungs- und Filtermaßnahmen verursachen enorme Kosten für die Automobilhersteller.

Aufgrund der hohen Komplexität, wegen einer deutlich höheren Spannungsebene gegenüber den konventionellen Bordnetzen und wegen schnellerer Schaltvorgänge von leistungselektronischen Systemen mit höheren Strömen können die EMV-Anforderungen des Gesamtsystems im Fahrzeug nur dann erfüllt werden, wenn man sie vorerst auf Kom-

¹⁰³Vgl. ZVEI 2021.

ponenten- beziehungsweise Systemebene detailliert und die EMV-Eigenschaften auf diesen Ebenen gezielt entwickelt. Die Einhaltung der EMV muss bei der Integration in das Gesamtfahrzeug erhalten bleiben. Die Verantwortung dafür, dass das Fahrzeug in der elektromagnetischen Umgebung bestimmungsgemäß funktioniert, liegt beim Hersteller.¹⁰⁴ Die Komplexität an EMV-Anforderungen wächst jedoch nicht nur durch die gestiegenen Systemspannungen. Auch die rapide zunehmende Anzahl elektronischer Einrichtungen im Fahrzeug erhöht die Gefahr, dass sich die einzelnen Komponenten gegenseitig beeinflussen.

Das reibungslose Zusammenwirken elektronischer Systeme im Kfz stellt äußerst hohe Ansprüche an die EMV. Aus diesem Grund verlangen die Automobilkonzerne die Prüfung der elektrischen und elektronischen Unterbaugruppen nach wesentlich schärferen Kriterien, als es für die Typenzulassung (zum Beispiel für e1, CE, ECE R10) vorgeschrieben ist. Der Druck einer EMV-konformen Entwicklung wird bis auf Halbleiterebene weitergegeben. So werden integrierte Schaltungen („Internal Circuit“ – IC) häufig als Ursache für Störungen betrachtet. Dementsprechend werden ein hohes Maß an Störfestigkeit und gleichzeitig geringe Störemissionen gefordert.

Für die EMV-Prüfung integrierter Schaltungen werden zwei Normen – IEC 61967 und IEC 62132 – zur Messung der Störemission beziehungsweise der Störfestigkeit herangezogen. Für die Typgenehmigung sind jedoch nur die gesetzlichen Mindestanforderungen nachzuweisen. Aus Gründen der Produkthaftung des Herstellers gegenüber dem Endkunden werden in den Pflichtenheften der Automobilhersteller Prüffeldstärken gefordert, die ein Vielfaches über jenen der europäischen Richtlinie liegen.

Der Nachweis der Erfüllung der EMV-Anforderungen erfolgt in der Kraftfahrzeugentwicklung auf Labor- und Fahrzeugebene. Die Komponenten werden einerseits in einer Fahrzeugnachbildung und andererseits im realen Fahrzeug getestet. Für diese Prüfung sind EMV-relevante Betriebszustände des Antriebssystems zu ermitteln. Insbesondere beim Anfahren und Bremsen entstehen hohe Stromspitzen, die durch schnelle Schaltvorgänge zu breitbandigen Störspektren führen. Als weiteres Hilfsmittel in der Entwicklung dienen die Modellierung und die Simulation der Komponenten sowie des Gesamtsystems. Simulationen bieten die Möglichkeit, frühzeitig zu erkennen, wo die höchsten Feldstärken auftreten und wie das günstigste Routing der Leitungen verlaufen kann. Die Simulationsmodelle helfen dabei, im Vorfeld mögliche Koppelpfade sowie Störquellen zu identifizieren und zielgerichtet geeignete Maßnahmen wie Materialauswahl und Filterung zu ergreifen. Bei den Berechnungen können jedoch größere Ungenauigkeiten auftreten. Daher ist eine Simulation der Störquellen alleine nicht ausreichend. Tests auf Komponenten- und Fahrzeugebene sind unverzichtbar.¹⁰⁵ Gleichwohl bedeutet eine vorangegangene Simulation eine signifikante Kostenreduktion und Beschleunigung in der Entwicklung.

Neben der Notwendigkeit, spezifisches neues Know-how aufzubauen und die Weiter- und Fortbildung in diesem Bereich auszubauen, sind erhebliche Investitionen in die Ent-

¹⁰⁴ Vgl. UN/ECE 2012.

¹⁰⁵ Vgl. Hein et al. 2017.

wicklung einer an die neuen Anforderungen angepassten EMV-Prüfungsumgebung unumgänglich. Anforderungen der Störabstrahlung und Störeinstrahlung sind nicht nur für ein Elektrofahrzeug und damit auch für ein Hybridfahrzeug gültig, sondern bestehen im gleichen Maß für alle beteiligten Systemkomponenten. Nur wenn diese Anforderungen erfüllt werden, kann die elektromagnetische Verträglichkeit der Fahrzeuge gewährleistet werden.

21.6.2 Historische Entwicklung

Seit den Anfängen des Automobils ist die Anzahl der Steuergeräte und der elektronischen Geräte im Fahrzeug stetig gestiegen. Mit Blick auf elektrisch angetriebene Fahrzeuge nimmt die Anzahl elektrischer und elektronischer Komponenten weiter zu.¹⁰⁶ Infolgedessen ist die Höhe des Störpegels und die Wahrscheinlichkeit, eine Störung auszulösen, ebenfalls gewachsen. Zudem hat die Größe der elektronischen Geräte kontinuierlich abgenommen, so dass die elektrische Packungsdichte gestiegen ist. Dadurch rücken die Störquellen immer näher an die Störquellen heran und die geringere Leistungsaufnahme erhöht die Empfindlichkeit gegenüber Störungen. Auch die Taktfrequenz wurde stetig erhöht – und mit der Einführung von Digitaltechnik auch die Flankensteilheit.¹⁰⁷ Daraus ergeben sich ein höherfrequenterer Störpegel und die Erhöhung des Störbandes (breitbandiger).

1934 wurden durch den „Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik“ (VDE) Leitsätze der Funkentstörung eingeführt. Richtlinien zur Störfestigkeit folgten erst Mitte der 1960er-Jahre. Bei den elektrischen Einbauten ins Fahrzeug bis 1970 standen im Wesentlichen die Entstörung von Zündung und Elektromotoren im Fokus der EMV. Mit den ersten Hybridfahrzeugen Ende der 1990er-Jahre sorgten die hohen Ströme für neue Herausforderungen im Bordnetz. Gleichzeitig stieg die Anzahl der Steuergeräte und somit der Vernetzungsgrad im Fahrzeug über CAN-Busse. Mit den ersten in größerer Serie hergestellten Elektrofahrzeugen in den 2000er-Jahren ist die Bedeutung des elektrischen Bordnetzes für den Antrieb erneut gestiegen.¹⁰⁸

EMV wird im Zusammenhang mit Normung nur auf Antriebs- und auf Gesamtsystemebene unter Einschluss der Batterie betrachtet. Wesentliche Bemessungsgrundlage für Elektrofahrzeuge werden in der ECE R 10 festgehalten, die seit 2019 in der mittlerweile sechsten Revision vorliegt.¹⁰⁹ Die Überprüfung auf Einhaltung der rechtlichen Grenzwerte der Emissionen beziehungsweise die notwendige Störfestigkeit ist im Rahmen der Fahrzeugzulassung in speziellen Laboren nachzuweisen. Eine wesentliche Herausforderung liegt dabei in der exakten Nachbildung der in der Praxis auftretenden und zu erwartenden Lastfälle im Bordnetz.

¹⁰⁶ Vgl. Meissner et al. 2020.

¹⁰⁷ Vgl. Lannoo 2020.

¹⁰⁸ Vgl. Kampker et al. 2018.

¹⁰⁹ Vgl. United Nations 2019.

Die Normierung in Bezug auf EMV unterliegt einem kontinuierlichen Wandel, welcher auch der gestiegenen Leistungsfähigkeit der Systeme nachkommen muss. Speziell für das Laden traten in der Vergangenheit beispielsweise die IEC 61851-21-1 (2017)¹¹⁰ und die IEC 61851-21-2(2018)¹¹¹ in Kraft.

21.6.3 Kopplungsmodell und Kopplungsmechanismen

Im Zuge der Mobilitätswende sowie der kontinuierlichen Entwicklungsschritte autonomer Fahrsysteme werden zunehmend elektrische und elektronische Komponenten im Fahrzeug verbaut – zum Beispiel in Form von Frequenzumrichtern, der Hochvolt-Batterie und Hochvolt-Nebenaggregaten. Gleichzeitig steigen die Taktfrequenzen der Steuergeräte und der Antriebselektronik. Damit erhöht sich auch das Risiko der gegenseitigen Beeinflussung und der damit verbundenen Funktionsbeeinträchtigungen.

Das Wirkungsprinzip der elektromagnetischen Beeinflussung zweier Komponenten lässt sich durch das Kopplungsmodell beschreiben, das von den Begriffen „Störquelle“, „Kopplungspfad“ und „Störsenke“ ausgeht. Störungserzeugende Fahrzeugkomponenten (wie der Umrichter) oder solche aus der Umgebung (etwa Funkmasten) werden als „Störquelle“ und die beeinflusste Komponente als „Störsenke“ bezeichnet. Damit es zu einer Beeinflussung der Senke durch die Quelle kommen kann, muss die Störung zur Senke gelangen. Der Weg zwischen Quelle und Senke wird „Kopplungspfad“ genannt. Das Zustandekommen einer Störung wird über das Kopplungsmodell beschrieben (vgl. Abb. 21.13).

Klassische Beispiele für potenzielle Störquellen und Störsenken sind unterdessen in Abb. 21.14 dargestellt.

Das wesentliche Kriterium der Güte einer Signalübertragung ist in der EMV der Störabstand zwischen Störquelle und -senke. Der Störabstand ist maßgeblich davon abhängig,

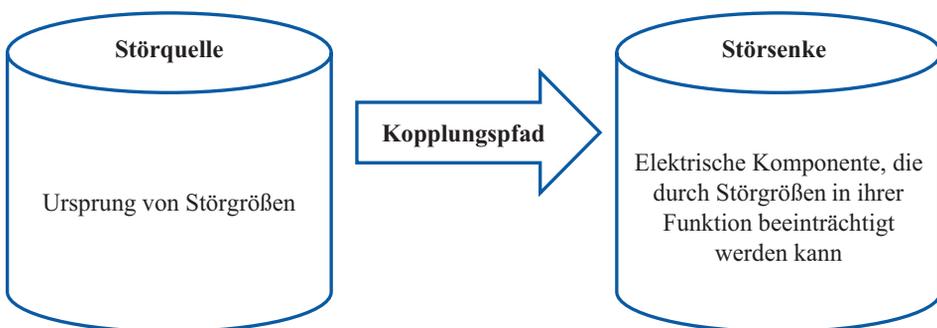


Abb. 21.13 Das Kopplungsmodell. (vgl. Busch 2015, S. 492)

¹¹⁰Vgl. International Electrotechnical Commission 2017.

¹¹¹Vgl. International Electrotechnical Commission 2018.

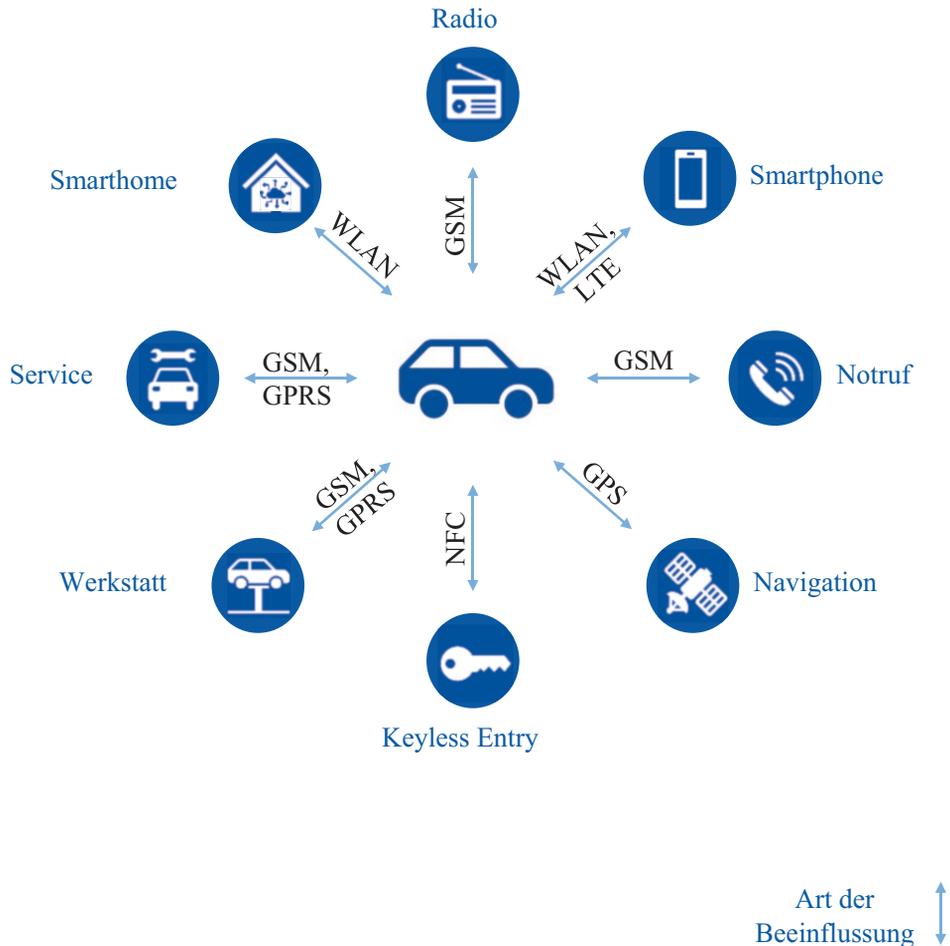


Abb. 21.14 Elektromagnetische Umwelt im Kraftfahrzeug. (vgl. Reif 2011, S. 542f)

ob sich die Störquelle und -senke im selben System beziehungsweise in derselben Baugruppe befinden. Wie in Abb. 21.15 dargestellt, wird zwischen der Intersystem- und der Intrasystem-Beeinflussung unterschieden. Letztere beschreibt die Beeinflussung der Störquelle durch eine Störquelle im selben System. Eine Intersystem-Beeinflussung liegt hingegen bei mindestens zwei verschiedenen Systemen vor.¹¹²

Auch wenn die genannten Bedingungen – Störquelle, Störquelle und Kopplungspfad – erfüllt sind, kommt es erst dann zu einer Störung, wenn die Beeinflussung die Störfestigkeit einer Komponente überschreitet. Die Störfestigkeit beschreibt die Fähigkeit eines Systems, in einer elektromagnetisch gestörten Umgebung ohne Fehler oder Defekte zu funktionieren. Dabei wird zwischen Eigen- und Fremdstörfestigkeit unterschieden. Erste-

¹¹²Vgl. Schwab et al. 2011, S. 3.

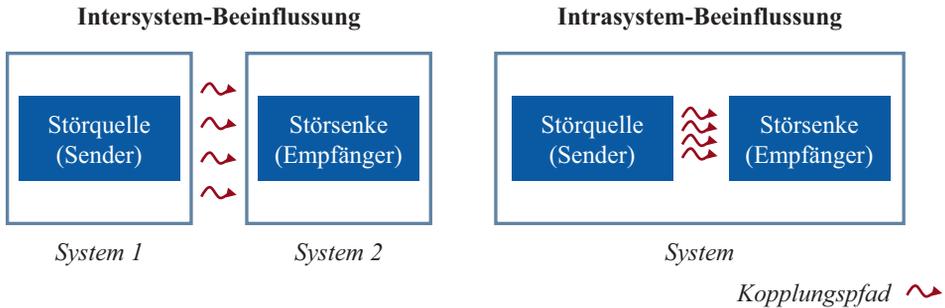


Abb. 21.15 Intersystem-Beeinflussung und Intrasystem-Beeinflussung (rechts). (vgl. Schwab et al. 2011, S. 4)

res bezeichnet die Robustheit gegen Intrasystem-Beeinflussung – das heißt gegenüber Störungen im selben System (interne EMV). Im Gegensatz dazu beschreibt die Fremdstörfestigkeit die Immunität gegenüber Intersystem-Beeinflussung – also Störungen systemfremder Komponenten (externe EMV).¹¹³

Grundsätzlich gibt es fünf Kopplungsmechanismen, über die ein Störsignal von einer Störquelle zu einer Störsenke gelangen kann. Man unterscheidet zwischen der galvanischen, kapazitiven und induktiven Kopplung, der elektromagnetischen Leitungskopplung sowie der Strahlungskopplung (vgl. Abb. 21.16). Eine Beschreibung der Kopplungsmechanismen ist in Tab. 21.3 dargestellt.

Gerade die Identifikation der jeweiligen Kopplungsmechanismen und -pfade ist herausfordernd, da es sich oft um parasitäre Übertragungswege (Streukapazitäten, Streuinduktivitäten) handelt. Zudem liegen häufig mehrere Kopplungspfade gleichzeitig vor. Eine eindeutige Bestimmung des Kopplungspfads ist daher nur selten möglich.¹¹⁴ Um diesem Problem vorzubeugen, sieht der Gesetzgeber Richtlinien vor. In Deutschland werden entsprechende Verantwortlichkeiten im „Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln“ (EMVG) geregelt.¹¹⁵ Demnach ist der Hersteller eines Geräts dazu verpflichtet, eine EMV-Bewertung seiner Komponente vorzunehmen und das System mit Hilfe geeigneter Maßnahmen abzusichern (Erhöhung der Fremdstörfestigkeit). Gleichzeitig muss der Hersteller die Störemission seiner Störquelle minimieren, um die EMV anderer Systeme zu gewährleisten (Verringerung der Störemissionen).¹¹⁶ Eine entsprechende Richtlinie oder Norm, welche die Eigenstörfestigkeit einer Komponente regelt, existiert nicht. Die Ursache dafür ist, dass die Eigenstörfestigkeit ein grundlegendes Produktmerkmal einer elektrischen beziehungsweise elektronischen Komponente darstellt. Ein Wechselrichter, der aufgrund fehlender Eigenstörfestigkeit keinen störungs-

¹¹³Vgl. Durcansky 1999, S. 17ff.

¹¹⁴Vgl. Tschöke et al. 2020, S. 363.

¹¹⁵Vgl. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz 2016.

¹¹⁶Vgl. Bundesministerium des Justiz und für Verbraucherschutz 2016.

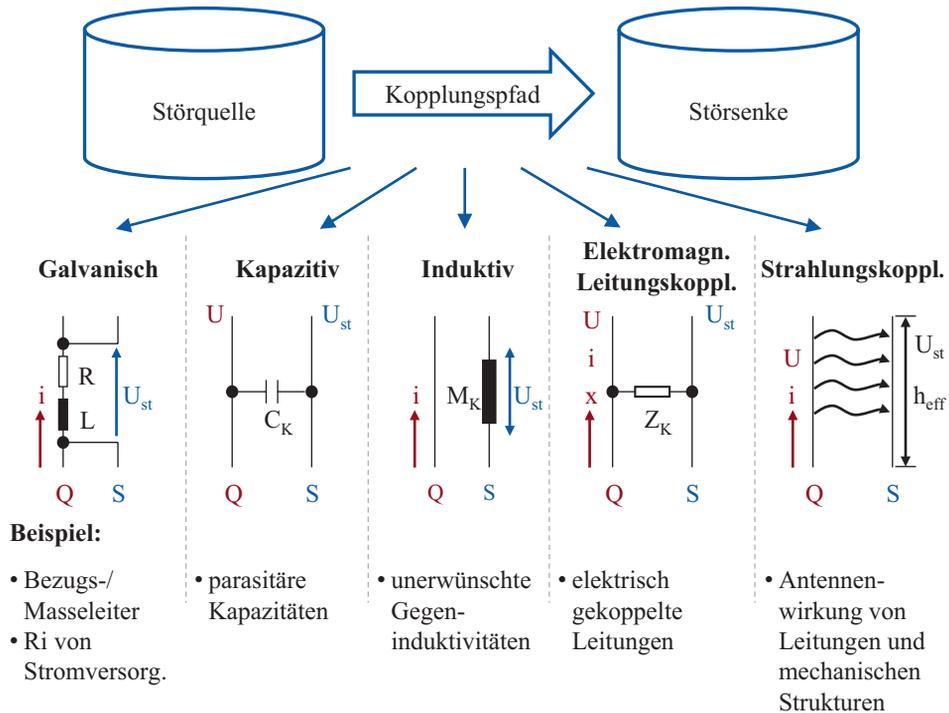


Abb. 21.16 Die Kopplungsmechanismen der Kopplungspfade. (vgl. Reif 2011, S. 543ff., vgl. Schwab et al. 2011, S. 99ff)

Tab. 21.3 Beschreibung der Kopplungsmechanismen^a

Kopplungsmechanismus	Beschreibung der Kopplungsmechanismen
Galvanisch	Störsignalübertragung aufgrund einer gemeinsamen Impedanz unterschiedlicher Stromkreise
Kapazitiv	Störsignalübertragung aufgrund des quasistatisch-magnetischen Nahfelds zwischen Bereichen mit relativ großen Potenzialdifferenzen
Induktiv	Störsignalübertragung aufgrund des quasistatisch-magnetischen Nahfelds in der Umgebung von relativ großen Strömen
Elektromagnetische Leitungskopplung	Störsignalübertragung aufgrund parallel geführter Strukturen, wobei die Länge ausreichend groß ist, dass Wellenausbreitung auftritt und die elektrischen und magnetischen Nahfelder nicht mehr als quasistatisch angesehen werden können
Strahlungskopplung	Störsignalübertragung aufgrund der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen zwischen voneinander entfernten Strukturen (elektromagnetische Fernfelder). Schaltungsstrukturen können ungewollt als Sende- und Empfangsantenne wirken.

^aVgl. Gustrau und Kellerbauer 2015, S. 48f.

freien Betrieb gewährleisten kann, wird sich langfristig nicht am Markt behaupten können, da es ihm an einem entscheidenden Qualitätsmerkmal fehlt.¹¹⁷

21.6.4 EMV-Design am E-Fahrzeug

Im Gegensatz zu konventionellen Fahrzeugen, die als potenzielle EMV-Störquelle lediglich die Zwölf-Volt-Bordelektronik besitzen, müssen in Elektrofahrzeugen weitere Komponenten berücksichtigt werden. Dazu gehören insbesondere leistungselektronische Komponenten, die aufgrund vieler Schaltvorgänge entsprechend hohe Störaussendungen verursachen.¹¹⁸ Infolge hoher Störemission können ungewollte Signale sowohl leitungsgelassen oder über elektromagnetische Wellen übertragen werden. Eine derartige Störung kann im Fahrzeugbetrieb Fehler hervorrufen – etwa das ungewollte Auslösen des Airbags – und damit die Sicherheit der Passagiere sowie des Straßenverkehrs gefährden. Aus diesem Grund sind das Zwölf-Volt-Bordnetz sowie die daran angeschlossenen Komponenten unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Störungen auszuführen.

Um die EMV zu gewährleisten, werden für Straßenfahrzeuge entsprechende Prüfverfahren in der Normenreihe ISO 11451 festgehalten.¹¹⁹ Dabei gelten die Anforderungen sowie Grenzwerte insbesondere für Komponenten mit hohem Störquellenpotenzial. Dazu gehören vor allem die leistungselektronischen Komponenten des Antriebsstrangs. Richtlinien zu Prüfverfahren und Testläufen, die sich speziell auf den elektrischen Antriebsstrang fokussieren, sind zudem in der qualitäts- und funktionssichernden Norm ISO 21782 beschrieben.¹²⁰ Um die geforderten Grenzwerte erreichen zu können, müssen Hersteller in der Praxis diverse Maßnahmen ergreifen. Übergeordnet werden mit ihrer Hilfe drei Ziele verfolgt, die aus dem Kopplungsmodell hervorgehen:

- Verminderung der Störemission durch die Störquelle
- Abschwächung der Kopplung zwischen Störquelle und Störsenke
- Erhöhung der Störfestigkeit der Störsenke¹²¹

In der Praxis haben sich verschiedene Maßnahmen zur Erhöhung der EMV und zur Vorbeugung typischer Störungsbilder etabliert. Insbesondere leistungselektronische Komponenten (etwa Frequenzumrichter) stellen hohe EMV-Anforderungen an ihre Umgebung. Im Antrieb beziehungsweise zwischen Antriebskomponenten und Umrichter finden daher meist EMV-Filter Anwendung, um Störströme zu reduzieren. Außerdem werden Y-

¹¹⁷Vgl. Jeromin, S. 5.

¹¹⁸Vgl. Sebastian Jeschke 2016, S. 17.

¹¹⁹Vgl. International Organization for Standardization 2015.

¹²⁰Vgl. International Organization for Standardization 2019.

¹²¹Vgl. Tschöke et al. 2020, S. 362.

Kondensatoren auf der Gleichspannungsseite des Umrichters verbaut, um Gleichtaktstörungen zu minimieren. Ebenso haben Kabelparameter einen maßgeblichen Einfluss auf die entstehenden Störaussendungen. Beispielsweise ist die Kabelkapazität stark von der entsprechenden Leitungslänge abhängig, weshalb HV-Leitungen möglichst kurz realisiert werden sollten, um Schirmströme zu reduzieren. Die Schirmung von HV-Leitungen reduziert die Beeinflussung durch hochfrequente elektrische beziehungsweise magnetische Felder. Untersuchungen zeigen, dass Leitungen mit Summenschirmung eine geringere Kabelkapazität aufweisen, so dass auftretende Schirmströme abgeschwächt werden. Im Automobilbau ist jedoch der Bauraum ein weiterer begrenzender Parameter. Summenschirmungen, die relativ unbeweglich sind und mit zunehmendem Querschnitt kontinuierlich Flexibilität verlieren, lassen sich nur aufwendig im Kfz verlegen. Aus diesem Grund werden in heutigen Fahrzeugen überwiegend einzeln geschirmte (HV-) Leitungen vorgesehen.¹²²

Eine besondere Herausforderung im Kfz stellen indes die Steckverbinder dar. Durch Verschmutzung oder Alterungseffekte (Abnutzung) steigt der Übergangswiderstand am Verbinder an. Infolge hoher Übergangswiderstände können undefinierte Strompfade für hochfrequente Störströme entstehen. Insgesamt erhöht dies die Systemanfälligkeit, da die Schirmwirkung dauerhaft verringert wird.¹²³

In Elektroautos wird das Schirmkonzept üblicherweise für das HV-Bordnetz sowie für Verbindungen zwischen Umrichter und Motor eingesetzt. Während EMV-Problemen am Umrichter über entsprechende EMV-Filter begegnet werden kann, sollte das restliche HV-Bordnetz vollständig geschirmt ausgeführt werden und die Schirmung zwecks Potenzialausgleichs mit der Fahrzeugkarosserie verbunden werden.¹²⁴ Obwohl die Schirmung des gesamten HV-Bordnetzes vergleichsweise kostenintensiv ist, überzeugt diese Maßnahme, indem zahlreiche Komponenten, die mit dem HV-Bordnetz verbunden sind, gleichzeitig gegen elektromagnetische Störungen geschützt werden. Von entscheidender Relevanz ist dabei die lückenfreie Ausführung der Schirmung, da kleine Unterbrechungen zu einem massiven Abfall der Schirmwirkung führen können.¹²⁵

Zusammenfassend kann die sachgemäße Funktion eines Elektrofahrzeugs nur dann erreicht werden, wenn die Entwicklung sowie der Einbau von Komponenten ins Fahrzeug neben den betriebstechnischen Anforderungen auch die Präventionsmaßnahmen der EMV erfüllen (zum Beispiel Erdung, Schirmung, Filterung). Tab. 21.4 zeigt eine detaillierte Übersicht typischer Kopplungsmechanismen sowie EMV-Maßnahmen am Elektrofahrzeug.

¹²²Vgl. Sebastian Jeschke 2016, S. 25f.

¹²³Vgl. Tschöke et al. 2020, S. 367.

¹²⁴Vgl. Proff 2019, S. 285.

¹²⁵Vgl. Tschöke et al. 2020, S. 367.

Tab. 21.4 Unterschiedliche Kopplungsmechanismen sowie entsprechende EMV-Maßnahmen^{a, b, c}

Kopplungsmechanismus	Ziel der Gegenmaßnahmen	Gegenmaßnahmen am E-Fahrzeug
Galvanische Kopplung	• Potenzialtrennung	• Verwendung getrennter Masseleitungen
	• Reduzierung der Schleifenimpedanz	• Verwendung niederimpedanter Bezugsleiter • Kurze Leitungslängen • Verbindung zweier Stromkreise in einem Sternpunkt • Flächig oder vermascht ausgeführtes Bezugsleitersystem
Kapazitive Kopplung	• Reduzierung der Koppelkapazität	• Separates Verlegen von Signalleitungen
		• Schirmung der Leitungen • Nutzung von Filtern • Kurze Kabellängen
Induktive Kopplung	• Reduzierung der Induktivität	• Hin- und Rückleiter möglichst dicht beieinander ausführen
		• Verdrillen der Leiter • Unterschiedliche Schlaglängen beim Verdrillen
Elektromagnetische Leitungskopplung	• Reduzierung der Koppelkapazität/Induktivität	• Analog zum kapazitiven/induktiven Kopplungsmechanismus
Strahlungskopplung	• Reduzierung der Induktivität	• Analog zum induktiven Kopplungsmechanismus

^aVgl. Schwab et al. 2011, S. 99ff

^bVgl. Tschöke et al. 2020, S. 362ff

^cVgl. Sebastian Jeschke 2016, S. 25f

21.7 Zulassung und Zertifizierung von Batteriepacks

Die Hochvolt-Batterie bildet die Kernkomponente eines Elektrofahrzeugs. Verschiedene Segmente und Anwendungsfälle differenzieren sich vom spezifischen Design und von der Auslegung des zentral verbauten Energiespeichers in den Fahrzeugen. Die Reichweite und die Leistungsfähigkeit werden dabei elementar durch die Hochvolt-Batterie bestimmt. Für eine hohe Reichweite muss die Batterie möglichst groß mit hoher spezifischer Energiedichte ausgelegt werden. Die Energiedichte fordert eine produktseitige Absicherung des damit einhergehenden Sicherheitsrisikos. Vor Markteinführung muss eine Hochvolt-Batterie gemäß den geltenden Vorgaben zertifiziert werden. Dies gewährleistet einen Standard in Bezug auf die Sicherheit und die Leistungsfähigkeit der Batteriepacks. Verschiedene Institutionen sind an der Entwicklung der geltenden Standards beteiligt, die teilweise allgemeingültig sind oder länderspezifisch Anwendung finden. Ein internationaler Vergleich gibt darüber Aufschluss.

21.7.1 Institutionen, Standards und Normen

Gespeicherte Energie fordert – unabhängig von der vorliegenden Energieform und der Speichertechnologie – vom Anwendenden stets einen gewissenhaften Umgang mit ihr. Je nach Energieform gilt es daher, die notwendigen Sicherheitsaspekte zu beachten und diese in der Produktentwicklung sicherzustellen. Auch für die Entwicklung und den Betrieb von elektrochemischen Energiespeichern in Form von Akkumulatoren sind Sicherheitsmaßnahmen aufgrund der hohen Energiedichte von besonderer Bedeutung.

Dabei lässt sich die Sicherheit nicht durch ein einziges Kriterium oder einen einzigen Parameter bestimmen oder bewerten. Vielmehr wird sie durch die Umsetzung komplementärer Ansätze bestimmt, die zusammenwirken, um die Sicherheit zu erhöhen. Um von einem Elektrofahrzeug ausgehende Risiken zu minimieren, muss die Sicherheit auf allen Produktebenen der Batterie (Zellen-, Modul- und Packebene) bis einschließlich der Fahrzeugebene berücksichtigt werden. Aufgrund der engen Verknüpfungen jener verschiedenen Ebenen kann ein einzelner Defekt auf einer von ihnen große Auswirkungen auf die übrigen Ebenen haben. Um sowohl dem Verbraucher als auch dem Hersteller einen hohen Sicherheitsstandard zu garantieren, sind einheitliche Standards zur Zulassung zwangsläufig notwendig.¹²⁶

Die Vorgaben werden auf Basis von entwickelten Normen festgesetzt und durch Technische Dienste überwacht. Die wichtigsten Normungsinstitutionen auf nationaler und internationaler Ebene sind in Tab. 21.5 dargestellt.

Die Aufgabe einer Norm besteht darin, durch die anerkannten Regeln der Technik einen Standard festzulegen, der dem Verbraucher das Vertrauen in ein zuverlässiges Produkt ermöglicht und dem Hersteller eine Rechtsgrundlage bietet.¹²⁷

Um weltweit einen einheitlichen Standard festzulegen und zur Marktharmonisierung beizutragen, gibt es neben den länderspezifischen Normungsinstitutionen wie dem Deutschen Institut für Normung (DIN) auch internationale Institutionen wie das „European Committee for Standardization“ (CEN) oder die „International Organization for Standardization“ (ISO). Nationale Normungsinstitute sind dabei ständige Mitglieder in den höhe-

Tab. 21.5 Übersicht der relevanten Normierungsinstitutionen im Bereich Batterie

Kürzel	Institution	Wirkungskreis
ISO	International Organization for Standardization	international
IEC	International Electrotechnical Commission	international
CEN	Comité Européen de Normalisation	europaweit
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Électrotechnique	europaweit
DIN	Deutsches Institut für Normung	deutschlandweit
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE	deutschlandweit

¹²⁶Vgl. Doughty et al. 2012, S. 37ff.

¹²⁷Vgl. Schönau et al. 2013, S. 371.

ren internationalen Institutionen. Die aus diesen Institutionen – gleichgültig, ob national oder international – hervorgehenden Normen sind grundsätzlich nicht verpflichtend oder rechtsbindend – außer, wenn der Gesetzgeber ihre Einhaltung zwingend vorschreibt. Je nach Zulassungsvorschrift beinhalten die Normen spezielle Tests, denen Produkte vor ihrer Marktzulassung unterzogen werden müssen. Mit Hilfe solcher Prüfungen soll nachgewiesen werden, ob die benötigten Normen und Standards eingehalten wurden.

Das gilt auch für die Zulassung eines Elektrofahrzeugs mit Traktionsbatterie. Für den Fall, dass eine Traktionsbatterie nicht sämtliche Tests besteht und insofern den benötigten Sicherheitsstandard nicht nachweisen kann, wird die Erlaubnis, das Produkt auf den Markt zu bringen, nicht erteilt. Kann der Hersteller der Traktionsbatterie hingegen alle Testnachweise erbringen, erhält er von der zuständigen regulatorischen Behörde die Zertifizierung für das Produkt. Diese ist zwingend notwendig für die Verbreitung einzelner Fahrzeugkomponenten sowie für die Zulassung des Gesamtfahrzeugs. Ohne sie darf das Fahrzeug nicht am Straßenverkehr teilnehmen. Im Zusammenhang mit der Zulassung wird häufig von der „Typgenehmigung“ beziehungsweise speziell bei Elektrofahrzeugen von der „Homologation“ gesprochen. Dabei handelt es sich um die erwähnte Erlaubnis zur Herstellung und zum Inverkehrbringen eines Fahrzeugs oder einer bestimmten Komponente. Um nicht für jedes Land einen eigenen Nachweis für die Zulassung erbringen zu müssen, wurde in Form der sogenannten ECE-Homologation ein einheitliches Zertifizierungsverfahren entwickelt. Es verpflichtet alle ECE-Signatarstaaten dazu, die gegenseitige einheitliche Zertifizierung anzuerkennen.

Mit der immer rasanteren Weiterentwicklung der Batterietechnologie haben sich die Mitgliedstaaten der ECE-Regelung mit Beginn des Jahres 2016 für eine Erneuerung der bis dahin geltenden Vorschriften geeinigt. Um innerhalb der ECE-Signatarstaaten einheitliche Rahmenbedingungen für die Genehmigung von Fahrzeugen mit einem elektrischen Antriebsstrang zu schaffen, wurde die ECE R100 veröffentlicht. Sie enthält sicherheitsrelevante Anforderungen und Prüfungen, die notwendig sind, um eine Zulassung zu erhalten. Die Prüfungen unterteilen sich dabei in elektrische, mechanische und thermische Prüfungen. Mit Hilfe dieser Tests soll ein möglichst breites Spektrum realistischer Betriebsszenarien dargestellt werden. Ein Technischer Dienst erstellt auf Basis der Prüfergebnisse ein Gutachten, das für die Typgenehmigung bei einer Kraftfahrzeugbehörde eingereicht wird. In Deutschland ist dies das Kraftfahrt-Bundesamt. Die ECE R100 befindet sich aktuell in ihrer dritten Revision und wird somit stetig auf den aktuellen Stand der Technik gebracht.

21.7.2 Internationaler Vergleich

Bevor ein Hersteller auf dem globalen Markt Batteriesysteme in Umlauf bringen darf, müssen regional gültige Vorschriften eingehalten werden. Dabei gibt es je nach Region unterschiedliche Nachweisregularien. Im europäischen Raum ist eine CE-Kennzeichnung verpflichtend. Diese wird durch den Hersteller aufgebracht. Damit geht die Erklärung ein-

her, „dass das Produkt den geltenden Anforderungen genügt, die in den Harmonisierungsrechtsvorschriften der Gemeinschaft über ihre Anbringung festgelegt sind“ (Art. 2 Nr. 20, VERORDNUNG (EG) Nr. 765/2008). Darüber hinaus gelten in der Europäischen Union die ECE-Regelungen, die ein Übereinkommen zur Annahme einheitlicher technischer Fahrzeugvorschriften umfasst. Die Anforderungen an ein wiederaufladbares Energiespeichersystem hinsichtlich seiner Sicherheit sind dabei in der Regelung 100 (ECE-R100) niedergeschrieben. Diese ist eine von insgesamt 152 Normen (Stand: 2020), die von der UNECE zwecks der grenzübergreifenden Harmonisierung technischer Regelungen verabschiedet worden ist. Für die Vermarktung einer Lithium-Ionen-Batterie in den Ländern Europas und anderen Staaten ist eine Zulassung durch eine nationale Behörde erforderlich. Um diese Zulassung zu erlangen, ist eine erfolgreiche Prüfung nach ECE-R100 nachzuweisen. Dafür erstellt ein eigens akkreditierter Technischer Dienst auf Basis der Testergebnisse ein Gutachten, das für die Typgenehmigung bei einer Kraftfahrzeugbehörde eingereicht wird. In Deutschland handelt es sich dabei um das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), das die Akkreditierung der Technischen Dienste regelt.

Die erste Version ECE-R100 ist in Deutschland bereits 2016 verpflichtend in Kraft getreten. Sie enthält Anforderungen an ein Fahrzeug und ein wiederaufladbares Energiespeichersystem hinsichtlich deren elektrischer Sicherheit. Außerdem beinhaltet die ECE-R100-Norm jeweils verschiedene Prüfverfahren für die mechanische, thermische und elektrische Sicherheit. Die im Jahr 2022 erschienene dritte Revision der ECE-R100 umfasst insgesamt zehn Prüfungen (Tab. 21.6). Ebenfalls definiert sind die zu erfüllenden Akzeptanzkriterien für das Bestehen der Prüfungen.¹²⁸

In Nordamerika muss hingegen ein Nachweis gemäß „Underwriters Laboratories“ (UL) erfolgen. Diese Einrichtungen nehmen als unabhängige Organisation Tests und Zertifizierungen vor und vergeben anschließend ihr Prüfzeichen. Dabei erhalten Produkte keine Genehmigungen, stattdessen wird lediglich deren Einhaltung von Standards überprüft. Die Regelungen der UL 2580 werden als Grundlage für die Batterietests in vollelektrischen Fahrzeugen herangezogen. Gemäß dieser Norm sind neun Prüfverfahren bezüglich der elektrischen, fünf Prüfverfahren im Rahmen der mechanischen und fünf Prüfverfahren im Rahmen der thermischen Sicherheit vorgeschrieben (Tab. 21.7).

Ein weiterer großer Markt für Elektrofahrzeuge stellt der chinesische Raum dar. Mit dem dort geforderten „China-Compulsory-Certification“ (CCC)-Nachweis bestätigt der

Tab. 21.6 Prüfverfahren nach ECE-R100⁸⁶³

Vibration	Temperaturschock
Mechanischer Schock	Mechanische Integrität
Feuerbeständigkeit	Äußerer Kurzschluss
Überladen	Tiefenentladen
Übertemperatur	Überstromschutz

¹²⁸Vgl. United Nations Economic Commission for Europe 2021, S. 1f.

Tab. 21.7 Prüfverfahren nach UL 2580^a

Rotationsprüfung	Vibrationsprüfung
Mechanischer Schock	Aufprallprüfung
Mechanische Integrität	Wärmezyklusprüfung
Salzsprühprüfung	Eintauchprüfung
Externe Brandschutzprüfung	Interne Brandschutzprüfung
Überladungsprüfung	Kurzschlussprüfung
Tiefenentladen	Temperaturprüfung
Unausgeglichene Ladeprüfung	Spannungsfestigkeitsprüfung
Isolationswiderstandsprüfung	Kontinuitätsprüfung
Thermische Stabilitätssystem-prüfung	

^aVgl. Underwriters Laboratories 2020

Tab. 21.8 Prüfverfahren nach GB 38031-2020⁸⁶⁵

Vibrationsprüfung	Mechanische Schockprüfung
Simulierte Aufprallprüfung	Pressprüfung
Feuchtigkeitsprüfung bei zyklischen Temperaturveränderungen	Wassereintauchprüfung
Externe Feuerprüfung	Temperaturschockprüfung
Salznebelprüfung	Höhenprüfung
Übertemperaturschutzprüfung	Überstromprüfung
Externe Kurzschlusschutzprüfung	Überladungsschutzprüfung

Hersteller, dass die von ihm gefertigten Produkte den nationalen Guobiao (GB)-Standards entsprechen und die Produktkonformität gemäß den chinesischen Regularien laufend eingehalten werden. Dabei wurden viele GB-Standards von der ISO, IEC oder anderen internationalen Normungsorganisationen (anteilig) übernommen. Am 1. Januar 2021 trat die GB 38031-2020 in Kraft. In dieser Norm sind 16 Prüfungen hinsichtlich der Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge beschrieben (Tab. 21.8).¹²⁹

Neben den zuvor genannten regionalen Prüfverfahren sind einzelne länderspezifische Regelungen zu beachten.

Seit 1975 ist das DIN für Deutschland die zuständige nationale Normungsorganisation und die nationale Mitgliedsorganisation in den internationalen Normungsorganisationen CEN und ISO. Es besteht die Möglichkeit, internationale Standards in nationale Standards zu überführen. Eine Pflicht zur Übernahme von internationalen Standards auf nationale Standards besteht allerdings nicht.¹³⁰ Einzige Ausnahme gilt für das Land, dessen nationale Normungsorganisation den Antrag gestellt hat. Dort sehen die Richtlinien vor, dass jede verabschiedete Norm unverändert in das nationale Normenwerk zu übernehmen ist, wobei bereits vorhandene nationale Normen zum selben Thema zurückgezogen werden

¹²⁹Vgl. Standardization Administration of the People's Republic of China 2020.

¹³⁰Vgl. Bender et al. 2021, S. 1035.

müssen. Alle weiteren Länder dürfen die internationale Norm auch modifiziert in ihre nationale Norm übernehmen. Das liegt unter anderem an der unterschiedlichen Rechtsprechung in den verschiedenen Ländern.¹³¹

Die in Deutschland geltende Rechtsprechung für Energiespeicher ist im sogenannten Batteriegesetz (BattG) verankert. Dieses Gesetz legt rechtliche Rahmenbedingungen für das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren fest. Das BattG orientiert sich an den bereits existierenden Normen von nationalen und internationalen Normungsinstitutionen. Das im Jahr 2009 erstmalig in Kraft getretene BattG wurde am 1. Januar 2021 verschärft. Die Änderungen haben insbesondere Auswirkungen auf die Batteriehersteller und die Rücknahmesysteme von Geräte-Alt-Batterien.

21.7.3 Zulassung

Damit ein Fahrzeug für den Straßenverkehr zugelassen werden kann, muss es bestimmte technische Voraussetzungen und Sicherheitsstandards erfüllen. In diesem Zusammenhang spricht man auch von einer „Homologation“ beziehungsweise einer „Fahrzeughomologation“. Dabei handelt es sich um die Erlaubnis seitens der zuständigen Behörden, ein Produkt auf dem Markt in Verkehr zu bringen. Neben den Zulassungsverfahren des Gesamtfahrzeugs können einzelne Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs zertifiziert werden. Eine der wichtigsten Bestandteile ist die Hochvolt-Traktionsbatterie. Sie durchläuft einen eigenen Zulassungsprozess, der durch verschiedene regionale Vorschriften und Normen geregelt wird. Für eine erfolgreiche Zulassung im europäischen Raum muss die Batterie von einer nationalen Kraftfahrzeugbehörde, in Deutschland zum Beispiel vom Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), zertifiziert werden und die relevanten Prüfverfahren unter Aufsicht einer Prüfbehörde bestehen. Für die Prüfverfahren regelt die ECE-R100-Norm die wichtigsten Grundlagen. Sie erläutert alle notwendigen Testverfahren, die durchlaufen werden müssen, um der Batterie im europäischen Raum die Marktzulassung erteilen zu können.

Um sowohl den internationalen Handel zu fördern als auch einen einheitlichen Standard zu schaffen, wurde im Rahmen der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE) das „Übereinkommen von 1958“ beschlossen. Innerhalb dieser Vereinbarung wurde ein Regelsystem für den Fahrzeugbau geschaffen, auf das sich alle Vertragsparteien des ECE-Abkommens geeinigt haben. Das Ziel war es, eine grenzübergreifende Harmonisierung von technischen Regelungen zu schaffen, was eine rechtliche Bindung für alle teilnehmenden Länder bedeutet. Aufgrund dieser einheitlichen Regelungen gilt gleichermaßen, dass ein Produkt, das bereits in einem Mitgliedstaat die Typgenehmigung erhalten hat, in jedem anderen Mitgliedstaat für die Einfuhr, den Verkauf und die Verwendung als legal zu betrachten ist. In erster Linie werden durch das Abkommen Vor-

¹³¹ Vgl. AVK-Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.) 2013, S. 559.

schriften für Fahrzeugsicherheit, Umweltschutz, Energieeffizienz und Diebstahlsicherheit behandelt. Alle Vorschriften stehen im Internet frei zur Verfügung. Mittlerweile sind 64 Länder, darunter auch viele nichteuropäische Länder, Teil des ECE-Abkommens (vgl. Abb. 21.17).¹³²

Das Prüfzeichen nach einer gültigen Homologation besteht aus einem Kreis, in dessen Inneren sich der Buchstabe „E“ und eine Zahl befindet. Die Ziffer ist dabei eine Länderkennzahl und steht für den Staat, der die Genehmigung erteilt hat. Die Ziffer „1“ steht für Deutschland (vgl. Abb. 21.18).

Aufgrund der Herausforderung, dass einige Länder (etwa die USA) an der Entwicklung der Vorschriften mitwirken wollten, jedoch nicht der gegenseitigen Anerkennung von Typgenehmigungen zustimmten, wurde 1998 das sogenannte Parallelübereinkommen verabschiedet. Wohingegen die Regelungen von 1958 tendenziell eher auf europäischer Ebene entschieden worden waren, bietet das Parallelübereinkommen Ländern weltweit die Möglichkeit, sich an der Ausarbeitung globaler technischer Regelungen (GTR) zu beteiligen, ohne die Verpflichtungen der gegenseitigen Anerkennung zu übernehmen. Die GTR enthalten global harmonisierte Leistungsanforderungen und Testverfahren für die Genehmigung von Sicherheits- und Umweltaspekten von Fahrzeugen. Die meisten dieser Aspekte sind im Regelwerk des Abkommens von 1958 umgesetzt worden. Folglich wer-

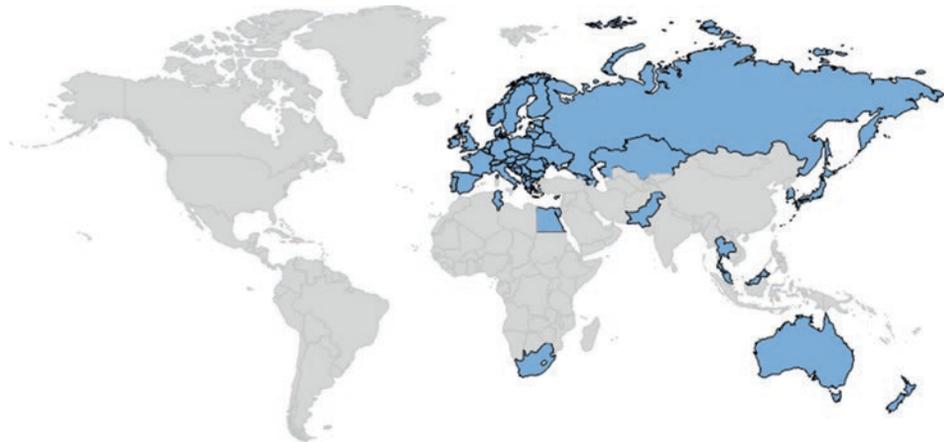


Abb. 21.17 Übersicht der Mitgliedsländer der ECE-Regelung

Abb. 21.18 ECE-Kennzeichnung Deutschland. (vgl. United Nations Economic Commission for Europe 2021, S. 18)



¹³²Vgl. Arbeitsgruppe 4 – Normung, Standards und Zertifizierung 2015, S. 9ff.

den diese von dessen Unterzeichnerstaaten anerkannt und mit Hilfe der ECE-Regelungen umgesetzt.¹³³ Speziell mit der „Sicherheit von Elektrofahrzeugen“ beschäftigt sich die zuletzt veröffentlichte GTR Nr. 20. Innerhalb dieser GTR wurden einige ECE-Regelungen übernommen beziehungsweise erweitert – so zum Beispiel die ECE-R 85 zur Messung der Nutzleistung von elektrischen Antriebssystemen oder die ECE-R 100 für die elektrische Sicherheit von Traktionsbatterien elektrischer Fahrzeuge. Ein großer Befürworter des Parallelübereinkommens waren aus Gründen des nationalen Zulassungsverfahrens die USA.¹³⁴

Das Zulassungsverfahren in den USA unterscheidet sich vom europäischen Prinzip. Während es sich bei der europäischen Zulassung um eine Typgenehmigung handelt, gilt in den USA das Prinzip der Selbstzertifizierung. Das bedeutet: Die Zertifizierung darf selbstständig vorgenommen werden und muss nur im Verdachtsfall von unzureichender Erfüllung durch eine Behörde begleitet werden. Somit überprüft der Hersteller seine Produkte eigenverantwortlich nach dem gängigen Stand der Technik und anerkannten Normen. Für die Zertifizierungstests wird auf die Vorschriften der „Underwriters Laboratories“ (UL) zurückgegriffen. Als unabhängige Organisation nehmen sie die Tests und Zertifizierungen vor und vergeben anschließend ihr Prüfzeichen. Die Regelungen der UL 2580 werden als Grundlage für die Batterietests in vollelektrischen Fahrzeugen herangezogen.¹³⁵

Da sich die Automobilhersteller in den USA selbst überprüfen, ist das Zertifizierungssystem nicht vereinbar mit dem Typgenehmigungsverfahren im Rahmen der ECE-Homologation. Anders als in Europa, ist vor der Vermarktung von Lithium-Ionen-Batterien innerhalb der USA keine staatliche Überprüfung vorgeschrieben. Um diesem Konflikt entgegenzuwirken, werden die ECE-Regelungen an die „Global Technical Regulation“ angelehnt und durch die Vertragsparteien im Konsens festgelegt. Die GTR enthält global harmonisierte Leistungsanforderungen sowie Testverfahren und betrifft in erster Linie die Genehmigung von Sicherheits- und Umweltaspekten von Fahrzeugen. Aktuell gibt es insgesamt 21 Regularien sowie 34 Vertragsparteien – inklusive China, Südkorea und den USA. Durch die Erstellung der Regularien gibt es inzwischen zwar einheitliche Vorschriften, jedoch bleibt das Problem zwischen Typgenehmigung und Selbstzertifizierung auch in der GTR bestehen. Eine mögliche Lösung stellt die „Transatlantic Trade and Investment Partnership“ (TTIP) dar. Bei dem Abkommen handelt es sich um ein Vertragswerk zwischen der EU und den USA. Die Verhandlungen hatten bereits im Juni 2013 begonnen, eine Einigung wurde jedoch noch nicht erzielt. Ziel des TTIP-Abkommens ist unter anderem eine gegenseitige Anerkennung von technischen Vorschriften und Zertifizierungen auch und insbesondere im Bereich der Fahrzeugsicherheit.¹³⁶

¹³³ Vgl. Ross 2019, S. 23.

¹³⁴ Vgl. Arbeitsgruppe 4 – Normung, Standards und Zertifizierung 2015, S. 17f.

¹³⁵ Vgl. United Nations 2018, S. 14.

¹³⁶ Vgl. United Nations 2019, S. 16.

Im Gegensatz zu den bisher genannten Zulassungsverfahren beruht der Homologationsprozess in China auf verschiedenen Ansätzen. Dabei existieren mehrere Zertifizierungsverfahren und es wird zwischen Selbstzertifizierung und beaufsichtigter Zertifizierung sowie zwischen freiwilligen und verpflichtenden Standards unterschieden. Für die Zulassung einer Batterie, welche die chinesischen Sicherheitsstandards erfüllen soll, wird eine Zertifizierung gemäß den Kriterien des „China Quality Certification Center“ (CQC) vorgenommen. Die Guobiao (GB)-Standards stellen hierfür die nationalen Standards dar. Die CQC-Zertifizierung erfolgt freiwillig bei Bestandteilen, die nicht in der Liste der verpflichtenden „China Compulsory Certification“ (CCC) auftauchen. Bei der CQC-Zertifizierung wird – wie auch bei der CCC – nach einer erfolgreichen Bewerbung ein Testobjekt angefragt und in zugelassenen chinesischen Testlaboren gemäß GB-Standard geprüft.¹³⁷

21.7.4 Transportvorschriften

Mit den stetig wachsenden Anwendungsbereichen von Batterien mit Lithium-Anteilen und der daraus resultierenden höheren Nachfrage wurde 2003 erstmalig eine Transportvorschrift seitens der EU veröffentlicht. Ähnlich wie bei der Zulassung von Elektrofahrzeugen für den Straßenverkehr durch die ECE-R100, müssen Lithium-Ionen-Batterien bereits vor dem ersten Transport von einem akkreditierten Labor auf Sicherheit überprüft werden. Die dafür vorgesehene Vorschrift ist die UN T 38.3 (siehe Tab. 21.9). Die darin enthaltenen Versuche stellen sicher, dass Lithium-Batterien und -Zellen gefahrlos versendet werden können. Die vorgenommenen Versuche sind möglichst realitätsnah, um die Einflüsse abzutesten, die auf eine Lithium-Batterie während eines Transports wirken. Die Vorschrift gilt für jegliche Transportmöglichkeiten über die Verkehrsträger Straße, Schienen, See und Luft.

Lithium-Ionen-Batterien sind ab 100 Wh als Gefahrgutklasse 9A einzustufen und können ein Sicherheitsrisiko darstellen, wenn sie nicht den Transportvorschriften entsprechend geprüft und verpackt werden. Die Transportnorm ist verpflichtend für einen spezifischen Zelltyp beziehungsweise Zellverbund.

Tab. 21.9 Prüfanforderungen auf thermischer, elektrischer und mechanischer Ebene nach Transportnorm UN T 38.3

T1 – Höhensimulation	T2 – Thermischer Test
T3 – Vibration	T4 – Schock
T5 – Externer Kurzschluss	T6 – Schlagwirkung
T7 – Überlastungstest	T8 – Tiefentladung

¹³⁷Vgl. United Nations 2019, S. 85.

Seit dem 1. Januar 2020 müssen die Informationen über den erfolgreich bestandenen UN T 38.3-Test wesentlich detaillierter dokumentiert und den Nutzern zur Verfügung gestellt werden. Diese Informationen müssen entlang der gesamten Lieferkette für jede Person verfügbar sein. Außerdem war bereits ein Jahr zuvor eine Kennzeichnung mit einer UN-Nummer für Lithium-Ionen-Batterien verpflichtend geworden. Im Bereich von Lithium-Ionen-Batterien sind folgende UN-Nummern relevant.¹³⁸

- UN 3480 – Lithium-Ionen-Batterien
- UN 3481 – Lithium-Ionen-Batterien in Ausrüstungen oder Lithium-Ionen-Batterien, mit Ausrüstungen verpackt

Damit die Lithium-Ionen-Batterien als transportsicher gelten, müssen sie vorher acht unterschiedliche Prüfungen aus der UN T 38.3-Vorschrift bestehen. Um das zufällige Bestehen einer Prüfung auszuschließen, müssen die Tests stets mehrmals vorgenommen werden. Wie viele Prüflinge am Ende getestet werden müssen, ist sowohl von der Art der Batterie als auch von deren Gewicht abhängig. Für eine Batterie mit einem Gewicht von weniger als 12 kg sind beispielsweise die Tests T1 bis T5 und T7 mit jeweils 8 Batterien zu absolvieren. Wichtig ist zudem, dass es sich bei den ersten fünf Prüfungen (T1 bis T5) um nicht zerstörende Prüfungen handelt. Deswegen sind die Prüfungen in dieser Reihenfolge mit den identischen Batterien durchzuführen. Bei Batterien von mehr als 12 kg reduziert sich die Prüflingsanzahl um 50 %.

Ohne Bestätigung der UN T 38.3-Prüfung dürfen Lithium-Ionen-Zellen und Lithium-Ionen-Batterien nur nach strengeren Auflagen als sogenannte Prototypen transportiert werden. Je nach Transportweg sind wegen anderer Gefahrgutvorschriften unterschiedliche zusätzliche Richtlinien einzuhalten. Für den Transport von Lithium-Ionen-Batterien im Flugverkehr gelten verschärfte Sicherheitsregelungen, deren Relevanz sich in der Praxis gezeigt hat.

Anfang 2013 kam es in einem Passagierflugzeug zu einem gefährlichen Zwischenfall im Zusammenhang mit einer verbauten Lithium-Ionen-Batterie. Aufgrund von äußeren Einflüssen hatte die Batterie Feuer gefangen, und es kam zu einem Brand an Bord des Flugzeugs. Im Nachhinein wurde festgestellt, dass die eingebaute Brandschutzanlage die durch Lithium-Ionen-Batterien ausgelösten Brände nicht löschen kann.¹³⁹

Um dieser Gefahr entgegenzuwirken, wurde im April 2016 von der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) ein Verbot zum Transport von Lithium-Ionen-Batterien im Laderaum von Passagierflugzeugen erlassen. Diese Regelung gilt indes nicht für Unterhaltungselektronik – also Smartphones, Tablets, Laptops oder Powerbanks bis zu 100 Wh –, in denen die Batterien bereits eingebaut sind. Kleine Fahrzeuge hingegen – etwa Hoverboards oder Gepäck-Scooter – dürfen in der Regel weder im Handgepäck noch als Check-in-Gepäck mitgenommen werden. Sie müssen für den privaten Transport über die Luft als

¹³⁸ Vgl. Eich 2020.

¹³⁹ Vgl. Williard et al. 2013, S. 4682f.

Frachtgut aufgegeben werden. Dieser Beschluss der ICAO ist nicht rechtsbindend, jedoch haben die meisten UN-Mitglieder und Fluggesellschaften den Beschluss in ihre Richtlinien aufgenommen.¹⁴⁰

Trotz der strengen Vorschriften kommt es dennoch immer wieder zu Zwischenfällen beim Transport von Lithium-Ionen-Batterien. Ende des Jahres 2020 hatte eine Sendung mit Lithium-Ionen-Batterien in einer Ladeinheit eines Logistikunternehmens angefangen zu brennen. Dies hatte zur Folge, dass eine komplette Luftfrachtsortieranlage geräumt werden musste, um weitere Schäden zu vermeiden oder in Grenzen zu halten.¹⁴¹

Literatur

Teil IV: Technische und regulatorische Rahmenbedingungen der Elektromobilität

- Albers, J; Meissner, E; Shirazi, S.:** *Lead-acid batteries in micro-hybrid vehicles*. In: Journal of Power Sources, Jg. 196, 2011, Nr. 8, S. 3993–4002
- Arbeitsgruppe 4- Normung, Standards und Zertifizierung:** *Elektromobilität: Vorschriften in den Bereichen Kraftfahrzeugtechnik und Gefahrguttransporte*, 2015
- Arbeitsgruppe 5 „Verknüpfung der Verkehrs- und Energienetze, Sektorkopplung“:** *Factsheet „Vehicle to Grid“ – Kundennutzen und Netzintegration*, 2020
- Arbeitsgruppe 5 „Verknüpfung der Verkehrs- und Energienetze, Sektorkopplung“:** *Flächen-deckende Ladeinfrastruktur*, 2020
- Arbeitsgruppe 6 „Standardisierung, Normung, Zertifizierung und Typgenehmigung“:** *Schwerpunkt-Roadmap Nachhaltige Mobilität. Standards und Normen*, 2020
- AVK–Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.):** *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013
- Beloufa, A.:** *The Effect of Cable Section on the Variation of Power Automotive Connector Temperature*. In: IEEE Trans. Compon., Packag. Manufact. Technol., Jg. 9, 2019, Nr. 6, S. 1020–1028
- Bender, B; Gericke, K.:** *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021
- Bertram, M; Bongard, S.:** *Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr. Grundlagen, Einflussfaktoren und Wirtschaftlichkeitsvergleich*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014
- BMW AG2021:** *So klingt Zukunft. BMW M IconicSounds Electric für den neuen i4 in M Ausprägung*. In: BMW M GmbH, 02.06.2021
- Börçsök, J.:** *Funktionale Sicherheit. Grundzüge sicherheitstechnischer Systeme*. 5., überarbeitete Auflage Aufl. Berlin: VDE Verlag, 2021
- Brost, M; Ewert, A; Schmid, S; Eisenmann, C; Gruber, J; Klauenberg, J; Stieler, S.:** *Elektrische Klein- und Leichtfahrzeuge. Chancen und Potenziale für Baden-Württemberg*. https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/LEV_e-mobil_BW_Leichtfahrzeug_Studie.pdf. Abruf 20.10.2021
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz:** *§ 13 EG-FGV – Einzelgenehmigung für Fahrzeuge*

¹⁴⁰ Vgl. ICAO 2016.

¹⁴¹ Vgl. Federal Aviation Administration 2021, S. 2.

- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz:** § 21 StVZO – Betriebslaubnis für *Einzelfahrzeuge*
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz:** *Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln** (Elektromagnetische-Verträglichkeit-Gesetz – EMVG). https://www.gesetze-im-internet.de/emvg_2016/BJNR287910016.html. Abruf 29.07.2021
- Bundesministerium des Justiz und für Verbraucherschutz:** *Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln*. EMVG, 2016
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.):** *Standards und Normen für die Mobilität der Zukunft. Ergebnisse der Arbeitsgruppe 6 der NPM 2018–2021*, 2021
- Busch:** *Elektrotechnik und Elektronik*: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015
- Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union:** *Richtlinie 2002/24/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. März 2002 über die Typgenehmigung für zweirädrige oder dreirädrige Kraftfahrzeuge und zur Aufhebung der Richtlinie 92/61/EWG des Rates*. Richtlinie 2002/24/EG, 18.03.2002
- Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union:** *Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge (Rahmenrichtlinie)*, 05.09.2007
- Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union:** *Verordnung (EU) Nr. 168/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Januar 2013 über die Genehmigung und Marktüberwachung von zwei- oder dreirädrigen und vierrädrigen Fahrzeugen*. Verordnung (EU) Nr. 168/2013, 15.01.2013
- Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union:** *Verordnung (EU) 2018/858 des Europäischen Parlaments und des Rates – vom 30. Mai 2018 – über die Genehmigung und die Marktüberwachung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 715/2007 und (EG) Nr. 595/2009 und zur Aufhebung der Richtlinie 2007/46/EG*. Verordnung (EU) 2018/858, 30.05.2021
- De la Garza, A.** 2021: *Electric Cars Can Sound Like Anything. That’s a Huge Opportunity to Craft the Soundscape of the Future*. In: Time. <https://time.com/5951773/electric-car-sound-future/>. Abruf 25.08.2021
- DIN e.V.:** DIN EN 61508-1:2011-02 Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme – Teil 1: Allgemeine Anforderungen (IEC 61508-1:2010); Deutsche Fassung EN 61508-1:2010. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- DIN e.V.:** DIN EN 60664-1:2008-01 Isolationskoordination für elektrische Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen – Teil 1: Grundsätze, Anforderungen und Prüfungen (IEC 60664-1:2007). Berlin: Beuth Verlag GmbH
- DIN e.V.:** DIN EN 62196-1:2015-06 Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplungen und Fahrzeugstecker – Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen (IEC 62196-1:2014, modifiziert); Deutsche Fassung EN 62196-1:2014. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015-06
- DIN e.V.:** DIN EN ISO 15118-1:2019-08 Straßenfahrzeuge – Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation – Teil 1: Allgemeine Informationen und Festlegungen der Anwendungsfälle (ISO 15118-1:2019); Englische Fassung EN ISO 15118-1:2019. Berlin: Beuth-Verlag, 2019-08
- DIN e.V.:** DIN EN ISO 17409:2020-10 Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge – Kabelgebundene Energieübertragung – Sicherheitsanforderungen: Beuth-Verlag, 2020

- DIN e.V.:** DIN EN ISO 7010:2020-07 Graphische Symbole – Sicherheitsfarben und Sicherheitszeichen – Registrierte Sicherheitszeichen (ISO 7010:2019); Deutsche Fassung EN ISO 7010:2020. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2020-07
- DIN e.V.:** DIN EN IEC 62351-4:2021-11 Energiemanagementsysteme und zugehöriger Datenaustausch – IT-Sicherheit für Daten und Kommunikation – Teil 4: Profile einschließlich MMS und Ableitungen (IEC 62351-4:2018 + A1:2020); Deutsche Fassung EN IEC 62351-4:2018 + A1:2020. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2021-11
- Doppelbauer, M.:** *Grundlagen der Elektromobilität*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020
- Doughty, D. H.; Roth, E. P.:** *A General Discussion of Li Ion Battery Safety*. In: *Electrochemical Society Interface* 2012.
- Durcansky, G.:** *EMV-gerechtes Gerätedesign. Grundlagen der Gestaltung störungsarmer Elektronik; mit 65 Tabellen*. 5., neubearb. und erw. Aufl. Aufl. Poing: Franzis, 1999
- Eich, C.:** *Versand von Lithium-Ionen Batterien 2021* 2020.
- Europe, W. R. O. f.:** *Burdens of Disease from Environmental Noise. Quantification of Healthy Life Years Lost in Europe*. Geneva: World Health Organization, 2011
- Fastl, H.; Fruhmann, M.:** *Fortschritte der Akustik – DAGA '05. Tagungs-CD-ROM der DAGA '05, 14. – 17. März 2005, München*. Berlin: Deutsche Gesellsch. f. Akustik, 2005
- Federal Aviation Administration:** *Battery Incident Chart*, 2021
- Federal Register:** *Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 141, Minimum Sound Requirements for Hybrid and Electric Vehicles*. <https://www.federalregister.gov/documents/2019/09/17/2019-19874/federal-motor-vehicle-safety-standard-no-141-minimum-sound-requirements-for-hybrid-and-electric>. Abruf 25.08.2021
- Genuit, K.:** *Product Sound Quality of Vehicle Noise – A Permanent Challenge for NVH Measurement Technologies*: SAE Technical Paper Series. SAE Brasil Noise and Vibration Conference, MAR. 30, 2008: SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States 2008.
- Genuit, K.:** *E-Mobility – The Silent Revolution!?* 178th Meeting of the Acoustical Society of America. San Diego, 02.12.2019
- Genuit, K.; Fiebig, A.:** *Fahrzeugakustik und Sound design im Wandel der Zeit*. In: *ATZ Automobiltech Z*, Jg. 113, 2011, Nr. 7–8Nr., S. 530–535
- Guler, S; Yenikaya, S; Simsek, M.:** *EMC Design for Battery Electric Vehicle (BEV) Propulsion System*: 2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO): IEEE 2019.
- Gustrau, F; Kellerbauer, H.:** *Elektromagnetische Verträglichkeit. Berechnung der elektromagnetischen Kopplung, Prüf- und Messtechnik, Zulassungsprozesse*. [Place of publication not identified]: CARL HANSER Verlag GMBH &, 2015
- Hein, J; Hippeli, J; Eibert, T. F.:** *Reduction of EMC simulation efforts using design of experiments*: 2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal and Power Integrity: *Proceedings EMC+SIPI Washington, DC, August 7–11, 2017*. 2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI), 8/7/2017–8/11/2017. Piscataway, NJ: IEEE 2017, S. 725–730
- UN Regulation No. 138 – Rev.1 – Amend.2* [UNECE 2021. <https://unece.org/transport/documents/2021/02/standards/un-regulation-no-138-rev1-amend2>. Abruf 09.08.2021
- EUR-Lex – 32014R0540 – DE – EUR-Lex* 2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32014R0540>. Abruf 25.08.2021
- Hofmann, P.:** *Hybridfahrzeuge. Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft*. 2 Aufl. Vienna: Springer Vienna, 2014
- ICAO:** *Council Prohibits Lithium-Ion Cargo Shipments on Passenger Aircraft*, 2016

- International Electrotechnical Commission:** DIN EN 61851-23:2014-11 Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge – Teil 23: Gleichstromladestationen für Elektrofahrzeuge (IEC 61851-23:2014); Deutsche Fassung EN 61851-23:2014. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2014-11
- International Electrotechnical Commission:** DIN EN 61851-24:2014-11 Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge – Teil 24: Digitale Kommunikation zwischen einer Gleichstromladestation für Elektrofahrzeuge und dem Elektrofahrzeug zur Steuerung des Gleichstromladevorgangs (IEC 61851-24:2014); Deutsche Fassung EN 61851-24:2014. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2014-11
- International Electrotechnical Commission:** IEC 61851-21-1 Electric vehicle conductive charging system – Part 21-1 Electric vehicle on-board charger EMC requirements for conductive connection to AC/DC supply, 2017
- International Electrotechnical Commission:** IEC 61851-21-2 Electric vehicle conductive charging system – Part 21-2: Electric vehicle requirements for conductive connection to an AC/DC supply – EMC requirements for off board electric vehicle charging systems, 2018
- International Organisation for Standardisation (IOS):** ISO 3833:1977-12 Straßenfahrzeuge; Typen; Begriffe. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1977-12
- International Organisation for Standardisation (IOS):** ISO 6722-2:2013-12 Straßenfahrzeuge – 60 V und 600 V einadrige Niederspannungsleitungen – Teil 2: Maße, Prüfverfahren und weitere Anforderungen für Aluminiumkabel. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2013-12
- International Organisation for Standardisation (IOS):** ISO 26262:2018-12 Straßenfahrzeuge – Funktionale Sicherheit. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2018-12
- International Organisation for Standardisation (IOS):** ISO 6469-3:2021-10 Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge – Sicherheitsspezifikation – Teil 3: Elektrische Sicherheit. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2021-10
- International Organisation for Standardisation:** ISO 6722-1:2011-10 Straßenfahrzeuge – 60 V und 600 V einadrige Niederspannungsleitungen – Teil 1: Maße, Prüfverfahren und weitere Anforderungen für Kupferkabel: Beuth-Verlag, 2011
- International Organisation for Standardisation** Road Vehicles – Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy, 2015
- International Organisation for Standardisation** Electrically propelled road vehicles – Test specification for electric propulsion components, 2019
- Jeromin, G.:** *Die elektromagnetische Verträglichkeit. Ein Kriterium für die Produktqualität*
- Kampker, A.:** *Elektromobilproduktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014
- Kampker, A; Vallée, D; Schnettler, A. (Hrsg.):** *Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. 2. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018
- Kätzel, A.:** Förderprogramm „Elektromobilität – Beschaffung Elektrofahrzeuge + Ladeinfrastruktur“. Antragseinreichung bis 31. März 2021 – Diesmal im Fokus: Vielfahrer mit PKW und Leichtfahrzeugen. <https://www.hwk-oberfranken.de/artikel/foerderprogramm-elektromobilitaet-beschaffung-elektrofahrzeuge-ladeinfrastruktur-72,0,2608.html>. Abruf 19.07.2021
- Korthauer, R.:** *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013
- Kraftfahrt-Bundesamt** Verzeichnis zur Systematisierung von Kraftfahrzeugen und ihren Anhängern, Stand: Januar 2021, SV 1, 01.02.2021
- Lannoo, J.:** *System-level hardware-based design techniques for EM Resilience: a necessity for safe and reliable programmable electronics*, 2020
- Linnemann, M; Nagel, C.:** *Elektromobilität und die Rolle der Energiewirtschaft*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020
- Meissner, F; Shirokinskiy, K; Alexander, M.:** *Computer on wheels. Disruption in automotive electronics and semiconductors*, 2020

- Morche, D; Schmitt, F; Genuit, K; Elsen, O; Kampker, A; Deutskens, C; Heimes, H. H; Swist, M; Maue, A; Vom Hemdt, A; Lienemann, C; Haunreiter, A; Wessel, S; Hollah, A; Friedrich, B; Vest, M; Georgi-Maschler, T; Honggang, W.:** *Fahrzeugkonzeption für die Elektromobilität*. In: Kampker, A; Vallée, D; Schnettler, A. (Hrsg.): *Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie* 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018, S. 181–277
- Möser, M.:** *Technische Akustik*. 10 Aufl. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015
- National Highway Traffic Safety Administration (2014):** *Incidence Rates of Pedestrian and Bicyclist Crashes by Hybrid Electric Passenger Vehicles: An Update* 1. In: *Annals of Emergency Medicine*, Jg. 64, 2014, Nr. 2, S. 195–196
- Nationale Plattform Zukunft der Mobilität:** *NPM Fortschrittsbericht 2019*, 2019
- Noreikat, K. E.:** *10. Brennstoffzelle Einführung Und Grundlagen*. In: *MTZ Motortech Z*, Jg. 74, 2013, Nr. 3, S. 246–251
- Paschek, L; Winterhagen, J.:** *Alles auf E*, 2019. Sonderedition VISION-E
- Proff:** *Mobilität in Zeiten der Veränderung*: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019
- Reif, K.:** *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik*: Vieweg+Teubner, 2011
- Ronanki, D; Kelkar, A; Williamson, S. S.:** *Extreme Fast Charging Technology – Prospects to Enhance Sustainable Electric Transportation*. In: *Energies*, Jg. 12, 2019, Nr. 19, S. 3721
- Ross, H.-L.:** *Funktionale Sicherheit im Automobil. Die Herausforderung für Elektromobilität und automatisiertes Fahren* (Hanser eLibrary). 2., vollständig überarbeitete Auflage Aufl. München: Hanser, 2019
- Schönau, H. von; Baumann, M.:** *Normung für die Sicherheit und Performance von Lithium-Ionen-Batterien*. In: Korthauer, R. (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 371–380
- Schulte-Fortkamp, B; Genuit, K; Fiebig, A.:** *A New Approach for Developing Vehicle Target Sounds*. In: *Sound & vibration*, Jg. 41, 2007
- Schwab, A; Kürner, W; Schwab, A. J.:** *Elektromagnetische Verträglichkeit*: Springer Berlin Heidelberg, 2011
- Schwark, P.:** *Unfallforschung der Versicherer: Leichtkraftfahrzeuge sind gefährlich/Gewichtsbeschränkung verhindert mehr passive Sicherheit*. <https://verbaende.com/news.php/Unfallforschung-der-Versicherer-Leichtkraftfahrzeuge-sind-gefaehrlich-Gewichtsbeschaerung-verhindert-mehr-passive-Sicherheit?m=43131>. Abruf 19.07.2021
- Sebastian Jeschke:** *Grundlegende Untersuchungen von Elektrofahrzeugen im Bezug auf Energieeffizienz und EMV mit einer skalierbaren Power-HiL-Umgebung*. Dissertation, 2016
- Sellberbeck, P. (2010):** *Enhancing noise and vibration comfort of hybrid/electric vehicles using transfer path models*, 2010
- Siebenpfeiffer, W. (Hrsg.):** *Automotive Acoustics Conference 2019. 5. Internationale ATZ-Fachtagung Fahrzeugakustik*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020
- Sinambari, G. R; Sentspali, S. (Hrsg.):** *Ingenieurakustik. Physikalische Grundlagen, Anwendungsbeispiele und Übungen*. 6. Überarbeitete Auflage Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020
- Standardization Administration of the People's Republic of China:** GB 38031-2020 Electric Vehicles Traction Battery Safety requirements. China, 2020
- Steiner, P.:** *Praktische Anwendungen von Sound Branding*. In: Steiner, P. (Hrsg.): *Sound Branding: Grundlagen akustischer Markenführung* (Reihe: Research). 3., aktualisierte und erweiterte Auflage Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler, 2018, S. 111–154
- Taghavipour, A; Vajedi, M; Azad, N. L.:** *Introduction*. In: Taghavipour, A; Vajedi, M; Azad, N. L. (Hrsg.): *Intelligent Control of Connected Plug-in Hybrid Electric Vehicles* (Reihe: Advances in Industrial Control). Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 1–4
- Toth, M; Weber, R; Benecke, J; Remisch, D; Kübel, M.:** *Standardisierter Kombistecker für DC- und AC-Laden von Elektroautos*. In: *ATZ Elektron*, Jg. 7, 2012, Nr. 6, S. 430–433

- Tschöke, H; Gutzmer, P; Pfund, T:** *Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Grundlagen -vom mikro-hybrid zum.* [Place of publication not identified]: MORGAN KAUFMANN, 2020
- U. Sandberg; L. Goubert; P. Mioduszewski:** *Are vehicles driven in electric mode so quiet that they need acoustic warning signals* 2010.
- UN/ECE:** *Regelung Nr. 10 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) – Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit. UN ECE R10*, 2012
- Underwriters Laboratories:** UL 2580, Edition 3 Batteries for Use In Electric Vehicles, 2020
- United Nations:** *Global Technical Regulation on Electric Vehicle Safety (EVS)*, 2018
- United Nations:** *Electromagnetic compatibility. E/ECE/324/Add.9/Rev.6*, 2019
- United Nations:** *World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29). How it works, how to join it. Fourth edition.* Fourth Edition Aufl. Geneva: United Nations Economic Commission for Europe, 2019
- United Nations Economic Commission for Europe:** *ECE-R100 Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train*, 2022
- V. van der Seijs, Maarten; Klerk, D. de; Rixen, D. J.:** *General framework for transfer path analysis: History, theory and classification of techniques* 2015.
- Vorländer, M; Fels, J. (Hrsg.):** *Fortschritte der Akustik. DAGA 2016, Aachen 14.-17. März 2016* 42. Jahrestagung für Akustik, Berlin: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), 2016
- Wallentowitz, H; Freialdenhoven, A.:** *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges.* Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011
- Williard, N; He, W; Hendricks, C; Pecht, M.:** *Lessons Learned from the 787 Dreamliner Issue on Lithium-Ion Battery Reliability.* In: *Energies*, Jg. 6, 2013, Nr. 9, S. 4682–4695
- Winner, H; Hakuli, S; Lotz, F; Singer, C.:** *Handbuch Fahrerassistenzsysteme.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015
- Zeller, P. (Hrsg.):** *Handbuch Fahrzeugakustik. Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch.* 3 Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018
- ZVEI:** *Spannungsklassen in der Elektromobilität* 2021.

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.



Infrastruktur für die Elektromobilität

Mit Blick auf den Infrastrukturbedarf unterscheidet sich die Elektromobilität in großen Teilen kaum von der Mobilität mit anderen Kraftfahrzeugen. Das gilt vor allem für das Straßennetz und die Anlagen für den ruhenden Verkehr. Zwar regt die E-Mobilität auch zu einer Neubetrachtung der Geschwindigkeitsvorschriften besonders auf Stadtstraßen an, was gegen Ende des Kapitels zum Thema wird, aber die wichtigsten Implikationen der Elektromobilität beziehen sich zweifelsohne auf die Ladeinfrastruktur. Vor diesem Hintergrund widmet sich dieses Kapitel vor allem dem Thema „Laden“ und den entsprechenden Voraussetzungen.

Der Übergang vom Tanken zum Laden von Fahrzeugen bringt maßgebliche Veränderungen mit sich: Während Tankvorgänge zeitlich eher punktuell und räumlich konzentriert ablaufen, sind Elektrofahrzeuge häufiger, länger und potenziell an deutlich mehr Orten mit dem Stromnetz verbunden. Die Notwendigkeit der räumlich-zeitlichen Passfähigkeit von Energienachfrage der Fahrzeuge und Energiebereitstellung der Ladeinfrastruktur nimmt zu. Daher bildet die Elektromobilität einen maßgeblichen Faktor im Kontext der Sektorkopplung – in diesem Fall von Energie- und Verkehrssektor. Ladeinfrastruktur erfüllt somit nicht nur eine wichtige Funktion bei der Energieversorgung der Fahrzeuge: Sie stellt auch die Schnittstelle zwischen E-Mobilität und Energiesektor her und ist damit von zentraler Bedeutung im Zusammenhang mit der Energiewende. Dieses Kapitel geht bei der Diskussion der Ladeinfrastruktur deshalb sowohl auf die Abdeckung des Energiebedarfs der Elektromobilität als auch auf die Netzintegration ein.

Im Hinblick auf den Energieverbrauch bilden Pkw aus Privathaushalten die bedeutendste Fahrzeuggruppe, gefolgt von gewerblichen Kfz. Andere Elektrofahrzeuge – etwa elektrifizierte Busse oder Zweiräder – sind Sonderfälle, weshalb ihre Bedeutung für die Ladeinfrastruktur eher eine untergeordnete Rolle spielt. Elektro-Kfz im privaten, aber auch im gewerblichen Einsatz stehen daher im Vordergrund dieser Betrachtung.

Der E-Mobil-Bestand wächst derzeit zwar äußerst schnell, repräsentiert aber – gemessen am Gesamtverkehr – nach wie vor eine Nische. Damit stellt Ladestrom bislang auch nur einen kleinen Anteil der gesamten Energieaufnahme des Verkehrs dar. Aktuell ist die

Elektromobilität immer noch von „Early Adoptern“ geprägt, deren Fahrzeugnutzung sich vom Durchschnitt deutlich unterscheidet. Daraus folgt, dass heute beobachtbares Ladeverhalten nur eingeschränkt Einblicke in die Zukunft mit einem deutlich dominanteren Marktanteil der E-Mobilität erlaubt. Deshalb zielt dieses Kapitel nicht in erster Linie darauf ab, heutiges Ladeverhalten und daraus ableitbare Ladeinfrastrukturbedarfe darzustellen. Stattdessen betten die folgenden Ausführungen die Elektromobilität in den Gesamtkontext der Mobilität ein, um auf dieser Basis Grundstrukturen für die Ladenachfrage abzuleiten, die auch eine Fortschreibung der Ladeinfrastruktur-Bedarfsentwicklung in die Zukunft erlauben. Dennoch beinhaltet dieses Kapitel auch eine Darstellung des heutigen Ladeverhaltens, um den Status quo mit den konzeptionellen Aspekten der Ladebedarfsentwicklung vergleichen zu können.



Tobias Kuhnimhof

In Europa und vielen anderen Regionen wird die Elektromobilität nicht in einer Frühphase der Mobilitätsentwicklung eingeführt, so dass sich die Entwicklung der Verkehrsnachfrage von vorneherein an den Gegebenheiten der E-Mobilität ausrichten könnte. Stattdessen löst sie etablierte Strukturen in existierenden Verkehrssystemen ab. Sie wird gewissermaßen in ein bereits existierendes Ökosystem des Verkehrs eingeführt. Es ist nicht zu erwarten, dass sich die Grundstrukturen des Mobilitätssystems in Gesellschaften mit hochentwickelter Mobilitätsnachfrage sehr schnell an die Rahmenbedingungen der Elektromobilität anpassen. So gehört etwa die Möglichkeit der Fernfahrten mit dem Pkw zu einer etablierten Gewohnheit. Wenn Elektrofahrzeuge solche Bedürfnisse infolge von Reichweitenbeschränkungen nicht erfüllen, ist eine Verlagerung auf andere Verkehrsmittel nur bedingt zu erwarten. Stattdessen muss diese Lücke über Ladeinfrastruktur geschlossen werden. In Ländern, denen das Wachstum der Verkehrsnachfrage zu großen Teilen noch bevorsteht und in denen etwa Fernfahrten mit dem Pkw noch nicht etabliert sind, könnte diese Entwicklung in den nächsten Jahren anders verlaufen.

Für Industrieländer wie Deutschland gilt somit, dass die Elektromobilität gegebene Strukturen vorfindet und sich der Aufbau von Infrastrukturen für die E-Mobilität daran ausrichten muss. Dies beginnt bei den etablierten Mobilitätsmustern der Menschen, schließt aber viele andere Aspekte ein – etwa Gebrauchtwagenmärkte, Geschäftsmodelle der Finanzierung und anderes mehr. Vor diesem Hintergrund führt dieser Abschnitt grundlegende Mobilitätsstrukturen auf, in die die Elektromobilität eingeführt wird, und die für die nachfolgende Ableitung von Ladeinfrastruktur-Bedarfen maßgebend sind.

T. Kuhnimhof (✉)

Universitätsprofessor, Lehrstuhl und Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr (ISB), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: kuhnimhof@isb.rwth-aachen.de

22.1 Grundlagen zum Mobilitätsverhalten

Ein Mensch in Deutschland legt am Tag durchschnittlich etwas mehr als drei Wege zurück. Dafür werden pro Person im Mittel etwa 80 min aufgewendet. Diese Werte – die sogenannte Wegerate und das Mobilitätszeitbudget – sind über Jahrzehnte hinweg relativ stabil geblieben.¹ Deutlich angewachsen hingegen sind die Verkehrsleistungen, das heißt die pro Person zurückgelegten Kilometer. Zwischen 1970 und 2019 hat sich die Verkehrsleistung in Deutschland von rund 20 km pro Person und Tag auf knapp 40 km pro Person und Tag verdoppelt.² (Dabei sind maßgebliche Teile von im Ausland erbrachten Verkehrsleistungen, etwa im Zuge von Fernreisen, nicht enthalten. Inklusive dieser Verkehrsleistungen kommt die Bevölkerung Deutschlands auf mehr als 50 km pro Person und Tag.³)

Das Wachstum der Verkehrsleistung bei gleichzeitiger Stabilität der dafür aufgewendeten Zeit war nur durch eine deutliche Beschleunigung der Alltagsmobilität möglich. Die maßgebliche Entwicklung dafür war die Motorisierung der Bevölkerung, das heißt, der deutliche Anstieg des Pkw-Besitzes in Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten. Im Alltagsverkehr ist der Pkw in den meisten Fällen das schnellste Verkehrsmittel, das im Vergleich zu den anderen mit Abstand die größte Erreichbarkeit gewährleistet – beispielsweise gemessen an der Anzahl erreichbarer Arbeitsplätze innerhalb von 30 min Reisezeit. Die Einkommensentwicklung der vergangenen Jahrzehnte machte den Privat-Pkw für immer größere Bevölkerungsanteile in Deutschland erschwinglich, die somit ihre täglichen Aktionsradien ausdehnen konnten. Hinzukam der Ausbau der Straßeninfrastruktur, so dass auch die Reisegeschwindigkeit des Autos heute deutlich höher liegt als vor einigen Jahrzehnten.⁴ Diese langfristig wirksamen Faktoren erklären die heutige Dominanz des Pkw für das Verkehrsgeschehen in den Industrieländern. Für viele Schwellenländer ist für die nächsten Jahrzehnte eine ähnliche Entwicklung mit der Folge einer rapiden Zunahme der jeweiligen Verkehrsleistung zu erwarten.⁵

Heute legen die Deutschen knapp 60 % ihrer Wege und drei Viertel ihrer Verkehrsleistung am Pkw-Steuer oder als Passagier im Auto zurück. Jeweils etwa ein Zehntel der Wege der Deutschen entfallen auf das Fahrrad und den öffentlichen Verkehr (ÖV). Fußwege machen ein Fünftel aus. Die Dominanz des Pkw ist situativ jedoch sehr verschieden und fällt je nach Eignung des Pkw als Verkehrsmittel im Vergleich zu den Alternativen unterschiedlich aus. So legt die Bevölkerung von Metropolen nur knapp 40 % ihrer Wege mit dem Pkw zurück, während dieser Wert in ländlichen Regionen bei 70 % liegt. Besonders dominant ist der Pkw auf Entfernungen zwischen zehn und 100 km – mit einem Wege-

¹Vgl. Ecke et al. 2020.

²Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 2021.

³Vgl. Schulz et al. 2020.

⁴Vgl. Axhausen et al. 2008.

⁵Vgl. Seum et al. 2020.

Anteil von etwa 80 %.⁶ In diesem Entfernungsspektrum spielt der nichtmotorisierte Verkehr kaum noch eine Rolle und der ÖV kann seinen Geschwindigkeits- und Bequemlichkeitsvorteil, den etwa die Bahn auf langen Strecken oft bietet, noch nicht ausspielen.

Mit Blick auf die Wegzwecke ist der Pkw besonders bei den Arbeits- und Dienstwegen dominant (mit einem Anteil von rund 60 % Autofahrern), wobei die Quote der Mitfahrenden beziehungsweise der Besetzungsgrad bei solchen Strecken gering ausfällt, weil dabei selten Personen aus demselben Haushalt gemeinsam unterwegs sind. Dies zeigt auch, dass der Besetzungsgrad als die gleichzeitige Nutzung des Autos durch mehrere Personen vor allem von gemeinsamen Wegen im Haushaltskontext bestimmt ist. Mitfahrten außerhalb des eigenen Haushalts kommen zwar vor, sind aber für den Besetzungsgrad von Fahrzeugen von geringer Bedeutung.

Wichtig für die Einbindung des Pkw in den Alltagsverkehr der Menschen ist aber nicht nur sein Anteil an den Wegen, sondern auch das Phänomen der „Multimodalität“. Als multimodal werden Personen bezeichnet, die im Verlauf einer definierten Zeitspanne – beispielsweise einer Woche – unterschiedliche Verkehrsmittel nutzen. Dies trifft auf einen Großteil der Bevölkerung zu, der im Alltag mehrere Verkehrsträger miteinander kombiniert, da diese sich je nach Entfernung, Transportnotwendigkeiten und anderem für unterschiedliche Einsatzzwecke eignen. Nur etwa ein Zehntel der Bevölkerung ist monomodal und erledigt im Wochenverlauf sämtliche Wege mit dem Pkw.⁷ Dabei ist das Auto aufgrund seiner nahezu universellen Einsetzbarkeit im Grunde das einzige Verkehrsmittel, das monomodales Verhalten unterstützt. Auch diese Universalität des Pkw ist für das Verständnis seiner Dominanz von großer Bedeutung. Ob die Universalität in den kommenden Jahrzehnten und mit zunehmender Elektromobilität – etwa im Zuge von Reichweiten- oder Zufahrtsbeschränkungen in Städten – erhalten bleibt, ist abzuwarten.

22.2 Pkw der Privathaushalte

Anfang 2021 waren in Deutschland rund 48 Mio. Pkw zugelassen.⁸ 1993, im Jahr der Zusammenlegung der entsprechenden Register der alten und neuen Bundesländer betrug der Pkw-Bestand in Deutschland noch 38,8 Mio.⁹ In den vergangenen knapp 30 Jahren ist der Bestand relativ kontinuierlich um jährlich etwa eine halbe Million Fahrzeuge gewachsen. Ein maßgeblicher Treiber hinter diesem Anstieg des Pkw-Bestands war erstens, dass immer mehr Personen ein eigenes Fahrzeug zur Verfügung haben und weniger Fahrzeuge innerhalb von Haushalten geteilt werden. Das liegt in immer mehr Zweit- und Drittwagen sowie in einer zunehmenden Zahl von Einpersonenhaushalten mit Pkw

⁶Vgl. Nobis und Kuhnimhof 2018.

⁷Vgl. Nobis und Kuhnimhof 2018.

⁸Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2021.

⁹Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2002.

begründet. Zweiter wichtiger Treiber des Bestandszuwachses war der steigende Autobesitz älterer Menschen, deren Pkw-affine Generation auf eine andere folgt, die ein Leben ohne Auto verbracht hat.

Der Bestandszuwachs von einer halben Million Pkw pro Jahr kam durch etwa drei Millionen jährliche Neuzulassungen zustande,¹⁰ denen etwa zweieinhalb Millionen Fahrzeuglöschungen gegenüberstanden. Wenn bei einem Fahrzeugbestand von etwa 45 bis 50 Mio. Pkw jährlich rund drei Millionen ausgetauscht werden, ergibt sich daraus rechnerisch eine Größenordnung von 15 bis 20 Jahren, bis der gesamte Fahrzeugbestand ausgewechselt ist. (Von diesem Austauschprozess ist auch das mittlere Fahrzeualter im Bestand geprägt, das bei knapp zehn Jahren liegt – wobei zu berücksichtigen ist, dass dabei wenige sehr alte Pkw sehr stark auf diesen Mittelwert wirken.¹¹) Die lange Dauer des Austauschs des Fahrzeugbestandes ist der Grund dafür, dass der Markthochlauf der Elektromobilität im Bestand der Entwicklung bei den Neuzulassungen mehrere Jahre hinterherhinkt.

Bei knapp zwei Dritteln der Pkw-Neuzulassungen handelt es sich um gewerbliche Zulassungen.¹² Viele davon sind Kurzzeitzulassungen auf die Autohersteller selbst oder auf Autohäuser. Dazu kommen echte gewerbliche Nutzungen, zum Beispiel durch Handwerksbetriebe. Größere Anteile von Neuwagen, gerade aus dem Premiumsegment, treten indes als Dienstwagen und dementsprechend mit gewerblicher Zulassung in den Fahrzeugbestand ein. Sie stehen also Privathaushalten zur Verfügung und werden vielfach wie Privatfahrzeuge genutzt. Bezogen auf den Bestand sind nur gut 10 % der Pkw gewerblich zugelassen (am 1. Januar 2021 etwa fünf Millionen).¹³ Das bedeutet, dass bei jungen Pkw der Anteil der gewerblichen Zulassungen beziehungsweise der Dienstwagen zwar sehr hoch ist, diese aber teilweise schon nach wenigen Monaten oder Jahren in den privaten Pkw-Bestand übergehen. Insgesamt steht den Privathaushalten etwa die Hälfte der gewerblich zugelassenen Fahrzeuge als Dienstwagen zur Verfügung. Das bedeutet, dass etwa 95 % aller in Deutschland zugelassenen Pkw von Privathaushalten genutzt werden. Umgerechnet heißt das für das Jahr 2020 eine Motorisierung von etwa 550 Pkw pro 1000 Einwohnende in deutschen Privathaushalten – wobei die Motorisierung im ländlichen Raum mit über 600 Pkw pro 1000 Einwohnende um mehr als die Hälfte höher ausfällt als in Metropolen mit weniger als 400 Pkw pro 1000 Einwohnende.

Der Fall der Dienstwagen verdeutlicht auch, dass Fahrzeuge während ihres Verbleibs im zugelassenen Fahrzeugbestand verschiedene Nutzungsphasen durchlaufen – oft bei unterschiedlichen Besitzenden. Aus einer ebenfalls relativ stabilen Anzahl von jährlich etwa sieben Millionen Halterwechseln in Deutschland ergibt sich, dass ein Pkw während seines Lebenszyklus von rund 15 bis 20 Jahren etwa drei bis vier Besitzenden gehört. Es

¹⁰ Vgl. [Kraftfahrt-Bundesamt \(KBA\)](#).

¹¹ Vgl. [Kraftfahrt-Bundesamt \(KBA\) 2021](#).

¹² Vgl. [Kraftfahrt-Bundesamt \(KBA\) 2020](#).

¹³ Vgl. [Kraftfahrt-Bundesamt \(KBA\) 2021](#).

wird sich zeigen, ob diese Größenordnungen in Zukunft auch für Elektrofahrzeuge gelten, oder ob sich bei ihnen – etwa aufgrund eines anderen Alterungsverhaltens jener Autos – andere Verhältnisse einstellen.

Ähnlich wie der Pkw-Bestand ist auch die Gesamtfahrleistung der Autos in Deutschland gestiegen – allerdings nicht im selben Maße. Daraus folgt, dass die Fahrleistung je Auto langfristig zurückgeht, da sich die Gesamtfahrleistung auf immer mehr Autos verteilt. Während die Fahrleistung pro Pkw im Jahr 2014 noch bei etwa 14.100 km lag, sank sie bis 2019 auf 13.600 km.¹⁴ Darin spiegelt sich auch wider, dass ein großer Teil des Bestandszuwachses bei Zweit- und Drittwagen sowie bei älteren Menschen und damit bei Gruppen stattfindet, die typischerweise keine besonders hohe Fahrleistung aufweisen.

Entsprechend der erwähnten unterschiedlichen Nutzungsphasen im Verlauf eines Pkw-Lebenszyklus sinken im Durchschnitt die Jahresfahrleistungen der Autos mit zunehmendem Fahrzeugalter (vgl. Abb. 22.1). Die höheren Fahrleistungen neuer Autos führen dazu, dass neue Fahrzeuge einen größeren Anteil der Gesamtfahrleistung ausmachen als ältere. Bleibt dieses Schema auch beim künftigen Markthochlauf der Elektromobilität erhalten, macht das die im Vergleich zu den Neuzulassungen verzögerte Entwicklung im Bestand zumindest teilweise wieder wett: Die noch jungen und deshalb viel gefahrenen Elektroautos dürften einen größeren Anteil an der Fahrleistung als am Fahrzeugbestand ausmachen. Derzeit lässt sich das allerdings noch nicht beobachten.

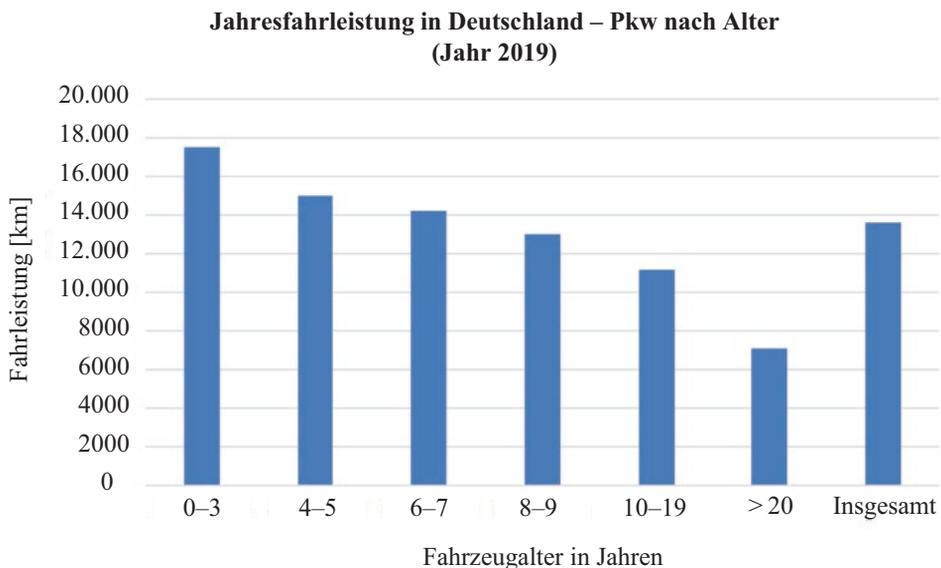


Abb. 22.1 Jahresfahrleistung von Pkw im deutschen Fahrzeugbestand nach Alter. Eigene Darstellung mit Daten des KBA

¹⁴Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2021.

Wie das menschliche Verkehrsverhalten unterscheidet sich auch die Fahrleistung pro Pkw zwischen Stadt und Land – allerdings deutlich geringfügiger als auf Ebene der Personen: Die Stadtbevölkerung (Metropolen: 14 km pro Person und Tag) weist im Vergleich zur Landbevölkerung (dörflicher Raum: 26 km je Person und Tag) nur etwa die Hälfte der Kilometer als Fahrer im Pkw auf. Demgegenüber bringen es Autos in Metropolen auf eine jährliche Fahrleistung, die bei mehr als 80 % der Fahrleistung von Pkw auf dem Land liegt.¹⁵ Mit anderen Worten: Die Stadtbevölkerung fährt deutlich weniger mit dem Auto als die Landbevölkerung. Weil sich aber die Fahrleistung in der Stadt auch auf weniger Fahrzeuge verteilt, ist der Unterschied zwischen Stadt und Land auf Ebene der Fahrzeuge nicht so groß, wie man es erwarten könnte.

Wichtig im Hinblick auf die Unterschiede der Pkw-Nutzung in der Stadt und auf dem Land ist im Kontext der Elektromobilität auch die durchschnittliche Weite der Pkw-Fahrten (vgl. Abb. 22.2) In kleinen und mittelgroßen Städten fällt sie am geringsten und in Metropolen am höchsten aus. Sie unterscheidet sich außerdem nur wenig zwischen den unterschiedlichen Raumtypen. Noch aussagekräftiger im Hinblick auf etwaige Probleme durch mangelnde Reichweite ist der Fernverkehrsanteil der Pkw-Fahrten. Nur 1,8 % reichen weiter als 100 km, jedoch machen diese etwa ein Viertel der Pkw-Fahrleistung aus und müssen somit als Einflussfaktor bei Pkw-Kauf- und -Nutzungsentscheidungen beachtet werden. Bedeutsam ist hier der Befund, dass der Anteil der Fahrten von mehr als 100 km bei Metropolen-Pkw deutlich höher ausfällt (2,6 %) als für Pkw aus ländlichen Regionen (1,6 %). Es zeigt sich also, dass Stadt-Pkw anteilig häufiger im Fernverkehr eingesetzt werden als Pkw vom Land. Dies widerspricht vielfach der landläufigen Erwartung, erklärt sich aber dadurch, dass die Stadtbevölkerung für kurze Wege häufiger Alternativen nutzt als die Landbevölkerung. Solange Reichweitenmangel eine Hürde darstellt, ist Elektromobilität im ländlichen oder suburbanen Bereich einfacher zu verankern als in Großstädten.

Zur Ableitung von Grundlagen für Ladeinfrastruktur ist außerdem von Bedeutung, welche Nutzungsmuster Pkw im Alltag aufweisen beziehungsweise wann sie sich wie lange wo befinden. Im Mittel werden Autos für etwa zwei Wege pro Tag eingesetzt, wobei jedoch zwei Fünftel der Pkw an einem durchschnittlichen Tag gar nicht bewegt werden. Insgesamt verbringen Autos die deutlich überwiegende Zeit parkend: Nur etwa 3 % ihrer Zeit (rund 45 min pro Tag) befinden sich Pkw im Fahrtmodus. Den weitaus überwiegenden Teil seiner Zeit – durchschnittlich etwa 20 h pro Tag – verbringt ein Auto parkend am Wohnort. Die übrigen Zeiten entfallen auf Parken am Arbeitsplatz (im Mittel aller Pkw rund 1 h und 40 min) sowie Parken an anderen Zielen.¹⁶

Abb. 22.3 zeigt, welcher Anteil der Autos zu den verschiedenen Stunden im Wochenverlauf jeweils unterwegs beziehungsweise geparkt ist. Außerdem sind die jeweiligen Aktivitäten der Pkw-Nutzenden am Zielort aufgeführt. Abb. 22.3 offenbart die große Dominanz des Parkens zu Hause: Im gesamten Wochenverlauf gibt es keinen Zeitpunkt, an dem

¹⁵Vgl. Nobis und Kuhnimhof 2018.

¹⁶Vgl. Nobis und Kuhnimhof 2018.

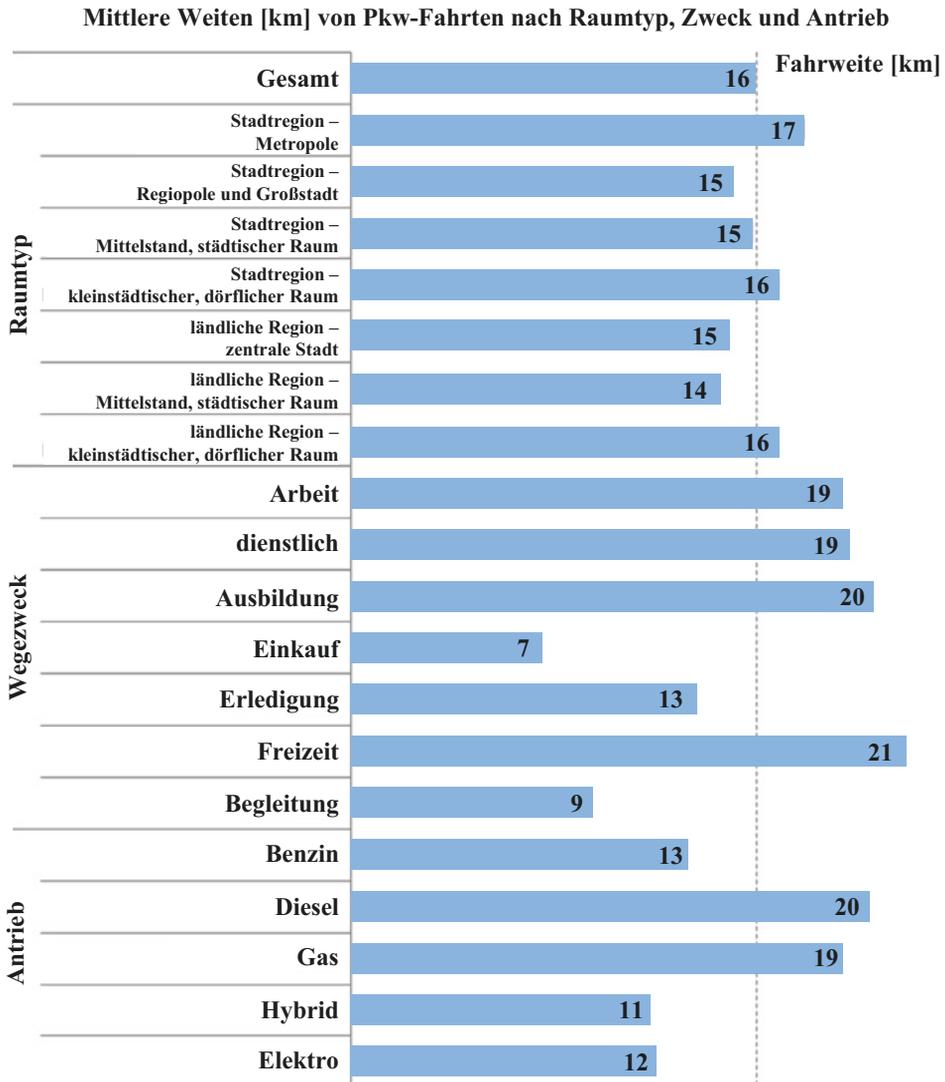


Abb. 22.2 Mittlere Fahrtweiten nach Pkw-Merkmalen. Eigene Darstellung mit Daten der MID 2017

weniger als die Hälfte der Pkw am Wohnort geparkt sind. Abb. 22.3 zeigt zudem, dass zu keiner Zeit mehr als etwa ein Zehntel der Autos gleichzeitig unterwegs ist. Diese Beobachtung stimuliert immer wieder die Vorstellung, dass sich der Bedarf an Pkw-Mobilität mit einer viel kleineren Flotte decken lässt, die mit einem anderen Geschäftsmodell als dem heutigen Privat-Pkw betrieben wird, und nur zu kurzen Zeiten des Tages voll ausgelastet ist. Inwieweit sich Geschäftsmodelle entwickeln lassen, die dieses Potenzial heben und damit Fahrzeugnutzungsmuster künftig fundamental verändern, bleibt abzuwarten.

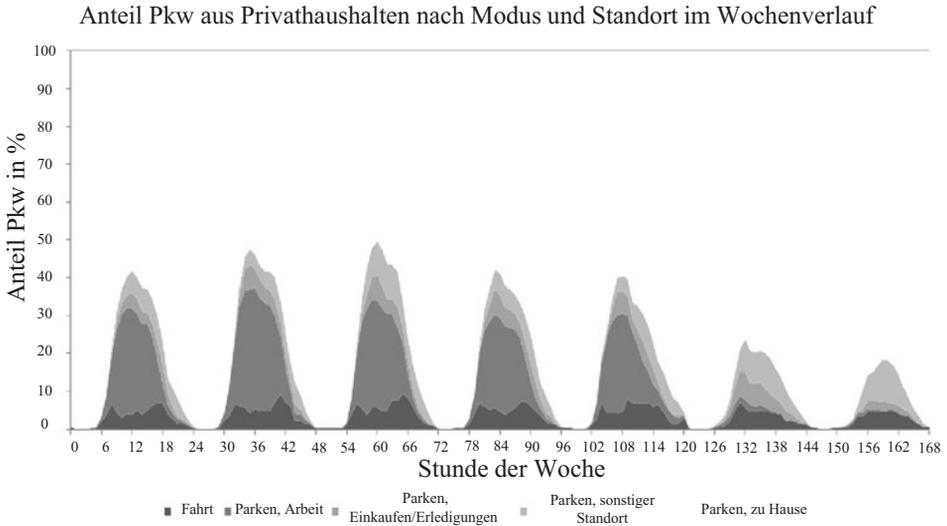


Abb. 22.3 Aktivität und Standort der Pkw im Wochenverlauf. Eigene Darstellung mit Daten der MID 2017

22.3 Zweiräder

Bei Zweirädern sind Motorräder und Fahrräder getrennt voneinander zu betrachten, deren jeweilige Bedeutung für den Alltagsverkehr – auch mit Blick auf deren Entwicklung in den vergangenen Jahrzehnten – sich deutlich unterscheidet. Die folgenden Ausführungen widmen sich zunächst dem zahlenmäßig deutlich relevanteren Fahrrad; im Anschluss wird kurz das Motorrad betrachtet. Dies soll die Grundlagen für die Diskussion über eine Hybridisierung jener Fahrzeugformen schaffen, die im Zuge der Elektrifizierung bereits eingeleitet zu sein scheint.

Zu Beginn der Motorisierung in der Nachkriegszeit war das Fahrrad ein bedeutendes Alltagsverkehrsmittel. Allerdings ging die Fahrradnutzung mit zunehmender Verbreitung motorisierter Verkehrsträger bis in die 1970er-Jahre hinein deutlich zurück. Anschließend hat zunächst eine Stabilisierung und dann ein schwaches Wiedererstarben des Radverkehrs stattgefunden. Seit den 1990er-Jahren spricht man von einer Renaissance des Fahrrads – vor allem deshalb, weil die Fahrradkilometer pro Person in den vergangenen Jahren wieder deutlich zugenommen haben. Heute werden etwa 1,4 km pro Person und Tag mit dem Fahrrad zurückgelegt. Das entspricht grob einer Verdreifachung des Radverkehrs pro Person seit den 1970er-Jahren. Obwohl das Fahrrad (inklusive Pedelec) nun einen Anteil von knapp 11 % an den Wegen in Deutschland hält, werden damit weniger als 3,5 % der Verkehrsleistung absolviert, da es eher für vergleichsweise kurze Distanzen zum Einsatz kommt.

Der Bestand von rund 900 Fahrrädern pro 1000 Personen bedeutet, dass heute fast jede Person in Deutschland ein Fahrrad besitzt, das im Durchschnitt gut 500 km pro Jahr bewegt wird. Die Unterschiede zwischen den Raumtypen im Hinblick auf die Ausstattung mit Fahrrädern sind gering. Bezüglich der Häufigkeit des Radfahrens ist die Bevölkerung nahezu dreiteilig: Ein Drittel nutzt das Fahrrad mindestens einmal in der Woche, ein weiteres Drittel nutzt das Fahrrad seltener und das letzte Drittel nutzt das Fahrrad eigenen Angaben zufolge nie. Diese Dreiteilung findet sich in der Stadt und auf dem Land sowie in unterschiedlichen Altersklassen wieder. Lediglich bei Kindern ist der Anteil der regelmäßigen Fahrradnutzer höher und liegt bei ungefähr der Hälfte.

Krafträder waren wie Fahrräder zu Beginn der Motorisierung in den 1950er-Jahren ein deutlich bedeutenderes Verkehrsmittel in Deutschland als sie es heute sind. Mitte der 50er-Jahre lag die Ausstattung mit Krafträdern bei etwa 50 pro 1000 Personen und damit in einer ähnlichen Größenordnung wie heute.¹⁷ Bis Ende der 1950er-Jahre war der Motorradbesitz in Deutschland höher als der Pkw-Besitz. Dann löste der Pkw das Motorrad als dominierendes motorisiertes Individualverkehrsmittel ab und der Motorradbesitz sank bis Anfang der 1970er-Jahre rapide – auf etwa fünf Motorräder pro 1000 Einwohnende. Damit verschwand das Motorrad nahezu vollständig aus dem Alltagsverkehr.

Ab dem Ende der 1970er-Jahre erlebte das Motorrad zwar wieder einen Aufschwung, aber nicht als Alltags-, sondern als Freizeitverkehrsmittel. Dabei waren es zunächst die damals jungen Erwachsenen, bei denen der Motorradbesitz wieder zunahm. Mittlerweile hat diese Jahrgangskohorte ihre Motorradaffinität gewissermaßen mit ins Alter genommen. So sind es heute die Über-50-Jährigen, bei denen Motorräder besonders verbreitet sind.¹⁸ Trotz eines Bestandes von 4,5 Mio. Krafträdern in Deutschland sind Motorräder als Alltagsverkehrsmittel nach wie vor fast bedeutungslos: Nur 0,6 % der Wege und 0,8 % der Personenverkehrsleistung werden mit ihnen erbracht.¹⁹ Die mittlere spezifische Fahrleistung von Krafträdern lag 2014 bei rund 3000 km pro Motorrad und Jahr, wobei der Freizeiteinsatz eine bedeutende Rolle spielt.²⁰

Bis vor wenigen Jahren waren Krafträder und Fahrräder technisch wie funktional meist klar erkennbar voneinander zu unterscheiden. Hybride Fahrzeugformen bildeten die absolute Ausnahme. Mit der Elektrifizierung von Zweirädern beginnt diese Abgrenzung jedoch zu verschwimmen. Für die Einstufung elektrifizierter Zweiräder im juristischen Sinne als Fahrrad oder als Kraftfahrzeug sind die Geschwindigkeit im elektrischen Betriebsmodus sowie die Notwendigkeit des Tretens entscheidend: Liefert der Elektroantrieb lediglich eine Tretunterstützung und ist nur bis zu einer Geschwindigkeit von 25 km/h aktiv, so wird das Zweirad als Fahrrad eingeordnet. Weitere elektrische Zweiräder sind anders kategorisiert, so dass damit je nach Fahrzeugmerkmal etwa Fahrerlaubnisvoraussetzungen oder

¹⁷Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 2021.

¹⁸Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2020.

¹⁹Vgl. Nobis und Kuhnimhof 2018.

²⁰Vgl. Bäumer et al. 2017.

eine Helm-, Kennzeichen- oder Versicherungspflicht einhergehen können.²¹ Der Trend der vergangenen Jahre hin zu einer zunehmenden Bedeutung elektrifizierter Fahrräder geht aus der Verkaufstatistik hervor: Von den im Jahr 2020 in Deutschland abgesetzten fünf Millionen Fahrrädern (2019: 4,4 Mio.) waren etwa zwei Fünftel E-Bikes (2019: ein Drittel).²²

22.4 Busse des öffentlichen Verkehrs

Im Jahr 2019 betrug der Kraftomnibus-Bestand in Deutschland knapp 80.000 Fahrzeuge.²³ In den vergangenen Jahren gab es zwischen 6000 und 6500 Neuzulassungen jährlich, so dass etwa ein Zwölftel des bundesweiten Busbestandes pro Jahr ausgetauscht wird.²⁴ Entsprechend sind etwa zwei Drittel der Busse in Deutschland jünger als zehn Jahre. Im Durchschnitt bleibt die Jahresfahrleistung von Bussen in den ersten zehn Jahren nahezu konstant und liegt in einer Größenordnung von etwa 60.000 km. Busse werden somit in ihren ersten zehn Jahren relativ unabhängig von ihrem Alter eingesetzt.

Etwa ein Zehntel des deutschen Busbestandes wird im Gelegenheitsfernverkehr betrieben. Umgekehrt ist die weit überwiegende Zahl der Busse im Linienverkehr des öffentlichen Verkehrs eingesetzt. Der Buslinienverkehr zeichnet sich durch Fahrpläne und damit durch regelmäßige, vorhersagbare Einsatzmuster aus. Die Elektrifizierung von Bussen erscheint damit naheliegender als für Fahrzeuggruppen mit weniger vorhersehbaren Einsatzfeldern.

22.5 Fahrzeuge des Wirtschaftsverkehrs

Der Wirtschaftsverkehr deckt eine äußerst große Bandbreite unterschiedlicher Fahrzeuge und verschiedener Einsatzfelder ab. Sie reichen von gewerblich zugelassenen und eingesetzten Pkw (rund 5 % des Pkw-Bestandes) über leichte Nutzfahrzeuge bis hin zu schweren Lkw und Sattelzugmaschinen. Wesentliche Strukturen zu Bestand, Neuzulassungen und Fahrleistungen im Vergleich zu Pkw sind Tab. 22.1 zu entnehmen. Im Hinblick auf die Antriebe handelt es sich bei Nutzfahrzeugen mit wenigen Ausnahmen bislang nahezu komplett um Dieselfahrzeuge.²⁵

²¹ Vgl. [ADAC 2020](#).

²² Vgl. [Zweirad-Industrie-Verband \(ZIV\) 2021](#).

²³ Vgl. [Kraftfahrt-Bundesamt \(KBA\) 2021](#).

²⁴ Vgl. [Kraftfahrt-Bundesamt \(KBA\) 2020](#).

²⁵ Vgl. [Kraftfahrt-Bundesamt \(KBA\) 2021](#).

Tab. 22.1 Übersicht zu Bestand, Neuzulassungen und Jahresfahrleistungen von Nutzfahrzeugen und Pkw 2019 im Vergleich. Datenquelle: KBA^a

	Mittlerer Fahrzeugbestand	Neuzulassungen	Anteil Fahrzeuge Alter < 10 Jahre	Jahresfahrleistung pro Fahrzeug [km]
2019				
Pkw	46.482.116	3.607.258	61 %	13.602
Kraftomnibusse	79.598	6437	65 %	55.346
Leichte Nutzfahrzeuge (bis 3,5 t)	2.653.044	297.128	72 %	19.343
Lkw (> 3,5 t bis 7,5 t)	237.931	14.007	49 %	16.896
Lkw (> 7,5 t)	313.064	32.503	74 %	38.158
Sattelzugmaschinen	212.377	38.620	91 %	89.667

^aVgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2021.

Bei den meisten Nutzfahrzeuggruppen sind die Fahrleistungen höher und der Bestandsumschlag schneller als beim Pkw. Eine Ausnahme bilden kleine Lkw mit 3,5 bis 7,5 t zulässiger Gesamtmasse, in deren Gruppe sich auch viele ältere Fahrzeuge befinden und die etwa auch bei Handwerksbetrieben oder kleinen Bauunternehmen zum Einsatz kommen. Durch schnellen Bestandsumschlag und hohe Fahrleistungen zeichnen sich vor allem Sattelzugmaschinen aus, die mit etwa 90.000 km pro Jahr, die zu großen Teilen im Fernverkehr erbracht werden, die Fahrzeuggruppe mit der höchsten Jahresfahrleistung bilden. Bei ihnen wird außerdem fast der gesamte Fahrzeugbestand innerhalb eines Jahrzehnts ausgewechselt. Innovationen in den Fahrzeugen setzen sich bei Sattelzugmaschinen somit besonders schnell im Bestand durch. Allerdings ist bei dieser Fahrzeuggruppe zu beachten, dass ein großer Teil der in Deutschland absolvierten Fahrleistung (2014: 41 % der Fahrleistung auf Bundesautobahnen)²⁶ durch ausländische Sattelzugmaschinen erbracht werden. Insofern sind Bestand und Nutzungs-Charakteristika von in Deutschland zugelassenen Fahrzeugen bei dieser Gruppe weniger aussagekräftig für das bundesweite Verkehrsgeschehen als im Fall anderer Fahrzeuggruppen.

Herausgehoben seien noch die leichten Nutzfahrzeuge, die in den vergangenen Jahren stark an Bedeutung gewonnen haben. Dies gilt insbesondere für den Stadtverkehr, da diese Fahrzeuge vielfach für Lieferungen – etwa im Zustellverkehr für Onlinehandel – zum Einsatz kommen. Sie sind damit auch stark an einem wachsenden Güterverkehr in Wohngebieten beteiligt, die ursprünglich nicht für diesen, sondern vor allem für den Verkehr der Bevölkerung ausgelegt wurden. Damit tragen leichte Nutzfahrzeuge in besonderem Maße zu Herausforderungen im städtischen Verkehr und zu dortigen Emissionen bei, was in den vergangenen Jahren vor allem in diesem Segment zu Anstrengungen mit Blick auf eine Antriebsumstellung beigetragen hat.

²⁶Vgl. Bäumer et al. 2017.

Literatur

Teil V: Infrastruktur für die Elektromobilität

- ADAC:** *Pedelecs & E-Bikes: Das sollten Sie wissen.* <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/zwei-rad/fahrrad-ebike-pedelec/vorschriften-verhalten/pedelec-ebike/>. Abruf 11.09.2021
- Axhausen, K. W; Dolci, C; Fröhlich, P; Scherer, M; Carosio, A.:** *Constructing Time-Scaled Maps: Switzerland from 1950 to 2000†.* In: *Transport Reviews*, Jg. 28, 2008, Nr. 3, S. 391–413
- Bäumer, M; Hautzinger, H; Pfeiffer, M; Stock, W; Lenz, B; Kuhnimhof, T. G; Köhler, K.:** *Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung* (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen V, Verkehrstechnik, Heft 290). Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH, August 2017
- BMWi:** *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland.* <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2020.pdf>. Abruf 16.06.2021
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI):** *Verkehr in Zahlen 2020/2021*, 2021
- Ecke, L; Chlond, B; Magdolen, M; Vortisch, P.:** *Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2019/2020: Alltagsmobilität und Fahrleistung.* Karlsruhe, 2020
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA):** *Neuzulassungen von Personenkraftwagen in den Jahren 2011 bis 2020 nach ausgewählten Kraftstoffarten.* [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Umwelt/2020/2020_n_umwelt_zeitreihen.html?nn=3525054&fromStatistic=3525054&yearFilter=2020](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Umwelt/2020/2020_n_umwelt_zeitreihen.html?nn=3525054&fromStatistic=3525054&yearFilter=2020&fromStatistic=3525054&yearFilter=2020). Abruf 11.10.2021
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA):** *Statistische Mitteilungen. Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern am 1. Januar 2002* (Reihe 2: Kraftfahrzeuge Jahresband 2002). Flensburg, 2002
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA):** *Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Haltern, Wirtschaftszweigen 1. Januar 2020.* Flensburg, 2020
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA):** *Fahrzeugzulassungen (FZ), Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, Jahr 2019, FZ 14.* Flensburg, 2020
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA):** *Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter. 1. Januar 2021. FZ 15.* Flensburg, 2021
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA):** *Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen 1. Januar 2021.* Flensburg, 2021
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA):** *Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Haltern, Wirtschaftszweigen. 1. Januar 2021. FZ 23.* Flensburg, 2021
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA):** *Verkehr in Kilometern (VK), Zeitreihe 2014–2021.* Flensburg, 10.09.2021
- Nobis, C; Kuhnimhof, T.:** *Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur.* Bonn, Berlin, 2018
- Schulz, A; Kuhnimhof, T; Nobis, C; Chlond, B; Magdolen, M; Bergk, F; Kämper, C; Knörr, W; Kräck, J; Jödden, C; Sauer, A; Führer, M; Frick, R.:** *Klimawirksame Emissionen des deutschen Reiseverkehrs. Abschlussbericht*, 2020
- Seum, S; Schulz, A; Kuhnimhof, T.:** *The evolutionary path of automobility in BRICS countries.* In: *Journal of Transport Geography*, Jg. 85, 2020, S. 102739
- Zweirad-Industrie-Verband (ZIV):** *Zahlen – Daten -Fakten zum Fahrradmarkt in Deutschland 2020* (Wirtschaftspressekonferenz am 10. März 2021 in Berlin). Berlin, 10.03.2021

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Tobias Kuhnimhof und Marcel Porschen

Trotz ihrer bisher weiterhin geringen Marktdurchdringung sind Elektrofahrzeuge bereits heute in vielen verschiedenen Einsatzfeldern vorzufinden. Für die kommenden Jahre ist in allen Bereichen mit einem deutlichen Bedeutungszuwachs der Elektromobilität zu rechnen. Die folgenden Unterkapitel widmen sich der Etablierung der Elektromobilität in der Individualmobilität von Privathaushalten, im öffentlichen Verkehr, in Mobilitätskonzepten und im Wirtschaftsverkehr.

23.1 Elektromobilität in Privathaushalten: Elektrische Pkw

Anfang 2021 hatte nur etwas mehr als die Hälfte der elektrischen Pkw (BEV und PHEV) eine private Zulassung.¹ Dennoch ist davon auszugehen, dass auch ein Großteil der elektrischen Pkw mit gewerblicher Zulassung Privathaushalten zur Verfügung steht. Es handelt sich bei Elektrofahrzeugen meist um sehr junge Fahrzeuge, die vielfach als Dienstwagen

¹ Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2021.

T. Kuhnimhof (✉)

Universitätsprofessor, Lehrstuhl und Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr (ISB), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: kuhnimhof@isb.rwth-aachen.de

M. Porschen

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Lehrstuhl und Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr (ISB), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: porschen@isb.rwth-aachen.de

von Privathaushalten genutzt werden. Dies bestätigen auch Zahlen aus dem Jahr 2017,² als etwa die Hälfte der elektrischen Autos bei Privathaushalten als Firmenwagen zugelassen war. Bei den Pkw ist die Elektromobilität somit deutlich von den Privathaushalten dominiert.

Aus dem Jahr 2017 stammt die bis dato jüngste große bundesweite Mobilitätsbefragung. Die Erhebung „Mobilität in Deutschland“ erlaubt einen umfangreichen Vergleich elektrischer Pkw mit konventionellen Pkw aus Privathaushalten im Hinblick auf Nutzung und Rahmenbedingungen. Auch wenn der Bestand elektrischer Pkw (BEV und PHEV) sich von etwa 55.000 im Jahr 2017 auf fast 600.000 im Jahr 2021 vervielfacht hat,³ liefert der Vergleich auf der Basis von 2017 immer noch wichtige Aufschlüsse. Dabei sind Unterschiede zwischen elektrischen Pkw und konventionellen Pkw zu erkennen. Die folgenden Abschnitte zeigen diese Besonderheiten auf und formulieren Hypothesen dazu, wie sich diese Unterschiede weiterentwickeln dürften, wenn die Elektromobilität die Nische der „Early Adopters“ verlässt und ein Mainstream-Markt wird.

Die mittlere Jahresfahrleistung von Elektrofahrzeugen (vgl. Tab. 23.1) lag 2017 unter der mittleren Jahresfahrleistung des Gesamtbestandes der Pkw, aber über derjenigen für Benziner. (In diesem Fall handelt es sich um durch die Befragten selbst geschätzte Jahresfahrleistungen, weshalb sie von den oben gezeigten, durch das KBA ausgewiesenen Werten abweichen.) Wird zusätzlich beachtet, dass Elektrofahrzeuge unterdurchschnittliche Fahrtweiten und einen deutlich geringeren Anteil längerer Fahrten aufweisen, wird deutlich, dass die Einsatzmuster von Elektrofahrzeugen durch viele Einzelfahren im unteren Entfernungssegment bestimmt sind. Dies entspricht der Erwartung – einerseits aufgrund der Reichweitenproblematik und andererseits, weil die Elektromobilität sich wegen der höheren Investitionskosten bei insgesamt geringeren Fahrleistungen derzeit nicht lohnt. In diesem Punkt bleibt abzuwarten, ob sich die Nutzungsmuster von Elektrofahrzeugen im Zuge des Markthochlaufs zunehmend an diejenigen konventioneller Fahrzeuge anpassen oder ob sich durch die Elektromobilität die Nutzungsmuster von Pkw langfristig verändern.

Tab. 23.1 Mittlere Jahresfahrleistungen, mittlere Fahrtweiten und Anteil längerer Fahrten für Pkw mit unterschiedlichen Antriebsarten im Vergleich. (Auswertung der MiD 2017)

	Mittlere geschätzte Jahresfahrleistung [km]	Mittlere Entfernung von Einzelfahrten [km]	Anteil Einzelfahrten von mehr als 30 km
Gesamt	14.700	15	11 %
Benzin	11.800	13	8 %
Diesel	20.600	20	15 %
Gas	19.000	19	19 %
PHEV & Hybrid	14.500	11	9 %
Elektro	13.100	12	3 %

²Vgl. Nobis und Kuhnimhof 2018.

³Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2021.

Auch die Rahmenbedingungen im Hinblick auf das Vorhandensein eines Stellplatzes zu Hause und die Verfügbarkeit weiterer Pkw im Haushalt lassen den Schluss zu, dass im Jahr 2017 die Reichweitenproblematik neben der Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur ein wichtiger Faktor bei der Entscheidung für oder gegen ein Elektroauto war: Während ein Viertel aller Pkw aus Privathaushalten daheim nicht auf eigenem Gelände parkte, war dies bei den Elektroautos weniger als jedes zehnte. Vieles spricht dafür, dass dies maßgeblich von der Möglichkeit beeinflusst ist, zu Hause laden zu können. Allerdings können auch andere Faktoren wie etwa höhere Haushaltseinkommen eine Rolle spielen. Dies dürfte zum Teil auch den größeren Pkw-Besitz von Haushalten mit Elektrofahrzeug erklären: Während im Gesamtbestand etwa jedes zweite Auto das einzige im jeweiligen Haushalt ist, gilt dies nur für ein Viertel der Elektro-Pkw. Mit Blick auf Ladeinfrastruktur und vor allem das Laden im öffentlichen Raum bedeutet das: 2017 konnte der weit überwiegende Teil der Elektro-Pkw zu Hause am eigenen Stellplatz geladen werden und bei einem Großteil der Elektroautos konnten die Nutzer für längere Fahrten auf andere Pkw im Haushalt ausweichen.

Die Summe der genannten Faktoren – vergleichsweise viele Fahrten, darunter nur wenige weite Strecken, hoher Anteil mit eigenem Stellplatz und mehrere Pkw pro Haushalt – spiegelt sich auch darin wider, dass Elektromobilität 2017 eher ein Phänomen der kleinen und mittelgroßen Städte oder der ländlichen Bereiche war: Während damals ein knappes Drittel des gesamten Pkw-Bestandes Haushalten aus Metropolen und Großstädten gehörte, traf dies auf weniger als ein Viertel der Elektro-Pkw zu.

Die Verteilung des Pkw-Bestandes auf Raumtypen insgesamt, die räumlichen Bedingungen des Wohnungsbestandes im Hinblick auf Stellplatzverfügbarkeit und die Ausstattung der Haushalte mit mehreren Pkw ändern sich nur langsam. Insofern ist für den Markthochlauf der Elektromobilität in den kommenden Jahren davon auszugehen, dass sich die Rahmenbedingungen für E-Fahrzeuge hinsichtlich dieser Faktoren immer mehr denen des gesamten Pkw-Bestandes anpassen werden.

Mit Blick auf die Ladeinfrastruktur für Elektroautos lässt sich aus der großen Bedeutung von Pkw aus Privathaushalten ableiten, dass diese und ihre Nutzungsmuster zu großen Teilen maßgeblich für die Ladeinfrastruktur sind. Es existieren Unterschiede zwischen elektrischen und konventionellen Pkw bezüglich wichtiger Rahmenbedingungen und Nutzungsmuster. Allerdings sind diese nicht sehr groß, und es ist zu erwarten, dass sie sich im Zuge der weiteren Verbreitung der Elektromobilität nivellieren. Dies gilt auch deshalb, weil Einschränkungen in der frühen Phase der E-Mobilität – etwa durch mangelhafte Reichweite oder Lademöglichkeiten – immer mehr an Bedeutung verlieren dürften. Gleichzeitig gehen mit Elektroautos aber keine grundsätzlich neuen oder gegenüber konventionellen Pkw maßgeblich erweiterten Einsatzmöglichkeiten einher, wie es zum Beispiel bei Pedelecs im Vergleich zu Fahrrädern der Fall ist.

Somit wird wahrscheinlich ein zunehmend größerer Teil konventioneller Pkw-Mobilität durch Elektromobilität ersetzt, ohne dass sich an den Grundstrukturen der Pkw-Nutzung Maßgebliches ändert. Dies lässt den Schluss zu, dass die Nutzungsmuster auch konventioneller Pkw eine wichtige Orientierung für den Aufbau von Ladeinfrastruktur in den kom-

menden Jahren bieten. Dennoch sollte immer wieder überprüft werden, ob Elektromobilität nicht zu einem insgesamt veränderten Mobilitätsverhalten – beispielsweise bei der Wahl des Ziels – und infolgedessen zu einer veränderten Pkw-Nutzung führt. Nur so lässt sich sicherstellen, dass der Ladeinfrastruktur-Aufbau bedarfsgerecht erfolgt.

23.2 Elektromobilität in Privathaushalten: Pedelecs

Im Vergleich zum Pkw ist die Elektrifizierung von Zweirädern beziehungsweise Fahrrädern anders einzuordnen: Pedelecs ermöglichen für viele Menschen ein gegenüber dem Fahrrad erweitertes Einsatzspektrum – insbesondere, was Entfernungen betrifft. Deshalb geht mit der Elektrifizierung des Fahrrads nicht vor allem der Ersatz muskelbetriebener Mobilität einher, sondern es entsteht eine neue Zweiradmobilität, die sich etwa durch eine Verlagerung von anderen Verkehrsmitteln auf das Pedelec ergeben kann.

Im Jahr 2017, auf das sich die folgenden Darstellungen zum Einsatz von Pedelecs beziehen, gab es in Deutschland bereits einen Pedelec-Bestand von mehr als 200.000 Fahrzeugen. Dies und die seitdem noch stark gewachsenen Verkaufszahlen machen deutlich, dass der Bestand der Pedelecs denjenigen der Elektroautos bei Weitem in den Schatten stellt. Dabei war elektrische Zweiradmobilität 2017 noch deutlicher ein Phänomen der mittelgroßen und kleinen Städte als dies bei den Elektroautos der Fall war: Während in Metropolen auf 1000 Personen etwa 20 Pedelecs kamen, waren dies außerhalb der großen Städte mit rund 60 Pedelecs je 1000 Personen etwa dreimal so viele.⁴

Durchschnittlich wurden 2017 bereits rund 5 % des gesamten Fahrradverkehrs mit dem Pedelec erledigt. Mit Blick auf das Alter von Radfahrenden gilt: je älter, desto höher war der Anteil der Pedelec-Nutzung am Radverkehr. Während bei Personen unter 40 Jahren eine deutlich unterdurchschnittliche Pedelec-Nutzung von weniger als 3 % vorlag, bewältigten insbesondere Personen im Alter von über 60 Jahren einen großen Teil ihrer Fahrradwege mit dem Pedelec (mehr als 12 %). Vor allem längere Wege von mehr als 15 km wurden gerne mit dem Pedelec absolviert. So kam ein Pedelec 2017 auf eine Jahresfahrleistung, die mit gut 900 km etwa beim Doppelten eines konventionellen Fahrrads liegt.⁵

In der Summe ermöglichen Pedelecs somit eine sehr weitverbreitete Form der Elektromobilität. Dennoch sind sie im Hinblick auf ihre Bedeutung für Ladeinfrastruktur nahezu irrelevant. Ihr Stromverbrauch ist vergleichsweise gering, sie werden üblicherweise an normalen Haushaltssteckdosen geladen, und es dominiert der Ladevorgang zu Hause. Ladeinfrastruktur für Pedelecs an öffentlichen oder öffentlich zugänglichen Orten bildet eine Ausnahme. Sie ist vielfach eher ein Komfortfaktor oder eine Serviceleistung im Sinne des Marketings, etwa an touristischen Zielorten, als dass sie in Form einer flächendeckenden Versorgung zur Sicherung der Mobilität bereitgestellt werden müsste.

⁴Vgl. Nobis und Kuhnimhof 2018.

⁵Vgl. Nobis und Kuhnimhof 2018.

23.3 Öffentlicher Verkehr

Elektrifizierter öffentlicher Verkehr hat bis heute vor allem im Hinblick auf den Schienenverkehr einen großen Stellenwert – und eine mehr als 100-jährige Geschichte. Im Kontext der Elektrifizierung von Straßenfahrzeugen, auf denen hier das Augenmerk liegt, sind jedoch vor allem Busse mit elektrischen Antrieben von Bedeutung. Maßgeblich getrieben durch das Ziel von Verbesserungen der Luftqualität, nehmen sich zahlreiche Städte der Elektrifizierung ihrer Busflotten an. Dabei stehen batterieelektrische Busse im Vordergrund. (Die Alternative Oberleitungsbus ist eine seltene Ausnahme.) Auch wenn Anteil und Anzahl der batterieelektrischen Busse bei den Neuzulassungen noch sehr gering sind (2019: 180 BEV-Busse bei insgesamt 6437 Neuzulassungen;⁶ 2020: 370 BEV-Busse bei insgesamt 6460 Neuzulassungen⁷), ist der Zuwachs deutlich.

Der Anteil batterieelektrischer Busse dürfte in den kommenden Jahren – auch getrieben durch aktuelle EU-Vorgaben – noch deutlich zunehmen: Seit August 2021 müssen in Deutschland 45 % der durch die öffentliche Hand neu beschafften Busse einen alternativen Antrieb haben. Ab 2026 beträgt dieser Anteil 65 %. Die Hälfte dieser Fahrzeuge mit alternativem Antrieb muss emissionsfrei sein, was hauptsächlich durch batterieelektrische Busse erreicht werden dürfte. Somit ist für die nächsten Jahre eine spürbare Umstellung öffentlicher Busflotten auf elektrische Fahrzeuge zu erwarten.⁸

Damit gehen auch Fragen zur Ladeinfrastruktur und zur Integration batterieelektrischer Busse in den Linienbetrieb einher. Dabei sind die Rahmenbedingungen der Elektromobilität durch die vorgegebenen regelmäßigen Einsatzmuster grundlegend verschieden zu den anderen Fahrzeuggruppen. Investitionsentscheidungen, die in diesem Zusammenhang getroffen werden müssen, betreffen die Größe der Batteriespeicher in Fahrzeugen, das Ladesystem (Normalladen, Schnellladen oder Batterietausch) sowie ein Ladekonzept in Verbindung mit einem Standorttyp für Ladeinfrastruktur (etwa Nachtladen im Depot beziehungsweise Gelegenheitsladen an Haltestellen oder Endstationen).

Ladeinfrastrukturen, die sich elektrische Busse mit anderen Fahrzeugen teilen, spielen so gut wie keine Rolle. Das bedeutet, dass die Entwicklung der Infrastruktur für elektrische Busse weitgehend abgekoppelt von der übrigen Ladeinfrastruktur erfolgt. Die große Vorhersagbarkeit des Fahrzeugeinsatzes von Bussen macht Investitionsentscheidungen zur Elektromobilität in diesem Feld außerdem zu einem betriebswirtschaftlichen Optimierungsproblem. Ihr Charakter unterscheidet sich somit grundlegend von den Entscheidungen zum Ausbau der Ladeinfrastruktur für andere Fahrzeuggruppen. Dieses Kapitel geht auf diesen Spezialfall nicht detaillierter ein. Stattdessen sei hier auf die einschlägige und sich schnell entwickelnde Fachliteratur verwiesen.^{9, 10, 11}

⁶Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2020.

⁷Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2021.

⁸Vgl. Europäisches Parlament und Rat 2019.

⁹Vgl. An 2020.

¹⁰Vgl. Kunith 2017.

¹¹Vgl. Shen et al. 2019.

23.4 Mobilitätskonzepte – Elektrifizierung der Shared Micromobility

Die sogenannte Shared Micromobility umfasst verschiedene Service-Modelle und Verkehrsmittel, die den unterschiedlichen Bedürfnissen der Reisenden gerecht werden. Hierunter fallen etwa Fahrradverleihsysteme, wobei sowohl Fahrräder mit als auch ohne elektrische Unterstützung verwendet werden. Darüber hinaus haben sich in vielen Städten E-Scooter-Systeme verbreitet. Zielsetzungen und erhoffte Wirkungen der Shared Micromobility sind ein reduzierter Autoverkehr, die damit einhergehende Verminderung von Treibhausgasen und Luftschadstoffen sowie positive Auswirkungen auf die Gesundheit.¹²

Grundsätzlich ist dabei zwischen zwei Systemen zu unterscheiden: stationsgebunden und nicht stationsgebunden (Free Floating). Daneben existieren Hybridsysteme – etwa in Gestalt eines Pedelec-Verleihsystems, das sowohl über bauliche Stationen mit Lademöglichkeit als auch über Ausleih- und Abgabepunkte ohne Lademöglichkeiten verfügt. Die Systeme im Rheinisch-Bergischen Kreis und im Kreis Euskirchen verfügen beispielsweise neben ihren Stationen mit Bedienterminals, physischen Abstellständern und einer Lademöglichkeit auch über „virtuelle Stationen“, die durch Markierungen und Hinweisschilder sowie in einer App gekennzeichnet sind.¹³

23.4.1 Pedelecs

Pedelecs bilden eine Alternative oder Ergänzung zu herkömmlichen Share-Bikes. Durch die elektrische Unterstützung lassen sich weitere Nutzergruppen erschließen. Auch lässt sich die Abdeckung gegenüber klassischen Leihfahrrädern von zwei bis vier Kilometern auf etwa fünf bis zehn Kilometer steigern.¹⁴ Pedelecs können körperliche Anstrengungen ausgleichen, die durch die Topografie des Raumes entstehen. Neben höheren Kundenpotenzialen ergibt sich für die Betreiber von Pedelec-Verleihsystemen ein zusätzlicher Aufwand, da die Akkus der Fahrräder geladen oder ausgetauscht werden müssen.¹⁵

Fahrradverleihsysteme sind in zahlreichen Städten und Regionen auf der ganzen Welt zu finden. In den vergangenen Jahren sind zuerst in Europa und dann vermehrt in Asien und Nordamerika Pedelec-Verleihsysteme eingeführt worden. Dabei wurden zu Beginn häufig bestehende Fahrradverleihsysteme um Pedelecs erweitert. Die Möglichkeit der Integration des Lademechanismus führte in Europa zunächst zu einer Dominanz der stationsgebundenen Systeme. Free-Floating-Pedelec-Verleihsysteme sind in den USA und in Asien insgesamt verbreiteter als in Europa. Solche Systeme verfügen häufig schon bei der Markteinführung über größere Flotten. In den vergangenen Jahren sind auch in Europa

¹²Vgl. Shaheen und Cohen 2019.

¹³Vgl. RVK 2021.

¹⁴Vgl. Zhang et al. 2020.

¹⁵Vgl. Zhang et al. 2020.

vermehrt stationslose Pedelec-Sharing-Systeme eingeführt worden. Von den im Jahr 2019 neu entstandenen Systemen sind 78 % nicht stationsgebunden.¹⁶

Die primären Nutzungsgruppen können sich je nach Ausrichtung und Betriebsgebiet deutlich unterscheiden. Es existieren sowohl Systeme, die vor allem als Ergänzung zum ÖPNV auf dem letzten Kilometer vorrangig von Pendelnden genutzt werden, als auch solche, bei denen die touristische Nutzung im Vordergrund steht.¹⁷ Teilweise richten sich Systeme mit verschiedenen spezifischen Angeboten auch explizit an unterschiedliche Gruppen, etwa an Reisende oder an Einwohnende.¹⁸ Pedelec-Verleihsysteme in Kooperation mit Akteuren des lokalen öffentlichen Personennahverkehrs können von Personen mit ÖPNV-Zeitkarten häufig vergünstigt oder für einen gewissen Zeitraum gratis genutzt werden.¹⁹

In geringerem Umfang werden auch Lastenfahrräder in Sharing-Flotten angeboten. Diese lassen sich zum Transport unterschiedlicher Waren kurzzeitig ausleihen. Dabei sind jedoch verschiedene zusätzliche Hindernisse zu beachten – zum Beispiel eine unzureichende Breite der Radverkehrswege oder fehlende Abstellmöglichkeiten.²⁰

23.4.2 E-Scooter

Elektrisch betriebene City-Roller, auch „E-Scooter“ genannt, sind zulassungsfreie Fahrzeuge mit Lenk- und Haltestange, deren bauartbedingte Höchstgeschwindigkeit 20 km/h nicht überschreitet. Fahrzeuge mit einer Höchstgeschwindigkeit von weniger als 12 km/h dürfen auf Gehwegen oder in Fußgängerzonen genutzt werden.²¹

In jüngerer Vergangenheit haben verschiedene Anbieter E-Scooter in mehreren deutschen Städten eingeführt. E-Scooter werden vorrangig in einem Free-Floating-System angeboten. Innerhalb eines bestimmten Gebietes dürfen die Elektroroller nahezu überall abgestellt werden. Es gibt keine festen Stationen, an denen die E-Scooter beispielsweise geladen werden können. Als Konsequenz müssen die Roller vom Anbieter zum Laden eingesammelt oder die Akkus ausgetauscht werden.

Bisher liegen nur wenige gesicherte Erkenntnisse zu den Nutzenden und den Wirkungen der E-Scooter auf den „Modal Split“ als dem Mobilitätsverhalten vor. Eine Befragung von E-Scooter-Nutzenden in Paris kam zu der Erkenntnis, dass ihre Hauptmotivation in der Reisezeitersparnis, gefolgt vom Fahrspaß und von Kosteneinsparungen begründet liegt. Dabei werden die E-Scooter vorrangig auf Freizeitwegen verwendet. In Bezug auf die modale Verlagerung kommt die Untersuchung zu zentralen Ergebnissen. Etwa 72 %

¹⁶Vgl. Galatoulas et al. 2020.

¹⁷Vgl. Bieliński und Ważna 2020.

¹⁸Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2021.

¹⁹Vgl. RVK 2021.

²⁰Vgl. Hess und Schubert 2019.

²¹Vgl. Bundesregierung 2019.

der Befragten haben Wege, die zuvor zu Fuß und mit dem ÖPNV zurückgelegt wurden, mit dem E-Scooter absolviert. Rund 18 % haben motorisierte Verkehrsmittel einschließlich Taxi durch die E-Scooter ersetzt. Bei knapp 8 % kam es zu einer erhöhten Verkehrsnachfrage durch die Nutzung der Elektroroller.²² Im US-amerikanischen Portland wiederum werden gemäß dem „Portland Scooter User Survey“ neben Fußwegen (36 %) auch in einem größeren Umfang von 20 % Taxis und taxiähnliche Dienstleistungen substituiert. Auf den motorisierten Individualverkehr entfallen etwa 18 %.²³

Im Zusammenhang mit E-Scootern treten vielerorts zahlreiche Probleme auf. In den Medien wird von Vandalismus, verantwortungslosem Fahrverhalten oder achtlosem Abstellen und Blockieren von Wegen berichtet.²⁴ In der US-Stadt San José wurden im Sommer 2018, im Jahr der Einführung, die Abstellorte der Elektroroller dokumentiert. Mit etwa 72 % wurde ein Großteil der E-Scooter auf Gehwegen abgestellt – von denen wiederum rund 10 % Behinderungen des Fußverkehrs verursachten.²⁵

23.4.3 Carsharing

Carsharing-Systeme verfolgen das Ziel, die Abhängigkeit von eigenen Fahrzeugen zu reduzieren. Dabei kann der Einsatz von Elektrofahrzeugen Emissionseinsparungen bewirken. Zusätzlich kann ein solches Angebot als „Schaufenster“ für die Elektromobilität dienen, indem E-Mobile im Straßenraum sichtbar werden. In einigen deutschen und europäischen Städten bietet es Vorteile, Elektrofahrzeuge einzusetzen; andernorts ist es gar die einzige Möglichkeit, Carsharing anzubieten. So dürfen etwa in der Innenstadt von Madrid keine Sharing-Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor angeboten werden.²⁶ In Deutschland kann das Kriterium „einer Entlastung von straßenverkehrsbedingten Luftschadstoffen, insbesondere durch das Vorhalten elektrisch betriebener Fahrzeuge im Sinne des Elektromobilitätsgesetzes“ (§ 16a (3) 2. StrWG NRW) als Entscheidungskriterium für die Erteilung der Sondernutzungserlaubnis für ein stationsbasiertes Carsharing festgelegt werden.

Laut dem Bundesverband CarSharing e.V. kamen in Deutschland zum 1. Januar 2021 rund 26.200 Fahrzeuge im Carsharing zum Einsatz. Der Anteil der batterieelektrischen Fahrzeuge in den deutschen Carsharing-Flotten beträgt etwa ein Fünftel.²⁷ Neben Mischsystemen mit Verbrenner- und Elektrofahrzeugen gibt es Sharing-Systeme, die ausschließlich E-Mobile anbieten. Das gilt insbesondere für Sharing-Angebote von Fahrzeugherstellern. So war ein OEM-Carsharing-Anbieter im Jahr 2019 mit 1900 Elektro-

²² Vgl. Christoforou et al. 2021.

²³ Vgl. Portland Bureau of Transportation (PBOT) 2019.

²⁴ Vgl. Gössling 2020.

²⁵ Vgl. Fang et al. 2018.

²⁶ Vgl. Ampudia-Renuncio et al. 2020.

²⁷ Vgl. Bundesverband CarSharing e.V. 2021.

fahrzeugen gestartet. Inzwischen soll das Angebot kurzfristig auf eine Flotte von insgesamt 8400 Fahrzeugen ausgebaut werden.²⁸

Ähnlich wie für Privatfahrzeuge, ist auch für Sharing-Fahrzeuge die Ladeinfrastruktur von Bedeutung. Dabei kommen verschiedene Ladekonzepte zum Einsatz, wobei zwischen stationsbasierten und Free-Floating-Carsharing-Systemen zu unterscheiden ist. Abhängig vom System des Carsharing-Angebots können die Fahrzeuge unter Verwendung öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur oder dedizierter Ladeinfrastruktur an dezentralen oder zentralen Standorten geladen werden. Ein weiteres innovatives Konzept besteht beispielsweise in der Kooperation mit Lebensmitteleinzelhändlern, die eine öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur auf den Parkplätzen ihrer Märkte errichten. Während der Öffnungszeiten stehen diese Lademöglichkeiten der Kundschaft zur Verfügung. In den Nachtstunden können dort die Sharing-Fahrzeuge geladen werden.²⁹

23.5 Wirtschaftsverkehr

Die Anforderungen an Elektrofahrzeuge unterscheiden sich im Wirtschaftsverkehr je nach Branche und Einsatzfeld zum Teil deutlich. Der Wirtschaftsverkehr ist unter anderem in Personen- und Güterverkehr zu differenzieren. Viele Unternehmen kennen ihr Einsatzgebiet oder können etwa über Fahrtenbücher die benötigte Reichweite pro Tag aus der bisherigen Nutzung ableiten.

Im Bereich des Personenwirtschaftsverkehrs kommen in vielen Fällen Pkw zum Einsatz. Auf Basis der Flottengröße und Zusammensetzung sowie der durchschnittlichen und maximalen Fahrleistungen bieten sich beispielsweise im Gesundheitssektor große Potenziale für die Umstellung auf elektrische Unternehmensflotten. Abgeschwächt gilt dies auch für den Handwerksbereich, in dem teilweise auch leichte Nutzfahrzeuge zum Einsatz kommen.³⁰

Im Güterverkehr können die Arten der eingesetzten Fahrzeuge und deren Eigenschaften stark variieren. So ist insbesondere bei Fahrzeugen, die vorrangig im Fernverkehr eingesetzt werden, eine hohe Reichweite wichtig.

23.5.1 „Last-Mile“-Logistik

Das fortschreitende Wachstum des Onlinehandels hat das Aufkommen von Paketlieferungen deutlich erhöht. Die größere Anzahl von Zustellfahrzeugen hat vor allem in den Städten zu einer verstärkten Flächenkonkurrenz sowie zu Lärm und zunehmenden Schadstoffemissionen geführt.

²⁸ Vgl. Volkswagen 2020.

²⁹ Vgl. Volkswagen 2020.

³⁰ Vgl. Christensen et al. 2017.

Neue Verteilkonzepte, wie etwa Micro-Hubs, führen dazu, dass neben leichten Nutzfahrzeugen auch Lastenräder im Bereich der „Last-Mile“-Logistik eingesetzt werden.³¹ Die Radverkehrsinfrastruktur ist jedoch nicht immer für die Ansprüche von Lastenfahrern ausgebaut, so dass auch eine Belieferung mit diesen Verkehrsmitteln nicht immer konfliktfrei ist. Eine allgemeine Stärkung des Rad- und Fußverkehrs führt zu einer zusätzlichen Attraktivitätssteigerung des Lastenfahrrads. Geschwindigkeitsvorteile gegenüber konventionellen Lieferfahrzeugen können entstehen oder ausgebaut werden.

Die zunehmende Fragmentierung und Häufigkeit der Sendungen, etwa durch Angebote wie „Same Day Delivery“, führen insgesamt zu einer Reduzierung der notwendigen Fahrzeuggrößen bei gleichzeitig höherer Fahrtenanzahl.³² Neben Lastenfahrern werden weitere Lieferfahrzeuge vermehrt elektrifiziert und in ihrer Größe den spezifischen Anforderungen angepasst. Nahezu alle großen Logistikkonzerne, die im Kurier-Express-Paket (KEP)-Segment tätig sind, haben sich Ziele zur Elektrifizierung ihrer Flotten gesetzt. Vor allem für Fahrzeuge, die auf der „Letzten Meile“ zum Einsatz kommen, gibt es häufig konkrete Ziele.³³ Einsatzzeiten und Aktionsradien erlauben das Laden der entsprechenden Fahrzeuge im Depot oder am Unternehmensstandort. Öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur wird weder von Lastenrädern noch von anderen Lieferfahrzeugen in Anspruch genommen.

23.5.2 Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeuge

In der EU sind schwere Nutzfahrzeuge für etwa ein Viertel der CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs und für etwa 6 % der CO₂-Emissionen sämtlicher Sektoren verantwortlich. Trotz technischer Verbesserungen nehmen diese Emissionen weiter zu, hauptsächlich aufgrund des wachsenden Straßengüterverkehrs. Mit der Verordnung 2019/1242 hat die Europäische Union Vorgaben zur Reduzierung der durchschnittlichen Emissionen neuer Lastkraftwagen für 2025 und 2030 festgelegt. Die Verordnung enthält auch einen Mechanismus, der Anreize für die Einführung emissionsfreier und emissionsarmer Fahrzeuge schaffen soll.³⁴

Ein hoher Energiebedarf, die damit einhergehend benötigten großen Batteriekapazitäten und die begrenzte Verfügbarkeit von Fahrzeugmodellen haben zu einer deutlich langsameren Adaption der Elektromobilität im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge geführt.³⁵ Insgesamt gilt: Je schwerer das Fahrzeug, desto schwieriger ist eine batteriegestützte Elektrifizierung. Batterieelektrische Schwerlastnutzfahrzeuge sind weltweit bisher sehr selten.

³¹ Vgl. Naumov 2021.

³² Vgl. Patella et al. 2021.

³³ Vgl. Deutsche Post DHL Group 2021.

³⁴ Vgl. Europäisches Parlament und Rat 2019.

³⁵ Vgl. International Energy Agency (IEA) 2021.

Global befinden sich etwa 31.000 solcher Fahrzeuge im Bestand. Im Jahr 2020 wurden etwa 6700 Fahrzeuge in China, 450 in Europa und 240 in den USA zugelassen.³⁶

In den nächsten Jahren ist mit einer Zunahme der Modellvielfalt emissionsfreier Nutzfahrzeuge zu rechnen. Dabei kommt sowohl batterieelektrische als auch brennstoffzellenbasierte Antriebstechnologie zum Einsatz. Im Bereich der Schwerlastnutzfahrzeuge als demjenigen Segment, in dem das stärkste Wachstum aller Nutzfahrzeuge erwartet wird, ist die größte Modellvielfalt derzeit in Europa vorzufinden. Für die Jahre 2022/2023 wird mit einer Markteinführung batterieelektrischer Modelle mit einer Reichweite von mehr als 1000 km gerechnet.³⁷ Die „European Automobile Manufacturers Association“ (ACEA) prognostiziert, dass im Jahr 2030 rund 200.000 batterieelektrische Lkw (größer 3,5 t) in europäischen Flotten vorhanden sein werden.³⁸

Neben dem Fahrzeughochlauf selbst stellt auch die Ladeinfrastruktur eine Herausforderung dar. Ähnlich wie im privaten Personenverkehr können im Wirtschaftsverkehr sowohl private als auch öffentlich zugängliche Ladeoptionen von Bedeutung sein. Die Fahrzeughersteller fordern, dass die Ladung für eine Fahrt von viereinhalb Stunden im Fernverkehr nicht länger als 45 min dauern darf. Nur so ließen sich Elektrofahrzeuge in bestehende Regularien und Geschäftsmodelle einfügen. Daher werden vor allem Lademöglichkeiten mit einer Leistung von mehr als 500 Kilowattstunden gefordert.³⁹

Literatur

Teil V: Infrastruktur für die Elektromobilität

- Ampudia-Renuncio, M; Guirao, B; Molina-Sanchez, R; Bragança, L.:** *Electric Free-Floating Carsharing for Sustainable Cities: Characterization of Frequent Trip Profiles Using Acquired Rental Data*. In: Sustainability, Jg. 12, 2020, Nr. 3, S. 1248
- An, K.:** *Battery electric bus infrastructure planning under demand uncertainty*. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Jg. 111, 2020, S. 572–587
- Bieliński, T; Ważna, A.:** *Electric Scooter Sharing and Bike Sharing User Behaviour and Characteristics*. In: Sustainability, Jg. 12, 2020, Nr. 22, S. 9640
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU):** *Usedom bekommt neuartiges Pedelec-Verleihsystem*. <https://www.bmu.de/pressemitteilung/usedom-bekommt-neuartiges-pedelec-verleihsystem>. Abruf 10.08.2021
- Bundesverband CarSharing e.V:** *Aktuelle Zahlen und Fakten zum CarSharing in Deutschland*. <https://carsharing.de/alles-ueber-carsharing/carsharing-zahlen/aktuelle-zahlen-fakten-zum-carsharing-deutschland>
- CARLSTART:** *Drive to Zero's Zero-emission Technology Inventory (ZETI) Tool Version 5.9*. <https://globaldrivetozero.org/tools/zero-emission-technology-inventory/>. Abruf 10.08.2021

³⁶ Vgl. International Energy Agency (IEA) 2021.

³⁷ Vgl. CARLSTART 2020.

³⁸ Vgl. European Automobile Manufacturers Association (ACEA) 2021.

³⁹ Vgl. European Automobile Manufacturers Association (ACEA) 2021.

- Christensen, L; Klauenberg, J; Kveiborg, O; Rudolph, C.:** *Suitability of commercial transport for a shift to electric mobility with Denmark and Germany as use cases.* In: *Research in Transportation Economics*, Jg. 64, 2017, S. 48–60
- Christoforou, Z; Gioldasis, C; Bortoli, A. de; Seidowsky, R.:** *Who is using e-scooters and how? Evidence from Paris.* In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Jg. 92, 2021, S. 102708
- Deutsche Post DHL Group:** *Beschleunigter Fahrplan zur Dekarbonisierung: Deutsche Post DHL Group beschließt Science Based Targets und investiert 7 Milliarden Euro in klimaneutrale Logistik bis 2030.* <https://www.dpdhl.com/de/presse/pressemitteilungen/2021/dpdhl-beschleunigter-fahrplan-zur-dekarbonisierung.html>. Abruf 10.08.2021
- Europäisches Parlament und Rat:** *Richtlinie (EU) 2019/1161 des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge.* Richtlinie (EU) 2019/1161, 2019
- Europäisches Parlament und Rat:** *Verordnung (EU) 2019/1242 des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Festlegung von CO₂-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 595/2009 und (EU) 2018/956 des Europäischen Parlamentes und des Rates sowie der Richtlinie 96/53/EG des Rates.* Verordnung (EU) 2019/1242, 2019
- European Automobile Manufacturers Association (ACEA):** *Heavy-duty vehicles: Charging and refuelling infrastructure requirements*, 2021
- Fang, K; Weinstein Agrawal, A; Steele, J; Hunter, J. J; Hooper, A. M.:** *Where Do Riders Park Dockless, Shared Electric Scooters? Findings from San Jose, California*, 2018
- Galatoulas, N.-F; Genikomsakis, K. N; Ioakimidis, C. S.:** *Spatio-Temporal Trends of E-Bike Sharing System Deployment: A Review in Europe, North America and Asia.* In: *Sustainability*, Jg. 12, 2020, Nr. 11, S. 4611
- Gössling, S.:** *Integrating e-scooters in urban transportation: Problems, policies, and the prospect of system change.* In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Jg. 79, 2020, S. 102230
- Hess, A.-K; Schubert, I.:** *Functional perceptions, barriers, and demographics concerning e-cargo bike sharing in Switzerland.* In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Jg. 71, 2019, S. 153–168
- International Energy Agency (IEA):** *Global EV Outlook 2021. Accelerating ambitions despite the pandemic*, 2021
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA):** *Fahrzeugzulassungen (FZ), Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, Jahr 2019, FZ 14.* Flensburg, 2020
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA):** *Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen 1. Januar 2021.* Flensburg, 2021
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA):** *Fahrzeugzulassungen (FZ), Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, Jahr 2020, FZ 14.* Flensburg, 2021
- Kunith, A. W.:** *Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs.* Dissertation, 2017
- Naumov, V.:** *Substantiation of Loading Hub Location for Electric Cargo Bikes Servicing City Areas with Restricted Traffic.* In: *Energies*, Jg. 14, 2021, Nr. 4, S. 839
- Nobis, C; Kuhnimhof, T.:** *Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur.* Bonn, Berlin, 2018
- Patella, S. M; Grazieschi, G; Gatta, V; Marcucci, E; Carrese, S.:** *The Adoption of Green Vehicles in Last Mile Logistics: A Systematic Review.* In: *Sustainability*, Jg. 13, 2021, Nr. 1, S. 6
- Portland Bureau of Transportation (PBOT):** *2018 E-Scooter Findings Report*, 2019
- RVK:** *Unsere E-Bike-Systeme.* <https://www.rvk.de/e-bike>. Abruf 10.08.2021

- Shaheen, S; Cohen, A.:** *Micromobility Policy Toolkit: Docked and Dockless Bike and Scooter Sharing*: Institute of Transportation Studies, Berkeley, 2019
- Shen, Z.-J. M; Feng, B; Mao, C; Ran, L.:** *Optimization models for electric vehicle service operations: A literature review*. In: *Transportation Research Part B: Methodological*, Jg. 128, 2019, S. 462–477
- Volkswagen:** *WeShare expands in Europe*. <https://www.volkswagenag.com/en/news/2020/01/WeShare.html>. Abruf 10.08.2021
- Zhang, C; Dong, M; Luan, T. H; Ota, K.:** *Battery Maintenance of Pedelec Sharing System: Big Data Based Usage Prediction and Replenishment Scheduling*. In: *IEEE Trans. Netw. Sci. Eng.*, Jg. 7, 2020, Nr. 1, S. 127–138

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Christopher Hecht, Jan Figgener und Dirk Uwe Sauer

Je nach Anwendungsfall können bei der Ladung von Elektrofahrzeugen sehr unterschiedliche Technologien zum Einsatz kommen. Abb. 24.1 zeigt eine Übersicht der gängigen Anwendungsszenarien sowie der zugehörigen Technologien. Bei der Ladung zu Hause kommen langsame AC-Ladungen mit typischerweise bis zu 11 kW zum Einsatz, die auf vergleichsweise schlanke Systeme ohne viele IT-Schnittstellen setzen. Im öffentlichen Raum werden an AC-Ladern hingegen mittelgroße Leistungen von 11 kW oder 22 kW abgegeben. Diese Installationen müssen außerdem über verschiedene Kommunikations- und Authentifizierungsmöglichkeiten verfügen. DC-Schnelllader mit Ladeleistungen oberhalb von 50 kW sind aufgrund der hohen Leistungen generell deutlich teurer und erfordern ähnliche IT-Standards wie auch die AC-Lader. Die verschiedenen in Abb. 24.1 dargestellten technischen Komponenten werden in den folgenden Unterkapiteln genauer beleuchtet.

C. Hecht

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: christopher.hecht@isea.rwth-aachen.de

J. Figgener

Abteilungsleiter, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: jan.figgener@isea.rwth-aachen.de

D. U. Sauer (✉)

Universitätsprofessor, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: dirkuwe.sauer@isea.rwth-aachen.de

	Laden zu Hause	AC Langsamladen	DC Schnellladen
Typische Technologie	<ul style="list-style-type: none"> Wallbox mit ≤11 kW AC Ladepunkt 	<ul style="list-style-type: none"> Ladesäule mit zwei 11 – 22 kW AC Ladepunkten 	<ul style="list-style-type: none"> Station mit mehreren DC-Ladepunkten mit ≥ 50 kW
Ladepunkte	<ul style="list-style-type: none"> Schuko / Typ 1 / Typ 2¹ 	<ul style="list-style-type: none"> Typ 2¹ / Tesla bzw. NACS / GB/T-AC 	<ul style="list-style-type: none"> CCS / CHAdeMO / Tesla bzw. NACS GB/T-DC
Hardwarekosten ²	<ul style="list-style-type: none"> 500 – 1,000 € 	<ul style="list-style-type: none"> 2,000 – 5,000 € 	<ul style="list-style-type: none"> Ab 15,000 €
Installations- und Netzkosten ²	<ul style="list-style-type: none"> 500 – 3,000 € (hängt v.a. von Netzkosten ab) 	<ul style="list-style-type: none"> ~5,000 € 	<ul style="list-style-type: none"> Ab 10,000 € (sehr viel höher für Leistungen über 150 kW)
Endkundenkosten ³	<ul style="list-style-type: none"> ~30 ct/kWh (Haushaltstarif) 	<ul style="list-style-type: none"> 30 – 40 ct/kWh 	<ul style="list-style-type: none"> 50 – 80 ct/kWh
Gängigsten Umrichteraufbauten ⁴			
Mögliche Batteriespeicher	<ul style="list-style-type: none"> PV-Heimspeicher kann genutzt werden 	<ul style="list-style-type: none"> Bei großen Stationen ein Gewerbespeicher als Puffer 	<ul style="list-style-type: none"> Gewerbespeicher als Puffer
Mess- und Abrechnungssysteme	<ul style="list-style-type: none"> Keine separaten Systeme, Abrechnung über bestehenden Stromvertrag 	<ul style="list-style-type: none"> Messung von AC-Strom ins Fahrzeug, Einhaltung des Eichrechts herausfordernd 	<ul style="list-style-type: none"> Messung von DC-Strom ins Fahrzeug, erster eichrechtskonformer Zähler erst 2019
Kommunikationsprotokolle	<ul style="list-style-type: none"> Typischerweise kein Backendbetreiber IEC-61851 mit Fahrzeug 	<ul style="list-style-type: none"> OCPP mit Backendbetreiber ISO 15118 oder IEC-61851 mit Fahrzeug 	<ul style="list-style-type: none"> OCPP mit Backendbetreiber ISO 15118 oder IEC-61851 mit Fahrzeug

Hinweis: Alle Kosten sind Schätzungen und können im Laufe der Zeit oder je nach Standort erheblich variieren!

1: Typ 2, Tesla und die AC-Variante von GB/T unterscheiden sich primär durch die Belegung der Phasen im Stecker. GB/T ist eine B-Phase anstatt eines Steckers.

2: Quelle: Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland – Statusbericht und Handlungsempfehlungen 2015, Prognose für 2020 genutzt

3: Zum Vergleich: Beim Laden zu Hause muss der Benutzer für Hardware, Installation und Netzkosten aufkommen, während er beim öffentlichen Laden nur für die Nutzung zahlt.

4: Galvanische Trennung und DC-DC-Wandler nicht dargestellt. Für Details bitte das entsprechende Kapitel konsultieren.

Abb. 24.1 Übersicht der verschiedenen Ladeinfrastrukturtechnologien

24.1 Lademöglichkeiten

Elektrofahrzeuge können mit verschiedenen Infrastrukturen mit dem Stromnetz verbunden werden. Die gängigsten vier Optionen – Schuko-Notlader, Wallbox, Ladesäule (AC) und Schnellladesäule (DC) – werden in diesem Kapitel eingeführt. Alle Optionen eint, dass auf stationärer Seite eine Wechselstromversorgung angenommen wird und auf Fahrzeugseite entweder Strom als Wechsel- oder Gleichstrom angeboten wird. Denkbar ist ebenfalls eine stationäre Gleichstromversorgung, zum Beispiel wenn das Fahrzeug direkt mit einer PV-Anlage oder einem Batteriespeicher verbunden wird. Solche Aufbauten haben in der Praxis aber noch keine Relevanz, allerdings wurden erste Produkte in diesem Bereich schon angekündigt.

24.1.1 Schuko-Notlader

Elektroautos können an einer Haushaltssteckdose mit Hilfe eines Adapters geladen werden. Dabei liegt die Ladeleistung von etwa 2 kW deutlich unter den Alternativen und sorgt für sehr langsame Ladeprozesse. Zwar sind Haushaltssteckdosen theoretisch mit 13 A oder 16 A abgesichert, was bis zu 3,7 kW Leistung ermöglicht, doch sollte diese Leistung nicht dauerhaft abgerufen werden. Grund dafür ist, dass die meisten Kabel nicht für die Abwärme ausgelegt sind, die bei einer Vollauslastung über mehrere Stunden hinweg generiert wird. Im schlimmsten Fall könnte es daher zu einem Kabelbrand kommen. Deshalb empfehlen sich entweder 6 A oder 10 A für den Dauerbetrieb.

Neben einer langen Ladedauer erzeugen die niedrigen Leistungen aber noch ein weiteres Problem: Die im Auto verbauten Gleichrichter sind ineffizient, wenn sie bei niedriger Leistung betrieben werden. Ist ein Fahrzeug zum Beispiel auf eine Wechselstromladung mit 22 kW ausgelegt, dann sind zusätzliche Effizienzverluste von 10 % und mehr üblich, wenn der Umrichter durch die niedrige Leistung via Notlader im Teillastbereich betrieben wird. Dementsprechend lohnt sich oft die Investition in eine Wallbox mit höherer Leistung. Der Schuko-Notlader sollte gemäß seinem Namen für Notladungen an Orten verwendet werden, an denen keine sonstige Ladeinfrastruktur verfügbar ist (Abb. 24.2).

24.1.2 Wallbox

Eine Wallbox ist ein kompaktes Gerät, das die notwendigen elektrischen und leistungselektronischen Komponenten enthält, um ein Auto oder zwei Fahrzeuge entweder ein- oder dreiphasig via Wechselstrom ans Stromnetz anzubinden. Ein Beispiel für ein solches Gerät ist in Abb. 24.3 zu sehen. In Anbetracht der Kompaktheit und des einfachen Aufbaus sind Hardware-Kosten von 500 bis 1000 € typisch. Die klassischen Einsatzgebiete einer Wallbox sind das Laden von Privatfahrzeugen zu Hause oder beim Arbeitgeber sowie auf Kundenparkplätzen bei Unternehmen. In vielen Anwendungsfällen wird der Strom dabei kostenlos zur Verfügung gestellt, was ein Abrechnungssystem überflüssig macht und Hardware- sowie Betriebskosten reduziert. Prinzipiell sind mit einer Wallbox aber die-

Abb. 24.2 Schuko-Notlader. (Vgl. [Elhamjaberansari 2016](#))





Abb. 24.3 Wallbox mit einem fest installierten Typ2-Stecker. (Vgl. [Marschmensch](#) 2020)

selben Betriebsmodi wie bei einer Ladesäule möglich, wenn entsprechende Mess-, Kommunikations- und Authentifizierungstechnik verbaut ist.

24.1.3 Ladesäule (AC)

Ladesäulen sind kompakte, stehende Aufbauten mit meist zwei Ladepunkten im Typ-2-Format, an denen Fahrzeuge mit 11 kW oder 22 kW dreiphasig laden können. Wie [Abb. 24.4](#) zeigt, werden die Geräte primär im öffentlichen oder halböffentlichen Raum installiert. Für eine Abrechnung ist dabei eine eichrechtskonforme Strommessung und eine Bezahlungsmöglichkeit ohne Vertragsbindung („Ad-hoc-Laden“) in der Ladesäulenverordnung vorgeschrieben. Die Bezahlung wird heutzutage häufig mittels einer an der Ladesäule erkennbaren Website gelöst, über die die Kosten für den Ladevorgang beglichen werden können. Für alle Säulen, die ab Juli 2024 installiert werden, ist zusätzlich ein kontaktloses EC- und Kreditkartenterminal plus Tastenfeld verpflichtend. Für Vertragskunden erfolgt die Freischaltung typischerweise über eine RFID-Ladekarte¹ oder etwas seltener über eine App.

24.1.4 Schnellladesäule (DC)

DC-Schnelllader liefern meist über die DC-Formate CCS- oder CHAdeMO-Leistungen von 50 bis 350 kW bei typischerweise 350 bis 450 V. Für besonders hohe Leistungen wird

¹ „Radio-Frequency Identification“ steht für „Identifizierung mit Hilfe elektromagnetischer Wellen“.



Abb. 24.4 Typische Ladesäulen im öffentlichen Raum. (Vgl. [Wolfmann 2017](#); vgl. [Lukas6464 2020](#); vgl. [SPBer 2017](#))

die Spannungsebene auf 750 bis 850 V verdoppelt, um Problemen bei der Kühlung vorzubeugen. Für Leistungen ab 150 kW werden in der Industrie auch die Begriffe „High Power Charging“ (HPC) und ab 350 kW „Ultra High Power Charging“ (UHPC) verwendet. Im Gegensatz zu den anderen vorgestellten Konzepten ist in diesem Fall der Gleichrichter in der Ladesäule verbaut und speist direkt die Pole der Traktionsbatterie im Fahrzeug. Gerade bei hohen Strömen ist dabei eine aktive Kühlung des Gleichrichters und manchmal auch des Kabels notwendig. Mit Blick auf Messung und Bezahlung unterscheiden sich die Konzepte zwischen AC- und DC-Ladung kaum.

Bezüglich ihrer Anwendungen haben sich vor allem zwei Szenarien durchgesetzt. Das bekannteste besteht im Spontanladen auf Langstreckenfahrten, ähnlich zum Nachtanken an Autobahntankstellen. Dabei werden besonders hohe Leistungen abgerufen, weil die Fahrt möglichst schnell fortgesetzt werden soll. Mit heutigen Modellen lässt sich Strom für bis zu 140 km Reichweite innerhalb von zehn Minuten nachladen,² wobei mit einer weiterhin sehr dynamischen Entwicklung zu rechnen ist. Das zweite Anwendungsfeld bilden 50 kW-Säulen an Supermärkten oder ähnlichen Orten. Der zugrundeliegende Gedanke ist, dass in einer typischen Einkaufsdauer ausreichend Energie für einige Tage nachgeladen werden kann. Bei einer halben Stunde Einkauf und dementsprechend 25 kWh nachgeladener Energie können somit je nach Fahrzeugverbrauch 100 bis 150 km Reichweite „aufgetankt“ werden. Künftig kann die Ladung schwerer Nutzfahrzeuge hinzukommen, da die gängigen 22 kW-AC-Ladesäulen vermutlich zu langsam sein werden. Zwei exemplarische Säulen sind in [Abb. 24.5](#) gezeigt.

²Vgl. [Hackmann et al. 2020](#).



Abb. 24.5 DC-Schnellladestation mit zwei Säulen inklusive jeweils einem CCS- und einem CHAdeMO-Anschluss. (Vgl. [Aschroet](#) 2019)

24.2 Steckertypen

In der Elektromobilität werden je nach Ort und Anwendungsart unterschiedliche Steckertypen genutzt. Am Fahrzeug haben sich in Europa vor allem der dreiphasige Typ-2-Stecker zur AC-Ladung und der „Combined-Charging-System“ (CCS)-Stecker zur DC-Ladung durchgesetzt. Koreanische und japanische Fahrzeuge verfügen hingegen häufig über einen Typ-1-Stecker für die AC-Ladung und CHAdeMO für die DC-Schnellladung. Der Typ-1-Stecker ist dabei demjenigen des Typs 2 sehr ähnlich und unterscheidet sich lediglich darin, dass eine Phase statt drei zur Verfügung gestellt werden. [Abb. 24.1](#) bietet eine Übersicht der jeweiligen Optiken und Aufbauten. In den USA ist ein Trend hin zum von Tesla entwickelten NACS-Standard zu beobachten. Da ein ähnlicher Trend in Europa nicht zu erkennen ist, wird der NACS-Standard in diesem Kapitel nicht detailliert betrachtet.

Bei AC-Ladestationen und Wallboxen hat sich der Typ-2-Stecker durchgesetzt, da er mit Hilfe eines einfachen Adapters auch ein Fahrzeug laden kann, das über einen Typ-1-Stecker verfügt. Die Verbindungskabel zwischen Station beziehungsweise Wallbox und Fahrzeug werden meistens von den Fahrzeughaltenden mitgeführt. Mit der im Jahr 2021 beschlossenen Aktualisierung der Ladesäulenverordnung sind jedoch auch Säulen mit fest verbautem Kabel zulässig.

An DC-Ladestationen sind die Ladekabel fest installiert. Da es zwischen CHAdeMO und CCS keine Adapter gibt, sind viele Stationen mit beiden Arten von Ladekabeln ausgestattet. Seit 18. November 2017 gilt innerhalb der EU, dass alle neu installierten DC-Ladestationen mit CCS ausgerüstet sein müssen. Daher setzt sich dieser Standard mittlerweile verstärkt durch und Zubauraten lagen in den Jahren 2019 und 2020 etwa zweieinhalbmal³ höher für CCS als für CHAdeMO. Bei nahezu allen neu installierten Stationen mit CHAdeMO waren zusätzlich CCS-Kabel verbaut. Auch international setzt sich CCS zunehmend durch, vor allem in Nordamerika und Europa. In China wird die DC-Variante des nationalen chinesischen Standards „GB/T“ genutzt. Tesla hat als bislang einziger Autobauer noch einen zusätzlichen proprietären Stecker eingeführt, der primär in Nordamerika und mittlerweile auch von einer Reihe anderer Hersteller genutzt wird. In Europa und China werden auch von Tesla die jeweils lokalen Standards genutzt.

24.3 Gleichrichteraufbauten

Stromnetze liefern Wechselstrom, Fahrzeugbatterien brauchen allerdings Gleichstrom – meist bei 400 V und in selteneren Fällen auch bei 800 V. Aus diesem Grund werden Gleichrichter benötigt. In diesem Abschnitt werden grundsätzliche Aufbauten dargestellt. Weitere Details beinhaltet die Langform der hier vorgestellten Konzepte.⁴ Grundsätzlich bestehen alle Varianten aus den in Abb. 24.6 (links beginnend) gezeigten Grundkomponenten „Netzanschluss“, „Filter für harmonische Schwingungen“, „Gleichrichter“ und „DC-DC-Wandler“.

Bei AC-Langsamladung befinden sich sämtliche Komponenten innerhalb des Fahrzeugs. An Notlader, Wallbox oder Ladesäule sind lediglich Überstromsicherungen installiert. Die Leistung des Gleichrichters wird vor Ladebeginn zwischen Fahrzeug und Ladepunkt ausgehandelt. Dabei wird die geringere Maximalleistung von Ladepunkt und Fahrzeug gewählt.

Bei DC-Schnellladung wird innerhalb der Komponentenkette eine galvanische Trennung benötigt. Dies kann entweder über einen Trenntransformator oder eine galvanische Trennung im DC-DC-Wandler erfolgen. Müssen mehrere Fahrzeuge parallel versorgt werden, wird die Komponentenkette meist dupliziert, wie Abb. 24.7 schematisch zeigt. Häufig



Abb. 24.6 Genereller Gleichrichteraufbau bei der Ladung eines Elektroautos. (Vgl. Mortimer et al. 2019)

³Vgl. Bundesnetzagentur 2021.

⁴Vgl. Mortimer et al. 2019.

Abb. 24.7 Typischer Aufbau einer DC-Schnellladestation mit mehreren Ladepunkten. (Vgl. Mortimer et al. 2019)

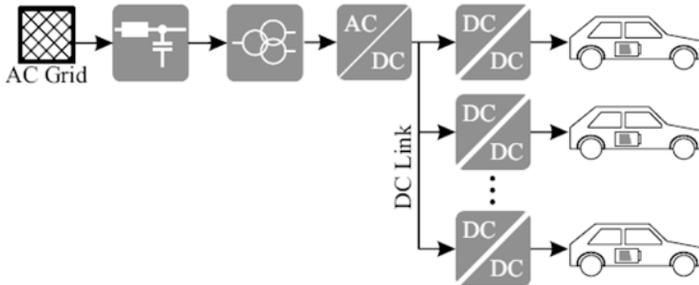
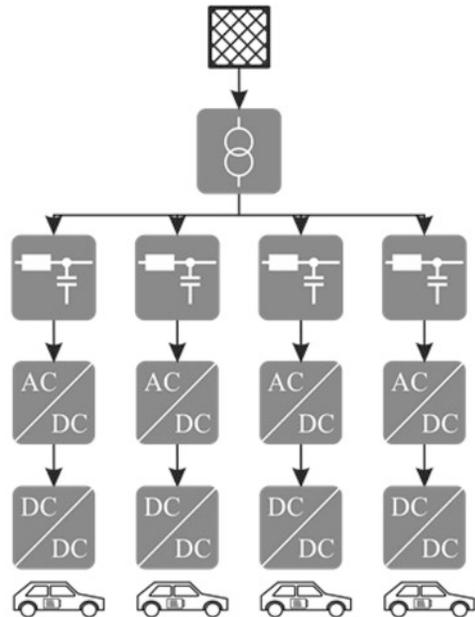


Abb. 24.8 Alternativer Aufbau einer DC-Schnellladestation mit DC-Kopplung der Ladesäulen. (Vgl. Mortimer et al. 2019)

ist auch eine zusätzliche Ertüchtigung des Netzanschlusspunkts notwendig – zum Beispiel durch einen Anschluss an die Mittelspannung.

Neben der Parallelisierung besteht auch die Möglichkeit, die Ladesäulen auf einer DC-Schiene zu koppeln (vgl. Abb. 24.8). Mit dieser Variante können gegebenenfalls Komponenten gespart werden, da nicht die volle Kette der Bestandteile für jede Ladesäule verbaut werden muss. Allerdings ist in diesem Fall eine galvanische Trennung an jedem DC-DC-Wandler notwendig.

24.4 Batteriespeicher

Batteriespeicher werden im Kontext der Ladeinfrastruktur vor allem aus zwei Gründen verwendet. Beim Einsatz als Pufferspeicher, insbesondere im gewerblichen Bereich, erlauben Batteriespeicher auch bei einem schwach ausgebauten Netz eine hohe Ladeleistung. Werden die Speicher allerdings – besonders im privaten Gebrauch – zur Eigenverbrauchsoptimierung eingesetzt, dann liegt ihr Nutzen primär darin, dass lokal erzeugte Energie für die Nachladung des Fahrzeugs verwendet werden kann. Beide Anwendungsfälle werden in den nächsten beiden Abschnitten kurz erläutert.

Pufferspeicher

Ein häufig genanntes Ziel bei der Schnellladung von Elektrofahrzeugen ist, dass sie ähnlich schnell wie die Betankung eines Verbrennerfahrzeugs vonstatten geht. Die sich daraus ergebenden Ladeleistungen von heute 350 kW und künftig auch mehr stellen vor allem für Netzanschlüsse an entlegenen Rastplätzen eine große Herausforderung dar. Abhilfe können in solchen Szenarien Pufferspeicher schaffen, die während niedriger Netzauslastung aufgeladen und zu Spitzenzeiten entladen werden. Je nach Leistung der zugehörigen Ladeinfrastruktur können dabei entweder kleinere Gewerbespeicher als Schranklösung (Leistung bis etwa 100 kW) oder größere Gewerbespeicher in Containerbauweise (Leistung ab etwa 100 kW) zum Einsatz kommen. Die meisten Systeme sind dabei auf eine Entladedauer von wenigen Stunden ausgelegt.

Eigenverbrauchsoptimierung

Der Eigenverbrauch lokal erzeugter Energie sorgt dafür, dass weniger Energie aus dem Netz bezogen wird. Auf diese Weise sparen vor allem Haushalte Abgaben, Umlagen und Steuern auf den genutzten Strom aus der eigenen Energieerzeugung. Ein typisches Beispiel dafür sind Photovoltaik (PV)-Heimspeicher, die lokal erzeugte Solarenergie zwischenspeichern und ins Auto laden. Eine solche Anwendung ist in den meisten Fällen aufgrund der hohen Investitionssummen für Speicher jedoch (noch) nicht wirtschaftlich. Anschaffungen werden dennoch getätigt, wenn etwa „das gute Gefühl“ bei der Nutzung des eigens erzeugten Stroms zum Autofahren wirtschaftliche Perspektiven überwiegt. Alternativ kann die Wirtschaftlichkeit gegeben sein, wenn der Speicher für einen anderen Zweck – zum Beispiel für die unterbrechungsfreie Stromversorgung oder zur Pufferung von Leistungsspitzen – angeschafft wurde und dafür aktuell nicht benötigt wird.

24.5 Mess- und Abrechnungssysteme

Wird eine Ladesäule im öffentlichen oder halböffentlichen Raum kommerziell betrieben, dann wird meist ein Mess- und Abrechnungssystem benötigt, das die geladene Energie in Rechnung stellt. Dafür werden an der Ladesäule eichrechtskonforme Stromzähler, Authentifizierungsmöglichkeiten und ab 1. Juli 2024 auch EC- und Kreditkartenterminals

benötigt. Zusätzlich ist ein Backend-System notwendig, das Kundendaten speichert, Ladevorgänge authentifiziert und Rechnungen stellt. Diese Komponenten werden in den folgenden Unterkapiteln jeweils kurz vorgestellt. Für weiterführende Informationen wird an entsprechende Fachliteratur verwiesen.

Eichrechtskonforme Zähler

Die kostenpflichtige Abgabe von Strom an Ladesäulen muss in Deutschland exakt nach Kilowattstunde abgerechnet erfolgen. Abrechnungsmodelle, bei denen nur die Standzeit oder eine entsprechende Pauschale („Session Fee“) berechnet wird, sind seit dem 1. April 2019 nicht mehr erlaubt, auch wenn bis 2020 noch Ladesäulen existiert haben, die auf diese Weise abgerechnet haben.⁵ Ein Zähler muss die an das Fahrzeug abgegebene Energie – bei DC-Säulen dementsprechend nach der Gleichrichtung – präzise messen und diesen Wert datenschutzkonform und nachvollziehbar weitergeben. Insbesondere im DC-Bereich wurde die Umrüstung auf eichrechtskonforme Zähler eher spät gestartet, da diese erst 2019 zur Verfügung standen.

Authentifizierungsmöglichkeiten

Soll ein Ladevorgang gestartet werden, so muss sich die auftraggebende Person authentifizieren. An öffentlicher Ladeinfrastruktur erfolgt das entweder über ein RFID-Pad, an das eine Ladekarte gehalten wird, oder über eine Website beziehungsweise eine App. Mit weiterer Verbreitung von „Plug&Charge“-Funktion müssen zusätzlich Zertifikate und eine sichere Kommunikationsinfrastruktur zur Verfügung stehen, die das Fahrzeug direkt über den Stecker identifizieren und die Ladung freigeben. In Zukunft kommen noch Kartenterminals hinzu, die im folgenden Abschnitt detaillierter betrachtet werden.

Kartenterminal

Aktuelle Ladesäulen verfügen nur sehr selten über ein Kartenterminal. Allerdings soll sich das nach der Neufassung der Ladesäulenverordnung ab 1. Juli 2024 für alle neu installierten Ladesäulen ändern. Ab dann muss jede öffentliche Ladesäule über ein Terminal für EC- und Kreditkarten verfügen, sofern Strom dort nicht kostenfrei abgegeben wird. Dadurch soll spontanes Laden einfacher werden, weil die Verwendung einer App oder einer mobilen Website entfällt. Der dafür zusätzlich entstehende Aufwand wurde von der Industrie mit Verweis auf die Mehrkosten mitunter heftig kritisiert. Auch müssen die zu nutzenden Systeme neu auf ihre Eichrechtskonformität geprüft werden, was die recht lange Zeitspanne zwischen dem Beschluss Mitte 2021 und der Einführung 2023 bzw. 2024 erklärt.

Backend-System

Das Backend-System wird von Backend-Betreibern bereitgestellt. Diese sind entweder direkt die jeweiligen Ladepunktbetreiber oder sie treten für diese als Dienstleistende in Erscheinung. Aufgabe des Backends ist es, Kundenschaftsdaten zu speichern und bei

⁵Vgl. [Wiedemann](#) 2020.

erfolgreicher Authentifizierung den Ladevorgang zu starten. Sofern es sich nicht um eine Ad-hoc-Ladung handelt, sondern um einen Ladevorgang via Vertragskundschaft, setzen die Backend-Betreibenden weitere Dienstleistungen um. Dies können zum Beispiel die monatliche Rechnungsstellung oder die Kooperation mit einem anderen „Charge Point Operator“ (CPO) über Roaming-Plattformen sein. Letztgenanntes ermöglicht es, dass verschiedene CPOs sich gegenseitig Zugang zur Infrastruktur des jeweils anderen für ihre Kundschaft gewähren.

24.6 Kommunikationsprotokolle

Bei der Ladeinfrastruktur gibt es zwei wichtige Kommunikationsstrecken: Fahrzeuge müssen mit Ladestationen kommunizieren und Ladestationen mit dem Backend. Die typischerweise für ersteres eingesetzten Protokolle sind in Tab. 24.1 aufgelistet.

Für die Kommunikation zwischen Ladestation und Backend kommt in Europa und Asien mittlerweile fast ausschließlich das „Open Charge Point Protocol“ (OCPP) zum Einsatz. Es wird von der „Open Charge Alliance“ entwickelt – eine herstellerneutrale Organisation, die sich für die Interoperabilität von Lade-Hardware einsetzt. Geleitet wird die „Open Charge Alliance“ von „ElaadNL“, „ESB“, „Greenlots“, „innogy“ und „Total EV Charge“. Das OCPP existiert in verschiedenen Varianten. Die Versionen 1.5 und 1.6 werden im Großteil der aktuell verkauften Säulen ausgeliefert. Mit diesen Ausführungen sind Betrieb und Abrechnung von Säulen problemlos möglich, jedoch sind nahezu alle

Tab. 24.1 Kommunikationsprotokolle zwischen Fahrzeug und Ladepunkt

Protokollname	Zugehörige Stecker	Beschreibung
IEC 61851	Schuko (via Typ 1/2-Adapter), Typ 1, Typ 2	Basisprotokoll, das von einfachen Ladegeräten genutzt wird und von jedem EV in Europa verstanden wird. Eine Kommunikation ist nur in geringem Maße möglich und erfolgt über Widerstandswerte für die Stromtragfähigkeit des Kabels und für den Fahrzeugzustand sowie die Pulsweitenmodulation für die Stromtragfähigkeit der Ladestation.
ISO 15118	Typ 1, Typ 2, CCS	Protokoll, das dem IEC 61851 überlagert wird. Dabei können deutlich mehr Datenfelder ausgetauscht werden. Mit der neuen ISO 15118-20 sind etwa bidirektionales Laden, „Plug&Charge“-Funktion und perspektivisch auch kontaktloses Laden möglich. Welche Features tatsächlich nutzbar sind, ist vom Hersteller abhängig, da das Protokoll nur teilweise implementiert werden kann.
CHAdEMO	CHAdEMO	Protokoll speziell für CHAdEMO-Stecker, das dementsprechend nur an Ladestationen mit dem DC-CHAdEMO-Standard genutzt wird. Es erlaubt standardmäßig bidirektionales Laden.

Vgl. Neaimeh und Andersen 2020

Funktionen des „Smart Charging“ nicht implementiert. Selbst einfache Parameter wie der Ladezustand lassen sich kaum übertragen. Für „Smart Charging“, „Vehicle-to-Grid“ und „Plug&Charge“ bietet die neuere Version 2.0 die entsprechenden Datenfelder und Kommunikationsschnittstellen. Auch wenn diese Version bereits veröffentlicht wurde, ist davon auszugehen, dass eine flächendeckende Nutzung erst in einigen Jahren erfolgt.

Literatur

Teil V: Infrastruktur für die Elektromobilität

- Aschroet:** *Electric vehicle charging station Thörey*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electric_vehicle_charging_station_Th%C3%B6rey.jpg. Abruf 07.07.2021
- Bundesnetzagentur:** *Ladesäulenkarte*. https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/E-Mobilitaet/Ladesaekulenkarte/start.html. Abruf 07.07.2021
- Elhamjaberansari:** *Mennekes chargercable*. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mennekes-chragercable.jpg>. Abruf 07.07.2021
- Hackmann, M; Daake, C; Gehring, C.:** *P3 Charging Index. Comparison of the fast charging capability of various electric vehicles from a users perspective*. <https://www.p3-group.com/en/p3-charging-index-comparison-of-the-fast-charging-capability-of-various-electric-vehicles-from-a-users-perspective/>. Abruf 07.07.2021
- Juli 2024:** <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/tris/de/search/?trisaction=search.detail&year=2023&num=104>
- Lukas6464:** *Charging station hydropower*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Charging_station_hydropower.jpg. Abruf 07.07.2021
- Marschmensch:** *Wallbox Söl 001*. https://fr.wikipedia.org/wiki/Datei:Wallbox_S%C3%B6l_001.jpeg. Abruf 07.07.2021
- Mortimer, B; Olk, C; Roy, G. K; Tarnate, W. R; Doncker, R. W. de; Monti, A; Sauer, D. U.:** *Fast-Charging Technologies, Topologies and Standards 2.0* (E.ON Energy Research Center Series). Aachen, 2019
- Neaimeh, M; Andersen, P. B.:** *Mind the gap- open communication protocols for vehicle grid integration*. In: *Energy Inform*, Jg. 3, 2020, Nr. 1, S. 683
- SPBer:** *Ladesäule für E-Autos in Spremberg (2)*. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lades%C3%A4ule_f%C3%BCr_E-Autos_in_Spremberg_\(2\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lades%C3%A4ule_f%C3%BCr_E-Autos_in_Spremberg_(2).jpg). Abruf 07.07.2021
- Wiedemann, K.:** *Warten auf eichrechtskonformes Laden. Elektromobilität*. <https://www.energatemessenger.de/news/204682/warten-auf-eichrechtskonformes-laden>. Abruf 07.07.2021
- Wolfmann:** *Electric vehicle charging station Ladestasjon for elbil Storgaten Tønsberg kommune Norway 2017-09-20 06*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electric_vehicle_charging_station_Ladestasjon_for_elbil_Storgaten_T%C3%B8nsberg_kommune_Norway_2017-09-20_06.jpg. Abruf 07.07.2021

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Marcel Porschen, Fabian Kühnel, Tobias Kuhnimhof,
Chris Martin Vertgewall, Niklas Wehbring und Andreas Ulbig

Der heute dominierende, an vergleichsweise wenigen Standorten gebündelte Prozess der Energieaufnahme konventioneller Fahrzeuge in Form des Tankens dürfte durch die Elektromobilität auf vielfältige Weise dezentralisiert werden. Elektrofahrzeuge können an verschiedenen Standorten, an denen Strom verfügbar ist, geladen werden. Allerdings stehen nicht alle Lademöglichkeiten auch allen Fahrzeugen zur Verfügung.

M. Porschen · F. Kühnel

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Lehrstuhl und Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr (ISB), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: porschen@isb.rwth-aachen.de; kuehnel@isb.rwth-aachen.de

T. Kuhnimhof

Universitätsprofessor, Lehrstuhl und Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr (ISB), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: kuhnimhof@isb.rwth-aachen.de

C. M. Vertgewall

Oberingenieur, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft (IAEW), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: c.vertgewall@iaew.rwth-aachen.de

N. Wehbring

Oberingenieur, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft (IAEW), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: n.wehbring@iaew.rwth-aachen.de

A. Ulbig (✉)

Universitätsprofessor, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft (IAEW), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: a.ulbig@iaew.rwth-aachen.de

Die Gesamtmenge des Energiebedarfs elektrischer Fahrzeuge – das heißt: der gesamte Ladebedarf – ist durch Fahrleistung und Verbrauch bestimmt und damit zunächst unabhängig von der Art der Ladeinfrastruktur. Allerdings ist die Ladeinfrastruktur entscheidend dafür, wie der Ladebedarf gedeckt werden kann. So ist es etwa von Bedeutung, ob er durch private Infrastruktur bedient wird oder ob es sich um Ladebedarf handelt, der an öffentlichen Einrichtungen gedeckt werden muss. Darüber hinaus kann nach Umgebung und Zeitpunkt, an denen der Ladebedarf gedeckt werden soll, differenziert werden. Dies verdeutlicht, dass Ladebedarf und Ladeinfrastrukturbedarf voneinander zu unterscheiden sind und auch nicht eins zu eins ineinander umgerechnet werden können.

Die folgenden Abschnitte stellen zunächst allgemeine ortsunabhängige Einflussfaktoren auf den Ladebedarf im privaten Personenverkehr vor. Daraus leitet sich ein theoretisches Gerüst zur Typisierung des Ladebedarfs mit Hilfe von Ladestandorttypen und verschiedenen Bedarfsgruppen ab. Anschließend wird die räumlich-zeitliche Struktur von Ladebedarfen erläutert. Die sich aus der räumlich-zeitlichen Struktur der möglichen Ladevorgänge ergebenden Implikationen auf notwendige netzseitige Ladeleistung werden im Abschn. 25.4 erläutert.

25.1 Einflussfaktoren auf den Ladebedarf

Für den Verkehr eines abgeschlossenen räumlichen Gebiets lässt sich bei gegebener elektrischer Fahrleistung und spezifischem Verbrauch der Fahrzeuge theoretisch der gesamte Ladebedarf unabhängig von der Ladeinfrastruktur bestimmen. Für die Bestimmung des Ladebedarfs sind die folgenden Einflussfaktoren von Bedeutung.

Bestand der Elektrofahrzeuge

Zunächst gilt im Grundsatz: Je mehr Elektrofahrzeuge in einem Gebiet zugelassen sind, desto höher fällt der Ladebedarf aus. Indirekt spiegeln Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen eine Erhöhung des Ladebedarfes wider.¹

Zusammensetzung des Elektrofahrzeugbestands

Im Bereich der elektrischen Fahrzeuge teilen sich derzeit rein batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und Plug-in-Hybride (PHEV) den Markt etwa zu gleichen Teilen auf. Dies gilt neben den Neuzulassungen auch für den aktuellen Bestand.² Für die Zukunft ist zu erwarten, dass BEV immer mehr an Bedeutung gewinnen. Dennoch bleiben die bereits zugelassenen PHEVs einige Jahre lang eine nennenswerte Größe im Fahrzeugbestand.

Vereinfacht lässt sich sagen: je größer der Anteil von PHEVs am Bestandszuwachs, desto geringer wächst der Ladebedarf. Da PHEVs sowohl über einen elektrischen als auch

¹Vgl. Wu und Niu 2017.

²Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2021.

über einen verbrennungsbasierten Antrieb verfügen, kann nicht direkt auf den Ladebedarf geschlossen werden: Inwiefern PHEVs sich auf den Ladebedarf auswirken, ist abhängig vom Fahr- und Ladeverhalten der Nutzenden. Bei Hybridfahrzeugen kann der elektrische Fahranteil stark variieren. In Deutschland liegt der mittlere elektrische Fahranteil von PHEVs für Privatfahrzeuge bei rund 43 %, für Dienstfahrzeuge bei etwa 18 %.³ Diese Verhältnisse können sich durch höhere Reichweiten oder einen Anstieg der Kraftstoffpreise verändern.

Fahrleistung der Fahrzeuge

Verändern sich die Nutzungsmuster im motorisierten Individualverkehr nicht, kann von konventionellen Verbrennerfahrleistungen auf die gefahrenen Kilometer von Elektrofahrzeugen geschlossen werden. Hinsichtlich Fahrverhalten und Fahrleistung ist die einfachste Annahme, dass Elektrofahrzeuge gleich oder ähnlich wie heutige Verbrennerfahrzeuge genutzt werden. Zwar zeigen Erhebungen, dass Elektrofahrzeuge aktuell anders verwendet werden als Verbrennerfahrzeuge, allerdings kann aus den Nutzungsmustern heutiger Elektrofahrzeuge nicht zwingend abgeleitet werden, auf welche Weise sie in Zukunft zum Einsatz kommen.^{4,5}

Energieverbrauch pro Kilometer

Ein höherer spezifischer Energieverbrauch erhöht den Ladebedarf. Der Energieverbrauch ist von verschiedenen fahrzeugspezifischen Parametern abhängig – etwa vom Gewicht, das mitunter von der Größe der Batterie beeinflusst wird.⁶ Des Weiteren sind das Fahrverhalten und Eigenschaften der Fahrtumgebung von Relevanz. So wirken sich etwa kalte oder heiße Temperaturen auf den Energieverbrauch aus.⁷

Ladeinfrastruktur hat keine unmittelbaren Auswirkungen auf das Gesamtvolumen des Ladebedarfs. Allerdings kann ein Ausbau der Ladeinfrastruktur den Ladebedarf erhöhen, da Elektrofahrzeuge für weitere Personengruppen interessant werden und der Elektrofahrzeugbestand infolgedessen anwächst. Ein höherer Bestand wiederum führt zu einer höheren elektrischen Fahrleistung und zu höherem Ladebedarf.

³Vgl. Plötz et al. 2020.

⁴Vgl. Davis 2019.

⁵Vgl. Nissan 2021.

⁶Vgl. Weiss et al. 2020.

⁷Vgl. Sagaria et al. 2021.

25.2 Typisierung von Ladebedarfen

Theoretisch könnten Fahrzeuge nahezu überall dort geladen werden, wo sie abgestellt werden, sofern dort ein Stromanschluss vorhanden ist. Daraus ergibt sich eine Vielzahl potenzieller Ladestandorte und -möglichkeiten. Die Inanspruchnahme von Ladeoptionen ist jedoch von den Präferenzen der Nutzenden abhängig. Vereinfacht lässt sich sagen, dass private Ladeinfrastruktur, insbesondere am eigenen Wohnort, gegenüber öffentlicher Ladeinfrastruktur bevorzugt wird.⁸ Das lässt sich sowohl mit Blick auf die Häufigkeit der Ladevorgänge als auch auf die Bedeutung für den Kauf eines Elektrofahrzeugs feststellen. Allerdings kann die Ladenachfrage nicht immer entsprechend der höchsten Präferenz gedeckt werden, da nicht jedem Fahrzeug sämtliche Abstell- oder Lademöglichkeiten zur Verfügung stehen.

Unabhängig von räumlichen Gegebenheiten ergibt sich eine konzeptionelle Kategorisierung des Ladebedarfs aus einer Kombination von Ladestandorttypen und Ladebedarfsgruppen. Grundannahme dieser Überlegungen ist, dass es verschiedene Möglichkeiten und Orte gibt, an denen der Ladevorgang stattfinden kann, diese aber nicht zu jeder Zeit von allen Fahrzeugen genutzt werden können. Aus dieser Verflechtung ergeben sich unterschiedliche Lademuster. Diese Überlegungen sind in Abb. 25.1 in Form einer Matrix dargestellt und werden in den folgenden Unterkapiteln erläutert. Zur Unterstützung der Lesbarkeit sind in Tab. 25.1 die Zelleninhalte der Matrix kurz beschrieben.

Es ist wichtig herauszustellen, dass die Matrix ein grundlegendes Konzept abbildet. In der Realität existieren neben den vorgestellten Kombinationen durchaus weitere Möglichkeiten. So kann das Laden am Arbeitsplatz nur für diejenigen Fahrzeuge relevant sein, die auch tatsächlich für Fahrten zur Arbeit genutzt werden. Generell gilt, dass die tatsächliche Nutzung der öffentlichen Ladeoptionen von den individuellen Verfügbarkeiten für das entsprechende Fahrzeug abhängig ist. Ist am Start- oder Zielort einer Fahrt keine Lademöglichkeit vorhanden, steht diese Option für dieses Fahrzeug nicht zur Verfügung.

25.2.1 Ladepunkte und Ladestandorttypen

Die Vielzahl möglicher Ladeorte mit unterschiedlichen Lademöglichkeiten lässt sich, gemäß ihrer Zugänglichkeit, in verschiedene Ladestandorttypen differenzieren. Die potenziellen Standorte lassen sich in private und öffentliche Ladeinfrastruktur unterteilen. Basierend auf Wegezweck und durchschnittlicher Aufenthaltsdauer ermöglichen Wohnort, Arbeitsort und weitere (dritte) Orte eine weitere Differenzierung. Außerdem kann die mögliche Ladeleistung ein wichtiges Entscheidungskriterium darstellen, so dass Schnellladeinfrastruktur gesondert zu betrachten ist. In Kombination aus Zugänglichkeit und Ort sowie der Ladeleistung ergeben sich folgende Ladestandorttypen (Tab. 25.2):

⁸Vgl. Hardman et al. 2018.

Nutzung der Lademöglichkeiten zur Deckung des Ladebedarfs von privaten BEV					Ladestandorttypen							
					Nähe zu Hause		Nähe Arbeitsplatz		Sonstige Orte			
					Privat	Öffentlich	Privat	Öffentlich	Privat	Öffentlich	Öffentlich	
Fahrzeugtypen/verfügbare Lademöglichkeiten	Privat	Pkw-Abstellort zu Hause	Lademöglichkeit zu Hause	Pkw-Abstellort Arbeitsplatz	Lademöglichkeit Arbeitsplatz	Normal-laden	Normal-laden	Normal-laden	Normal-laden	Normal-laden	Normal-laden	Schnell-laden
						Mit privater Lademöglichkeit zu Hause	Betriebsgelände/privat	Mit privater Lademöglichkeit am Arbeitsplatz	Reichweite	Nicht möglich	Lademöglichkeit	Vollständiger Ladevorgang
		Ohne private Lademöglichkeit am Arbeitsplatz	Reichweite	Nicht möglich	Lademöglichkeit			Vollständiger Ladevorgang	Ausnahmefälle	Nicht sinnvoll		
		Ohne private Lademöglichkeit zu Hause	Betriebsgelände/privat	Ohne private Lademöglichkeit am Arbeitsplatz	Reichweite	Nicht möglich	Lademöglichkeit	Vollständiger Ladevorgang	Ausnahmefälle	Nicht sinnvoll		
				Ohne private Lademöglichkeit am Arbeitsplatz	Reichweite	Nicht möglich	Lademöglichkeit	Vollständiger Ladevorgang	Ausnahmefälle	Nicht sinnvoll		
			Öffentlich	Mit privater Lademöglichkeit am Arbeitsplatz	Reichweite	Nicht möglich	Lademöglichkeit	Vollständiger Ladevorgang	Ausnahmefälle	Nicht sinnvoll		
	Ohne private Lademöglichkeit am Arbeitsplatz			Reichweite	Nicht möglich	Lademöglichkeit	Vollständiger Ladevorgang	Ausnahmefälle	Nicht sinnvoll			
	Öffentlich	Betriebsgelände/privat	Mit privater Lademöglichkeit am Arbeitsplatz	Reichweite	Nicht möglich	Lademöglichkeit	Vollständiger Ladevorgang	Ausnahmefälle	Nicht sinnvoll			
			Ohne private Lademöglichkeit am Arbeitsplatz	Reichweite	Nicht möglich	Lademöglichkeit	Vollständiger Ladevorgang	Ausnahmefälle	Nicht sinnvoll			
		Öffentlich	Ohne private Lademöglichkeit am Arbeitsplatz	Reichweite	Nicht möglich	Lademöglichkeit	Vollständiger Ladevorgang	Ausnahmefälle	Nicht sinnvoll			

Abb. 25.1 Matrix der Lademöglichkeiten

Tab. 25.1 Legende der Lademöglichkeitenmatrix

Lademöglichkeit	An diesen Standorten können die Fahrzeuge geladen werden. In Abhängigkeit von Ladeleistung und Aufenthaltsdauer kann die geladene Energiemenge stark variieren.
Vollständiger Ladevorgang	Die Ladestandorte sind durch eine lange Aufenthaltsdauer gekennzeichnet. Selbst bei geringer Ladeleistung ist ein vollständiges Laden der Batterie möglich.
Ausnahmefälle	Die Ladestandorte werden nicht regelmäßig genutzt. Durch besondere Gegebenheiten kann ein Ladevorgang an diesen Orten dennoch ermöglicht oder notwendig werden.
Überschreitung der Reichweite	Die Ladestandorte werden bei abzusehender Überschreitung der Fahrzeugreichweite genutzt. Durch eine hohe Ladeleistung kann die notwendige Aufenthaltsdauer minimiert werden.
Nicht sinnvoll	Der Ladestandort könnte genutzt werden. Eine Nutzung ist aber basierend auf verfügbarer, präferierter Ladeinfrastruktur nicht sinnvoll bzw. unwahrscheinlich.
Nicht möglich	Die Ladeinfrastruktur steht dieser Gruppe der Fahrzeuge nicht zur Verfügung.

Tab. 25.2 Ladestandorte differenziert nach Zugänglichkeit und Ortszweck

Abbildungsquelle (unter Abbildung):	
Private Ladeinfrastruktur	Auf einem privaten Stellplatz an/in oder nahe der eigenen Wohnung
	Auf einem privaten Stellplatz des Arbeitsplatzes
	Zugänglichkeit zu privaten Stellplätzen an weiteren Orten
Öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur	Öffentliche Ladeinfrastruktur in der Nähe der eigenen Wohnung
	Öffentliche Ladeinfrastruktur in der Nähe des Arbeitsplatzes
	Öffentliche Ladeinfrastruktur an weiteren Orten
	Öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur auf Privatgelände in der Nähe der eigenen Wohnung
	Öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur auf Privatgelände in der Nähe des Arbeitsplatzes
Schnellladeinfrastruktur	Öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur auf Privatgelände an weiteren Orten
	Schnellladeinfrastruktur an oder in der Nähe von Achsen
	Schnellladeinfrastruktur an weiteren Orten

Private Ladeinfrastruktur

Laden auf dem Privatgrundstück zu Hause

Der private Ladepunkt an privaten Stellplätzen steht nur einem eingeschränkten Personenkreis zur Verfügung. Die Lademöglichkeit wird lediglich durch die Fahrzeuge eines einzelnen Haushalts genutzt. Es ist davon auszugehen, dass solche privaten Ladepunkte den zugehörigen Fahrzeugen meistens zur Verfügung stehen, wenn sie benötigt werden. Inwiefern bei Mehrfamilienhäusern alle Hausbewohnenden über eine eigene Lademöglichkeit für ihre Fahrzeuge verfügen oder ob sich Konzepte mit geteilter Ladeinfrastruktur entwickeln werden, ist zum jetzigen Zeitpunkt ungewiss.

Laden am Arbeitsplatz

Steht den Fahrzeugen eine zugewiesene Lademöglichkeit auf dem Betriebsgelände am Arbeitsplatz zur Verfügung, kann sie mit relativ hoher Sicherheit regelmäßig genutzt werden. Bei Ladepunkten, die grundsätzlich von allen Beschäftigten genutzt werden können, ist es möglich, dass nicht zu jeder Zeit über die entsprechende Lademöglichkeit verfügt werden kann. Durch Koordination oder Vorgaben, beispielsweise ein Umparken nach Abschluss des Ladevorgangs, lassen sich Engpässe und Konflikte minimieren. Ob die Ladeinfrastruktur am Arbeitsplatz genutzt wird, ist von Kriterien wie Kosten, Nutzungsbedingungen und Verfügbarkeit abhängig.⁹

Private Lademöglichkeiten an weiteren Orten

Auch abseits des Wohngrundstücks und des Betriebsgeländes lässt sich private Ladeinfrastruktur vorfinden, die weiteren fest definierten Gruppen zur Verfügung steht. Beispielsweise ist es möglich, dass ein Hotel seinen Übernachtungsgästen Ladeoptionen anbietet. Neben privaten Lademöglichkeiten mit relativ vielen ladeberechtigten Fahrzeugen sind Ladepunkte zu nennen, die im Normalfall nur den zugehörigen Fahrzeugen zur Verfügung stehen und je nach Situation von weiteren Fahrzeugen genutzt werden können. Eine solche weitere Option wäre etwa der private Ladepunkt während des Besuchs von Familienmitgliedern, Freunden und Bekannten: Die Gastgebernden könnten ihren vorhandenen Ladepunkt bei Bedarf den Besuchenden bereitstellen.

Öffentliche und öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur

Ergänzend zu privater Ladeinfrastruktur gibt es öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur. Aufgrund der Zugänglichkeit für alle ist die theoretische Konkurrenz besonders groß. Öffentliche und öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur ist unterteilt in folgende Varianten.

1. Ladeinfrastruktur im öffentlichen Raum

Die Ladeinfrastruktur wird im öffentlichen Straßenraum aufgebaut und kann prinzipiell rund um die Uhr genutzt werden. An welchen Orten öffentliche Ladeinfrastruktur errichtet wird, ist wesentlich auch von der Strategie der jeweils zuständigen Stadt oder Gemeinde abhängig.

⁹Vgl. Tal et al. 2020.

2. Öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur auf privaten Flächen

Die Ladeinfrastruktur wird auf privaten Flächen errichtet. Infolgedessen kann die Zugänglichkeit im Rahmen der gesetzlichen Vorschriften eingeschränkt sein.

Öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur kann an Orten mit verschiedenen Nutzungsstrukturen installiert werden. Häufig wird die Errichtung in der Nähe von „Points of Interest“ vorgeschlagen.^{10,11} Eine weitere Möglichkeit ist der Aufbau von Ladeinfrastruktur in Wohngebieten. Je nach Umgebung und Lage des Wohngebiets ist sie vor allem auf die Bedürfnisse der Anwohnenden ausgerichtet. Vorrangig werden Ladepunkte dort benötigt und umgesetzt, wo sich der Ladevorgang mit dem eigentlichen Wegezweck kombinieren lässt – das bedeutet: Die Fahrzeuge können an Zielen von Wegen und damit an den Stellen geladen werden, wo sie ohnehin geparkt werden. Zusätzlich werden Lademöglichkeiten entlang von Achsen benötigt – wo sie vor allem als Schnellladeinfrastruktur umzusetzen sind.¹²

Die öffentliche Ladeinfrastruktur ist der am wenigsten genutzte Standorttyp.¹³ Öffentliche Ladeinfrastruktur ist dennoch ein elementarer Bestandteil im Gesamtsystem: Sie ist wichtig, um Personen zum Kauf von Elektrofahrzeugen zu ermutigen und um eine Grundbeziehungsweise Notfallversorgung sicherzustellen.

25.2.2 Einteilung der Fahrzeuge in Ladebedarfsgruppen

Elektrofahrzeuge können hinsichtlich der ihnen bereitstehenden Lademöglichkeiten in verschiedene Gruppen eingeteilt werden. Zentrale Unterscheidungskriterien der einzelnen Gruppen sind die diversen Verfügbarkeiten privater Ladeinfrastruktur am Wohn- und Arbeitsort. Elektrofahrzeuge können danach gruppiert werden, welche Abstellmöglichkeiten ihnen zu Hause oder am Arbeitsplatz zur Verfügung stehen, und ob dort jeweils eine Lademöglichkeit vorhanden ist (siehe hierzu die Zeilen der entsprechenden Matrix).

Fahrzeuge mit privater Ladeinfrastruktur

In einer besonders komfortablen Situation sind Fahrzeuge, die über private Lademöglichkeiten am Wohnort, am Arbeitsort und gegebenenfalls an weiteren Orten verfügen. Ein Laden des Fahrzeugs ist in diesen Fällen gemäß den Präferenzen der Nutzenden möglich. Ein Zurückgreifen auf öffentliche Ladeinfrastruktur kann notwendig werden, wenn die Reichweite überschritten wird. Besteht nur am Arbeitsplatz die Möglichkeit zur Nutzung

¹⁰ Vgl. Csonka und Csiszár 2017.

¹¹ Vgl. Karolemeas et al. 2021.

¹² Vgl. Anderson et al. 2018.

¹³ Vgl. Figenbaum und Kolbenstedt 2016.

privater Ladeinfrastruktur, müssen Nutzende Abstriche hinsichtlich der präferierten Ladeinfrastruktur machen. Bezüglich privater Lademöglichkeiten an weiteren Orten ist anzunehmen, dass sie nicht regelmäßig, sondern nur gelegentlich zur Verfügung stehen.

Fahrzeuge ohne private Ladeinfrastruktur

Die Fahrzeuge ohne Zugang zu privater Ladeinfrastruktur sind in folgende Untergruppen zu differenzieren.

1. Fahrzeuge ohne private Ladeinfrastruktur, aber mit privatem Stellplatz am Wohn-/Arbeitsort
2. Fahrzeuge ohne private Ladeinfrastruktur und ohne privaten Stellplatz am Wohn-/Arbeitsort

In der ersten Untergruppe verfügen die Fahrzeuge über einen privaten Stellplatz, der allerdings nicht mit Ladeinfrastruktur ausgestattet ist. Der Ladebedarf kann nicht durch private Ladeinfrastruktur zu Hause oder am Arbeitsplatz gedeckt werden. Das Laden wäre nur bei einer Abkehr von der privaten Abstellmöglichkeit zugunsten öffentlicher Abstellmöglichkeiten in der Umgebung möglich. Für diese Gruppe ist öffentliches Laden an dritten Aktivitätsorten eine der primären Lademöglichkeiten. Solche Aktivitäten sind etwa Freizeit, Einkaufen oder private Erledigungen. Wird das Fahrzeug am Arbeitsort nicht auf privaten Flächen des Unternehmens abgestellt, ergibt sich an diesem Ort ebenfalls eine Möglichkeit des öffentlichen Ladens.

In der zweiten Untergruppe verfügt das Fahrzeug über keinen privaten Stellplatz. Das Fahrzeug wird nach Beendigung der Fahrt am Wohnort im öffentlichen Straßenraum abgestellt. Die Nutzung öffentlicher Ladeinfrastruktur am Wohnort oder während einer Aktivität unterscheidet sich vor allem in Bezug auf die Aufenthaltsdauer. Eine erwartbare lange Parkdauer am Wohnort kann relativ viel Energieaufnahme auch bei geringer Ladeleistung gewährleisten. Gleiches gilt für öffentliches Laden am Arbeitsort. Diese Gruppe kann in der Umgebung ihres Wohnorts mit Hilfe von öffentlicher Infrastruktur laden, sofern sie vorhanden ist. Allerdings ist die Verfügbarkeit öffentlicher Ladeinfrastruktur nicht immer sichergestellt, so dass die Attraktivität dieser Lademöglichkeit weitaus geringer ist als bei privater Ladeinfrastruktur am Wohnort.

Da in beiden Gruppen die Sicherheit einer Lademöglichkeit am Wohn- oder Arbeitsplatz fehlt, müssen im Alltag zwingend öffentliche Lademöglichkeiten genutzt werden. Das Ladeverhalten kann sehr unterschiedlich ausfallen und wird sich zwischen folgenden extremen Optionen bewegen:

- Bei jeder Gelegenheit laden, auch wenn der Batteriestatus dies nicht erfordert
- Schnellladeinfrastruktur nutzen, um ähnlich wie beim Tanken nur dann zu laden, wenn es notwendig und die Batterie fast leer ist

25.2.3 Verflechtung von Ladestandorttypen und Ladebedarfsgruppen

Insgesamt sind deutlich mehr Fahrzeuge den Gruppen mit Zugang zu privater Ladeinfrastruktur zuzuordnen. Ein Großteil aktueller Elektrofahrzeuge wird regelmäßig mit privater Ladeinfrastruktur geladen. Gemäß einer Befragung norwegischer E-Auto-Besitzenden laden nur etwa 6 % nie an privater Ladeinfrastruktur am Wohnort. Im Kontrast dazu finden nur geringe Anteile der Ladevorgänge an öffentlicher Ladeinfrastruktur statt.¹⁴

Welcher Anteil der Fahrzeuge über private Stellplätze als Voraussetzung für private Ladeinfrastruktur verfügt, ist stark von Raumtyp und Wohnumgebung abhängig. Während in ländlichen Regionen nahezu alle Fahrzeuge über einen privaten Stellplatz verfügen, liegt der Anteil in Metropolen bei nur 50 %.¹⁵ Insbesondere in Gebieten mit einer hohen Bevölkerungsdichte und damit einhergehend einem hohen Anteil von Mehrfamilienhäusern ist die Anzahl der Möglichkeiten zur Installation privater Ladeinfrastruktur begrenzt oder mit zusätzlichen Herausforderungen verbunden.¹⁶

Errichtung oder Abbau von Ladeinfrastruktur sorgen dafür, dass sich die Anteile der Lademöglichkeiten zwischen bestimmten Orten verschieben. Wird beispielsweise private Ladeinfrastruktur installiert, verschiebt sich die Gruppenzugehörigkeit. Infolge der Präferenz für private Ladeinfrastruktur reduziert sich der öffentliche Ladebedarf dann deutlich. Inwiefern eine Verschiebung von Fahrzeugen in die Gruppe mit privater Ladeinfrastruktur stattfindet, ist abhängig von den Möglichkeiten, private Ladeinfrastruktur zu errichten. In einigen Fällen ist der Aufbau einer privaten Ladeinfrastruktur nur unter Inkaufnahme hoher Hürden und Kosten möglich. In anderen Fällen wäre der Aufbau möglich, wurde aber bisher nicht vorgenommen. Derzeit verfügen überdurchschnittlich viele private Elektrofahrzeuge über einen eigenen Stellplatz.¹⁷ Nähert sich dieser Wert dem Durchschnitt aller Fahrzeuge an, wird es mehr von ihnen geben, die über keine Möglichkeit des privaten Ladens am Wohnort verfügen.

Die Verteilung der Ladevorgänge auf die verschiedenen Standorte kann durch externe Anreize verändert werden. Ein solcher Anreiz ist beispielsweise kostenloses Laden. Wird ein solches Angebot durch den Arbeitgeber oder an öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur unterbreitet, können sich die Präferenzen hinsichtlich der Ladestandorte ändern. Im Extremfall wird die eigene private Ladeinfrastruktur nur noch als Notreserve verwendet. Der anfallende Ladebedarf wird vorrangig über die Ladeinfrastruktur am Arbeitsplatz oder durch öffentliche Ladeinfrastruktur gedeckt. Dies kann dazu führen, dass sich das Ladeverhalten insofern ändert, dass an verschiedenen Orten nicht bei Bedarf, sondern bei Gelegenheit geladen wird. Als Folge dieser zusätzlichen Ladevorgänge können alle

¹⁴Vgl. Figenbaum und Kolbenstedt 2016.

¹⁵Vgl. Nobis und Kuhnimhof 2018.

¹⁶Vgl. VDA et al. 2021.

¹⁷Vgl. Nobis und Kuhnimhof 2018.

Ladepunkte eines Standorts vermehrt belegt sein und so nicht mehr für diejenigen Fahrzeuge zur Verfügung stehen, die laden müssen.¹⁸

25.2.4 Schnellladebedarf in den verschiedenen Gruppen

Der bei der Nutzung von Elektrofahrzeugen anfallende Ladebedarf kann auf weitere Arten kategorisiert werden. Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal ist der Zeitpunkt des Ladevorgangs im Kontext des zurückgelegten Weges. Zum einen kann das Elektrofahrzeug auf einer Strecke zwischengeladen werden, wie dies bei der Nutzung von Verbrennerfahrzeugen üblich ist (im Weiteren „Transit Charging“ genannt). Zum anderen besteht die Möglichkeit, am Zielort zu laden (im Folgenden „Destination Charging“ genannt). Beim „Transit Charging“ ist davon auszugehen, dass das Elektrofahrzeug zwischengeladen wird, wenn entweder die Reichweite für den angestrebten Weg nicht genügt oder ein geplanter Zwischenstopp eingelegt wird.

In Abgrenzung zur Nutzung der Normalladeinfrastruktur ergeben sich auf diese Weise für die Schnellladeinfrastruktur weitere Einsatzfelder. Bei einem Zwischenstopp wird eine hohe Ladeleistung nachgefragt, da eine hohe Energiemenge in möglichst geringer Aufenthaltszeit übertragen werden soll. Mit einer deutlich höheren Ladeleistung lässt sich die Ladedauer entscheidend reduzieren. Der Ladevorgang ähnelt eher einem klassischen Tankvorgang, wenn auch mit einem etwas höheren Zeitbedarf. Tendenziell erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, auf Schnellladeinfrastruktur zurückzugreifen oder zumindest zurückgreifen zu wollen, mit zunehmender Länge einer Fahrt.¹⁹ Neben dem „Transit Charging“ sind eine bewusste Ladefahrt oder das Laden am geplanten Zielort weitere Anwendungsfälle. Sollte private Ladeinfrastruktur zugänglich sein, ist die Option des Schnellladens aufgrund der höheren Ladekosten wenig attraktiv.²⁰

25.3 Räumlich-zeitliche Struktur von Ladebedarfen

Auf der Basis der heutigen räumlichen und zeitlichen Nutzungsmuster von Fahrzeugen lässt sich der Ladebedarf bei einer vollständigen Umstellung auf die Elektromobilität abschätzen. Die Frage lautet dabei: Wie viel Energie müsste wann und wo von den Elektrofahrzeugen geladen werden, damit die Nutzungsmuster verwirklicht werden können? Zur Quantifizierung des Ladebedarfs an bestimmten Orten und Zeiten sind für die Fälle „Transit Charging“ und „Destination Charging“ zwei unterschiedliche Fragen zu beantworten. Im Fall des „Transit Charging“ ist zu klären: Wann befinden sich Fahrzeuge wo und wie

¹⁸Vgl. Hardman et al. 2018.

¹⁹Vgl. Yang et al. 2020.

²⁰Vgl. Ashkrof et al. 2020.

lange sind sie unterwegs? Für das „Destination Charging“ ist zu ergründen: Wann sind Fahrzeuge wo und wie lange abgestellt?

Der Ladebedarf beim „Transit Charging“ fällt vor allem auf und in der Nähe von Strecken mit überregionaler Verbindungsbedeutung an – etwa auf Bundesautobahnen oder Bundesstraßen. Dabei kann das Verkehrsaufkommen und daraus folgend der Ladebedarf auf einzelnen Streckenabschnitten im Jahresverlauf stark variieren. Insbesondere Ferien und Nichtferienzeiten unterscheiden sich je nach Streckenabschnitt deutlich.²¹ Auf Abschnitten mit hohem Verkehrsaufkommen während der Ferienzeiten ist stellenweise mit einem hohen Ladebedarf zu rechnen.

Im Bereich des „Transit Charging“ ist zur Abschätzung des Ladebedarfs darauf zu achten, dass nicht jedes Fahrzeug, das sich auf einem Streckenabschnitt befindet, zu diesem Zeitpunkt auch Ladebedarf hat. So fällt der Ladebedarf beispielsweise erst am Ziel an, wenn die komplette Strecke ohne Zwischenladung des Fahrzeugs zurückgelegt werden kann. Aus diesem Grund sind Aussagen zum Ladebedarf auf Streckenabschnitten im Wochen- und Tagesverlauf standortscharf nur unter Berücksichtigung der jeweiligen Verkehrsrelationen möglich.

Beim „Destination Charging“ fällt der Ladebedarf an Aktivitätsorten an. Das können der Wohnort, die Arbeitsstelle oder dritte Orte sein. Im Vergleich zum Ladebedarf beim „Transit Charging“ variiert der Ladebedarf für die meisten Standorte dieser Art im Normalfall wenig zwischen den Jahreszeiten. An Orten saisonaler Aktivitäten – zum Beispiel an Freibädern oder Skipisten – kann es jedoch auch zu ausgeprägten jahreszeitlichen Effekten kommen.

Wenn Fahrzeuge am Wohnort abgestellt werden, entsteht dort der Ladebedarf. Dieser kann sowohl im privaten als auch im öffentlichen Raum anfallen – je nachdem, wo das Fahrzeug abgestellt wird. Zu verorten ist diese Art des Ladebedarfs vermehrt in Wohn- und Mischgebieten. Der Wohnort wird zumeist nachmittags bis abends erreicht und die Fahrzeuge können in der Nacht geladen werden.²² Aufgrund der langen Aufenthaltszeit wird am Wohnort keine hohe Ladeleistung nachgefragt.

Ein weiterer Ort mit langer Aufenthaltszeit ist der Arbeitsort. Der arbeitsorttypische Ladebedarf tritt vermehrt in Mischgebieten sowie auf gewerblichen Arealen und auf Sonderbauflächen von montags bis freitags auf. In dieser Zeit erreichen fast 80 % der Fahrzeuge den jeweiligen Arbeitsort zwischen 5 und 10 Uhr (vgl. Abb. 25.2). Somit fällt auch der Großteil des Ladebedarfs ab diesem Zeitraum an. Die durchschnittliche Aufenthaltszeit am Arbeitsort ist relativ lang.²³ Daraus folgt meist die Nachfrage geringer Ladeleistung. Bei langen Fahrstrecken kann zum Teil dennoch eine hohe Ladeleistung notwendig sein, um den Ladebedarf zu decken.

Zusätzlich zum Wohn- und Arbeitsort entsteht Ladebedarf an dritten Orten. Dazu zählen beispielsweise Stätten mit Kunden- oder Besucherverkehr sowie anderweitige Ge-

²¹ Vgl. Fitschen und Nordmann 2021.

²² Vgl. Nobis und Kuhnimhof 2018.

²³ Vgl. Nobis und Kuhnimhof 2018.

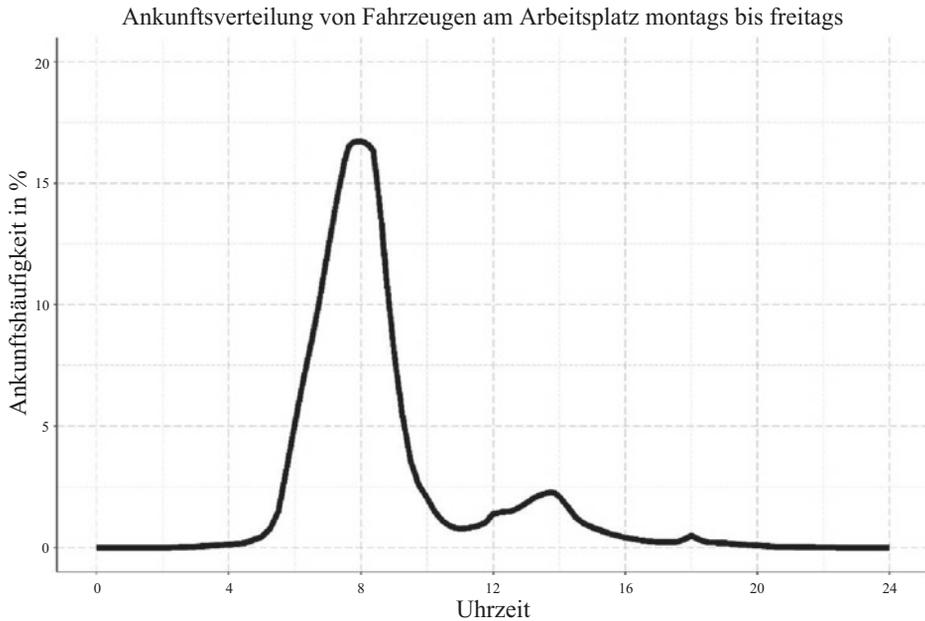


Abb. 25.2 Ankunftsverteilung der Fahrzeuge am Arbeitsplatz. (Vgl. Nobis und Kuhnimhof 2018) (eigene Darstellung)

biete, in denen Fahrzeuge – etwa zum Besuch von Bekannten – abgestellt werden. Der Ladebedarf von Elektrofahrzeugen an diesen Orten variiert im Wochen- sowie im Tagesverlauf. Im Rahmen dieses Kapitels werden lediglich die drei Wegezwecke „Einkauf“, „private Erledigung“ und „Freizeit“ näher betrachtet.

Während die drei Wegezwecke werktags etwa gleich häufig zu beobachten sind, unterscheidet sich der Anteil der zurückgelegten Wege am Wochenende. Samstags ist der Anteil der Wege zum Zweck „Einkaufen“ und „Freizeit“ höher. Da der Einkauf sonntags lediglich in Ausnahmefällen möglich ist, sinkt der Ladebedarf von Elektrofahrzeugen an diesen Orten erheblich. Im Gegensatz dazu werden sonntags die meisten Freizeitwege zurückgelegt. Der Anteil der Wege zum Zweck „private Erledigung“ ist im Wochenverlauf nahezu konstant.

Ladebedarfe an Einkaufseinrichtungen treten montags bis freitags von etwa 9:30 bis 19 Uhr auf, wobei sie morgens häufiger zu beobachten sind (vgl. Abb. 25.3). Die Aufenthaltsdauer im Einkaufsverkehr liegt meist zwischen 30 und 75 min.

Der zeitliche Verlauf der Ankünfte an Orten privater Erledigungen entspricht montags bis samstags in etwa demjenigen des Einkaufsverkehrs. Der Unterschied zwischen den beiden Ladebedarfen besteht in der längeren Aufenthaltszeit an Orten der privaten Erledigung. Während 75 % aller Fahrzeuge montags bis freitags weniger als 75 min während des Einkaufens abgestellt werden, liegt dieser Grenzwert für die privaten Erledigungen bei 120 min. An Sonntagen ist die Ankunftsverteilung zum Wegezweck privater Erledigungen

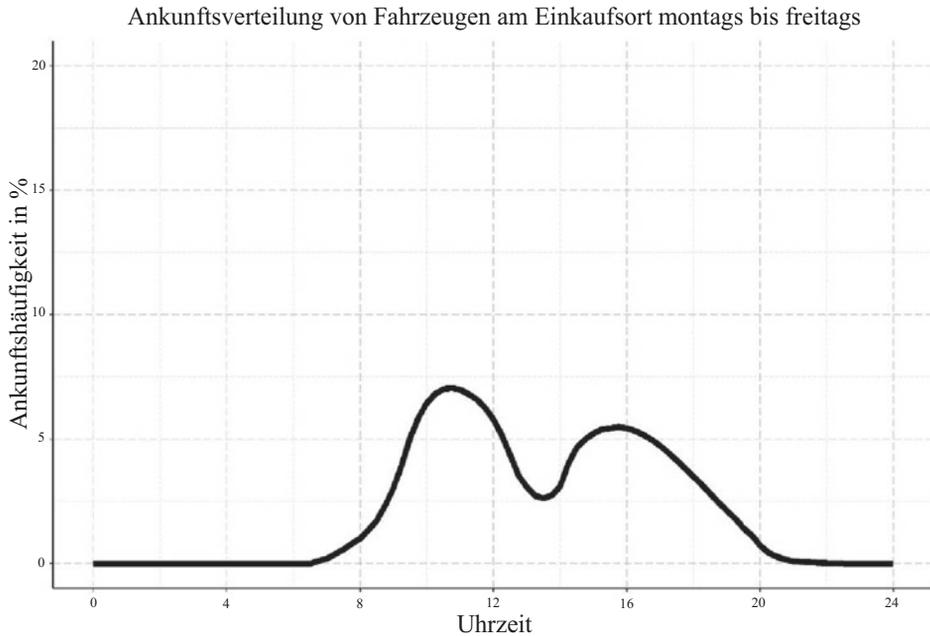


Abb. 25.3 Ankunftsverteilung der Fahrzeuge am Einkaufsort. (Vgl. Nobis und Kuhnimhof 2018) (eigene Darstellung)

zwischen 9 und 19 Uhr gleich verteilt. Neben der Ankunftszeit variiert auch die Aufenthaltszeit der Fahrzeuge beträchtlich.²⁴

Im Hinblick auf den Ladebedarf an Zielorten von Freizeitwegen ergeben sich Unterschiede zwischen Werktagen, Samstag und Sonntag. Montags bis freitags ist die Ankunfts­häufigkeit vor allem in den Abendstunden besonders hoch: Die mittlere Aufenthaltszeit liegt dort bei etwa zwei Stunden. Am Wochenende sind die Aufenthaltszeiten insgesamt länger: Sie liegen sonntags im Mittel bei zweieinhalb Stunden und samstags sogar darüber. Mit Blick auf die Ankunftszeiten beim Weg zu Freizeitaktivitäten gilt: Samstags erreichen die Fahrzeuge ihr Ziel zwischen 9 und 19 Uhr zeitlich relativ gleichmäßig verteilt. Sonntags liegt der Hauptzeitraum der Ankünfte am frühen Nachmittag.²⁵

25.4 Ladeleistung

Damit die Lade- und Netzinfrastruktur die Ladeleistung und -energie für eine große Zahl elektrischer Fahrzeuge bereitstellen kann, werden Prognosen bezüglich des zeitlichen und örtlichen Ladeleistungsbedarfs sämtlicher Fahrzeuge benötigt. Der jährliche Energiebedarf

²⁴Vgl. Nobis und Kuhnimhof 2018.

²⁵Vgl. Nobis und Kuhnimhof 2018.

eines Fahrzeuges kann mittels der durchschnittlichen Jahreskilometer und des spezifischen Energieverbrauchs abgeschätzt werden. Für die Bereitstellung und Übertragung elektrischer Leistung für Ladevorgänge muss der Bedarf jedoch zeitlich und örtlich aufgelöst sein. Studien und Forschungsarbeiten nutzen üblicherweise eine 15- oder 60-minütige Auflösung. Die Anforderungen an die örtliche Auflösung sind dabei vom Betrachtungsbereich abhängig. Für eine deutschlandweite Betrachtung kann der aggregierte Bedarf von Millionen von Fahrzeugen ausreichend sein. Soll jedoch der Einfluss von Elektromobilität auf die einzelnen Verteilnetze untersucht werden, sind häufig Leistungsprofile auf Fahrzeug- oder Ladepunktebene notwendig. Um den zukünftigen elektrischen Leistungsbedarf der Elektromobilität zu bestimmen, können Prognosemodelle genutzt werden. Im Folgenden wird erläutert, welche Aspekte in einer solchen Prognose prinzipiell berücksichtigt werden.

25.4.1 Prognose von Ladevorgängen

Für die Bestimmung der zusätzlichen Netzbelastung durch Elektrofahrzeuge sind im Wesentlichen die Ladeleistung sowie die Anfangs- und Endzeit eines jeden Ladevorgangs von Bedeutung. Soll darüber hinaus die elektrische Flexibilität eines Fahrzeuges – beispielsweise für intelligente Netzintegration (siehe Abschn. 27.4) – berücksichtigt werden, erweitern sich die Anforderungen um den Ladezustand der Fahrzeuge, um Ankunfts- und Abfahrtszeiten sowie um Informationen über die nächsten zu fahrenden Wegstrecken. Mit Hilfe dieser Informationen können dann Aussagen bezüglich des Lastmanagement-Potenzials getroffen werden. Bei der Prognose von Ladevorgängen existieren mehrere Ansätze. Eine Möglichkeit ist die Messung und Extrapolation realer Fahr- oder Ladeprofile. Dabei wird davon ausgegangen, dass das heutige Verhalten der (Elektro-)Fahrzeuglenkenden im Wesentlichen mit dem künftigen übereinstimmt. Eine andere Möglichkeit besteht darin, aus dem heutigen Fahrverhalten Realdaten abzuleiten und das zukünftige Ladeverhalten darauf basierend mit Hilfe von Simulationsmodellen zu bestimmen. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass Annahmen über künftige Bedingungen in die Verhaltensmodellierung aufgenommen werden können. Dies kann etwa mittels künstlicher Intelligenz oder einer probabilistischen Simulation auf Grundlage von Wahrscheinlichkeitsverteilungen erfolgen. Dabei ist zu beachten, dass verschiedene Gegebenheiten, von denen einige im Folgenden erläutert werden, einen Einfluss auf die Muster der Nutzung von Fahrzeugen und damit auf den Zeitpunkt und die Art eines Ladevorgangs haben. Ladevorgänge sind vor allem eine Folge der jeweiligen Fahrprofile, des damit verbundenen Energieverbrauchs und der individuellen Ladeentscheidung der Fahrer. Der Energieverbrauch setzt sich aus dem spezifischen Energieverbrauch und der gefahrenen Wegstrecke zusammen. Darüber hinaus ist die Geschwindigkeit des Fahrzeugs maßgeblich, da der Wirkungsgrad des Motors und der Windwiderstand geschwindigkeitsabhängig sind. Bei Angaben zum Verbrauch eines Fahrzeugs wird jedoch stets die benötigte Energie pro 100 km angegeben. Diese basiert auf Labormessungen, bei denen ein Fahrzeug einen

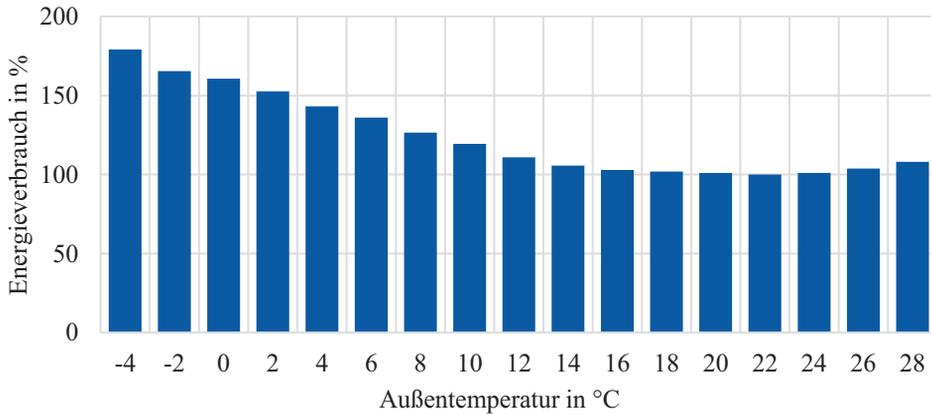


Abb. 25.4 Relativer Energieverbrauch elektrischer Fahrzeuge in Abhängigkeit von der Außentemperatur. (Vgl. Held et al. 2016)

bestimmten Fahrzyklus abfährt. Diese Messungen vernachlässigen normalerweise den Verbrauch von elektrischen Nebenverbrauchern wie Klimaanlage, Scheibenwischer oder Licht. In Held et al. (2016)²⁶ wurde daher gemessen, wie sich der Energieverbrauch eines Elektrofahrzeugs in Abhängigkeit von der Außentemperatur verändert. Das Ergebnis der Messung ist in Abb. 25.4 dargestellt.

Die Batteriegröße eines Fahrzeugs hat in Verbindung mit der Wegstrecke und dem Energieverbrauch einen Einfluss darauf, ob und wie oft ein Zwischenladevorgang unbedingt notwendig ist und wie lange ein Ladevorgang letztlich dauert. Je größer die Batteriekapazität eines Fahrzeugs ist, desto höher liegen meistens auch die maximale Ladeleistung und die Reichweite, so dass die Flexibilität bei der Planung eines Ladevorgangs größer ist. Insbesondere bei öffentlicher Ladeinfrastruktur ist zu beachten, dass verschiedene Stecker-Standards existieren und somit nicht alle Fahrzeuge und Ladesäulen kompatibel sind. Die maximale Ladeleistung ergibt sich aus dem Minimum der maximalen Ladeleistungen von Ladeinfrastruktur und Fahrzeug. Zuletzt hat das individuelle Ladeverhalten der Fahrzeugfahrer einen starken Einfluss darauf, ob ein Ladevorgang begonnen wird. Dabei lässt sich zwischen technisch notwendigen und nicht notwendigen Ladevorgängen unterscheiden. Technisch notwendige Ladevorgänge kommen dann zustande, wenn die Wegstrecke bis zur nächsten Lademöglichkeit mit dem aktuellen Ladezustand nicht mehr gefahren werden kann und deshalb geladen werden muss. In jedem anderen Fall ist die Entscheidung darüber, ob ein Ladevorgang begonnen werden soll, von verschiedenen Faktoren abhängig – beispielsweise vom Ladezustand, von der Aufenthaltsdauer, vom Wochentag oder von der Tageszeit. Zwei Einflüsse auf das Ladeverhalten sind in Abb. 25.5 dargestellt. Die linke Grafik zeigt den durchschnittlichen Ladezustand bei Beginn eines Ladevorgangs an. Es ist zu erkennen, dass ein Großteil der Fahrenden schon bei hohen Ladezuständen einen Ladevorgang beginnt und ein Fahrzeug nur selten mit

²⁶Vgl. Held et al. 2016.

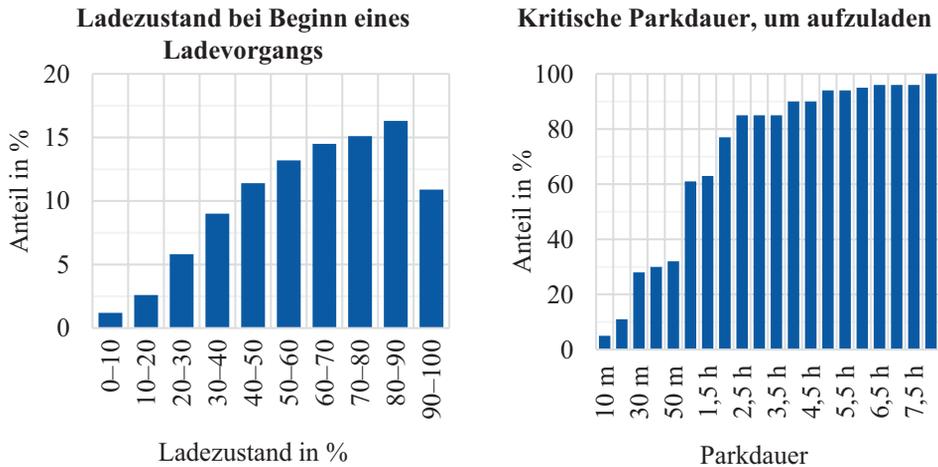


Abb. 25.5 Ladezustand bei Beginn eines Ladevorgangs (Vgl. [Stephan Krug et al. 2018](#)) und kritische Parkdauer, ab der sich ein Ladevorgang für Fahrende lohnt. (Vgl. [Katharina Papendick et al. 2011](#))

nahezu leerer Batterie eine Ladesäule ansteuert. Das rechte Diagramm zeigt, ab welcher Parkdauer sich Fahrende laut einer Umfrage für einen Ladevorgang entscheiden würden. Erst ab einer Parkdauer von mehr als einer Stunde würden mehr als 50 % der Fahrenden versuchen, ihr Auto aufzuladen.

25.4.2 Exemplarische Fahr- und Ladeprofile

Im Folgenden soll exemplarisch ein Prognoseergebnis von Fahr- und Ladeprofilen elektrischer Fahrzeuge dargestellt werden. Das Fahrverhalten wird hier anhand realer Tagesfahrprofile von Verbrennerfahrzeugen abgeschätzt. In [Abb. 25.6](#) sind Daten zum Aufenthaltsort von 5000 Fahrzeugen gezeigt.

Es wird deutlich, dass nahezu alle Fahrzeuge nachts daheim geparkt werden. Morgens verlassen viele Fahrzeuge das Zuhause und fahren zur Arbeit. Die Orte „Einkauf“ und „Freizeit“ haben vor allem am Wochenende eine größere Bedeutung. Außerdem wird am Wochenende deutlich seltener gefahren. Die Ladevorgänge – und damit die Ladeleistung – sind ein Resultat aus Fahrprofil sowie individuellem Ladeverhalten und sind in [Abb. 25.7](#) dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass vor allem dann Ladeleistung benötigt wird, wenn Autos an einem Ort ankommen. Deshalb resultieren Leistungsspitzen morgens bei der Arbeit und früh abends zu Hause. Die Anzahl öffentlicher Ladevorgänge ist relativ gering, da die Fahrenden ein kostengünstigeres und häufig angenehmeres Aufladen bei der Arbeit und vor allem zu Hause bevorzugen. Darüber hinaus ist das Laden mit geringer bis mittlerer Leistung batterieschonend. Die Ergebnisse solcher Prognosen lassen sich für Netzstudien zum zeitlichen und örtlichen Ladeenergiebedarf und zur Vorhersage künftiger Belastung von Stromnetzen nutzen.

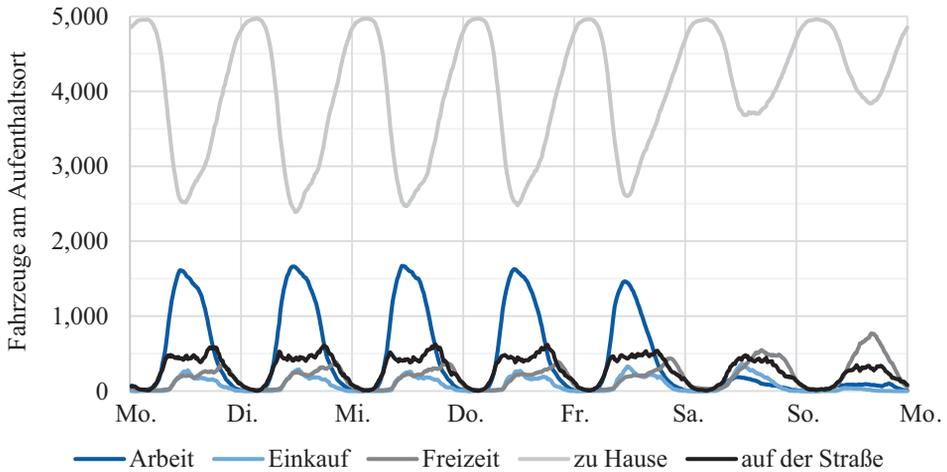


Abb. 25.6 Aufenthaltsort von 5000 Fahrzeugen im Wochenverlauf. (Vgl. [VertgeWall et al. 2021](#))

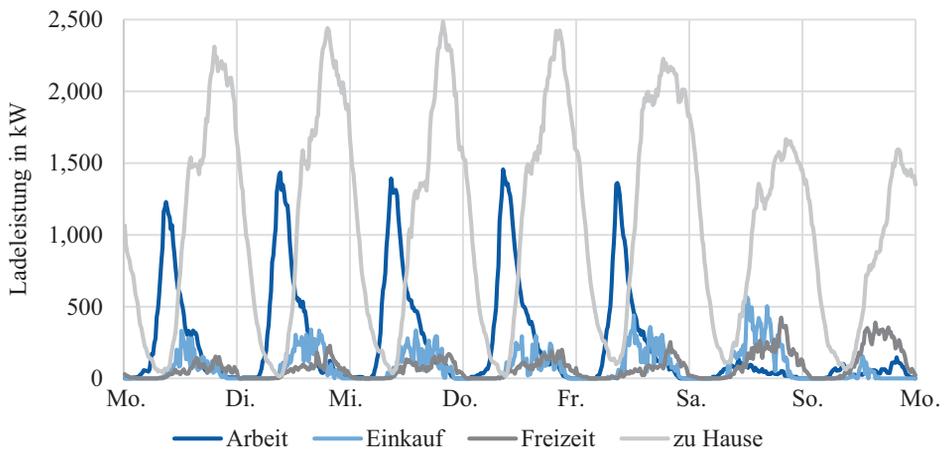


Abb. 25.7 Leistungsprofile von unregelmäßigen Ladevorgängen 5000 elektrischer Fahrzeuge im Wochenverlauf. (Vgl. [VertgeWall et al. 2021](#))

Literatur

Teil V: Infrastruktur für die Elektromobilität

Anderson, J. E; Lehne, M; Hardinghaus, M.: *What electric vehicle users want: Real-world preferences for public charging infrastructure.* In: International Journal of Sustainable Transportation, Jg. 12, 2018, Nr. 5, S. 341–352

Ashkrof, P; Homem de Almeida Correia, G; van Arem, B.: *Analysis of the effect of charging needs on battery electric vehicle drivers' route choice behaviour: A case study in the Netherlands.* In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, Jg. 78, 2020, S. 102206

- Csonka, B; Csiszár, C.:** *Determination of charging infrastructure location for electric vehicles*. In: Transportation Research Procedia, Jg. 27, 2017, S. 768–775
- Davis, L. W.:** *How much are electric vehicles driven?* In: Applied Economics Letters, Jg. 26, 2019, Nr. 18, S. 1497–1502
- Figenbaum, E; Kolbenstedt:** *Learning from Norwegian Battery Electric and Plug-in Hybrid Vehicle users – Results from a survey of vehicle owners*. Oslo, 2016
- Fitschen, A; Nordmann, H.:** *Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen* (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Verkehrstechnik, V, Heft V 340). Bremen: Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG, März 2021
- Hardman, S; Jenn, A; Tal, G; Axsen, J; Beard, G; Daina, N; Figenbaum, E; Jakobsson, N; Jochem, P; Kinnear, N; Plötz, P; Pontes, J; Refa, N; Sprei, F; Turrentine, T; Witkamp, B.:** *A review of consumer preferences of and interactions with electric vehicle charging infrastructure*. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, Jg. 62, 2018, S. 508–523
- Held, M; Graf, R; Wehner, D; Eckert, S; Faltenbacher, M; Weidner, S; Braune, O.:** *Abschlussbericht: Bewertung der Praxistauglichkeit und Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen*
- Karolemeas, C; Tsigdinos, S; Tzouras, P. G; Nikitas, A; Bakogiannis, E.:** *Determining Electric Vehicle Charging Station Location Suitability: A Qualitative Study of Greek Stakeholders Employing Thematic Analysis and Analytical Hierarchy Process*. In: Sustainability, Jg. 13, 2021, Nr. 4, S. 2298
- Katharina Papendick; Ulrich Brennecke; Juan Sebastián Sánchez Márquez; Barbara Deml:** *Nutzerverhalten beim Laden von Elektrofahrzeugen*
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA):** *Fahrzeugzulassungen (FZ). Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen mit alternativem Antrieb -Monatsergebnisse Juni 2021*. Flensburg, 2021
- Nissan:** *Nissan reveals European EV drivers are travelling further than petrol and diesel motorists*. <https://europe.nissannews.com/en-GB/releases/release-7aa4d3e4b25782dcbefda7df601b078a-nissan-reveals-european-ev-drivers-are-travelling-further-than-petrol-and-diesel-motorists>. Abruf 25.08.2021
- Nobis, C; Kuhnimhof, T.:** *Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur*. Bonn, Berlin, 2018
- Plötz, P; Moll, C; Bieker, G; Mock, P; Li, Y.:** *Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles – Fuel consumption, electric driving, and CO2 emissions*, 2020
- Sagaría, S; Neto, R. C; Baptista, P.:** *Modelling approach for assessing influential factors for EV energy performance*. In: Sustainable Energy Technologies and Assessments, Jg. 44, 2021, S. 100984
- Stephan Krug; Oliver Krey; Birte Ohm; Oliver Braune; Marc Weider:** *Elektromobilität vor Ort. Ergebnisbericht des Zentralen Datenmonitorings des Förderprogramms Elektromobilität vor Ort des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur*
- Tal, G; Debapriya Chakraborty, D; Jenn, A; Lee, J. H.:** *Factors Affecting Demand for Plug-in Charging Infrastructure: An Analysis of Plug-in Electric Vehicle Commuters*: University of California, Institute of Transportation Studies, 2020
- VDA; BDEW; GdW:** *Ladeinfrastruktur für Elektro-Pkw auch in Mehrfamilienhäusern ermöglichen – eigenes Förderprogramm notwendig*. Gemeinsame Pressemitteilung von VDA, BDEW und GdW. Abruf 25.08.2021
- Vertgehall, C; Trageser, M; Kurth, M.:** *Modelling of location and time dependent charging profiles of electric vehicles based on historical user behaviour*
- Weiss, M; Cloos, K. C; Helmers, E.:** *Energy efficiency trade-offs in small to large electric vehicles*. In: Environ Sci Eur, Jg. 32, 2020, Nr. 1

- Wu, H; Niu, D.:***Study on Influence Factors of Electric Vehicles Charging Station Location Based on ISM and FMICMAC.* In: Sustainability, Jg. 9, 2017, Nr. 4, S. 484
- Yang, Y; Tan, Z; Ren, Y.:***Research on Factors That Influence the Fast Charging Behavior of Private Battery Electric Vehicles.* In: Sustainability, Jg. 12, 2020, Nr. 8, S. 3439

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Christopher Hecht, Jan Figgener und Dirk Uwe Sauer

Die Planung neuer Ladeinfrastruktur und die zu erwartende Nutzung basieren derzeit primär auf Simulationsmodellen wie Agenten-Modellen, Verkehrsmodellen und Ähnlichem sowie auf Umfragedaten.¹ Mit fortschreitendem Hochlauf der Elektromobilität stehen als zusätzliche Säule auch reale Nutzungsdaten in immer größerer Zahl zur Verfügung. Diese Daten lassen sich verwenden, um genutzte Modelle zu validieren und Effekte zu entdecken, die in den bisherigen Methoden nicht sichtbar sind. In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Ladeinfrastrukturnutzung in Deutschland nach Infrastrukturart aufgezeigt. Bei privater Ladeinfrastruktur zeigt sich dabei eine erhöhte Nutzung vor allem am späten Nachmittag und Abend, wobei eine Leistungsverschiebung in die Nacht hinein ohne signifikante Komforteinbußen möglich ist. Öffentliche AC-Ladeinfrastruktur wird insbesondere nach der Ankunft am Arbeitsplatz genutzt. DC-Schnelllader wiederum

¹Vgl. Wolff und Madlener 2019.

C. Hecht

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: christopher.hecht@isea.rwth-aachen.de

J. Figgener

Abteilungsleiter, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: jan.figgener@isea.rwth-aachen.de

D. U. Sauer (✉)

Universitätsprofessor, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: dirkuwe.sauer@isea.rwth-aachen.de

finden für kürzere Zeiträume über den Tag hinweg Anwendung. Die Ladeprofile elektrischer Fahrzeugflotten sind dabei stark vom Einsatz der Fahrzeuge im jeweiligen Sektor abhängig. Durch eine planmäßige Nutzung der Fahrzeuge lässt sich die Ladung in der Regel gut planen.

26.1 Private Ladeinfrastrukturnutzung am Wohnort

Bei privater Ladeinfrastruktur besteht häufig eine Eins-zu-eins-Beziehung zwischen Fahrzeug und Ladestation, bei der das Fahrzeug an der privaten Wallbox geparkt wird. Bei typischen täglichen Fahrdistanzen von 39 km² und Energieverbräuchen von etwa 15 bis 25 kWh/100km³ ergibt sich ein Energiebedarf von 6 bis 10 kWh pro Tag. Da private Ladeinfrastruktur oft mit 11 kW Leistung realisiert wird, beschränkt sich die tägliche Ladedauer selbst bei erhöhten Verbräuchen somit auf maximal wenige Stunden. Die Ladungen finden typischerweise werktags nach Rückkehr vom Arbeitsplatz statt und lassen sich durch die Verwendung von typischen Mobilitätsprofilen modellieren.⁴

In den Projekten „E-Mobility-Carré“⁵ und „E-Mobility-Allee“⁶ wurde darüber hinaus gezeigt, dass die Gleichzeitigkeit dieser Ladungen selbst im ungesteuerten Zustand relativ gering ausgeprägt ist. So wurden im „E-Mobility-Carré“ maximal 13 der 58 untersuchten Ladepunkte gleichzeitig genutzt, womit eine Nachfragespitze von 98 kW erzeugt wurde. Diese konnte durch ein Lastmanagementsystem auf 40 kW reduziert werden, was von 93 % der Befragten als nicht einschränkend empfunden wurde. Die mittlere Infrastrukturnutzung war noch deutlich geringer und ist in Abb. 26.1 dargestellt. In der „E-Mobility-Allee“ waren die Ergebnisse mit maximal vier gleichzeitig ladenden von zehn Fahrzeugen insgesamt ähnlich. Ein wichtiger Grund für diese relativ niedrige Gleichzeitigkeitsquote ist, dass nach einer gewissen Gewöhnungsphase nicht mehr täglich geladen wird, wenn die Restreichweite die für den nächsten Tag geplante Strecke deutlich übersteigt. Mit immer größer werdenden Fahrzeugbatterien⁷ kann davon ausgegangen werden, dass einzelne Fahrzeuge noch seltener geladen werden.

²Vgl. Follmer und Gruschwitz 2019.

³Vgl. ADAC 2021.

⁴Für ein Beispiel siehe Abb. 37 in vgl. Nobis und Kuhnimhof 2018.

⁵Vgl. Netze BW 2021.

⁶Vgl. EnBW 2019.

⁷Vgl. Hecht et al. 2021.

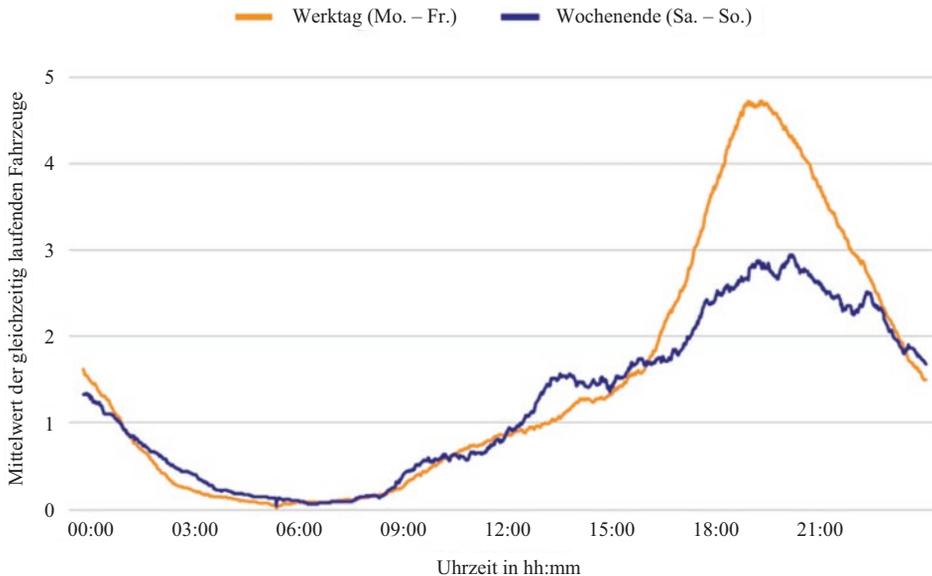


Abb. 26.1 Gleichzeitigkeit von Ladungen im „E-Mobility-Carré“. (Abbildung mit Erlaubnis abgedruckt nach Halder (2021)) (vgl. Halder 2021)

26.2 Öffentliche Ladeinfrastrukturnutzung

Öffentliche Ladeinfrastruktur unterscheidet sich in der Nutzung stark nach angebotener Leistung. Normalladeinfrastruktur wird entweder nachts genutzt oder parallel zu einer anderen Aktivität wie Arbeiten oder Einkaufen. Oftmals überschreitet die Standzeit die tatsächliche Ladezeit deutlich, da Standzeiten von acht oder mehr Stunden nicht selten sind.⁸ Schnelllader hingegen werden vor allem bei Langstreckenfahrten genutzt und nach etwa 20 bis 40 min wieder freigegeben, damit die Fahrt zügig fortgesetzt werden kann. Standzeiten ohne tatsächlichen Leistungstransfer sind eher selten.

Mit den genannten Nutzungsszenarien lassen sich die aktuellen Nutzungsprofile öffentlicher Ladepunkte mit niedriger Leistung gut erklären. Wie Abb. 26.2 offenbart, steigt die durchschnittliche Belegung von Ladepunkten mit niedriger Leistung in den Morgenstunden zwischen 6 und 10 Uhr stark an. Verantwortlich dafür sind vermutlich vor allem diejenigen Ladevorgänge, die nach der Ankunft am Arbeitsplatz starten. Die Auslastung sinkt am Nachmittag zwischen 15 und 18 Uhr und somit zum Ende eines Vollzeitarbeitstags wieder ab.

Bei Schnellladeinfrastruktur ist das Muster anders: Ladevorgänge finden zwar auch tagsüber statt, aber die Ankunftszeiten sind deutlich weniger mit dem Beginn eines typischen Arbeitstags korreliert. Unter Berücksichtigung der deutlich kürzeren Standzeiten ist davon auszugehen, dass es sich hier um Gelegenheitsladungen bei anderen Aktivitäten wie

⁸Vgl. Hecht et al. 2020.

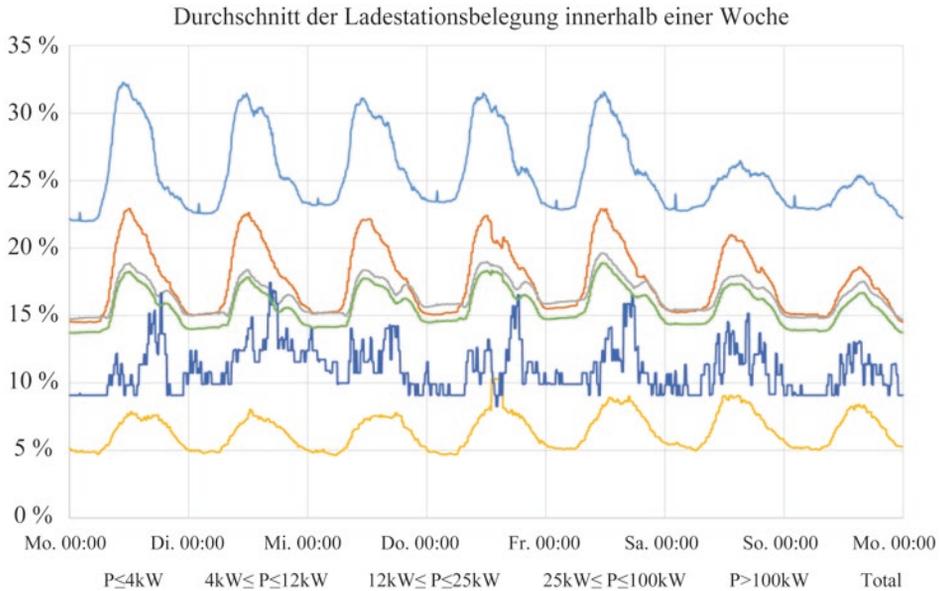


Abb. 26.2 Durchschnittliche Ladepunktbelegung in Deutschland zwischen 21.12.2019 und 10.03.2020 nach Leistung. (Vgl. Hecht et al. 2020)

Einkaufen oder Freizeit handelt. Außerdem bleibt im Vergleich zu langsameren Leistungen die Nutzung am Wochenende relativ konstant, was sich vor allem mit Fahrten auf Langstrecken oder bei Freizeitaktivitäten erklären lässt.

Im Vergleich zur Belegung ergibt sich bei der Anzahl der Ladevorgänge pro Tag ein deutlich anderes Bild, wie Abb. 26.3 zeigt: An Wochentagen ist die Summe der Ladevorgänge zwischen allen Leistungsklassen ähnlich – mit leicht höheren Werten bei Schnellladern mit 50 kW (für höhere Leistungen liegen keine ausreichenden Daten vor). Am Wochenende hingegen ist die Anzahl der Ladevorgänge an Schnellladepunkten deutlich höher als bei Normalladepunkten. Ursächlich hierfür sind die deutlich kürzeren Standzeiten, da eine langsame AC-Ladesäule häufig mehrere Stunden oder auch einen kompletten Tag lang belegt ist, um einen einzigen Ladevorgang zu ermöglichen, während Schnelllader im gleichen Zeitraum deutlich mehr Fahrzeuge bedienen können. Auf eine Überlegenheit von Schnellladern sollte man dennoch nicht sofort schließen, da diese deutlich höhere Investitionskosten erzeugen.

Beim Betrachten der Belegung nach Standort ergibt sich ein eindeutiges Bild (vgl. Abb. 26.4): Im urbanen Zentrum werden Ladestationen sowohl tagsüber als auch nachts intensiv genutzt, wobei tagsüber die Nutzung deutlich höher ist. Ursächlich hierfür ist vermutlich eine Kombination aus Fahrten zur Arbeit, Einkaufen und Freizeitaktivitäten mit jeweils zugehörigen Standzeiten. Dafür spricht unter anderem, dass an Sonntagen die Nutzung geringer ist. An Samstagen ist dies nicht zu beobachten, da Fahrten zur Arbeit durch andere Fahrten kompensiert werden. Da in urbanen Gegenden auch eine hohe

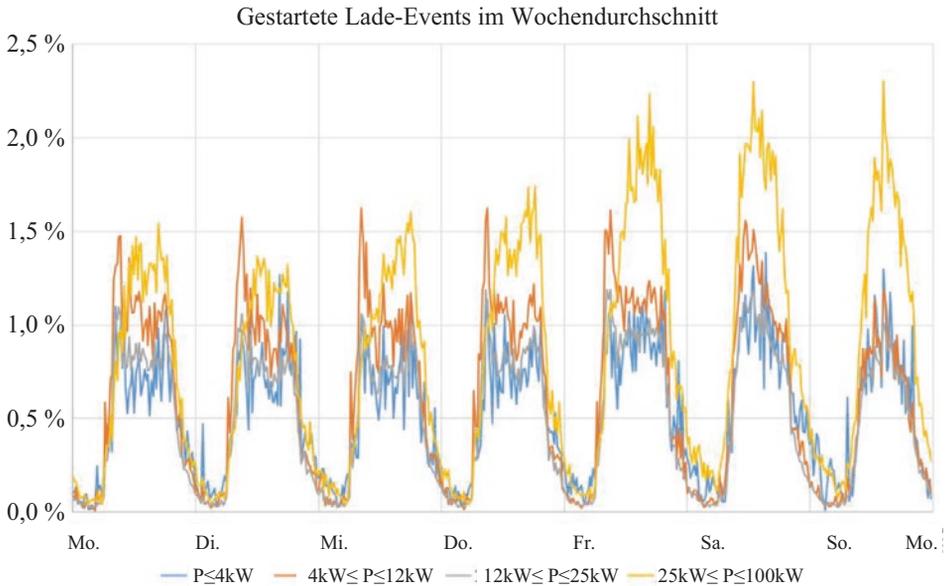


Abb. 26.3 Starts von Ladungen nach Ladepunktleistung (die y-Achse beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Ladevorgang innerhalb eines 20-minütigen Zeitfensters gestartet wird). (Vgl. Hecht et al. 2020)

Einwohnerdichte herrscht, wird die Infrastruktur abends und nachts von in der Nähe wohnenden Personen genutzt. Dies ist unter anderem an den leichten Spitzen der urbanen Kurve in Abb. 26.4 während des frühen Abends zu erkennen. Insgesamt ist der Standort dementsprechend äußerst attraktiv, da verschiedene Gruppen bedient werden können und sich durch hohe Auslastung auch ein hoher Umsatz erzielen lässt.

In primär gewerblich genutzten Gegenden wiederum steht eindeutig eine Nutzung während der Arbeit im Vordergrund. An Wochenenden ist die Nutzung stark reduziert, und auch nachts werden nur wenige Ladepunkte genutzt. Aufgrund der langen Standzeiten und der insgesamt niedrigen Auslastung ist der Standort für Betreibende weniger attraktiv. Im suburbanen Raum ist die Belegung über eine Woche hinweg von einer hohen Gleichmäßigkeit geprägt, da tagsüber kaum Neuankömmlinge die Nutzung erhöhen. Aus diesem Grund ist auch der Unterschied zwischen Woche und Wochenende kaum ausgeprägt. Ladeinfrastruktur in wenig besiedelten („unbewohnt“) Bereichen wird kaum genutzt. Dies lässt sich vor allem auf einen Mangel an Kundschaft zurückführen. Ein weiterer Grund ist, dass Schnellladestationen häufig in wenig besiedeltem Gebiet errichtet werden, welche aus bereits genannten Gründen weniger häufig belegt sind.

Neben diesen relativen Unterschieden zwischen den Aufstellungsorten ist anzumerken, dass selbst an guten Standorten der Betrieb von Ladeinfrastruktur derzeit noch kaum rentabel ist. Es gibt nur vergleichsweise wenige, hoch ausgelastete Ladestationen, die sich finanziell rechnen und einen Großteil der Erlöse generieren. Um ein deutschlandweites

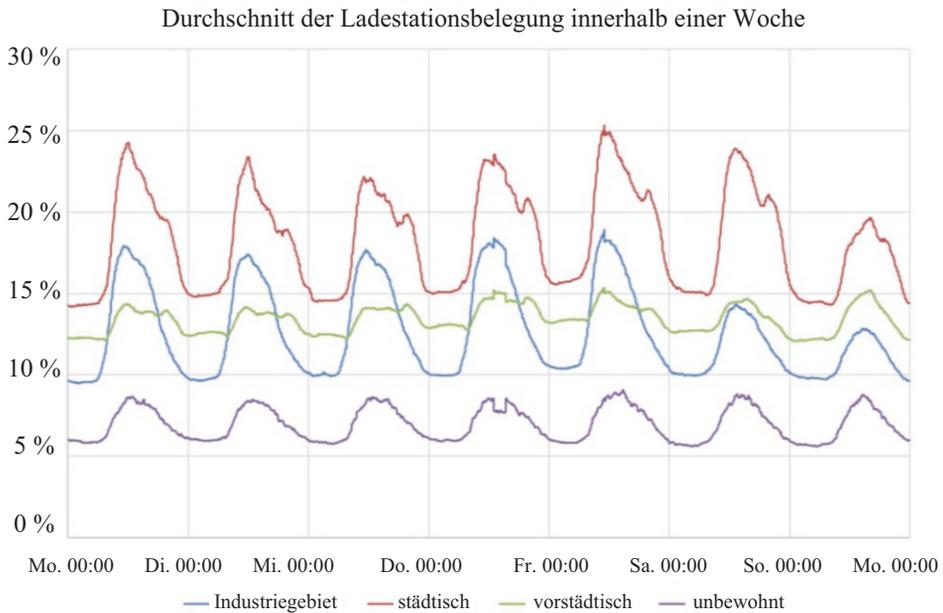


Abb. 26.4 Durchschnittliche Ladepunktbelegung in Deutschland zwischen 21.12.2019 und 10.03.2020 nach Standort. (Vgl. Hecht et al. 2020)

verfügbares Netz aufbauen zu können, müssen daher Kosten sinken und – wo notwendig – Förderungen die geringe Auslastung kompensieren.

26.3 Nutzung von elektrifizierten Flotten

Im privaten Bereich gibt es trotz einer stark steigenden Zulassungszahl immer noch viele Personen, die vom Kauf eines Elektrofahrzeugs absehen. Die genannten Gründe umfassen dabei häufig, dass die Reichweite der Elektrofahrzeuge vor allem für weite Fahrten als zu gering betrachtet wird. Dieses Argument tritt bei gewerblich eingesetzten Elektrofahrzeugen nur bedingt auf, da die Strecken je nach Gewerbe verhältnismäßig kurz und vor allem sehr planbar sind. Insgesamt ist das Flottenprofil stark vom individuellen Gewerbe abhängig, jedoch lassen sich die generellen Überlegungen an exemplarischen Beispielen gut darlegen. Abb. 26.5 zeigt beispielhaft die An- und Absteckzeitpunkte der Flotte eines Pflegedienstes und eines Energieversorgungsunternehmens, die im Projekt „GO ELK“ mit Datenloggern ausgestattet und über die Dauer von zwei Jahren hinweg dokumentiert wurden.⁹

⁹Vgl. Lechthaler 2016.

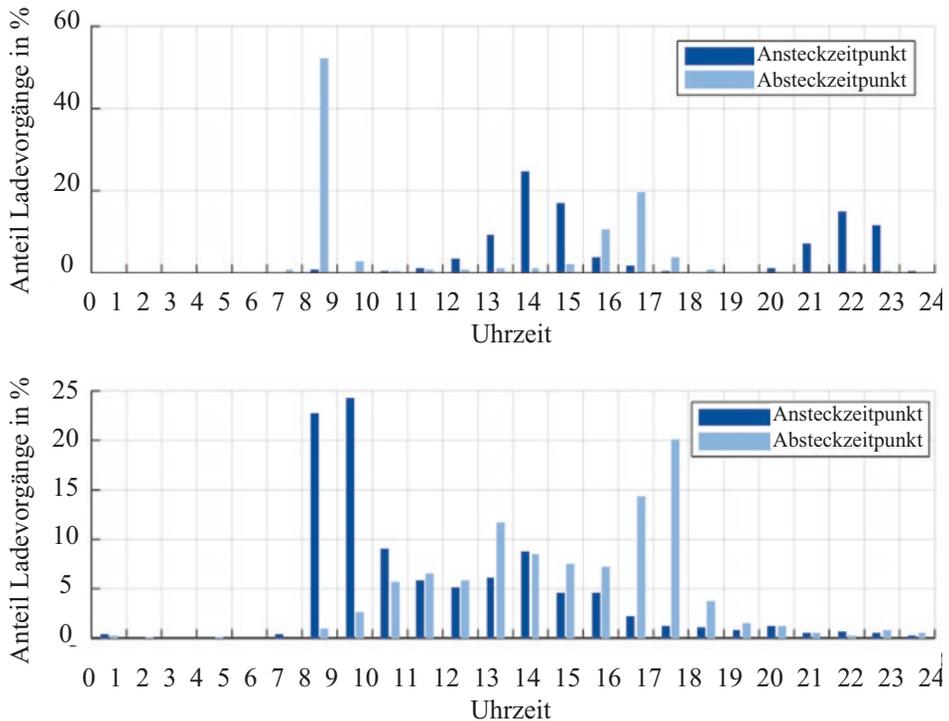


Abb. 26.5 An- und Absteckzeitpunkte der Flotte eines Pflegedienstes (oben) und eines Energieversorgungsunternehmens (unten). (Eigene Auswertung der Daten aus GO ELK)

Beim Pflegedienst sind insbesondere zwei regelmäßig auftretende Arbeitsschichten zu erkennen. Zwischen 6 und 7 Uhr beginnt die erste Schicht, zu der die meisten Fahrten gestartet werden. In der Zeit zwischen 11 und 14 Uhr wird die Schicht beendet. Dann werden die Fahrzeuge oftmals mit der Ladestation verbunden und geladen. Die zweite Schicht beginnt zwischen 14 und 17 Uhr und endet zwischen 20 und 23 Uhr. Nach Beendigung der Schicht werden die Fahrzeuge nachts mit der Station verbunden und wieder aufgeladen. Das Profil des Energieversorgungsunternehmens kann in gewisser Weise als komplementär gegenüber demjenigen des Pflegedienstes erachtet werden, da die Fahrzeuge tendenziell morgens in der Zeit von 6 bis 9 Uhr mit der Ladestation verbunden und nachmittags in der Zeit von 15 bis 18 Uhr wieder vom Netz genommen werden – in der Zwischenzeit gibt es einige Fahrten. Der Grund für dieses etwas ungewöhnliche Fahrprofil ist, dass der Belegschaft die Mitnahme der Fahrzeuge nach Hause gestattet ist und dieses Angebot für die Arbeitswege genutzt wird.

Durch das Ladeprofil ergeben sich regelmäßige und gut planbare Netzanschlusszeiten der beiden gewerblich eingesetzten Fahrzeugflotten. Abb. 26.6 zeigt die durchschnittliche Netzanschlusshäufigkeit beider Flotten innerhalb einer Woche. Während der Pflegedienst ein gleichmäßiges Profil über den gesamten Zeitraum hinweg aufzeigt, ergeben sich beim

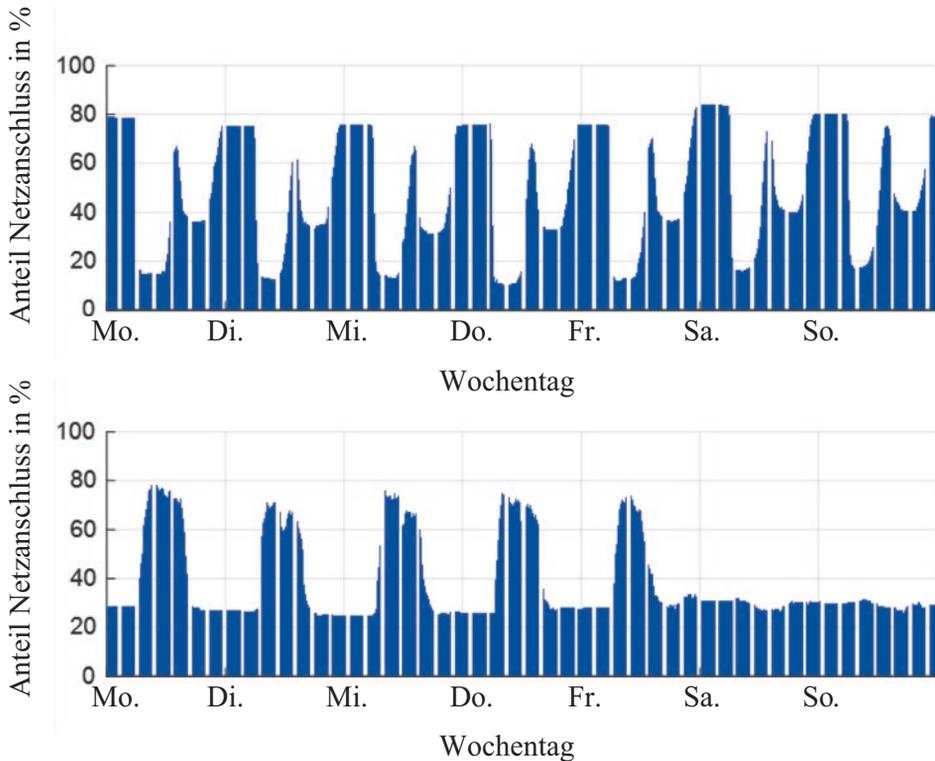


Abb. 26.6 Durchschnittliche Belegung der gewerblichen Ladeinfrastruktur der Flotten eines Pflegedienstes (oben) und eines Energieversorgungsunternehmens (unten)

Energieversorgungsunternehmen Unterschiede zwischen den Tagen Montag bis Freitag sowie Samstag und Sonntag, die auf die private Nutzung der Fahrzeuge durch die Belegschaft zurückzuführen sind. Die regelmäßig auftretenden Anschlussprofile können für die Planung der Ladevorgänge genutzt werden. Bei bekannten Stand- und Anschlusszeiten können intelligente Ladestrategien entwickelt werden, die die Bezugsleistung möglichst gleichmäßig halten, um hohe Leistungsspitzen und damit verbundene erhöhte leitungsbezogene Netzentgelte zu umgehen.

Bei Analyse der Ladezustände (State of Charge – SoC) zu Beginn einer Ladung ist zu erkennen, dass die Fahrzeuge häufig noch eine mittlere Restreichweite aufweisen (vgl. Abb. 26.7). Dabei liegen die Ansteck-SoC bei Fahrzeugen des Pflegedienstes durchschnittlich höher als bei denjenigen des Energieversorgungsunternehmens. Sie verteilen sich überwiegend im Bereich zwischen 40 und 80 % der Batteriekapazität, während beim Energieversorgungsunternehmen eine gleichmäßigere Verteilung zwischen 25 und 70 % der Batteriekapazität vorliegt. Sehr geringe Ansteck-SoC zwischen 0 und 10 % der Batteriekapazität treten nur äußerst selten auf. Beiden Profilen ist gemeinsam, dass die Werte der Absteck-SoC sich vermehrt zwischen 90 und 100 % befinden. Somit werden die Fahrzeuge meist vollgeladen, bevor sie wieder für eine Fahrt genutzt werden.

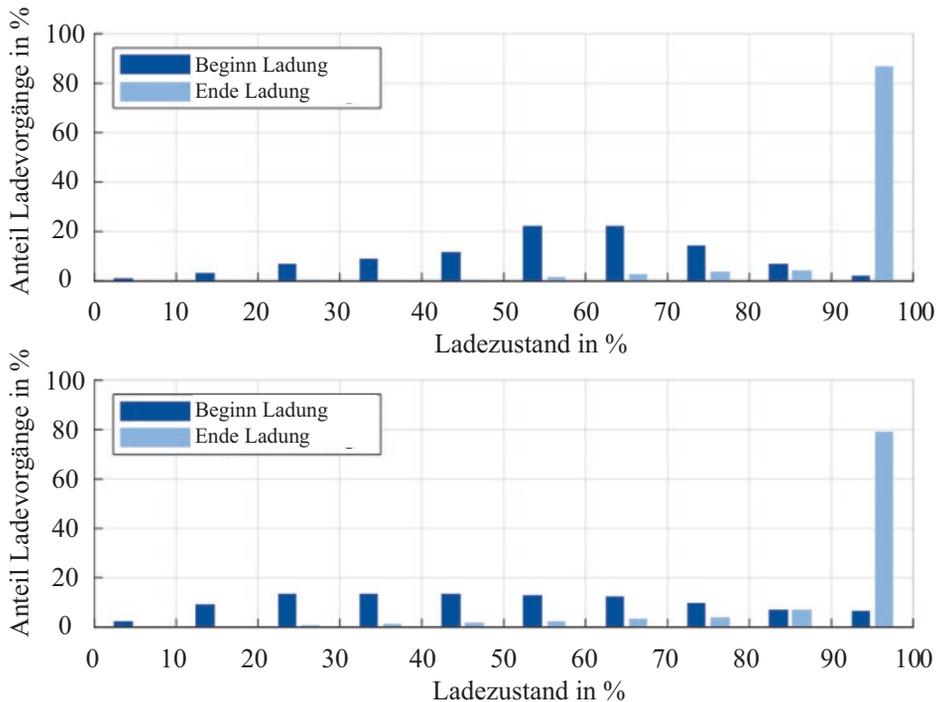


Abb. 26.7 SoC zu Beginn und am Ende der Ladevorgänge bei Fahrzeugen eines Pflegedienstes (oben) und eines Energieversorgungsunternehmens (unten)

Insgesamt unterscheidet sich die Nutzung gewerblicher Flotten von der Nutzung privater Pkw in der Planbarkeit des Gebrauchs, der Ladung und der Weglänge. Bei bekannten und sich wiederholenden Schichten kann die Ladeplanung bedarfsgerecht vorgenommen werden. Sind ausreichend lange Standzeiten vorhanden, könnten daher insbesondere diese Fahrzeuge mit einer bekannten Wahrscheinlichkeit für die Erbringung von Netzdienstleistungen genutzt werden, da die Erbringungszeiträume der Regelleistungsmärkte in den vergangenen Jahren deutlich verkürzt wurden.¹⁰ Werden die gewerblichen Fahrzeuge auch für den privaten Gebrauch freigegeben, sinkt diese Planbarkeit sehr stark, da die Fahrzeuge seltener an die Ladepunkte des Unternehmens angeschlossen werden. Zudem variiert die Planbarkeit zwischen den individuellen Gewerbeflotten – beispielsweise Logistikunternehmen mit festen Routen und Zeiten versus Carsharing mit spontanen Privatfahrten – und die Planung der Ladeinfrastrukturnutzung muss stets für den Einzelfall erfolgen.

¹⁰Vgl. Figgenger et al. 2021.

Literatur

Teil V: Infrastruktur für die Elektromobilität

- ADAC:** *Automarken & Modelle*. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/>. Abruf 06.04.2020
- EnBW:** *Die E-Mobility-Allee: Eine Straße unter Strom*. <https://www.enbw.com/blog/elektromobilitaet/laden/die-e-mobility-allee-eine-strasse-unter-strom/>. Abruf 07.07.2021
- Figgner, J; Tepe, B; Rücker, F; Schoeneberger, I; Hecht, C; Jossen, A; Sauer, D. U.:** *The Influence of Frequency Containment Reserve Flexibilization on the Economics of Electric Vehicle Fleet Operation*, <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105138>, 07/07/2021
- Follmer, R; Gruschwitz, D.:** *Mobilität in Deutschland – MiD Kurzreport. Ausgabe 4.0. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur*. Bonn, 2019
- Halder, R.:** *16 Monate unter Strom. Wir elektrifizieren eine Tiefgarage* (Abschlusswebinar zum Projekt). Stuttgart, 15.04.2021
- Hecht, C; Das, S; Bussar, C; Sauer, D. U.:** *Representative, empirical, real-world charging station usage characteristics and data in Germany*. In: eTransportation, Jg. 6, 2020, Nr. 4, S. 100079
- Hecht, C; Figgner, J; Sauer, D. U.:** *ISEAview – Elektromobilität*. Aachen: Unpublished, 2021
- Lechthaler, F.:** *Gewerblich operierende Elektro-Kleinflotten (GO-ELK) Abschlussbericht GO ELK Berichtszeitraum: 01.2013–06.2016*: Uniper Technologies GmbH, 2016
- Netze BW:** *NETZlabor E-Mobility-Carré. Ein Projekt der Netze BW zur Netzintegration von Elektromobilität in Mehrfamilienhäusern im Bestand*. <https://www.netze-bw.de/unsernetz/netz-innovationen/netzintegration-elektromobilitaet/e-mobility-carre>. Abruf 07.07.2021
- Nobis, C; Kuhnimhof, T.:** *Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur*. Bonn, Berlin, 2018
- Wolff, S; Madlener, R.:** *Charged up? Preferences for Electric Vehicle Charging and Implications for Charging Infrastructure Planning*. In: SSRN Journal, Jg. 47, 2019, Nr. 3, S. 357

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Chris Martin Vertgewall, Niklas Wehbring und Andreas Ulbig

Vor allem aufgrund der laufenden Energiewende unterliegt die Energieversorgung in Deutschland seit der Jahrtausendwende einem stetigen Wandel. Konventionelle Kraftwerke werden durch klimafreundlichere Alternativen ersetzt, so dass mittlerweile die installierte Erzeugungsleistung von Windkraft- und Photovoltaikanlagen diejenige von Kohle-, Gas- und Kernkraftwerken deutlich übersteigt. Durch die mit dem Ziel der Dekarbonisierung betriebene Elektrifizierung des Wärme- und Mobilitätssektors beeinflussen neuartige Lasten wie E-Fahrzeuge oder Wärmepumpen zunehmend den elektrischen Energiebedarf.

C. M. Vertgewall

Oberingenieur, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft (IAEW), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: c.vertgewall@iaew.rwth-aachen.de

N. Wehbring

Oberingenieur, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft (IAEW), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: n.wehbring@iaew.rwth-aachen.de

A. Ulbig (✉)

Universitätsprofessor, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft (IAEW), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: a.ulbig@iaew.rwth-aachen.de

27.1 Energieversorgung in Deutschland

27.1.1 Stromerzeugung und Kraftwerkspark

Die in Deutschland bezogene elektrische Energie stammt aus unterschiedlichen Quellen – das heißt: verschiedenen Primärenergieträgern, die in elektrische Energie umgewandelt werden. Der notwendige Energiebedarf wird einerseits über die Einspeisung in das nationale Stromnetz, andererseits durch Stromimporte aus benachbarten Ländern über Netzkuppelleitungen gedeckt. Der Leistungsaustausch mit benachbarten Ländern und damit einhergehende Importe beziehungsweise Exporte sind durch verfügbare Leitungskapazitäten und die Regulierung begrenzt. Im Jahr 2019 wurden in Deutschland 72,4 Terrawattstunden elektrischer Energie bei einem Exportsaldo von 25,19 TWh über die Landesgrenzen gehandelt.¹ Die installierte Einspeiseleistung und eingespeiste Energie in Deutschland im Jahr 2020 sind je Energieträger in Abb. 27.1 dargestellt.

Der Großteil der erneuerbaren Energie wird von Windkraftanlagen eingespeist. Demgegenüber ist der Anteil der durch Wasserkraftwerke eingespeisten Energie relativ gering, da auch das Potenzial für Wasserkraftwerke in Deutschland – im Gegensatz beispielsweise zu Norwegen oder den Alpenländern – eher gering ist. Der hohe Anteil regenerativer Energieträger an der Energieeinspeisung ist unter anderem die Folge der deutschen Klimapolitik, die in den vergangenen zwei Jahrzehnten den Ausbau von Wandlungsanlagen für regenerative Energie gefördert hat. So ist der Anteil erneuerbarer Energie am Bruttostromverbrauch von 6,3 % im Jahr 2000 – damals mehrheitlich aus Wasserkraft – über etwa

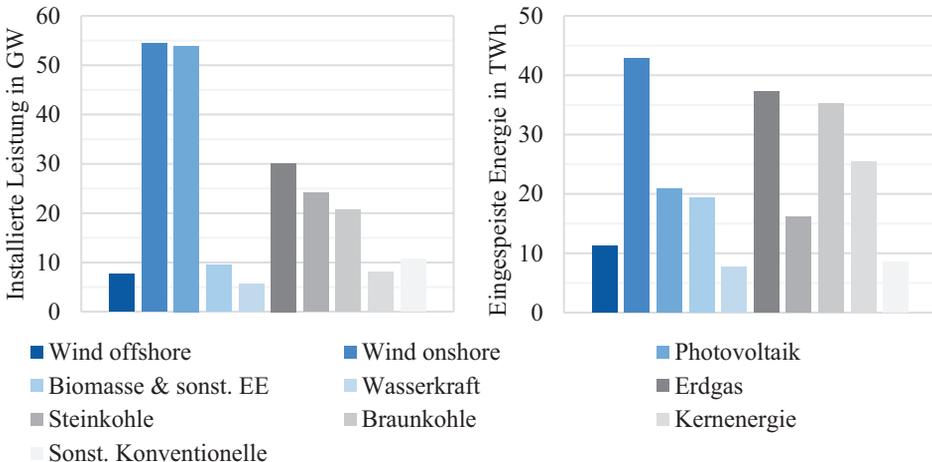


Abb. 27.1 Installierte Leistung und Energieerzeugung in Deutschland im Jahr 2020. (Vgl. BDEW 2021)

¹Vgl. Bundesnetzagentur 2020.

17 % im Jahr 2010 bis auf den heutigen Wert von 45 % gestiegen,² nun klar dominiert von Windturbinen und Photovoltaikanlagen als deren Quellen.

Aufgrund des sich vollziehenden Kohle- und Kernenergieausstiegs in Deutschland werden und müssen diese Anteile in Zukunft weiter steigen, damit die Versorgung mit elektrischer Energie in der Bundesrepublik weiterhin gewährleistet werden kann. Im Jahr 2020 überstieg die installierte Leistung der Träger erneuerbarer Energie diejenige der konventionellen Energieträger. Dabei ist jedoch zu beachten, dass Wind- und Photovoltaikeinspeisung dargebotsabhängig sind und nicht konstant ihre maximale Leistung abrufen können. Dies lässt sich auch anhand von Jahresvolllaststunden quantifizieren. Dieser Wert gibt an, wie viele Stunden eines Jahres eine Anlage mit voller Leistung Energie bereitstellen müsste, um die tatsächlich eingespeiste Jahresenergiemenge zu erreichen. Daher liegt dieser Wert zwischen null und 8760 h und gibt somit eine relative Ausnutzung der jeweiligen Anlage an. Die durchschnittlichen Jahresvolllaststunden aus 2020 in Deutschland pro Energieträger sind in Abb. 27.2 dargestellt.

Abb. 27.2 verdeutlicht, weshalb Quellen erneuerbarer Energie derzeit trotz höherer installierter Leistung noch weniger Energie einspeisen als konventionelle Kraftwerke. Die

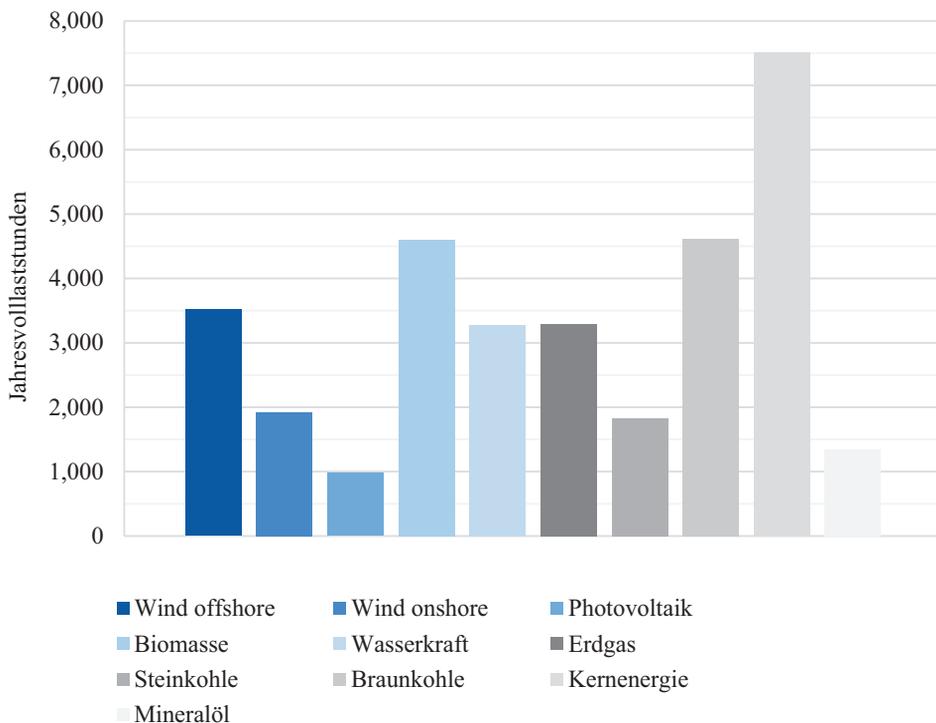


Abb. 27.2 Jahresvolllaststunden in Deutschland im Jahr 2020. (Vgl. BDEW 2021)

²Vgl. BMWi 2021, S. 5.

Volllaststunden von Photovoltaik und Onshore-Windenergieanlagen sind deutlich geringer als die von Kernkraft- oder Braunkohlekraftwerken. Die Volllaststunden sind jedoch nicht nur durch die technischen Möglichkeiten der Anlagen und das Dargebot begrenzt, sondern auch durch die Kapazität des Stromnetzes und die Nachfrage der Verbraucher. Alle Wandlungsanlagen für erneuerbare Energie genießen dabei laut § 11 des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG)³ einen Einspeisevorrang vor konventionellen Kraftwerken. Diese Einspeisung muss jedoch abgeregelt werden, wenn die Übertragungskapazitäten der elektrischen Netze aufgrund hoher Leistungsspitzen überschritten werden („Einspeisemanagement“) oder es keinen Abnehmer für die elektrische Energie im Inland und Ausland gibt. Laut Prognosen des Netzentwicklungsplans 2035 müssen aufgrund fehlender Nachfrage im Jahr 2035 voraussichtlich 7 bis 8 TWh abgeregelt werden.⁴ Im Jahr 2019 betrug die abgeregelte Energie in Deutschland aufgrund fehlender Netzkapazitäten 6482 Gigawattstunden, entsprechend etwa 1 % der Gesamterzeugung, wobei die Tendenz gegenüber den Vorjahren steigend ist.⁵ Da elektrische Fahrzeuge beim Aufladen eine hohe Flexibilität besitzen, könnte ein koordiniertes Aufladen einer großen Anzahl von E-Mobilen insbesondere diese abgeregelte Energie verringern und somit besonders umweltfreundlich sein. Flexibilität bedeutet in diesem Kontext, dass der elektrische Verbraucher seinen elektrischen Energiebedarf zeitlich flexibel beziehen kann, da die Energie nicht instantan benötigt wird.

Obwohl die Menge der abgeregelten Energie bereits heute relativ groß ist, ist ein weiterer großflächiger Ausbau der Wandlungsanlagen für regenerative Energie notwendig. Denn für die zuverlässige und sichere Versorgung mit elektrischer Energie muss die benötigte Leistung zu jedem Zeitpunkt bereitgestellt werden können, so dass die installierte Einspeiseleistung wesentlich höher ausgelegt werden muss als die maximale Verbraucherlast. Die abgeregelte Energie ist bei nicht ausreichender Speichermöglichkeit eine unvermeidbare Folge der Dargebotsabhängigkeit von Solar- und Windenergie und begründet damit einen Mehrbedarf flexibler Lasten. Laut Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021)⁶ wird in Deutschland bis zum Jahr 2045 eine installierte Photovoltaik-Leistung von 385 GW und Wind-Leistung von 215 GW (im Gegensatz zu 54 GW PV- und 62 GW Wind-Leistung im Jahr 2020) notwendig sein, um das Ziel der Klimaneutralität der Bundesregierung erreichen zu können. In Verbindung mit der Abschaltung von Kern- und Kohlekraftwerken entwickelt sich die Energieversorgung von wenigen Kraftwerken mit jeweils hoher Erzeugungsleistung hin zu vielen kleinen dezentralen Anlagen mit jeweils geringerer Leistung. Dies stellt für die elektrischen Netze in Zukunft eine Herausforderung dar.

³Vgl. Erneuerbare-Energien-Gesetz 2020.

⁴Vgl. 50 Hertz Transmission GmbH et al. 2021.

⁵Vgl. Bundesnetzagentur 2020, S. 24.

⁶Vgl. Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut 2021.

27.1.2 Energiebedarf und elektrische Verbraucher

Wie die Energieerzeugung befindet sich auch der Energieverbrauch in Deutschland in einem Wandel. Ein erklärtes Ziel der Bundesregierung ist dabei eine Steigerung der Energieeffizienz, so dass bis zum Jahr 2050 rund 50 % weniger Primärenergie im Vergleich zum Jahr 2008 verbraucht werden soll. Im Jahr 2020 betrug der Bruttostromverbrauch in Deutschland 559,6 TWh, wobei die Tendenz leicht sinkend ist. Der Bruttostromverbrauch umfasst den eigentlichen Stromverbrauch samt Netzverlusten und Eigenverbräuchen von Kraftwerken oder Pumpspeicherkraftwerken. Der bisherige Höchstwert wurde im Jahr 2008 mit 621,4 TWh erzielt. Um das hochgesteckte Ziel einer Halbierung des Primärenergieverbrauchs zu erreichen, hat die Bundesregierung die Energieeffizienzstrategie 2050 verabschiedet.⁷ Der Nettostromverbrauch in Deutschland betrug im Jahr 2020 etwa 488 TWh. Abb. 27.3 zeigt, wie sich diese Energie auf die verschiedenen Verbrauchergruppen aufteilte.

Der maximale Leistungsbedarf lag bei 77,2 GW.⁸ Neben der Veränderung des Energiebedarfs ist jedoch auch eine starke Veränderung der Art der elektrischen Verbraucher zu erwarten, womit eine stärkere Kopplung der verschiedenen Sektoren der Energiewirtschaft einhergeht. Diese Sektoren sind Elektrizität, Wärmeversorgung, Verkehr und Industrie. Durch sektorenkoppelnde Anlagen oder Geräte kann Energie zwischen den verschiedenen Sektoren umgewandelt werden. Dies resultiert einerseits in veränderten

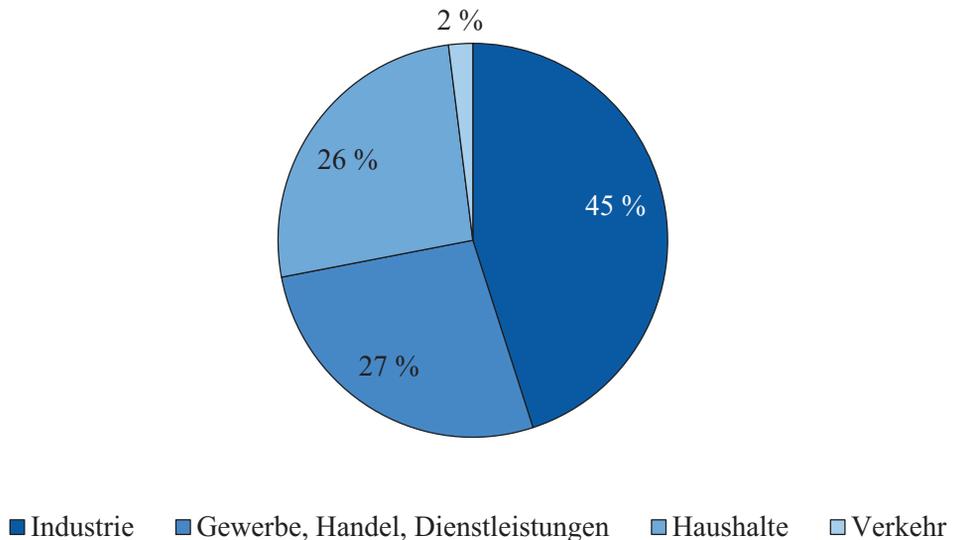


Abb. 27.3 Stromverbrauch in Deutschland 2020 nach Verbrauchergruppen. (Vgl. BDEW 2020)

⁷Vgl. BMWi 2019.

⁸Vgl. Fraunhofer ISE 2019.

Energiebedarfen der jeweiligen Sektoren und bietet andererseits eine höhere Flexibilität. Insbesondere durch den Hochlauf von Wandlungsanlagen für regenerative Energie ist diese zusätzliche Flexibilität ein wichtiges Kriterium für das Erreichen der klimapolitischen Ziele.

Im Bereich der Wärmeversorgung sind Wärmepumpen ein attraktives Mittel zum klimafreundlichen Heizen, da sie Raumwärme aus regenerativ eingespeistem Strom anstatt fossiler Brennstoffe bereitstellen können. Im Jahr 2015 gab es in Deutschland etwa 670.000 Wärmepumpen.⁹ Die Studie „Wärmewende 2030“ prognostiziert, dass bis zum Jahr 2030 etwa fünf bis sechs Millionen Wärmepumpen in Deutschland installiert sein müssen, um die Klimaziele der Bundesregierung erreichen zu können.¹⁰

„Power-to-X“ bezeichnet verschiedene sektorkoppelnde Technologien, welche überschüssige elektrische Energie in andere Energieformen umwandeln können. Die Ausgangsstoffe können beispielsweise Wasserstoff („Power-to-Gas“), Wärmeenergie („Power-to-Heat“) oder Flüssigkraftstoff („Power-to-Liquid“) sein. Auch eine Rückumwandlung in elektrische Energie („X-to-Power“) ist in Zeiten äußerst geringer Einspeisung regenerativer Energie denkbar. Dies ist aufgrund der zweimaligen Umwandlung und geringer Wirkungsgrade jedoch relativ energieineffizient. Die Kurzstudie „Power-to-X“ prognostiziert für das Jahr 2030 eine installierte „Power-to-Gas“-Leistung zwischen einem und drei Gigawatt. Aufgrund fehlender Wirtschaftlichkeit wird derzeit nicht mit einem nennenswerten Zubau von „Power-to-Heat“-Anlagen bis zum Jahr 2030 gerechnet.¹¹

Mit Hilfe unterschiedlicher Fördermaßnahmen wurden in Deutschland seit dem Jahr 2000 großflächig Photovoltaikanlagen installiert; im Jahr 2020 beträgt die installierte Leistung etwa 53 GWp.¹² Dabei wurden vor allem zahlreiche Anlagen mit jeweils relativ geringer Leistung auf Dachflächen privater Wohnhäuser angebracht. Aufgrund hoher Einspeisevergütungen wurde die Energie zum Großteil ins elektrische Netz eingespeist. Mittlerweile ist es für Privatpersonen nicht mehr wirtschaftlich, den Strom der eigenen Photovoltaikanlage ins Netz einzuspeisen. Wegen verhältnismäßig hoher Strompreise in Deutschland ist es daher am lukrativsten, den erzeugten Strom selbst zu verbrauchen. Aus diesem Grund werden immer mehr Heimspeicher installiert, um die Energie aus der sonnenreichen Mittagszeit zu speichern und am restlichen Tag sowie in der Nacht zu nutzen. Laut Ammon et al. (2020)¹³ wird bis zum Jahr 2030 eine installierte Speicherkapazität von 12,7 GWh und bis 2040 von 31,4 GWh im Bereich der Heimspeicher erwartet. Dies führt zu einem deutlich höheren Autarkiegrad der privaten Haushalte in Deutschland und kann die elektrischen Netze entlasten.

⁹Vgl. Fraunhofer IWES/IBP 2017.

¹⁰Vgl. Fraunhofer IWES/IBP 2017.

¹¹Vgl. FfE 2017.

¹²Vgl. BDEW 2021.

¹³Vgl. Ammon et al. 2020.

Zu Beginn des Jahres 2021 waren in Deutschland 309.083 batterieelektrische Fahrzeuge und 279.861 Plug-in-Hybridfahrzeuge zugelassen.¹⁴ Das Ziel der Bundesregierung sind zehn Millionen zugelassene elektrische Fahrzeuge bis zum Jahr 2030. Darüber hinaus sollen eine Million öffentliche Ladepunkte installiert sein.¹⁵ Es kann davon ausgegangen werden, dass für die meisten Fahrzeuge zusätzlich private Ladepunkte errichtet werden. Bei einer durchschnittlichen Jahresfahrleistung eines privaten Pkw von rund 12.000 km¹⁶ liegt der elektrische Energieverbrauch eines batterieelektrischen Fahrzeuges netzseitig etwa bei 2500 kWh,¹⁷ was ungefähr dem durchschnittlichen Energieverbrauch eines Single-Haushalts entspricht.¹⁸ Gewerbliche Pkw fahren etwa die doppelte Strecke und verbrauchen dementsprechend mehr Energie. In Deutschland würden zehn Millionen private Pkw mit 25 TWh etwa 5 % des aktuellen gesamten elektrischen Nettoenergiebedarfs entsprechen.

27.2 Stromnetze

In Verbindung mit den zuvor erwähnten künftigen Entwicklungen der Erzeugungsanlagen und Verbraucher lassen sich einige Herausforderungen für die Netzplanung und den Netzbetrieb ableiten.

27.2.1 Übertragungsnetz

Das Übertragungsnetz in Deutschland und Europa hat die Aufgabe, große Energiemengen und Leistungen über weite Distanzen zu transportieren. Daher wird es auch als „Transportnetz“ bezeichnet. Das europäische Übertragungsnetz ist in Abb. 27.4 dargestellt. Da die Übertragungsverluste mit steigender Leiterspannung geringer werden, wird das Übertragungsnetz mit relativ hohen Leiter-Leiter-Spannungen von 220 und 380 kV betrieben. Für die Energieübertragung über große Distanzen bei hoher Spannung sind vor allem Freileitungen geeignet. Auch die Verlegung von Leitungen als Erdkabel ist immer wieder ein politisches Thema, jedoch sind diese aufgrund ihres hohen Blindleistungsbedarfs bei Drehstrom technisch im Wesentlichen nur als Gleichstromübertragung (HGÜ) geeignet.¹⁹ Alle europäischen Übertragungsnetzbetreiber sind Mitglieder des „European Network of Transmission System Operators for Electricity“ (ENTSO-E). Dessen Zuständigkeitsbereich besteht aus verschiedenen Verbundnetzen, wobei das kontinentaleuropäische, zu

¹⁴Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2021.

¹⁵Vgl. BMU 2019.

¹⁶Vgl. Bäumer et al. 2017.

¹⁷Vgl. FfE 2019.

¹⁸Vgl. EnergieAgentur.NRW 2015.

¹⁹Vgl. Schwab 2020.

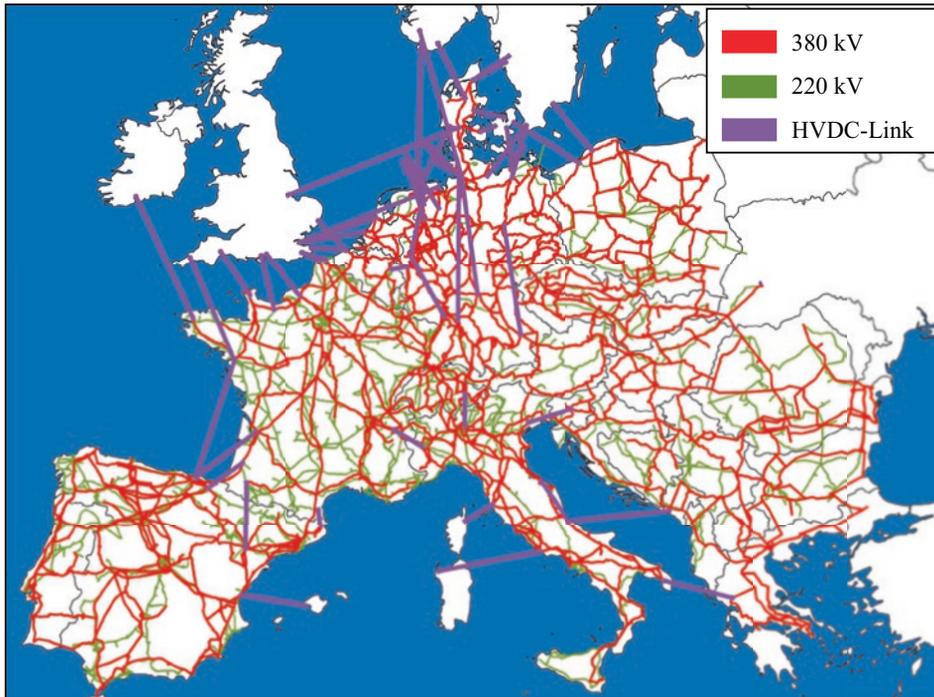


Abb. 27.4 Das europäische Übertragungsnetz. (Vgl. Hoersch et al. 2020)

dem auch Deutschland zählt, das größte darstellt. Die Übertragung elektrischer Energie ist zwischen allen Verbundnetzen der ENTSO-E möglich. Dies hat den Vorteil, dass die jeweiligen elektrischen Netze ausfallsicherer sind, da jederzeit elektrische Energie aus Nachbarregionen bezogen werden kann. Außerdem wird durch die europaweite Vernetzung ein freier Handel mit elektrischer Energie ermöglicht.²⁰ Das Übertragungsnetz weist – im Gegensatz zum Verteilungsnetz – einen hohen Vermaschungsgrad auf. Um eine hohe Versorgungssicherheit gewährleisten zu können, ist das Übertragungsnetz nach dem „(n-1)-Kriterium“ geplant worden. Dies bedeutet, dass durch den Ausfall einer Leitung oder eines Betriebsmittels in näherer Umgebung kein Versorgungsausfall auftreten darf.²¹ Im Übertragungsnetz werden vor allem Großkraftwerke oder Offshore-Windparks mit hoher Nennleistung angeschlossen.

²⁰Vgl. Schwab 2020.

²¹Vgl. Schwab 2020.

27.2.2 Verteilungsnetz

Das Verteilungsnetz wurde so konzipiert, dass die elektrische Energie von Großkraftwerken, die über das Übertragungsnetz zum jeweiligen Umspannwerk transportiert wurde, auf die verschiedenen privaten und industriellen Endkunden verteilt werden kann.²² Es gibt daher viele verschiedene Verteilungsnetzgebiete, die jeweils eine Region mit elektrischer Energie versorgen. Alleine in Deutschland gibt es 874 Verteilungsnetzbetreiber.²³ Jedes Verteilungsnetzgebiet kann in Hochspannung (110 kV), Mittelspannung (10 oder 20 kV) und Niederspannung (0,4 kV) unterteilt werden. Dabei sind vor allem im Mittel- und Niederspannungsnetz Leitungen als Erdkabel verlegt. Die deutschen Verteilungsnetze weisen mit rund zwei Millionen Kilometern Leitungslänge ein deutlich größeres Netz als das Übertragungsnetz mit nur etwa 37.000 km Länge auf.²⁴ Aus diesem Grund ist die Redundanz der Stromversorgung mit tiefer werdenden Spannungen aus wirtschaftlichen Gründen immer geringer, bis schließlich in der Niederspannungsebene auch das „(n-1)-Kriterium“ nicht mehr eingehalten wird. Allerdings sind bei einem Betriebsmittelausfall im Verteilungsnetz deutlich weniger Endverbraucher von einem Stromausfall betroffen als im Übertragungsnetz. Im Bereich der Mittelspannung werden Verteilnetze in einer geöffneten Ringstruktur betrieben; in der Niederspannung ist das Netz als Strahlennetz ausgeführt.²⁵ Der Grad der Vermaschung ist somit deutlich geringer als im Übertragungsnetz. Die Spannungsebene installierter Anlagen richtet sich vor allem nach deren Leistung. 96 % aller Onshore-Windenergieanlagen in Deutschland sind deshalb in der Mittel- und Niederspannung angeschlossen. Photovoltaikanlagen sind zu 54 % in der Niederspannung und zu 36 % in der Mittelspannung angeschlossen.²⁶

27.2.3 Zukünftige Herausforderungen

Die Struktur der elektrischen Netze in Deutschland inklusive der Erzeugungsanlagen und Verbraucher ist in Abb. 27.5 dargestellt.

In der Vergangenheit besaßen Netzplanung und -betrieb eine vergleichsweise geringe Komplexität. Um große Lastzentren – etwa Großstädte – mit elektrischer Energie zu versorgen, wurden große Kern- oder Kohlekraftwerke in relativer Nähe errichtet. Die Energie musste dadurch nur über vergleichsweise geringe Strecken transportiert werden. Außerdem ist die eingespeiste Leistung konventioneller Kraftwerke steuerbar und kann jederzeit – innerhalb der jeweiligen technischen Grenzen eines Kraftwerks – angepasst werden. Daraus ergeben sich unidirektionale Leistungsflüsse, die darüber hinaus gut prognostizier-

²² Vgl. Schwab 2020.

²³ Vgl. Bundesnetzagentur 2020.

²⁴ Vgl. Bundesnetzagentur 2020.

²⁵ Vgl. Schwab 2020.

²⁶ Vgl. Bundesnetzagentur 2020.

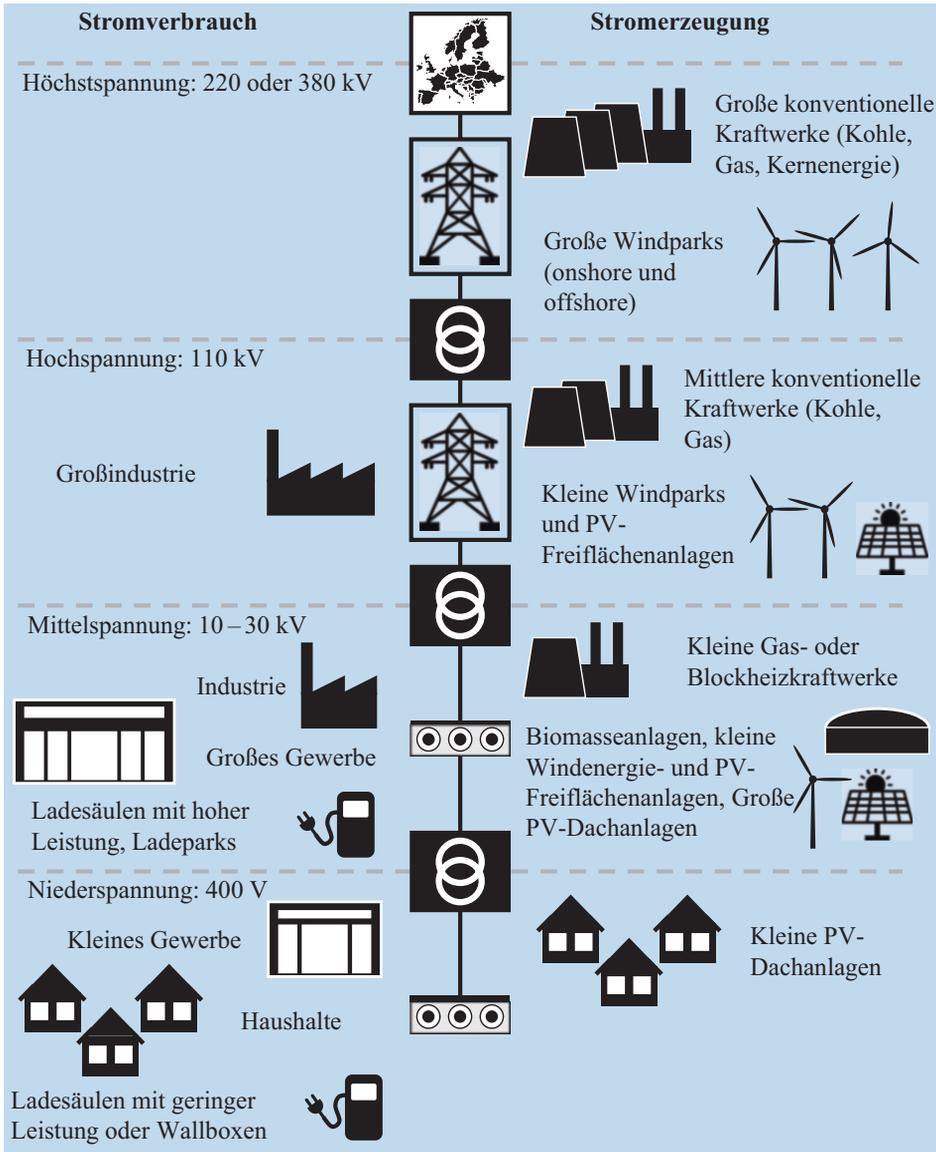


Abb. 27.5 Struktur des deutschen Stromnetzes inklusive Stromerzeugung und -verbrauch. (Eigene Darstellung des IAEW)

bar sind. Mit der großflächigen Integration von Wind- und Solarenergie ändert sich diese Situation jedoch grundlegend. Die Wahl des Standorts für eine Erzeugungsanlage ist deutlich eingeschränkter, so dass potenzielle Standorte von Windenergie- und Photovoltaikanlagen lastfern sein können. Ein Beispiel dafür ist das große Potenzial von Onshore- und Offshore-Windenergieanlagen im Norden Deutschlands, wobei die verbrauchte Energie in

den nördlichen Bundesländern relativ gering ist. Darüber hinaus sind die installierten Leistungen der Anlagen deutlich kleiner als die der konventionellen Kraftwerke, was zu einer Vielzahl kleinerer, dezentral ans Netz angeschlossener Anlagen führt. Ein Beispiel dafür sind Photovoltaik-Dachanlagen, die direkt ins Niederspannungsnetz einspeisen. Das führt zu bidirektionalen Leistungsflüssen im Netz, die außerdem volatil und aufgrund der Wetterabhängigkeit bei der Vorhersage mit größeren Unsicherheiten behaftet sind. Außerdem besteht die Gefahr von Dunkelflauten. In diesen Phasen ist das Wind- und Sonnendargebot sehr gering und somit die Versorgungssicherheit gefährdet. Mit einem Fortschreiten der Energiewende ist es somit immer wichtiger, dass Netzbetreiber die elektrische Flexibilität neuartiger Verbraucher nutzen können, um Überschüsse regenerativer Einspeisung zu nutzen und Dunkelflauten zu überbrücken. Obwohl eine aktive Netzbetriebsführung den Ausbaubedarf an vielen Stellen vermeiden oder verringern kann, ist ein Ausbau der Netze für die Energiewende unabdingbar. Um die Überschüsse aus Windenergie im Norden Deutschlands in den Süden zu transportieren, werden verschiedene Nord-Süd-Korridore in Deutschland gebaut. Dabei kommt die Hochspannungsgleichstromtechnologie zum Einsatz, die große Energiemengen verlustarm und mit der Möglichkeit zur Leistungsflusssteuerung über weite Distanzen transportieren kann.

27.3 Auswirkungen von Elektromobilität auf das Energiesystem

27.3.1 Netzanschlussmöglichkeiten

Ladeinfrastruktur wird hinsichtlich ihrer maximalen Leistung entweder im Niederspannungs- oder im Mittelspannungsnetz angeschlossen. Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen stellen neben der bestehenden Netznutzung eine weitere Belastung dar, die die Transformatoren und Leitungen zusätzlich erwärmt. Sobald die thermische Grenze eines Betriebsmittels überschritten wird, gilt es als überlastet. Da alle Leitungen einen ohmschen Widerstand besitzen, geht ein Stromfluss mit einem zusätzlichen Spannungsabfall über die Leitung einher. Dabei entscheidet die Flussrichtung des Stroms, ob sich die Spannung am Knotenpunkt im Netz erhöht oder verringert. Ein Ladevorgang sorgt zum Beispiel für eine geringere Spannung, eine einspeisende Photovoltaikanlage jedoch sorgt für einen Spannungsanstieg. Aufgrund relativ langer Zeitkonstanten müssen diese Grenzwerte nicht zu jeder Sekunde eingehalten werden. Die Europäische Norm EN 50160 definiert beispielsweise, dass 95 % der Zehn-Minuten-Mittelwerte in einer Woche nicht um mehr als 10 % von der Nennspannung abweichen dürfen.²⁷ Aufgrund der relativ großen Heterogenität der Verteilnetze untereinander ist die beste Anschlussart immer vom Einzelfall abhängig. Die gängigsten Vorgehensweisen sollen hier jedoch erläutert werden. Die Installation sämtlicher privater oder öffentlicher Ladeinfrastruktur muss, wie andere größere Stromverbraucher auch – etwa Wärmepumpen oder dezentrale Erzeuger wie PV-Anlagen –

²⁷ Vgl. DIN e.V. 2020.

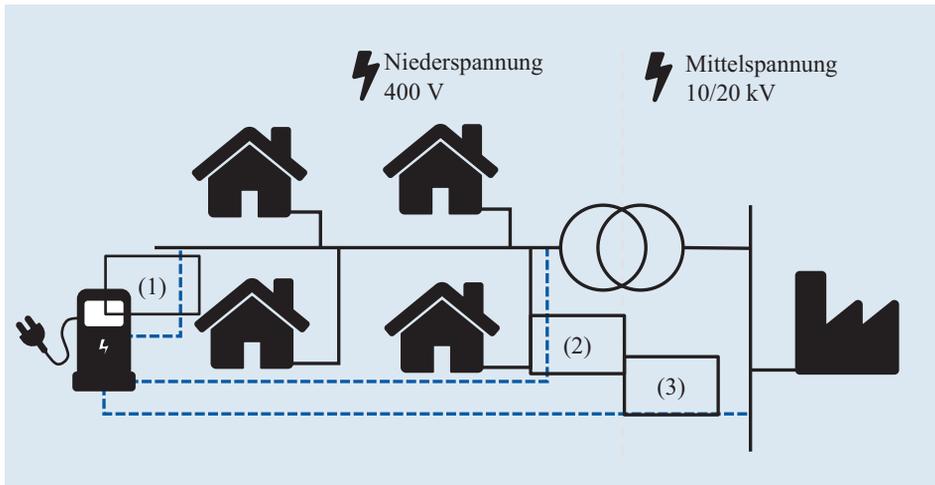


Abb. 27.6 Netzanschlussmöglichkeiten für Ladeinfrastruktur

beim jeweiligen Verteilungsnetzbetreiber angemeldet werden. Ab einer maximalen Leistung von 12 kVA oder mehr muss diese sogar vom Netzbetreiber genehmigt werden.²⁸ Er kann dann vorgeben, wie Ladeinfrastruktur ans Netz anzuschließen ist. In Abb. 27.6 sind die drei gängigsten Varianten dargestellt.

Die erste Möglichkeit (1) besteht im direkten Anschluss der Ladeinfrastruktur an den nächstgelegenen Strang des Niederspannungsnetzes. Dabei können auch bestehende Hausanschlüsse genutzt werden. Diese Vorgehensweise ist kostengünstig und mit wenig Aufwand verbunden, allerdings sind die maximal installierbaren Leistungen im Niederspannungsnetz begrenzt. Ladeleistungen bis etwa 11 kW stellen dabei normalerweise kein Problem dar, 22 kW hingegen können bereits problematisch sein und sind daher genehmigungspflichtig. Eine Alternative (2) dazu ist die Verlegung einer eigenen Leitung für die Ladeinfrastruktur hin zum speisenden Transformator. Dadurch kann der Einfluss des Ladestroms auf die Auslastung der Betriebsmittel des jeweiligen Niederspannungsstrangs verringert werden, und es lassen sich höhere Ladeleistungen installieren. Allerdings geht die Verlegung einer eigenen Leitung mit deutlich höheren Kosten einher. Die letzte (3) der in Abb. 27.6 dargestellten Optionen ist der Direktanschluss an die Mittelspannung. Dies ist vor allem beim Anschluss sehr hoher Ladeleistungen sinnvoll – beispielsweise eines sogenannten Lade-Hubs. Auch die relativ hohen Ladeleistungen an einer Autobahnraststätte lassen sich gut ins Mittelspannungsnetz integrieren. Dabei ist zu erwähnen, dass ein direkter Anschluss an das Mittelspannungsnetz mit anderen technischen Anforderungen einhergeht. Wallboxen, die üblicherweise in Privathaushalten installiert werden, sind deshalb nicht dafür geeignet. Je nach Lage kann die Entfernung zum nächsten Mittelspannungsknoten jedoch vergleichsweise hoch sein. Aufgrund üblicherweise niedriger Leistungen

²⁸Vgl. Niederspannungsanschlussverordnung 2020, § 19.

wird private Ladeinfrastruktur vor allem nach dem Prinzip der erstgenannten Möglichkeit angeschlossen. Öffentliche Ladeinfrastruktur, die normalerweise über höhere Leistungen verfügt, wird nach der abgebildeten Option (2) oder (3) angeschlossen.

27.3.2 Energiebedarf und Leistungsspitzen

In Abschn. 27.1 wurde bereits gezeigt, dass der zusätzliche elektrische Energiebedarf durch Elektrofahrzeuge bei zehn Millionen Fahrzeugen in Deutschland nur etwa 5 % des heutigen elektrischen Energiebedarfs bedeuten würde. Bei einer vollständigen Durchdringung elektrischer Fahrzeuge wären dies zirka 20 %, wobei unklar ist, ob und wann dieser Zustand jemals erreicht wird. Es stellt sich die Frage, inwiefern die benötigte Ladeleistung der Elektrofahrzeuge zu Engpässen im Netz führen kann. Die zusätzliche Energie kann vom Bestandsnetz zweifelsfrei übertragen werden. Es können jedoch Engpässe auftreten, wenn zahlreiche Ladevorgänge gleichzeitig vorgenommen werden. Bei der Bestimmung der maximal auftretenden Ladeleistung muss berücksichtigt werden, dass es unwahrscheinlich ist, dass alle Fahrzeuge gleichzeitig aufladen. Bei einer durchschnittlichen täglichen Wegstrecke von 36 km²⁹ sind für den Großteil aller elektrischen Fahrzeuge ein Ladevorgang oder zwei Vorgänge pro Woche ausreichend, um genügend elektrische Energie zu beziehen. Zur Quantifizierung des Phänomens der zur selben Zeit ladenden Fahrzeuge dient der Gleichzeitigkeitsfaktor. Er ist gegenüber der Prognose von Leistungszeitreihen ungenauer und stellt nur eine Worst-Case-Abschätzung dar, doch wird er heutzutage in Bereichen der Netzplanung angewendet – zum Beispiel für die Abschätzung von Haushaltslasten. Der Gleichzeitigkeitsfaktor g berechnet sich zu

$$g = \frac{P_{\max}}{\sum_i P_i} \quad (27.1)$$

mit der tatsächlichen Spitzenlast P_{\max} und den jeweiligen Spitzenlasten der Elektrofahrzeuge P_i und gibt somit die höchste zu erwartende relative Leistungsnachfrage an.³⁰ Dieser kann sowohl simulativ als auch über Messungen bestimmt werden. Da die Anzahl elektrischer Fahrzeuge bisher noch keinen signifikanten Wert erreicht hat, ist die Messung eines solchen Wertes nur schwierig möglich, wobei es bereits Pilotprojekte gibt, die diese Messungen mit einer geringen Zahl von Fahrzeugen vornehmen.³¹ Das Ergebnis einer simulativen Bestimmung des Gleichzeitigkeitsfaktors ist in Abb. 27.7 dargestellt.

In Abb. 27.7 wird dabei zwischen verschiedenen Ladeleistungen und Gruppen von Nutzenden differenziert. G1 bezeichnet Erwerbstätige, wohingegen G2 Nichterwerbstätige repräsentiert. Es existieren weitere Faktoren, die das Ergebnis einer solchen Simu-

²⁹Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2021.

³⁰Vgl. Kaufmann 1995.

³¹Vgl. Netze BW 2021.

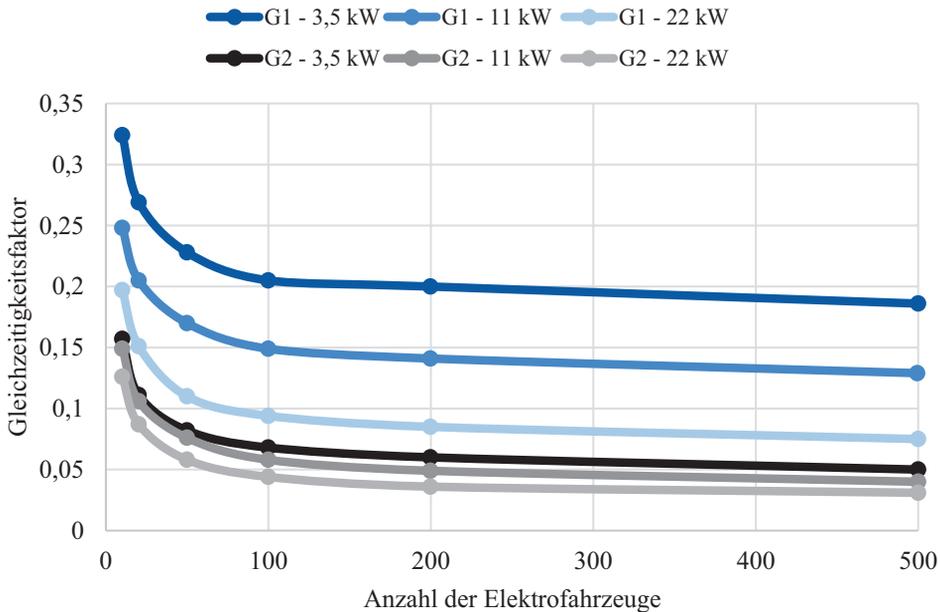


Abb. 27.7 Gleichzeitigkeitsfaktor aufladender Elektrofahrzeuge. (Vgl. Liu 2017)

lation beeinflussen können. Dies ist beispielsweise die Berücksichtigung anderer Orte – bei der Arbeit oder öffentlich –, an denen aufgeladen werden kann. Auch die Batteriegröße der betrachteten Fahrzeuge kann einen Einfluss haben. Der Verlauf des Gleichzeitigkeitsfaktors kann folgendermaßen interpretiert werden: Je geringer die Anzahl der Autos ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein relativ hoher Anteil dieser Fahrzeuge gleichzeitig auflädt – und je mehr Autos betrachtet werden, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Ladevorgänge auf verschiedene Zeitpunkte verteilen. Ab einer gewissen Fahrzeuganzahl wird dabei der minimale Gleichzeitigkeitsfaktor g_{∞} erreicht. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Gleichzeitigkeitsfaktor auch bei einer unendlich hohen Anzahl von Fahrzeugen nicht mehr unterschritten wird. Es fällt auf, dass der Gleichzeitigkeitsfaktor für höhere Ladeleistungen niedriger ist. Dies ist eine Folge daraus, dass die durchschnittliche Länge eines Ladevorgangs kürzer ist, wenn mit höherer Leistung geladen wird. Somit ist auch die Wahrscheinlichkeit einer Überlagerung von Ladevorgängen geringer. Eine geringere Gleichzeitigkeit bedeutet allerdings nicht, dass auch die maximale Ladeleistung geringer ist. Dies lässt sich an einem einfachen Rechenbeispiel verdeutlichen: Wenn 500 Elektrofahrzeuge der Nutzendengruppe 1 mit einer Ladeleistung P_{Auto} von 22 kW ausgestattet sind, lässt sich die maximale Leistung zu

$$P_{\text{max}} = n_{\text{Autos}} \cdot P_{\text{Auto}} \cdot g_{\infty, 22\text{kW}} = 500 \cdot 22\text{ kW} \cdot 0,04 = 440\text{ kW} \quad (27.2)$$

berechnen, wobei n_{Autos} die Anzahl der betrachteten Fahrzeuge darstellt. Für eine Ladeleistung P_{Auto} von 3,5 kW ergibt sich

$$P_{\max} = n_{\text{Autos}} \cdot P_{\text{Auto}} \cdot g_{\infty, 3,5\text{kW}} = 500 \cdot 3,5\text{kW} \cdot 0,18 = 315\text{kW}. \quad (27.3)$$

Trotz eines deutlich geringeren Gleichzeitigkeitsfaktors ist die maximale gesamte Ladeleistung beim 22 kW-Laden also höher. Eine weitere Erkenntnis aus dem Verlauf des Diagramms ist, dass relative Leistungserhöhungen vor allem dann zu erwarten sind, wenn nur wenige Fahrzeuge versorgt werden müssen. Dies ist vor allem im Niederspannungsnetz der Fall, da einzelne Stränge teilweise nur wenige Haushalte und Fahrzeuge versorgen und somit höhere Gleichzeitigkeitsfaktoren gelten. Dies bedeutet, dass vor allem dort die Gefahr lokaler Betriebsmittelüberlastungen existiert und in Zukunft Netzausbaubedarf entsteht oder eine aktive Netzbetriebsführung notwendig wird. Im Übertragungsnetz hingegen ist die Gefahr einer unzulässigen Leistungsspitze geringer.

Neben der Höhe der maximalen Ladeleistung selbst ist auch der Zeitpunkt dieser nachgefragten Leistung entscheidend. Wenn sich die maximale Ladeleistung mit der maximal nachgefragten Leistung von beispielsweise Privathaushalten überlagert, sind Netzengpässe möglich. In Vertgewall et al. (2021)³² wird gezeigt, wie ein aggregiertes Leistungsprofil mehrerer Fahrzeuge zusammengesetzt sein kann. In Abb. 27.8 wird dieses Profil mit den Standardlastprofilen des BDEW für Haushalte im Winter verglichen.³³ Der Leistungsbezug entspricht 5000 Elektrofahrzeugen und 10.000 Haushalten, was etwa einer 50-prozentigen Elektrofahrzeugdurchdringung entsprechen würde.

Es zeigt sich, dass Spitzenlasten unregelmäßiger Ladevorgänge ungefähr dann zu erwarten sind, wenn auch die Spitzenlasten der Haushalte auftreten, also in den frühen Abendstunden ab 19 Uhr. Diese Überlagerung des maximalen Leistungsbedarfs kann sowohl in der Energieversorgung als auch in der Energieübertragung zu Engpässen führen. Da auf

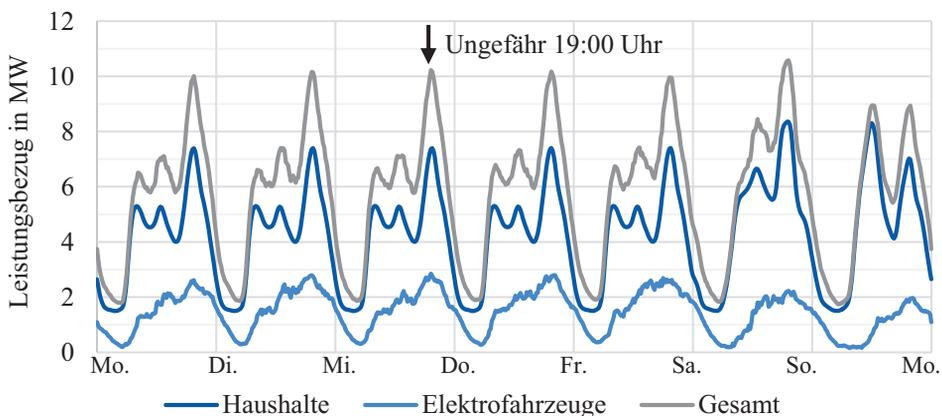


Abb. 27.8 Vergleich des elektrischen Leistungsbezugs von Haushalten und Elektrofahrzeugen

³²Vgl. Vertgewall et al. 2021.

³³Vgl. VDEW 1999.

die Lastspitzen jedoch meistens Zeitbereiche mit geringer Nachfrage folgen, würde eine verzögerte Aufladung der Fahrzeuge diese Zusatzbelastung erheblich verringern.

27.3.3 Netzausbaubedarf durch Elektromobilität

Um Netzüberlastungen durch Elektrofahrzeuge zu beheben, sind ein Ausbau der elektrischen Netze oder die Steuerung von Ladevorgängen geeignete Mittel. Dabei sind Netzbetreiber dazu verpflichtet, die jeweils wirtschaftlichste Kombination dieser Maßnahmen zu ergreifen. Die Studie „Verteilnetzausbau für die Energiewende“ prognostiziert daher die deutschlandweiten Netzausbaukosten im Verteilnetz in Abhängigkeit von unterschiedlichen Elektrofahrzeugdurchdringungen, Ladeleistungen und Lastmanagementstrategien. Dabei ist erkennbar, dass die entstehenden Kosten umso höher sind, je höher die durchschnittlich installierte Ladeleistung der Ladeinfrastruktur liegt.³⁴ Ein Grund dafür ist, dass die Ladevorgänge bei geringerer Leistung länger andauern und somit besser über den Tag verteilt sind. Des Weiteren kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass der Einsatz von intelligenter Ladeinfrastruktur für ein gesteuertes Laden die Netzausbaukosten – je nach Szenario – drastisch senken kann. Bis zum Jahr 2030 entstehen Ausbaubaukosten von 35 bis 72 Mrd. €, die durch Steuerung der Ladevorgänge um 40 bis 50 % gesenkt werden können. Bis zum Jahr 2050 ergibt sich ein Einsparpotenzial zwischen 26 und 33 % der sonst notwendigen Netzausbaukosten von 80 bis 108 Mrd. €.³⁵

27.4 Intelligente Netzintegration

Im vorherigen Abschnitt wurde ein Vergleich der Spitzenlasten von Haushalten mit denjenigen von Elektrofahrzeugen aufgestellt. Ungeregelte Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen können die ohnehin schon bei Haushalten auftretenden Lastspitzen unter Umständen deutlich erhöhen und auf diese Weise einen kostenintensiven Netzausbau verursachen. Im folgenden Abschnitt werden daher Möglichkeiten aufgezeigt, wie Elektromobilität sich durch den Einsatz von Lastmanagement intelligent in die bestehenden Netze integrieren lässt.

27.4.1 Spitzenglättung

Auf die normalerweise am frühen Abend auftretenden Leistungsspitzen der Privathaushalte folgt häufig ein Zeitbereich geringer Leistung. Da die meisten Fahrzeuge nachts zu Hause stehen, kann ein koordiniertes Verschieben der Ladevorgänge in die Nacht zu einer

³⁴Vgl. [Agora Verkehrswende et al. 2019](#).

³⁵Vgl. [Agora Verkehrswende et al. 2019](#).

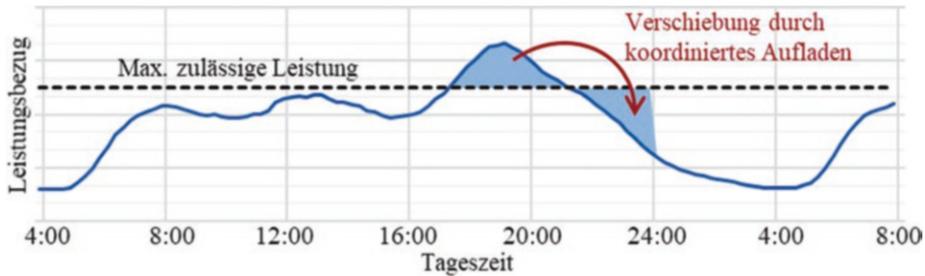


Abb. 27.9 Das Prinzip der Spitzenglättung

Verringerung der elektrischen Spitzenlast führen. Darüber hinaus ergibt sich das Potenzial, Überschüsse aus regenerativer Energie – beispielsweise Windenergie – zur Ladung zu nutzen. In Abb. 27.9 ist das Prinzip der sogenannten Spitzenglättung dargestellt. Sobald die maximal zulässige Leistung in einem Betriebsmittel erreicht wird, müssen Ladevorgänge verzögert werden, so dass ein Teil der Ladeleistung erst zeitversetzt nachgefragt wird.

Wenn es vollständig und dauerhaft gelingt, die maximal zulässige Leistung der Betriebsmittel nicht zu überschreiten, kann ein Austausch und die damit einhergehende Verstärkung der jeweiligen Betriebsmittel verhindert werden. Da auch die Vermeidung eines Netzausbaus oder einer Netzverstärkung mit finanziellen Kosten behaftet ist, kann die Spitzenglättung ein für Netzbetreiber attraktives Mittel zur Behebung von Engpässen sein. Jedoch ist die Verwendung eines Systems zur Verschiebung von Lasten aufgrund zusätzlicher Hardware- und/oder Software-Anforderungen ebenfalls mit Kosten verbunden. Ein Netzbetreiber muss daher im Einzelfall entscheiden, welche Umsetzung wirtschaftlich am sinnvollsten ist. Unterschiedliche Möglichkeiten der technischen Umsetzung werden im Folgenden vorgestellt.

27.4.2 Ausgestaltungsmöglichkeiten

Auch auf politischer Ebene ist die Steuerung von Ladevorgängen mittlerweile ein Thema. Deshalb hat die deutsche Bundesregierung in § 14a des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) die netzdienliche Steuerung von Verbrauchseinheiten im Niederspannungsnetz geregelt, um die freiwillige Teilnahme auch finanziell anzureizen. Demnach müssen Endverbraucher, die ihre Wärmepumpen oder Elektrofahrzeuge vom Netzbetreiber netzdienlich steuern lassen, geringere Netzentgelte zahlen. Netzentgelte sind Gebühren, die jeder private oder gewerbliche Netzkunde jährlich für die Netznutzung zahlen muss. Die Art der Steuerung oder die Höhe der verringerten Netzentgelte werden jedoch nicht spezifiziert und sind dem jeweiligen Verteilnetzbetreiber überlassen. Deshalb werden in diesem Abschnitt unterschiedliche Möglichkeiten der technischen Umsetzung vorgestellt. Ein Vorteil ist, dass die bereits in den Fahrzeugen oder Ladesäulen verbauten Gleichrichter ihren

Leistungsbedarf – innerhalb ihrer jeweiligen technischen Grenzen – beliebig steuern können. Es bedarf also lediglich eines Lastmanagements, das die Ladeleistung vorgibt. Dazu muss vorab zusätzliche Messtechnik installiert werden, um den Zustand der jeweiligen Betriebsmittel auslesen zu können. Aktuell ist solch eine Messtechnik im Niederspannungsnetz normalerweise nicht vorhanden. Zusätzlich kann danach unterschieden werden, ob die Systeme miteinander kommunizieren oder nicht. Je nachdem entsteht also ein Bedarf einer kommunikationstechnischen Anbindung. Dies kann beispielsweise über Mobilfunk, Internet oder auch „Powerline Communication“ realisiert werden. Bei der Powerline-Lösung erfolgt die Datenübertragung direkt über die Stromleitungen. Verschiedene Möglichkeiten der Lastverschiebung sind in Tab. 27.1 zusammengefasst.

Feste Sperrzeiten bedeuten, dass ein Netzbetreiber bestimmte, zum Beispiel in den Abendstunden liegende Zeiträume definiert, in denen das Aufladen von Elektrofahrzeugen nicht möglich ist. Das lässt sich mittels einer simplen Zeitschaltung erreichen und ist mit wenig Aufwand und geringen Kosten verbunden. Nachteilig ist, dass Ladevorgänge vollkommen unabhängig von der Netzsituation geregelt werden. Es ist also wahrscheinlich, dass das Lastverschiebungspotenzial der Fahrzeuge nur in einem geringen Maße ausgenutzt wird. Darüber hinaus ist es gut möglich, dass zum Ende der Sperrzeit sehr viele Fahrzeuge aufladen und somit wiederum eine hohe Lastspitze erzeugen.

Tab. 27.1 Vorzüge und Nachteile verschiedener Lastmanagements

Lastmanagement	Vorteile	Nachteile
Feste Sperrzeiten	Geringe Kosten	Keine Messung der Netzurückwirkung, keine Berücksichtigung von Mobilitätsbeschränkungen, Lastspitzen zum Ende der Sperrzeiten möglich
	Einfache Implementierung	
Spannungsregelung	Berücksichtigung der Netzurückwirkung	Keine Berücksichtigung von Mobilitätsbeschränkungen, Kosten durch zusätzliche Messtechnik
	Einfache Implementierung	
Zentrale Regelung durch einen Aggregator	Berücksichtigung der Netzurückwirkungen und Mobilitätsbeschränkungen	Hohe Kosten durch hohen Bedarf an Mess- und Kommunikationstechnik
	Ganzheitliche Optimierung möglich	Aufwendige Implementierung
Eigenbedarfsoptimierung	Erhöht Autarkiegrad von Haushalten → Kann Stromnetze entlasten	Keine Berücksichtigung der Stromnetze
		Benötigt privates Energiemanagementsystem

Bei der Spannungsregelung regelt die Ladeinfrastruktur ihren Wirk- und Blindleistungsbezug in Abhängigkeit von der Spannung, die netzseitig an der Ladeinfrastruktur gemessen wird. Ab Erreichung eines kritischen Spannungswertes im Netz wird dabei die Ladeleistung stückweise reduziert. Vorteile dieser Vorgehensweise sind zum einen die einfache Umsetzbarkeit bei moderaten Kosten und zum anderen die Tatsache, dass Ladevorgänge nur dann abgeregelt werden, wenn eine starke Belastung im jeweiligen Strang des Netzes vorliegt.

Die zentrale Regelung aller Ladevorgänge durch einen Aggregator stellt die kommunikationsintensivste und damit auch kostenaufwendigste Option dar. Ein Aggregator ist dabei eine zentrale Einheit, die Informationen über alle zu steuernden Ladevorgänge sammelt und entscheidet, welche Ladevorgänge angepasst werden müssen. Es werden zu jedem Zeitpunkt Informationen über alle dem Aggregator bekannten Ladevorgänge erhoben und bei Engpässen im Stromnetz Ladevorgänge je nach Engpasssensitivität und Priorisierung abgeregelt. Ein Vorteil ist neben der Erfassung von Rückwirkungen auf Netzgrößen, dass bei der Priorisierung von Ladevorgängen auch die Mobilitätsbeschränkungen der Fahrer berücksichtigt werden können. Das bedeutet, dass Ladevorgänge von Autos, die zeitnah losfahren sollen, höher priorisiert sein könnten als diejenigen, die noch über eine lange Standzeit verfügen. Eine höhere Priorisierung führt in diesem Fall dazu, dass eine Abregelung der Ladeleistung weniger wahrscheinlich ist. Zur Nutzung dieser Funktion muss dem Aggregator folglich die vorgesehene Abfahrtszeit übermittelt beziehungsweise prognostiziert werden. Eine Priorisierung kann auch anhand anderer Kriterien bestimmt werden – etwa mit Blick auf den aktuellen Strompreis an der Strombörse. Vorteil dabei ist, dass sich das Verschiebepotenzial der Ladeleistung vollständig ausnutzen lässt.

Zuletzt kann ein Fahrzeug in Verbindung mit einer privaten Photovoltaikanlage von Haushalten dazu genutzt werden, den elektrischen Eigenbedarf auf die regenerative Einspeisung anzupassen und damit zu optimieren. Die Fahrzeugbatterie übernimmt dabei zusätzlich die Aufgabe eines Heimspeichers. Der Haushalt ist dann zu einem gewissen Teil autark versorgt, was positive Effekte auf die Netzauslastung haben kann. Außerdem sind die Strombezugskosten des eigenproduzierten Stroms deutlich geringer. Die Netzauslastung selbst wird bei dieser Methode jedoch nicht berücksichtigt. Aufgrund der einfachen Umsetzbarkeit wurden in Deutschland im Jahr 2021 vor allem Sperrzeiten für Teilnehmer der Verbrauchseinheitensteuerung angeboten. Ein deutscher Haushalt hat im Jahr 2020 für Netzentgelte durchschnittlich 7,75 Cent pro Kilowattstunde gezahlt.³⁶ Die reduzierten Netzentgelte für steuerbare Verbrauchseinrichtungen sind – wie die Netzentgelte selbst – regional stark unterschiedlich und schwanken zwischen zwei und fünf Cent pro Kilowattstunde.

³⁶Vgl. BDEW 2021.

27.4.3 „Vehicle-to-X“ und Pooling

Die vorgestellten Möglichkeiten zur intelligenten Netzintegration behandeln nur die Verzögerung oder Abregelung von Ladevorgängen. Prinzipiell ist Ladeinfrastruktur jedoch auch in der Lage, Energie aus der Fahrzeugbatterie zurück ins Netz zu speisen („Vehicle-to-Grid“). Diese Funktionalität erweitert die Möglichkeiten einer Bereitstellung von Systemdienstleistungen für die Netzstabilität – beispielsweise von Primärregelreserve – bei kurzfristigem Ausfall von Erzeugungsanlagen. Auch für eine Eigenverbrauchs-optimierung ist die Rückspeisung aus dem Fahrzeug („Vehicle-to-Home“) gut geeignet, da vor allem die Energie der sonnenreichen Stunden der Mittagszeit gespeichert und im Verlauf des restlichen Tags, vor allem nachts, genutzt werden kann.

Der Einsatz von „Vehicle-to-Grid“ zum Anbieten von Systemdienstleistungen erfordert eine Einbindung in den Stromhandel und ist somit aufwendiger in der Umsetzung. Um Regelleistung an den jeweiligen Strommärkten anbieten zu können, muss eine vorgeschriebene installierte Mindestleistung von 1 MW (für Primärreserve) oder 5 MW (für Minuten- und Sekundärreserve) sowie ihre jeweilige Verfügbarkeit gewährleistet werden. Deshalb müssen Aggregatoren Verbünde zahlreicher Fahrzeuge bilden, um die Teilnahme-kriterien zu erreichen und die Dienstleistungen anzubieten. In Bezug auf die Verfügbarkeit gibt es je nach Fahrzeugnutzung deutliche Unterschiede. Die meisten der in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge werden privat genutzt. Sie stehen häufig für eine Sekundärnutzung zur Verfügung, da die Standzeit privater Fahrzeuge im Durchschnitt mehr als 95 % der Gesamtzeit beträgt.³⁷

Bei „Vehicle-to-Home“ wird die rückgespeiste Leistung des Fahrzeugs lediglich zur Deckung der Haushaltslast eingesetzt, und es findet keine Rückspeisung ins Stromnetz statt. Das Fahrzeug agiert somit ähnlich wie ein PV-Heimspeicher: Es lädt tagsüber bei überschüssiger Photovoltaik-Erzeugung und entlädt im Laufe der Abend- und Nachtstunden. Da die Einspeisevergütung deutlich unter dem Haushaltsstrompreis liegt, kann die Zwischenspeicherung die Differenz der beiden Beträge erwirtschaften. Bei „Vehicle-to-Grid“ hingegen interagiert das Fahrzeug mit dem Stromnetz. Diese Interaktion kann sowohl den Netzbezug als auch die Rückspeisung ins Netz beinhalten. Hier können entweder Arbitrage-Geschäfte am Spotmarkt getätigt oder die Regelleistung erbracht werden. Mit Stand von 2021 sind die kommerziellen Aktivitäten in diesen Bereichen noch gering, jedoch wird für die nahe Zukunft von einem deutlichen Wachstum ausgegangen.

„Vehicle-to-Home“ und „Vehicle-to-Grid“ sind auf Hardware-Ebene sehr ähnlich. In beiden Fällen wird ein Wechselrichter benötigt, der den Gleichstromausgang der Batterie in Wechselstrom wandelt. Die meisten Konzepte setzen dabei auf eine bidirektionale Ladestation, die über eine DC-Kopplung wie CCS oder CHAdeMO direkt an die Pole der Batterie angeschlossen wird. Der Wechselrichter ist in der Ladestation verbaut. Die Kommunikation zwischen den Geräten erfolgt über ISO 15118-20 bei CCS oder über CHAde-

³⁷Vgl. Nobis und Kuhnimhof 2018.

MO.³⁸ Dabei teilt das Fahrzeug der Ladesäule mit, welche Leistungen möglich sind und wie viel Energie noch in der Fahrzeugbatterie verbleibt.

Eine Ausnahme zu den oben vorgestellten Konzepten bilden Fahrzeuge mit „Vehicle-to-Load“-Fähigkeit, wie zum Beispiel der EV6 von Kia. Dabei verfügt das Fahrzeug über eine 230-Volt-Schuko-Steckdose mit meist 16 A Sicherung. Diese Steckdose darf nicht mit dem Stromnetz in Kontakt gebracht werden, eignet sich aber beispielsweise für die Notstromversorgung oder die Stromversorgung abseits des elektrischen Netzes.

Werden Elektrofahrzeuge großflächig netzdienlich genutzt, hat das voraussichtlich Auswirkungen auf die aktuelle Netzbetriebsführung. In Deutschland wiesen alleine die Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 mit etwa 9 GWh ein Vielfaches der Speicherkapazität der stationären Batteriespeicher für die Primärregelleistung und etwa ein Fünftel der Kapazität der nationalen Pumpspeicherkraftwerke auf.³⁹ Übertragungsnetzbetreibende, Automobilproduzenten, Ladesäulenhersteller und Backend-Betreibende arbeiten aktuell daran, dass die aufgezeigten Konzepte zeitnah realisiert werden können.⁴⁰ Die Batterielebensdauer wird durch den ergänzenden Batterieeinsatz kaum verkürzt, da die zusätzlichen Zyklen in den dort betrachteten Fällen überwiegend eine geringe Zyklen-tiefe aufweisen.⁴¹ „Vehicle-to-Home“ erscheint dabei ab 2022 realistisch, und auch „Vehicle-to-Grid“ dürfte zeitnah folgen.⁴²

Literatur

Teil V: Infrastruktur für die Elektromobilität

50 Hertz Transmission GmbH; Amprion GmbH; TenneT TSO GmbH; TransnetBW GmbH: *Netzentwicklungsplan Strom 2035, Version 2021*

Agora Verkehrswende; Agora Energiewende; Regulatory Assistance Project (RAP): *Verteilnetzausbau für die Energiewende – Elektromobilität im Fokus*

Ammon, M; Bruns, T; Semerow, N.: *Energiewende im Kontext von Atom- und Kohleausstieg. Perspektiven im Strommarkt bis 2040*

Bäumer, M; Hautzinger, H; Pfeiffer, M; Stock, W; Lenz, B; Kuhnimhof, T. G; Köhler, K.: *Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung* (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen V, Verkehrstechnik, Heft 290). Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH, August 2017

BDEW: *Stromverbrauch in Deutschland nach Verbrauchergruppen 2020*. <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/stromverbrauch-deutschland-verbrauchergruppen/>. Abruf 26.06.2021

BDEW: *Installierte Leistung und Erzeugung 2020*. <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/installierte-leistung-und-erzeugung/>. Abruf 16.06.2021

³⁸ Vgl. International Organisation for Standardization (IOS) 2022.

³⁹ Vgl. Hecht et al. 2021.

⁴⁰ Vgl. Hecht et al. 2021.

⁴¹ Vgl. Schmalstieg et al. 2014.

⁴² Vgl. Hecht et al. 2021.

- BDEW:** *Jahresvolllaststunden*. <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/jahresvolllaststunden/>. Abruf 16.06.2021
- BDEW:** *Strompreisanalyse Juni 2021. Haushalte und Industrie*. https://www.bdew.de/media/documents/BDEW-Strompreisanalyse_no_halfjaehrlich_Ba_online_10062021.pdf. Abruf 16.06.2021
- BMU:** *Klimaschutzprogramm 2030*
- BMWi:** *Energieeffizienzstrategie 2050*
- BMWi:** *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland*. <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2020.pdf>. Abruf 16.06.2021
- Bundesnetzagentur:** *EEG in Zahlen 2019*
- Bundesnetzagentur:** *Monitoringbericht 2020*
- DIN e.V.:** DIN EN 50160:2020-11 Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen; Deutsche Fassung EN 50160:2010 + Cor.:2010 + A1:2015 + A2:2019 + A3:2019. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2020-11
- EnergieAgentur.NRW:** *Erhebung „Wo im Haushalt bleibt der Strom?“*. https://energiertools.ea-nrw.de/_database/_data/datainfopool/erhebung_wo_bleibt_der_strom.pdf
- Erneuerbare-Energien-Gesetz:** *Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 21. Dezember 2020 (BGBl. I S. 3138) geändert worden ist*, 2020
- FfE:** *Kurzstudie Power-to-X. Ermittlung des Potenzials von PtX-Anwendungen für die Netzplanung der deutschen ÜNB*
- FfE:** *Kurzstudie Elektromobilität – Modellierung für die Szenarienentwicklung des Netzentwicklungsplans*, 2019
- Fraunhofer ISE:** *Stromerzeugung in Deutschland im ersten Halbjahr 2019*. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/daten-zu-erneuerbaren-energien/ISE_Stromerzeugung_2019_Halbjahr.pdf. Abruf 26.06.2021
- Fraunhofer IWES/IBP:** *Wärmewende 2030. Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor*
- Hecht, C; Figgner, J.:** *Elektroauto-Boom 2020: Neuzulassungen mit 9 Gigawattstunden Batteriekapazität*. <https://www.pv-magazine.de/2021/03/12/elektroauto-boom-2020-neuzulassungen-mit-9-gigawattstunden-batteriekapazitaet/>. Abruf 05.07.2021
- Hecht, C; Figgner, J.:** *Wann und wie nutzen wir die Gigawattstunden in Elektroautobatterien?* <https://www.pv-magazine.de/2021/05/07/wann-und-wie-nutzen-wir-die-gigawattstunden-in-elektroautobatterien/>. Abruf 05.07.2021
- Hoersch, J; Hofmann, F; Schlachtberger, D; Brown, T; Neumann, F.:** *PyPSA-Eur: An Open Optimisation Model of the European Transmission System*. <https://pypsa-eur.readthedocs.io/en/latest/>
- International Organisation for Standardisation (IOS):** DIN EN ISO 15118-20:2022-03 Straßenfahrzeuge Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation – Teil 20: 2. Generation Anforderungen an das Netzwerk- und Anwendungsprotokoll (ISO/FDIS 15118-20:2022). Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2022-03
- Kaufmann, W.:** *Planung öffentlicher Elektrizitätsverteilungs-Systeme*. Frankfurt am Main: VWEV-Verlag, 1995
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA):** *Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen I. Januar 2021*. Flensburg, 2021
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA):** *Verkehr in Kilometern (VK), Zeitreihe 2014–2021*. Flensburg, 10.09.2021

- Liu, L.:** *Einfluss der privaten Elektrofahrzeuge auf Mittel- und Niederspannungsnetze*. Darmstadt, 2017
- Netze BW:** *E-Mobility-Carré. Ladeinfrastruktur in Mehrfamilienhäusern*. https://enbw-eg.de/wp-content/uploads/2021/05/3-NetzeBW_E-Mobility-Carre.pdf
- Niederspannungsanschlussverordnung:** *Niederspannungsanschlussverordnung vom 1. November 2006 (BGBl. I S. 2477), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 30. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2269) geändert worden ist*, 2020
- Nobis, C; Kuhnimhof, T.:** *Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur*. Bonn, Berlin, 2018
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut:** *Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann*
- Schmalstieg, J; Käbitz, S; Ecker, M; Sauer, D. U.:** *A holistic aging model for Li(NiMnCo)O₂ based 18650 lithium-ion batteries*. In: *Journal of Power Sources*, Jg. 257, 2014, Nr. 1, S. 325–334
- Schwab, A.:** *Elektroenergiesysteme. Smarte Stromversorgung im Zeitalter der Energiewende*. 6 Aufl.: Springer Vieweg, 2020
- VDEW:** *Repräsentative VDEW-Lastprofile*
- Vertgehall, C; Trageser, M; Kurth, M.:** *Modelling of location and time dependent charging profiles of electric vehicles based on historical user behaviour*

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Rechtliche Grundlagen zum Aufbau von Ladeinfrastruktur

28

Marcel Porschen, Tobias Kuhnimhof, Chris Martin Vertgewall,
Niklas Wehbring und Andreas Ulbig

Dieses Kapitel erläutert bedeutsame rechtliche Grundlagen in Bezug auf den Aufbau von Ladeinfrastruktur im öffentlichen und privaten Bereich. Aufbau und Betrieb von Ladeinfrastruktur werden regulatorisch durch zahlreiche Gesetze, Verordnungen und Satzungen bestimmt.

In diese rechtlichen Grundlagen fließen vielfältige Strategien und Leitlinien ein, vor allem in Bezug auf Klima- und Immissionsschutz. Neue Anforderungen, die Weiterentwicklung und der Hochlauf der Elektromobilität erfordern eine stete Anpassung und

M. Porschen

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Lehrstuhl und Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr (ISB), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: porschen@isb.rwth-aachen.de

T. Kuhnimhof (✉)

Universitätsprofessor, Lehrstuhl und Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr (ISB), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: kuhnimhof@isb.rwth-aachen.de

C. M. Vertgewall

Gruppenleiter, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft (IAEW), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: c.vertgewall@iaew.rwth-aachen.de

N. Wehbring

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft (IAEW), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: n.wehbring@iaew.rwth-aachen.de

A. Ulbig

Universitätsprofessor, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft (IAEW), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: a.ulbig@iaew.rwth-aachen.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Kampker, H. H. Heimes (Hrsg.), *Elektromobilität*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-65812-3_28

521

Tab. 28.1 Überblick zu rechtlichen Grundlagen und Steuerungsinstrumenten des Ladeinfrastrukturaufbaus auf verschiedenen Ebenen

EU-Ebene	Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (2014/94/EU), geändert durch delegierte Verordnung (EU) 2018/674 als zentrale EU-Vorgabe für den Ladeinfrastrukturaufbau.
	Im Juli 2021 hat die EU-Kommission, als Bestandteil von „Fit for 55“, die Umwandlung der Richtlinie in eine EU-Verordnung vorgeschlagen.
Bundesebene	Umsetzung der EU-Richtlinien in nationales Recht, Bauplanungsrecht, Eigentums- und Mietrecht, Netzanschluss, Eichrecht, Elektromobilitätsgesetz und weitere
Landesebene	Landesbauordnungen, Sonderbauverordnungen, Garagenverordnungen, Straßen- und Wegerecht
Kommunale Ebene	Stellplatzsatzungen, Sondernutzungssatzungen, Bebauungspläne

Überarbeitung dieser Grundlagen. Daher bietet dieses Kapitel einen Überblick zum Status quo vom Juli 2021. Änderungen und Aktualisierungen der rechtlichen Grundlagen sind innerhalb relativ kurzer Zeit sehr wahrscheinlich.

Tab. 28.1 verschafft einen Überblick zu den verschiedenen Ebenen der rechtlichen Grundlagen. Auf EU-Ebene geben diverse Richtlinien den Rahmen der Elektromobilität vor. Damit die Richtlinien ihre Wirkung entfalten können, ist eine Umsetzung in nationales Recht notwendig. So wurde etwa die Richtlinie 2014/94/EU als Ladesäulenverordnung in deutsches Bundesrecht übertragen. Weitere Rechtsmaterien auf Bundesebene, die Inhalte mit Bezug auf den Aufbau von Ladeinfrastruktur umfassen, sind etwa Eigentums- und Mietrecht, Netzanschluss, Eichrecht und das Elektromobilitätsgesetz. In Deutschland gelten darüber hinaus gemäß dem föderalistischen System in den einzelnen Bundesländern verschiedene Landesgesetze mit Bezug zur Ladeinfrastruktur. Zu nennen sind etwa die Landesbau- sowie Sonderbauverordnungen, der Denkmalschutz sowie das Straßen- und Wegerecht. Kommunen wird, ausgehend von Bundes- oder Landesrecht, etwa über Bebauungspläne, Stellplatz- oder Sondernutzungssatzungen eine gewisse Steuerung des Aufbaus von Ladeinfrastruktur ermöglicht.

Vielfach betreffen Regelungen, die beim Aufbau der Ladeinfrastruktur betrachtet werden müssen, nicht nur die Möglichkeiten des Aufbaus selbst und die diesbezüglichen Genehmigungen, sondern stellen auch Anforderungen in Bezug auf die Nutzung. Insbesondere die Art der Nutzung und der Nutzenden selbst spielen dabei eine Rolle. Als gesetzliche Regelungen sind beispielsweise zu betrachten:

- Einkommensteuergesetz (EStG)
- Energiewirtschaftsgesetz (EnWG)
- Messstellenbetriebsgesetz (MsbG)
- Mess- und Eichgesetz (MessEG)
- Ladesäulenverordnung (LSV)
- Stromsteuergesetz (StromStG)
- Preisangabenverordnung (PAngV)

Der Aufbau von Ladeinfrastruktur muss den Netzbetreibern sowie in bestimmten Fällen der Regulierungsbehörde angezeigt werden. Rechtliche Grundlagen sind dabei die Verordnung über Allgemeine Bedingungen für den Netzanschluss und dessen Nutzung für die Elektrizitätsversorgung in Niederspannung (Niederspannungsanschlussverordnung – NAV) sowie die Ladesäulenverordnung (LSV). Gemäß § 19 NAV sind Ladeeinrichtungen für Elektrofahrzeuge vor deren Inbetriebnahme dem Netzbetreiber mitzuteilen. Ab einer Summen-Bemessungsleistung von 12 kVA je elektrische Anlage ist die Zustimmung des Netzbetreibenden erforderlich. Versagt der Netzbetreiber die Zustimmung, so ist er dazu verpflichtet, neben einer Begründung mögliche Abhilfemaßnahmen auf Seiten des Netzbetreibenden sowie auf Seiten des Anschlussnutzenden zu nennen und einen Zeitbedarf für den beim Netzbetreiber anfallenden Aufwand darzulegen.¹ Die Netzanschlusspflicht des Netzbetreibenden gemäß § 17 EnWG wird von den Regelungen der NAV nicht beeinträchtigt. Als Resultat nicht hinreichender Netzkapazitäten sind Netzbetreiber zu einem entsprechenden Netzausbau verpflichtet. Betreiber öffentlich zugänglicher Ladepunkte sind gemäß § 5 LSV dazu verpflichtet, der Bundesnetzagentur den Aufbau und die Außerbetriebnahme solcher Ladepunkte anzuzeigen.²

28.1 Aufbau privater Ladeinfrastruktur

Private Ladeinfrastruktur bildet eine zentrale Säule zur Deckung des aktuellen und zukünftigen Ladebedarfs von Elektrofahrzeugen. Standorte und Ausgestaltung sind unterschiedlich und reichen von Haushaltssteckdosen (in Ausnahmefällen) und Wallboxen für einzelne Fahrzeuge bis hin zu privaten Lade-Hubs für Fahrzeugflotten.

Tab. 28.2 führt die zentralen Elemente einzelner rechtlicher Grundlagen in Bezug auf private Ladeinfrastruktur auf. Die in der Kurzfassung dargestellten Wirkungen auf den Aufbau der Ladeinfrastruktur werden anschließend erläutert.

28.1.1 Bauordnungs- und Bauplanungsrecht

Lademöglichkeiten für Elektrofahrzeuge sind grundlegend als bauliche Anlagen zu bewerten. Sie fallen jedoch nicht unter Tankanlagen, sondern sind eher als Nebenanlagen eingeordnet. In elf von 16 Landesbauordnungen (LBO) sind Lademöglichkeiten für Elektrofahrzeuge derzeit explizit unter den verfahrensfreien Bauvorhaben aufgeführt. Die Einteilung der Ladeinfrastruktur in die verschiedenen verfahrensfreien Anlagen ist in diversen LBO nicht einheitlich geregelt. Es lassen sich in den elf Landesbauordnungen vier

¹Niederspannungsanschlussverordnung vom 1. November 2006 (BGBl. I S. 2477), die zuletzt durch Artikel 35 des Gesetzes vom 23. Juni 2021 (BGBl. I S. 1858) geändert worden ist.

²Ladesäulenverordnung vom 9. März 2016 (BGBl. I S. 457), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 1. Juni 2017 (BGBl. I S. 1520) geändert worden ist.

Tab. 28.2 Relevante rechtliche Grundlagen für den Aufbau von Ladeinfrastruktur auf privaten Flächen

Grundlage	Kurzfassung
Bürgerliches Gesetzbuch (BGB)	Mit § 554 BGB können Mieter:innen verlangen, Veränderungen an der Mietsache vorzunehmen, um unter anderem das Laden elektrisch betriebener Fahrzeuge zu ermöglichen.
Wohnungseigentümergebiet (WEG)	Gemäß § 20 WEG können Wohnungseigentümer:innen eine angemessene bauliche Veränderung verlangen, die dem Laden elektrisch betriebener Fahrzeuge dient.
Gebäude-Elektromobilitätsinfrastruktur-Gesetz (GEIG)	Für den Neubau oder eine größere Renovierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden werden Vorgaben für zu schaffende Lade- und Leitungsinfrastruktur gemacht.
BauGB (Bauplanungsrecht)	Gemäß § 9 (11) BauGB können Flächen für Ladeinfrastruktur in Bebauungsplänen festgesetzt werden.
Landesbauordnungen (LBO)	Ladestationen sind bauordnungsrechtlich als bauliche Anlagen zu betrachten. In den meisten Landesbauordnungen sind sie unter den genehmigungsfreien Vorhaben zu finden.
Stellplatzsatzungen	Mit Hilfe der Stellplatzsatzungen können Kommunen den Aufbau von Ladeinfrastruktur vorantreiben und Anforderungen an die Ausstattung von Stellplätzen richten.

verschiedene bauliche Anlagenarten finden, denen die Lademöglichkeiten zugeordnet sind. Es handelt sich je nach Bauordnung um:

- Plätze, private Verkehrsanlagen, Aufschüttungen und Abgrabungen
- Leitungen und Anlagen für Lüftung, Wasser- und Energieversorgung, Abwasserbeseitigung und Fernmeldewesen
- Anlagen der Ver- und Entsorgung
- Sonstige Anlagen

In Bayern und im Saarland wird die Genehmigungsfreiheit durch Bedingungen eingeschränkt. Die Bayerische Landesbauordnung definiert eine maximale Größe der Ladestationen.³ Im Saarland dürfen Flächen notwendiger Stellplätze und deren Zufahrten nicht in Anspruch genommen werden.⁴ In den Bauordnungen der Länder Berlin, Hamburg, Nordrhein-Westfalen und Sachsen fehlt die explizite Nennung der Genehmigungsfreiheit.⁵

³Bayerische Bauordnung (BayBO) in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. August 2007 (GVBl. S. 588, BayRS 2132-1-B), die zuletzt durch § 4 des Gesetzes vom 25. Mai 2021 (GVBl. S. 286) geändert worden ist.

⁴Landesbauordnung (LBO) (Art. 1 des Gesetzes Nr. 1544) vom 18. Februar 2004, zuletzt geändert durch das Gesetz vom 4. Dezember 2019 (Amtsbl. I 2020 S. 211, 760).

⁵Vgl. Landesbauordnungen der 16 Bundesländer.

Allerdings ist in diesen Bundesländern von einer genehmigungsfreien Errichtung auszugehen. In Nordrhein-Westfalen stellt beispielsweise die Errichtung einer Ladestation in einer Garage keine genehmigungspflichtige Nutzungsänderung dar: Ladestationen werden als Teile von Leitungsanlagen und Bestandteile der technischen Gebäudeausrüstung bewertet.⁶

Trotz der Genehmigungsfreiheit sind die Bestimmungen der jeweiligen Bauordnungen einzuhalten. Des Weiteren sind bei Errichtung von Ladeinfrastruktur in der Nähe eines Denkmals die denkmalschutzrechtlichen Vorgaben der jeweiligen Länder zu berücksichtigen.⁷ Für die Errichtung von Ladesäulen in einer Garage oder Tiefgarage finden gegebenenfalls die Garagenverordnungen der Länder Anwendung. Gemäß § 2 (3) GaV Hessen müssen mindestens 5 % der Stellplätze über einen Anschluss an Ladestationen für Elektrofahrzeuge verfügen.⁸

Im Jahr 2021 wurde § 9 (11) BauGB um den Halbsatz „Flächen für Ladeinfrastruktur elektrisch betriebener Fahrzeuge“ ergänzt.⁹ Bauplanungsrechtlich gab es bis zu dieser jüngsten Änderung keine abschließenden Festsetzungen gemäß § 9 BauGB. Verschiedene Bebauungspläne umfassten dennoch bereits Festsetzungen, die eine Ladeinfrastruktur einbezogen haben. Ladeinfrastruktur steht in einem engen Zusammenhang zur Zulässigkeit von Stellplätzen oder Garagen. Es ist zu erwarten, dass nur dort Ladeinfrastruktur errichtet wird, wo zu ladende Fahrzeuge abgestellt werden können.¹⁰

28.1.2 Wohnungseigentumsmodernisierungsgesetz (WEMoG)

Mit dem Wohnungseigentumsmodernisierungsgesetz (Gesetz zur Förderung der Elektromobilität und zur Modernisierung des Wohnungseigentumsgesetzes und zur Änderung von kosten- und grundbuchrechtlichen Vorschriften – WEMoG) werden unterschiedliche Aspekte der privaten Ladeinfrastruktur an und in Wohngebäuden adressiert. Konkret richten sich die Änderungen des BGB an Wohnungsmietende und die des WEG an Wohnungseigentümer:innen. Mit diesen Änderungen soll der Aufbau privater Ladeinfrastruktur insbesondere in Mehrfamilienhäusern erleichtert werden. In der Vergangenheit hatte es einige Fälle gegeben, in denen es zu Rechtsstreitigkeiten kam. Streitpunkt waren zum Beispiel

⁶Vgl. Ministerium für Bauen, Wohnen, Stadtentwicklung und Verkehr (MBWSV NRW) 2017.

⁷Gesetz zum Schutz und zur Pflege der Denkmäler im Lande Nordrhein-Westfalen (Denkmalschutzgesetz – DSchG) in der Fassung vom 11. März 1980, zuletzt geändert durch Artikel 5 des Gesetzes vom 15. November 2016 (GV. NRW. S. 934), in Kraft getreten am 25. November 2016.

⁸Verordnung über den Bau und Betrieb von Garagen und Stellplätzen (Garagenverordnung – GaV) in der Fassung vom 17. November 2014.

⁹Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. November 2017 (BGBl. I S. 3634), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 16. Juli 2021 (BGBl. I S. 2939) geändert worden ist.

¹⁰Vgl. Zengerling 2017.

von Eigentümer:innen-Gemeinschaften nicht genehmigte bauliche Veränderungen zur Errichtung einer Lademöglichkeit für Elektrofahrzeuge.¹¹

Mit der Ergänzung des § 20 Abs. 2 WEG wird die Errichtung von Ladeinfrastruktur in Mehrfamilienhäusern mit mehreren Wohnungseigentümer:innen erleichtert. Analog zu den Änderungen des BGB kann eine Person mit Wohneigentum gemäß § 20 Abs. 2 WEG angemessene bauliche Veränderungen für Barrierefreiheit, Einbruchschutz und das Laden elektrisch betriebener Fahrzeuge verlangen. Zusätzlich wird der Anschluss an ein Telekommunikationsnetz mit sehr hoher Kapazität aufgeführt.¹²

Der § 554 des BGBs (Barrierereduzierung, E-Mobilität und Einbruchschutz) ermöglicht dem Mietenden den Anspruch, dass bauliche Veränderungen der Mietsache, die im Fall von E-Mobilität dem Laden elektrisch betriebener Fahrzeuge dienen, seitens des Vermietenden erlaubt werden. Allerdings wird dieser Anspruch durch Zumutbarkeit der baulichen Veränderung für den Vermietenden eingeschränkt. Bei Zustimmung zur Veränderung kann der Mietende zu einer Sicherheitsleistung verpflichtet werden.

28.1.3 Gebäude-Elektromobilitätsinfrastruktur-Gesetz (GEIG)

Während das WEMoG in Bezug auf Elektromobilität vor allem den Aufbau von Lademöglichkeiten des Nutzens in bestehenden Wohngebäuden erleichtert, zielt das GEIG auf eine Verbesserung der Rahmenbedingungen für den Aufbau insbesondere bei Neuerrichtung und größeren Renovierungen ab. Im Gegensatz zu den Änderungen des BGB und des WEG werden auch Nichtwohngebäude vom Geltungsbereich erfasst.

Mit dem Gebäude-Elektromobilitätsinfrastruktur-Gesetz (Gesetz zum Aufbau einer gebäudeintegrierten Lade- und Leitungsinfrastruktur für die Elektromobilität – GEIG) ist die Richtlinie EU/2018/844/¹³ in nationales Recht umgesetzt worden. Das GEIG regelt die Ausstattung von Stellplätzen mit notwendiger Leitungsinfrastruktur für Elektromobilität und gibt für bestimmte Anwendungsfälle zusätzlich Anforderungen an zu errichtende Ladeinfrastruktur vor. Leitungsinfrastruktur umfasst gemäß § 4 GEIG mindestens eine geeignete Leitungsführung sowie den erforderlichen Raum für die Elemente „Zähler“, „intelligente Messsysteme für ein Lademanagement“ und „erforderliche Schutzelemente“.

Die Vorgaben des GEIG sind nach Wohngebäuden, Nichtwohngebäuden und gemischt genutzten Gebäuden differenziert. Sowohl bei Neuerrichtung als auch bei größeren Reno-

¹¹ Gesetz zur Förderung der Elektromobilität und zur Modernisierung des Wohnungseigentumssetzes und zur Änderung von kosten- und grundbuchrechtlichen Vorschriften (Wohnungseigentumsmodernisierungsgesetz – WEMOG) in der Fassung vom 16. Oktober 2020.

¹² Wohnungseigentumsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 12. Januar 2021 (BGBl. I S. 34).

¹³ Richtlinie (EU) 2018/844 des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz.

vierungen sind ab einer bestimmten Zahl zugehöriger Stellplätze die Regelungen des GEIG anzuwenden. Für Nichtwohngebäude mit mehr als 20 Stellplätzen muss in jedem Fall bis zum Jahr 2025 mindestens ein Ladepunkt errichtet werden. Nichtwohngebäude von kleinen und mittelständischen Unternehmen, die größtenteils selbst genutzt werden, fallen nicht in den Anwendungsbereich. Zusätzlich gelten Ausnahmen, falls bei der Renovierung die Kosten der Lade- und Leitungsinfrastruktur 7 % der Gesamtkosten der Maßnahme überschreiten oder es sich um öffentliche Gebäude handelt, die bereits vergleichbaren Anforderungen – gemäß Umsetzung der Richtlinie 2014/94/EU – unterliegen.¹⁴

28.1.4 Stellplatzsatzungen

Über Vorgaben zur Gestaltung von Stellplätzen können Kommunen die Vorbereitung oder den Aufbau von Ladeinfrastruktur steuern. Wird in den Stellplatzsatzungen die Vorbereitung des Anschlusses gefordert, gehen die Vorgaben des GEIG bezüglich der Ausstattung der Stellplätze mit Leitungsinfrastruktur in vielen Fällen über die Anforderungen aktueller Stellplatzsatzungen hinaus. Die tatsächliche Ausstattung mit Ladepunkten ist durch das GEIG kaum abgedeckt, so dass in diesem Bereich Stellplatzsatzungen, die explizit Ladepunkte bei der Gestaltung der Stellplätze fordern, die Gestaltungsmöglichkeiten der Kommunen bezüglich des Aufbaus privater Ladeinfrastruktur verdeutlichen. So sind beispielsweise gemäß der Stellplatzsatzung der Stadt Rostock ab einer Anzahl von zehn zu errichtenden Stellplätzen 10 % von ihnen derart zu gestalten, dass sie den Mindestanforderungen an Normalladepunkte für Elektroautos genügen.¹⁵

Regulatorisch wird der Ausbau privater Ladeinfrastruktur eher ermöglicht als begrenzt. Jedoch existieren weiterhin limitierende Faktoren in Bezug auf den Ausbau der privaten Ladeinfrastruktur. Inwiefern sich die Rechtsansprüche von Wohnungseigentümer:innen und Mietenden konkret in der Praxis umsetzen lassen, lässt sich zum aktuellen Zeitpunkt nicht abschließend bewerten. Insbesondere bei Wohngebäuden mit einer Vielzahl von Eigentümer:innen und Stellplätzen stellt sich die Frage bezüglich der konkreten Umsetzung der Ladeinfrastruktur-Errichtung. Neben bestehenden technischen Hürden – unzureichende Anschlüsse etwa – ist auch zu bedenken, inwiefern ein Lade- und Lastenmanagement, das künftig notwendig werden kann, schon heute von Personen mit Wohneigentum bei der Errichtung ihrer eigenen Ladeinfrastruktur berücksichtigt werden muss. Errichten Personen mit Wohneigentum ihre Ladeeinrichtung ohne Rücksicht auf eine zukünftige Errichtung von Ladeinfrastruktur weiterer Personen mit Wohneigentum in der Immobilie, könnten diese mit zusätzlichem Aufwand konfrontiert werden, sollte die Kapazität des Hausanschlusses nicht für weitere Ladepunkte ausreichen.

¹⁴ Gebäude-Elektromobilitätsinfrastruktur-Gesetz vom 18. März 2021 (BGBl. I S. 354).

¹⁵ Vgl. Bürgerschaft der Hansestadt Rostock 2017.

28.2 Aufbau öffentlicher Ladeinfrastruktur

Wenn von öffentlicher Ladeinfrastruktur gesprochen wird, ist häufig öffentlich zugängliche Infrastruktur auf privatem Gelände einbezogen. Hinsichtlich öffentlich zugänglicher Ladepunkte, etwa auf Parkplätzen von Lebensmitteleinzelhändlern, gelten die rechtlichen Grundlagen für private Ladeinfrastruktur. Zusätzlich sind die Vorgaben zu berücksichtigen, die mit dem Betrieb einer solchen öffentlich zugänglichen Ladesäule einhergehen. Des Weiteren gibt es Ladeinfrastruktur im öffentlichen Straßenraum. In diesem Fall können Städte und Gemeinden direkt auf den Aufbau und deren Ausgestaltung einwirken.

Zielsetzungen zur Elektromobilität finden sich in verschiedenen informellen Plänen und Konzepten auf kommunaler Ebene. Aktuell existieren bezüglich öffentlicher Ladeinfrastruktur keine gesetzlichen Mindestvorgaben, die in bestimmten administrativen Räumen erfüllt werden müssen. Viele Städte und Gemeinden haben ein Eigeninteresse daran, dass öffentliche Ladeinfrastruktur in der jeweiligen Verwaltungseinheit errichtet wird. Häufige Zielsetzung ist ein bedarfsgerechter Aufbau öffentlicher Ladeinfrastruktur bei gleichzeitiger Grundversorgung von Gebieten mit voraussichtlich geringer Auslastung.

In Tab. 28.3 sind zu beachtende rechtliche Grundlagen im Kontext des Aufbaus öffentlicher Ladeinfrastruktur zusammengefasst.

Die Verordnung über technische Mindestanforderungen an den sicheren und interoperablen Aufbau und Betrieb von öffentlich zugänglichen Ladepunkten für Elektromobile (LSV) definiert Mindestanforderungen an Interoperabilität und barrierearme Nutzung. Darunter fallen etwa Vorgaben zu Bezahlmethoden oder zu punktuellm Laden. Die LSV setzt die Richtlinie (EU-AFI) in nationales Recht um.¹⁶

Tab. 28.3 Relevante rechtliche Grundlagen für den Aufbau von Ladeinfrastruktur auf öffentlichen Verkehrsflächen

Grundlage	Kurzfassung
Ladesäulenverordnung (LSV)	Die LSV enthält Anforderungen an den Aufbau und Betrieb von öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur
Straßen- und Wegegesetze der Länder	Öffentliche Ladeinfrastruktur im öffentlichen Straßenraum fallen als Verkehrsanlagen in den Geltungsbereich des Straßen- und Wegerechts. Ladeinfrastruktur ist als Sondernutzung zu betrachten.
Sondernutzungssatzungen	Eine Sondernutzungssatzung ermöglicht es, die Erteilung von Sondernutzungserlaubnissen zu systematisieren. Sie ermöglichen den Kommunen eine Steuerung des Aufbaus öffentlicher Ladeinfrastruktur.
Elektromobilitätsgesetz (EmoG)	Das EmoG ermöglicht etwa Bevorrechtigungen für Elektrofahrzeuge im Bereich des ruhenden Verkehrs, um Ladeoptionen besser nutzen zu können

¹⁶Ladesäulenverordnung vom 9. März 2016 (BGBl. I S. 457), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 1. Juni 2017 (BGBl. I S. 1520) geändert worden ist.

Gemäß aktueller Rechtsprechung des VGH München¹⁷ und den Vorgaben der Landesbauordnungen (vgl. § 1 Anwendungsbereich LBO NRW)¹⁸ berührt öffentliche Ladeinfrastruktur als Bestandteil der Straßenausstattung weder den Geltungsbereich des Bauordnungs- noch des Bauplanungsrechts. Im Sinne des BayStrWG stellen Ladesäulen im öffentlichen Straßenraum regelmäßige Verkehrsanlagen dar, die der Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs dienen. Folglich können Gemeinden als Straßenbaulastträger Ladeinfrastruktur ohne Baugenehmigung aufstellen.¹⁹ Tendenziell sind Ladesäulen im Sinne der Straßen- und Wegegesetze der Länder als Sondernutzung zu klassifizieren und benötigen daher eine Sondernutzungserlaubnis (beispielsweise StrWG NRW § 18 (1)). Mit Hilfe einer Sondernutzungssatzung können kommunale Leitbilder, Strategien und Konzepte bei der Vergabe der Sondernutzungserlaubnis systematisch berücksichtigt werden.

Basierend auf dem Elektromobilitätsgesetz (EmoG) sind für Elektrofahrzeuge Bevorrechtigungen im öffentlichen Straßenraum möglich. Das ermöglicht bei der Einrichtung von Ladestandorten, Parkplätze für die Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen freizuhalten und nicht erlaubte Nutzung zu sanktionieren.²⁰

28.3 Betrieb von Ladeinfrastruktur

Der Betrieb von Ladeinfrastruktur geht mit einigen rechtlichen Einschränkungen und Verpflichtungen einher. Es kann zwischen dem Betrieb von öffentlicher und privater Ladeinfrastruktur unterschieden werden, wobei die Vorgaben im öffentlichen Bereich deutlich komplexer sind.

28.3.1 Private Ladeinfrastruktur

Prinzipiell gelten grundlegende rechtliche Verpflichtungen in Bezug auf den Betrieb von Ladeinfrastruktur – sowohl für private als auch für öffentliche. Je nach Nutzung der privaten Ladeinfrastruktur finden jedoch diverse Vorgaben keine Anwendung. So entfällt etwa die Einstufung als Elektrizitätsversorgungsunternehmen inklusive der damit verbundenen Pflichten, falls nur eigene Fahrzeuge geladen werden. Diese Einordnung ist auch gültig, wenn Dritte unentgeltlich und nur in geringem Maße Strom beziehen.²¹

¹⁷Vgl. VGH München 2018.

¹⁸LBO NRW § 1 Anwendungsbereich.

¹⁹Vgl. VGH München 2018.

²⁰Elektromobilitätsgesetz vom 5. Juni 2015 (BGBl. I S. 898), das durch Artikel 5 des Gesetzes vom 12. Juli 2021 (BGBl. I S. 3091) geändert worden ist.

²¹Vgl. Mainz et al. 2019.

28.3.2 Öffentliche Ladeinfrastruktur

Das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) legt in § 3 Ziff. 25 fest, dass der Strombezug einer Ladesäule einem Letztverbrauch entspricht. Der Ladesäulenbetreibende ist damit Letztverbraucher und kann deshalb seine Energielieferanten frei wählen; insbesondere ist er selbst kein Energieversorgungsunternehmen im Sinne des EnWG. Die Ladesäulenverordnung (LSV) definiert dabei die Rolle des Ladesäulenbetreibers unter rechtlichen und wirtschaftlichen Aspekten. Die Definition von Letztverbrauchenden im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) weicht jedoch von dieser Darstellung ab. Dort sind Letztverbraucher laut § 3 Ziff. 33 als „jede natürliche oder juristische Person, die Strom verbraucht“ definiert – also der Fahrende des ladenden Fahrzeugs.

Ist die Ladeinfrastruktur auch für Dritte zugänglich, werden Betreiber gemäß § 3 Ziff. 20 EEG 2017 zum Elektrizitätsversorgungsunternehmen und sind zur Entrichtung der EEG-Umlage (Förderung des Ausbaus erneuerbarer Energien) verpflichtet.²² Aufgrund der zusätzlichen Kosten und des erhöhten Aufwands steht dieses Gesetz bei Ladeinfrastrukturbetreibern in der Kritik. Aus dieser rechtlichen Konstellation ergeben sich für Ladesäulenbetreiber diverse Meldepflichten an den zugehörigen Übertragungsnetzbetreiber. Darüber hinaus muss eine jährliche Endabrechnung vorgelegt werden. Die Ladesäulenverordnung legt fest, unter welchen Bedingungen Ladeinfrastruktur als öffentlich gilt. Für öffentliche Ladeinfrastruktur gelten spezielle Anforderungen, etwa die Verwendung bestimmter Steckerstandards oder die Möglichkeit des einmaligen Aufladens im Gegensatz zu beispielsweise Abonnements. Zuletzt müssen öffentliche Ladepunkte den Vorgaben des Mess- und Eichrechts (MessEG) entsprechen.²³

Gemäß § 3 der Preisangabenverordnung (PAngV) muss die Mengeneinheit für den Arbeitspreis stets €/kWh und als solche gut erkennbar an der jeweiligen Ladeinfrastruktur sichtbar sein. Verfügt die Ladeinfrastruktur über keinerlei Display, ist die dynamische Anpassung von Preisen erschwert. Zudem können Einmalentgelte je Ladevorgang oder eine Parkgebühr erhoben werden.

Darüber hinaus gehen Ladevorgänge mit einer Lärmemission einher. Diese Emission entsteht durch die Kühlung der Ladeinfrastruktur bei hoher Ladeleistung, also vor allem bei Schnellladeinfrastruktur. Dabei ist gemäß § 117 Gesetz über Ordnungswidrigkeiten (OWiG) zu beachten, dass keine unzulässig hohe Lautstärke entsteht. Im Fall zu hoher Lärmemission müssen beispielsweise Schallschutzwände installiert oder Ladeleistungen reduziert werden.

²²Vgl. Mainz et al. 2019.

²³Vgl. Mainz et al. 2019.

Literatur

Teil V: Infrastruktur für die Elektromobilität

- Bürgerschaft der Hansestadt Rostock (Satzung der Hansestadt Rostock über die Herstellung notwendiger Stellplätze für Kraftfahrzeuge und Abstellmöglichkeiten für Fahrräder und über die Erhebung von Ablösebeträgen für notwendige Stellplätze und Fahrradabstellmöglichkeiten:** *Satzung der Hansestadt Rostock über die Herstellung notwendiger Stellplätze für Kraftfahrzeuge und Abstellmöglichkeiten für Fahrräder und über die Erhebung von Ablösebeträgen für notwendige Stellplätze und Fahrradabstellmöglichkeiten (Stellplatzsatzung)*, 2017
- Mainz, I; Meeser, K; Reiners, K.:** *Elektromobilität – Rechtliche Rahmenbedingungen für die Errichtung und den Betrieb von Ladeinfrastruktur*. https://www.goerg.de/sites/default/files/2019-12/191206_GOERG_Legal%20Update_Elektromobilit%C3%A4t%20%E2%80%93%20Rechtliche%20Rahmenbedingungen%20f%C3%BCr%20die%20Errichtung%20und%20den%20Betrieb%20von%20Ladeinfrastruktur.pdf. Abruf 17.06.2021
- Ministerium für Bauen, Wohnen, Stadtentwicklung und Verkehr (MBWSV NRW):** *Landesbauordnung- Dienstbesprechung mit den Bauaufsichtsbehörden Mai 2017*
- VGH München 2018:** *Errichtung von Verkehrsanlagen zum Zwecke der Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs – Ladesäulen zum Aufladen von Elektromobilen*
- Zengerling, C.:** *e-Quartier Hamburg Elektromobilität in urbanen Wohnquartieren. Zentrale Ergebnisse des Rechtsgutachtens*, 2017

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Weitere Implikationen für Verkehrsinfrastruktur

29

Fabian Kühnel, Marcel Porschen und Tobias Kuhnimhof

Die Umstellung des Straßenverkehrs auf Elektroantriebe erfordert die Errichtung von Lademöglichkeiten, die als neue Infrastruktur bereitstehen. Der Aufbau von Ladeinfrastruktur ist mit weiteren Implikationen für die Verkehrsinfrastruktur verbunden.

29.1 Tankstellen

Der Straßenverkehr ist für fast 20 % des Primärenergieverbrauchs in Deutschland verantwortlich.¹ Ein Großteil dieser Energie wird an den bundesweit mehr als 14.000 Tankstellen an die Fahrzeuge als Endverbraucher übergeben.² Durch eine flächendeckende Marktdurchdringung der Elektromobilität wird diese eher gebündelte Struktur dezentralisiert und die Tankstelle in ihrer heutigen Form kann an Bedeutung verlieren.

Im Bereich des „Transit Charging“ oder als urbane Lade-Hubs können tankstellenartige Strukturen durchaus infrage kommen. Es ist denkbar, dass sich die Tankstelle durch

¹ Vgl. Statistisches Bundesamt (Destatis) 2018.

² Vgl. Mineralöl Wirtschaftsverband e.V. (MWV) 2021.

F. Kühnel · M. Porschen

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Lehrstuhl und Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr (ISB), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: kuehnel@isb.rwth-aachen.de; porschen@isb.rwth-aachen.de

T. Kuhnimhof (✉)

Universitätsprofessor, Lehrstuhl und Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr (ISB), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: kuhnimhof@isb.rwth-aachen.de

eine Verbesserung des Angebots während der Ladedauer als bevorzugte Lademöglichkeit im „Transit Charging“ und bei der Zwischenladung an urbanen Lade-Hubs etabliert. Beim „Destination Charging“ ist – vor allem bei langen Aufenthaltszeiten – zu erwarten, dass auf andere Orte zurückgegriffen wird.

An bestehenden Tankstellen können die Geschäftsfelder „Einkauf“ und „Autowäsche“, die derzeit bereits etwa die Hälfte der Wertschöpfung ausmachen, an Bedeutung gewinnen.³ Im Zuge der Umstrukturierung des Tankstellengeschäfts sind weitere Nutzungen von Tankstellen möglich, die zum Teil bereits anlaufen. Beispielsweise können sie als Mobilitätsstation, zur Fahrzeugreparatur oder als Mikrodepot im Logistikverkehr genutzt werden.⁴

29.2 Lärm- und Schadstoffemissionen

Elektrofahrzeuge bieten die Chance zur Emissionsreduktion. Allerdings sind die entsprechenden Potenziale von der Art der Emission und weiteren Rahmenbedingungen abhängig. Das gilt insbesondere für die Reduktion innerstädtischer Lärmemissionen, die dann wirksam werden kann, wenn Elektromobilität mit weiteren Anpassungen vor allem mit Blick auf die Fahrgeschwindigkeit kombiniert wird. Bei Verbrennerfahrzeugen ist das Rollgeräusch der Pkw ab einer Geschwindigkeit von 30 km/h dominierend. Unterhalb dieser Geschwindigkeit überwiegt das Motorengeräusch.⁵ Da Elektrofahrzeuge lediglich geringeren Motorenlärm emittieren und das Rollgeräusch nicht reduziert wird, ist eine flächendeckende Senkung der innerstädtischen Lärmemissionen von Pkw mittels Elektromobilität nur durch eine zusätzliche flächendeckende Herabsetzung der zulässigen Geschwindigkeit auf 30 km/h erreichbar. Bei Lkw sind die Antriebsgeräusche bis zu einer Geschwindigkeit von etwa 50 km/h dominierend.⁶ Somit könnte bei Lkw die Einführung der Elektromobilität auch ohne zusätzliche Geschwindigkeitsreduktionen zu einer Verringerung der innerstädtischen Lärmemissionen führen. Bei motorisierten Zweirädern und Nutzfahrzeugen wie Räum- oder Müllwagen sind die elektrischen Varianten im innerstädtischen Verkehr aus Lärmemissionssicht vorteilhaft.⁷

Die Schadstoffemissionen des Verbrennungsprozesses konventioneller Fahrzeuge fallen bei Elektrofahrzeugen nicht an. Dennoch emittieren E-Mobile während der Fahrt durch Bremsen und Reifenabrieb Feinstaub. Abhängig von der Art der Bremsanlage und dem Gewicht des Fahrzeugs, lassen sich die Feinstaubemissionen im urbanen Raum um bis zu 25 % verringern.⁸ Jedoch nehmen die Feinstaubemissionen mit dem Gewicht des Fahrzeugs zu, so dass infolgedessen die typischerweise schwereren Elektrofahrzeuge zu-

³Vgl. Aral AG 2019.

⁴Vgl. Aral AG 2019.

⁵Vgl. Beckenbauer 2008.

⁶Vgl. Beckenbauer 2008.

⁷Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 2021.

⁸Vgl. Beddows und Harrison 2021.

mindest hinsichtlich der Bremsen und des Reifenabriebs mehr Feinstaub emittieren als leichtere konventionelle Fahrzeuge.⁹

Mit Blick auf aktuelle Diskussionen über Fahrverbote wegen erhöhter Schadstoffbelastung in Städten kann die Nutzung von Elektrofahrzeugen teilweise zur Lösung des Problems beitragen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass das Durchschnittsalter der Fahrzeuge in Deutschland am 1. Januar 2021 etwa 9,8 Jahre betrug.¹⁰ Eine großflächige Elektrifizierung des Fahrzeugbestands und die damit einhergehende Verringerung der Emissionen sind dementsprechend erst langfristig zu erwarten, so dass durch die Einführung von Elektrofahrzeugen keine kurzfristigen Effekte in Form von verringerter Schadstoffbelastung zu erzielen sind.

29.3 Flächeninanspruchnahme

Parkraum und Ladeinfrastruktur sind als Resultat der benötigten Standdauer für den Ladevorgang miteinander verknüpft. Insbesondere beim „Destination Charging“ werden die Fahrzeuge für einen längeren Zeitraum abgestellt und währenddessen geladen. Zwar werden Sondernutzungserlaubnisse des öffentlichen Straßenraums nur für eine festgelegte Dauer erteilt, doch verstetigt der Aufbau von Ladeinfrastruktur die Zugänglichkeit eines Gebiets für den motorisierten Individualverkehr. So könnte sie Maßnahmen zur Umgestaltung des öffentlichen Straßenraums etwa zur Verbesserung der Fußgänger- und Fahrradinfrastruktur erschweren. Kommunale Entscheidungstragende müssen die Belange der verschiedenen Verkehrsteilnehmenden daher auch bei der Errichtung von Ladeinfrastruktur berücksichtigen. So ist beispielsweise abzuwägen, ob eine Ladesäule oder eine Anlage des Radverkehrs priorisiert werden soll. Diese Zielkonflikte können sowohl zu Lasten des Radverkehrs¹¹ als auch des Ladeinfrastrukturausbaus¹² gehen. Als bauliche Anlage benötigen Ladesäulen eine gewisse Fläche. Insbesondere bei der Errichtung innerstädtischer Lade-Hubs kann eine neue Konkurrenzsituation um knappe Flächen entstehen.

Weitere Flächenkonkurrenz ergibt sich in der Übergangsphase der Elektrifizierung des Individualverkehrs zwischen den Elektrofahrzeugen und den Verbrennerfahrzeugen. Existierende Abstellmöglichkeiten, die mit Ladeinfrastruktur ausgestattet werden, stehen Verbrennerfahrzeugen häufig nicht mehr zur Verfügung. Im fließenden Verkehr können sich Bevorrechtigungen von Elektro-Pkw – etwa in Gestalt der Mitbenutzung der Busspur – negativ auf den ÖPNV-Betriebsablauf auswirken.¹³ Des Weiteren kann es zu einer zusätzlichen Konkurrenz mit dem Radverkehr kommen, der teilweise dazu berechtigt ist, die Busspur zu nutzen.¹⁴

⁹Vgl. Timmers und Achten 2018.

¹⁰Vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2021.

¹¹Vgl. Krugler 2019.

¹²Vgl. WDR 2021.

¹³Vgl. Myklebust 2013.

¹⁴Vgl. Beedham 2021.

Literatur

Teil V: Infrastruktur für die Elektromobilität

- Aral AG:** *Studie Tankstelle der Zukunft. Mobilitätstrends 2040.* Bochum, 2019
- Beckenbauer, T.:** *Physik der Reifen-Fahrbahn-Geräusche. Geräuschenstehung, Wirkungsmechanismen und akustische Wirkung unter dem Einfluss von Bautechnik und Straßenbetrieb:* 4. Informationstage Geräuschmindernde Fahrbahnbeläge un der Praxis- Lärmaktionsplanung 11/12.06.2008, 2008
- Beddows, D. C; Harrison, R. M.:** *PM10 and PM2.5 emission factors for non-exhaust particles from road vehicles: Dependence upon vehicle mass and implications for battery electric vehicles.* In: Atmospheric Environment, Jg. 244, 2021, S. 117886
- Beedham, M.:** *Electric vehicles can now use bus lanes in the UK – and cyclists aren't happy.* Abruf 10.08.2021
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU):** *Wie umweltfreundlich sind Elektroautos? Eine ganzheitliche Bilanz,* 2021
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA):** *Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeualter 1.Januar 2021.* Flensburg, 2021
- Krugler, N.:** *Posse um Ladestation am Radweg*
- Mineralöl Wirtschaftsverband e.V. (MWV):** *Tankstellenbestand.* <https://www.mwv.de/statistiken/tankstellenbestand/>. Abruf 10.08.2021
- Myklebust, B.:** *EVs in bus lanes – controversial incentive:* International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium. EVS 27, 17–20 November 2013.
- Statistisches Bundesamt (Destatis):** *Umweltökonomische Gesamtrechnung. Transportleistungen und Energieverbrauch im Straßenverkehr 2005–2016,* 2018
- Timmers, V. R; Achten, P. A.:** *Non-Exhaust PM Emissions From Battery Electric Vehicles: Non-Exhaust Emissions Elsevier,* 2018, S. 261–287
- WDR:** *E-Mobilität in Köln: Probleme beim Bau von Ladesäulen.* <https://www1.wdr.de/nachrichten/rheinland/ausbau-e-ladesaeulen-in-koeln-100.html>. Abruf 10.08.2021

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Tobias Kuhnimhof und Marcel Porschen

Der Aufbau von Infrastruktur für die Elektromobilität findet in einem Mobilitätssystem mit bestehenden Strukturen statt. Da nicht zu erwarten ist, dass die Menschen ihre Mobilitätsmuster den Rahmenbedingungen der Elektromobilität anpassen, muss sich umgekehrt das System Elektromobilität an den bestehenden Bedürfnissen der Menschen orientieren. Implikationen für die Infrastruktur für Elektromobilität ergeben sich damit vorrangig aus der Ladenotwendigkeit der Fahrzeuge und damit aus der notwendigen Ladeinfrastruktur. Das gilt sowohl für die Verkehrsinfrastruktur, etwa in Form von Ladepunkten im öffentlichen Straßenraum, als auch für die Stromnetz- und Kommunikationsinfrastruktur.

Der heute dominierende und sehr ähnlich sowie zeitlich und räumlich konzentriert ablaufende Tankprozess wird durch die Elektromobilität voraussichtlich von wesentlich vielfältiger ausdifferenzierten Ladevorgängen abgelöst. Dadurch, dass das Laden an viel mehr Orten, zu anderen Zeiten, langsam oder schnell, verbunden mit Aktivitäten oder als Zwischenstopp und mit unterschiedlichen Ladeinfrastrukturen vorgenommen werden kann, kann die Ladenachfrage auf vielfältige Weise bedient werden. Durch diverse denkbare Konstellationen der Verfügbarkeit von privaten Lademöglichkeiten, von Präferenzen der Nutzenden, von Ladeanreizen und verfügbaren Ladeleistungen ergeben sich zahlreiche Abhängigkeiten von Ladestandorttypen und Ladebedarfen. Dies führt in der Summe zu

T. Kuhnimhof (✉)

Universitätsprofessor, Lehrstuhl und Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr (ISB), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: kuhnimhof@isb.rwth-aachen.de

M. Porschen

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Lehrstuhl und Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr (ISB), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: porschen@isb.rwth-aachen.de

dem Ergebnis, dass die Ladeinfrastruktur-Nachfrage an einem Ort nicht nur von den Eigenschaften dieses Ortes, sondern immer auch von alternativen Lademöglichkeiten abhängig ist. So gilt etwa, dass weniger Ladeoptionen in Wohnquartieren mehr Lademöglichkeiten an dritten Orten notwendig machen, um den insgesamt anfallenden Ladebedarf zu decken.

Es zeigt sich somit, dass bestehender Ladebedarf nicht eins zu eins in einen daraus abzuleitenden Ladeinfrastrukturbedarf überführbar ist. Stattdessen gibt es sehr unterschiedliche Ladeinfrastrukturkonstellationen, die zur Deckung eines bestehenden Ladebedarfs geeignet sind. Bei der Auswahl und Entwicklung einer solchen Konstellation für ein Gebiet – zum Beispiel auf der Ebene von Kommunen oder Regionen – sind verschiedene Faktoren zu beachten. Dazu zählen die Verfügbarkeit geeigneter Flächen für Ladeinfrastruktur ebenso wie das Vorhandensein und die Dimensionierung von Stromnetzanschlüssen. In Abhängigkeit von verschiedenen Elektrofahrzeugdurchdringungen, Ladeleistungen und Lastmanagementstrategien dürften in vielen Regionen auch Ertüchtigungen der Strom- und Verteilnetze notwendig sein.

Aus verkehrsinfrastruktureller Sicht ist festzuhalten, dass sich die Substitution von Verbrennerfahrzeugen durch Elektrofahrzeuge zwar positiv auf Klimagas-, Luftschadstoff- und gegebenenfalls auch Lärmemissionen auswirkt, dass sie jedoch nicht zur Verringerung der Flächeninanspruchnahme durch den motorisierten Individualverkehr beiträgt. Insbesondere in urbanen Bereichen ist die Flächenkonkurrenz sehr groß, und neben Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr sind weitere Maßnahmen notwendig, um dort die Lebens- und Aufenthaltsqualität zu verbessern sowie einen effizienten Verkehrsfluss zu ermöglichen. Durch eine Reduzierung von Flächen für den ruhenden Verkehr lassen diese sich etwa für Maßnahmen zur Klimaanpassung nutzen. Außerdem können auch besonders flächeneffiziente Formen der Elektromobilität – etwa Pedelecs oder Elektrobusse – zur Mobilitätswende beitragen.

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.



Geschäftsmodelle entlang der elektromobilen Wertschöpfungskette

Geschäftsmodelle charakterisieren in abstrahierter Form, welchen Nutzen Unternehmen ihren Kunden anbieten, wie die Wertschöpfung strukturiert ist und wie sie auf dieser Basis Umsätze generieren. Diese Vision gibt in komprimierter Form wieder, welcher Nutzen für die Kunden durch das Angebot von Produkten und Dienstleistungen entsteht. Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs ändert grundlegende Aspekte der Wertschöpfung in Bezug auf Produktion und Zulieferstruktur. Die für Elektrofahrzeuge notwendige Energieversorgung wird in diese Wertschöpfungsstruktur integriert, und es entstehen neue Kooperationen, um Kunden ein integriertes Angebot zu unterbreiten. Unternehmen erweitern ihre Nutzendefinition und werden zu Mobilitätsanbietern. Während diese Entwicklungen im Rahmen der bestehenden Nutzendefinition – das Angebot von Mobilität durch die Bereitstellung von Fahrzeugen – stattfinden könnten, entwickeln sich durch Digitalisierung und Konnektivität völlig neue Angebotsoptionen. Es sind vorrangig Dienstleistungsangebote, die zu erweiterten oder auch völlig neuen Geschäftsmodellen führen. Diese als „Servitization“ von Geschäftsmodellen bezeichnete Zunahme der Bedeutung von Dienstleistungsangeboten verändert für Fahrzeughersteller schrittweise sämtliche Elemente ihres Geschäftsmodells.

Zur Verdeutlichung jener Entwicklungen beschreibt Kap. 31 die Gezeitenwende in der Automobilindustrie, wonach Kap. 32 das elektromobile Wertschöpfungssystem detaillierter erläutert. Den konkreten Wertschöpfungspotenzialen entlang der elektromobilen „Value Chain“ widmet sich Kap. 33, gefolgt von einem in Kap. 34 gebotenen Blick auf die Elemente der elektromobilorientierten Geschäftsmodelle. Kap. 35 schließt daraufhin mit der Betrachtung von Geschäftsmodellen der Elektromobilität, die sich Automobilproduzenten, Energieversorgern, IT-Unternehmen und Start-up-Betrieben aus verschiedenen Bereichen eröffnen.



Garnet Kasperk, Sarah Fluchs und Julius Hausmann

Ökologische Regulierungen und veränderte Mobilitätsbedürfnisse treiben die Entwicklung alternativer Antriebstechnologien voran. Die globale Flotte der Elektrofahrzeuge wuchs im Jahr 2020 auf drei Millionen und 4,2 % der weltweiten Fahrzeugverkäufe.¹ Dieses Wachstum der Registrierungen von Elektrofahrzeugen um 41 % im Vergleich zum Vorjahr ist auf technologische Entwicklungen, Förderpolitik und eine allmählich zunehmende Kundenakzeptanz zurückzuführen. Für das Jahr 2030 wird der Anteil rein batterieelektrisch betriebener Fahrzeuge (BEV) bei Neuwagenverkäufen auf etwa 35 % geschätzt.²

Automobilproduzenten haben ihre Strategien in Bezug auf die Elektrifizierung ihrer Fahrzeugflotten entwickelt. In diesem Jahrzehnt werden Hunderte neuer E-Mobil-Modelle auf den Markt kommen.

¹Vgl. International Energy Agency (IEA) 2021.

²Vgl. Woodward et al. 2020.

G. Kasperk (✉)

Leiterin Center for International Automobile Management, Lehrstuhl für Internationale Wirtschaftsbeziehungen RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: garnet.kasperk@rwth-aachen.de

S. Fluchs

Economist im Bereich Umwelt, Energie, Infrastruktur, Institut der deutschen Wirtschaft, Köln, Deutschland

E-Mail: Fluchs@iwkoeln.de

J. Hausmann

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: julius.hausmann@rwth-aachen.de

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs verändert die Produktportfolios und Wertschöpfungsstrategien für Automobilproduzenten, ihre Zulieferer und auch Unternehmen der Energieversorgung, da ein integriertes elektrisches Mobilitätsangebot den Zugang zur Ladeinfrastruktur und zu Abrechnungsdienstleistungen erfordert. Die für ein elektromobiles Angebot notwendige industrieübergreifende Kompetenzbündelung sowie die damit einhergehenden technologischen und ökonomischen Herausforderungen fördern Kooperationen, so dass Wertschöpfung zunehmend in Anbieternetzwerken entsteht.

Digitalisierung, Konnektivität und die zunehmende Automatisierung von Fahrfunktionen sowie veränderte Mobilitätsbedürfnisse eröffnen neue Wertschöpfungspotenziale, auf die Unternehmen mit veränderten oder neuen Geschäftsmodellen eingehen. Diese stehen nur teilweise in Verbindung mit Elektromobilität, so dass im Folgenden eine klare Differenzierung zu weiteren dienstleistungs- und meist datenbasierten Geschäftsmodellen nicht immer möglich ist.

Ziel der folgenden Ausführungen ist es, veränderte und neue Geschäftsmodelle in Verbindung mit der Elektrifizierung des Antriebsstrangs darzustellen. Dazu werden die bestehende Wertschöpfung sowie künftige Wertschöpfungspotenziale analysiert, um auf dieser Basis die Anforderungen an Geschäftsmodellanpassungen und -innovationen für Automobilproduzenten, ihre Zulieferer sowie Unternehmen der Energieversorgung zu erläutern. Da die verschiedenen parallelen Herausforderungen die Strategien sowie Geschäftsmodelle von Automobilproduzenten fundamental verändern, stehen diese im Mittelpunkt der Analyse.³

Literatur

Teil VI: Geschäftsmodelle entlang der elektromobilen Wertschöpfungskette

International Energy Agency (IEA): *Global EV Data Explorer*. Paris, 2021

Woodward, M; Hamilton, J; Walton, B; Ringrow, J; Alberts, G; Fullerton-Smith, S; Day, E.: *Electric Vehicles – Setting a course for 2030*, 2020

³Im vorliegenden Kapitel wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Andere Geschlechteridentitäten werden dabei ausdrücklich mitgemeint, soweit für die jeweiligen Aussagen sinnvoll.

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Garnet Kasperk, Sarah Fluchs und Julius Hausmann

32.1 Das Elektromobilitätsangebot

Die für ein Angebot von Elektromobilität notwendige Zusammenführung der fahrzeug- und der energiebezogenen Wertschöpfung löst die klar definierten Grenzen der industriebasierten Geschäftsmodelle zunehmend auf. Während die Produktion der Fahrzeuge sowie die Stromerzeugung und die netzbasierte Verteilung in bekannten oder nur angepassten Wertschöpfungsstrukturen stattfindet, verändern informationstechnologische Innovationen und datenbasierte Geschäftsmodelle die kundenorientierten Upstream-Wertschöpfungsschritte. Etablierte und neue Anbieter der Automobilindustrie, Unternehmen der Energiebranche sowie mobilitäts- und informationstechnologisch orientierte Start-up-Betriebe konkurrieren um einen mobilitätsorientierten Wertschöpfungsanteil, der künftig den wachstumsstärksten Bereich des Wertschöpfungssystems ausmacht (vgl. Abb. 32.1).

G. Kasperk (✉)

Leiterin Center for International Automobile Management, Lehrstuhl für Internationale Wirtschaftsbeziehungen, RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: garnet.kasperk@rwth-aachen.de

S. Fluchs

Economist im Bereich Umwelt, Energie, Infrastruktur, Institut der deutschen Wirtschaft, Köln, Deutschland

E-Mail: Fluchs@iwkoeln.de

J. Hausmann

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: julius.hausmann@rwth-aachen.de

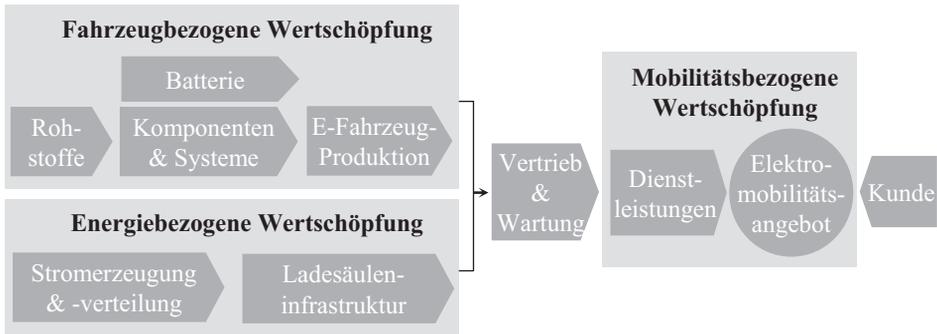


Abb. 32.1 Die elektromobile Wertschöpfung

Die Auswirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs, der Konnektivität und der zunehmenden Autonomisierung von Fahrfunktionen bei sich gleichzeitig wandelnden kundenseitigen Anforderungen an Mobilität auf Wertschöpfungsumfänge, -strukturen und -prozesse sind teilweise interdependent. Die folgenden Ausführungen stellen die Veränderung der Wertschöpfung durch Elektrifizierung des Antriebsstrangs aus Sicht von Automobilproduzenten und -zulieferern sowie Unternehmen der Energieversorgung in den Mittelpunkt. Vor allem die Darstellung neu entstehender Geschäftsmodelle ist aber untrennbar mit anderen technologischen Entwicklungen verknüpft – insbesondere mit der Digitalisierung und der zunehmenden Konnektivität von Fahrzeugen.

32.2 Fahrzeugbezogene Wertschöpfungsstruktur

Die fahrzeugbezogene Upstream-Wertschöpfung ist anhand der Zuliefererpyramide mit der wertschöpfungsorientierten Abfolge von Lieferanten dargestellt, wobei die Rangfolge der Zulieferer durch die Komplexität der produzierten Güter unterschieden wird. Automobilhersteller koordinieren die Automobilzulieferer und nehmen gemeinsam mit Tier-1-Zulieferern einen großen Teil der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten ein. Tier-1-Zulieferer bringen eine hohe Integrationskompetenz mit, durch die manche von ihnen auch als „Mega-Zulieferer“ oder „Tier-0,5-Zulieferer“ bezeichnet werden können. Zulieferer auf Tier-2-Ebene sind häufig Technologieführer in Spezialbereichen, Tier-3-Zulieferer hingegen sind Prozess- oder Kostenführer. Sie stellen vornehmlich Komponenten und Teile mit niedrigerem Komplexitätsgrad her (Abb. 32.2).

Unternehmen sind dabei nicht auf eine Ebene beschränkt, sondern können Aufgaben auf verschiedenen Levels übernehmen. Ein Zulieferer kann als Komponentenlieferant und gleichzeitig als Teilleverant für nachgelagerte Wertschöpfungsebenen aktiv sein. Zudem können Wertschöpfungsstufen übersprungen werden.

Das Netz der miteinander verbundenen Unternehmen aller Wertschöpfungsstufen basiert auf den komplexen Wertschöpfungsumfängen der Automobilindustrie. Die Wertschöpfung innerhalb eines solchen Systems stellt das theoretische Gewinnpotenzial

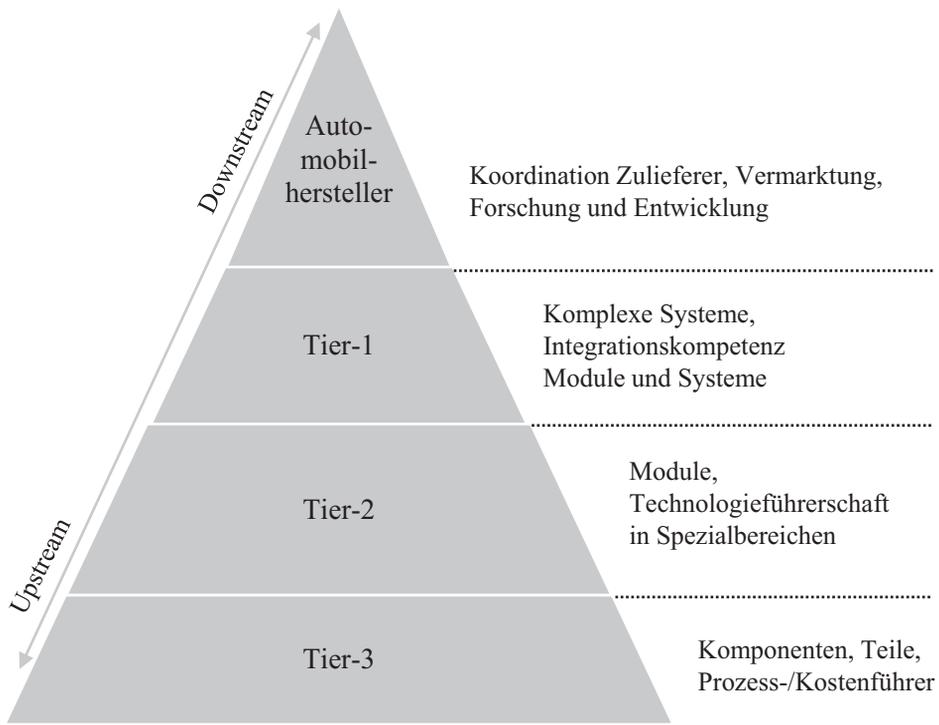


Abb. 32.2 Zuliefererpyramide der Automobilindustrie

dar. Sie teilt sich in Eigenleistungskosten und Gewinn. Die Wertschöpfung eines Herstellers ergibt sich aus dem am Ende der Produktion stehenden Produktionswert abzüglich der Vorleistungen des beziehungsweise der vorangegangenen Lieferanten (Abb. 32.3).

Die Wertschöpfungskette upstream umfasst Material-, Entwicklungs- und Produktionsumfänge. Physisch teilt sie sich nach Komplexitätsgrad in Teile, Komponenten, Module und Systeme, wie in Abb. 32.2 dargestellt. Durch Koordination des Wissens und Output der verschiedenen Wertschöpfungsstufen entsteht das automobilen Endprodukt. Die Endprodukte aus Sicht der Kunden sind üblicherweise im oberen Bereich der Zuliefererpyramide zu finden (Abb. 32.4).

Die Eigenleistung der Automobilhersteller auf den einzelnen Ebenen der Wertschöpfungskette ist in den vergangenen Jahren kontinuierlich zurückgegangen. Gründe dafür liegen in der Produktproliferation – das heißt: in der Vielfalt von Baureihen (Produktverbreiterung) und in der Auffächerung bestehender Baureihen in verschiedene Typen (Produktdifferenzierung).¹ Die Kosten, die einerseits mit dem massiv erweiterten Modell- und Variantenangebot und andererseits mit den Forschungs- und Entwicklungsaufwänden für das Prinzip „CASE“ (Connected – Autonomous – Shared – Electric) einhergehen, haben in der Fahrzeugproduktion zu einer Konzentration auf Kernkompetenzen geführt.

¹Vgl. Küpper et al. 2020.

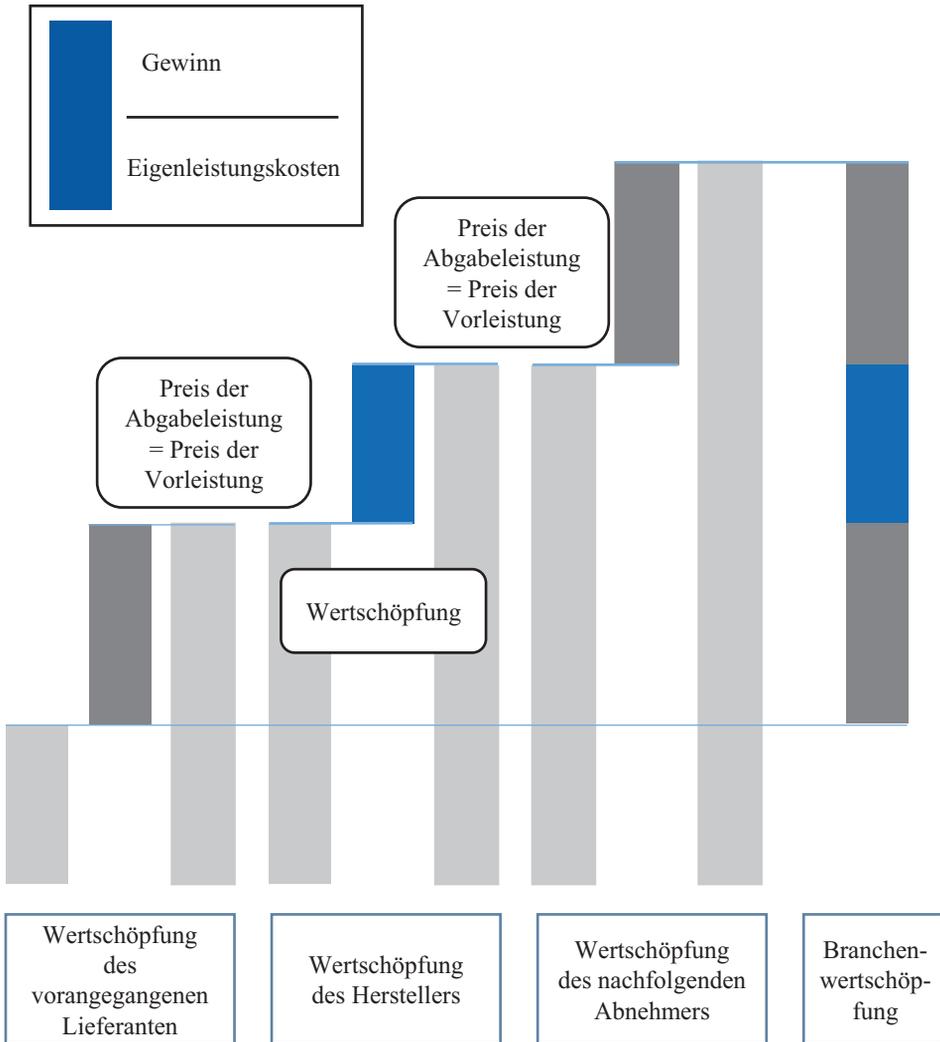


Abb. 32.3 Branchenwertschöpfung in Anlehnung an Müller-Stewens und Lechner (2005). (Vgl. Müller-Stewens und Lechner 2005)

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs hat direkte Effekte auf die derzeitige Wertschöpfung von Automobilproduzenten und ihren Zulieferern. Sie eröffnet neue Potenziale vor allem im Bereich von Batteriesystemen und Elektronik, jedoch reduziert die geringere Komplexität von Elektrofahrzeugen – je nach Modell – das derzeitige Wertschöpfungspotenzial gleichzeitig um etwa 35 bis 40 %. Die für Elektrofahrzeuge notwendige Infrastruktur eröffnet neue Potenziale für Energieversorger, Automobilproduzenten und weitere Anbieter, während Digitalisierung und Konnektivität die Grundlage für neue mobilitäts-

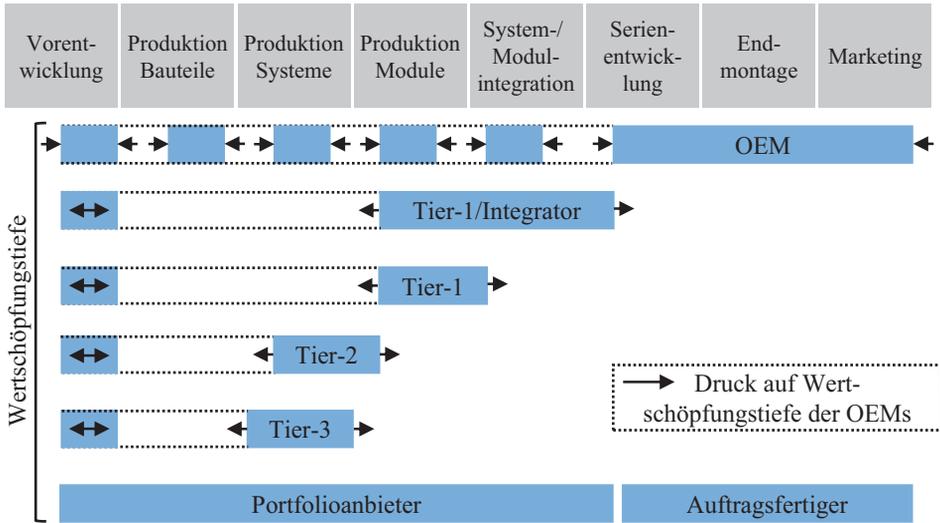


Abb. 32.4 Upstream-Wertschöpfungskette und -Wertschöpfungstiefe

orientierte Dienstleistungen schaffen, die von etablierten und neuen Akteuren angeboten werden. Im Folgenden wird die derzeitige Wertschöpfung in Bezug auf die Fahrzeugproduktion sowie künftige Potenziale der fahrzeug-, energie- und mobilitätsbezogenen Wertschöpfung dargestellt.

32.3 Die globale fahrzeugbezogene Wertschöpfung

32.3.1 Fahrzeugproduktion

In den vergangenen zehn Jahren sind die Verkaufszahlen für batterieelektrische, hybrid- oder brennstoffzellengetriebene Fahrzeuge kontinuierlich gestiegen – sogar in dem von der Corona-Pandemie geprägten Jahr 2020. Abb. 32.5 zeigt die globalen Verkaufszahlen elektrischer Fahrzeuge sowie ihr Anteil am gesamten Fahrzeugmarkt für die Jahre 2010 bis 2020.

Kumuliert wurden im Jahr 2020 weltweit knapp drei Millionen elektrisch angetriebene Fahrzeuge verkauft. Das entspricht einem Marktanteil von 4,2 %. Der Vergleich mit den knapp 8000 verkauften Einheiten im Jahr 2010, die einem Marktanteil von weniger als 0,1 % entsprechen, offenbart die stark gewachsene Bedeutung von Elektromobilität für die Automobilbranche.²

²Vgl. International Energy Agency (IEA) 2021.

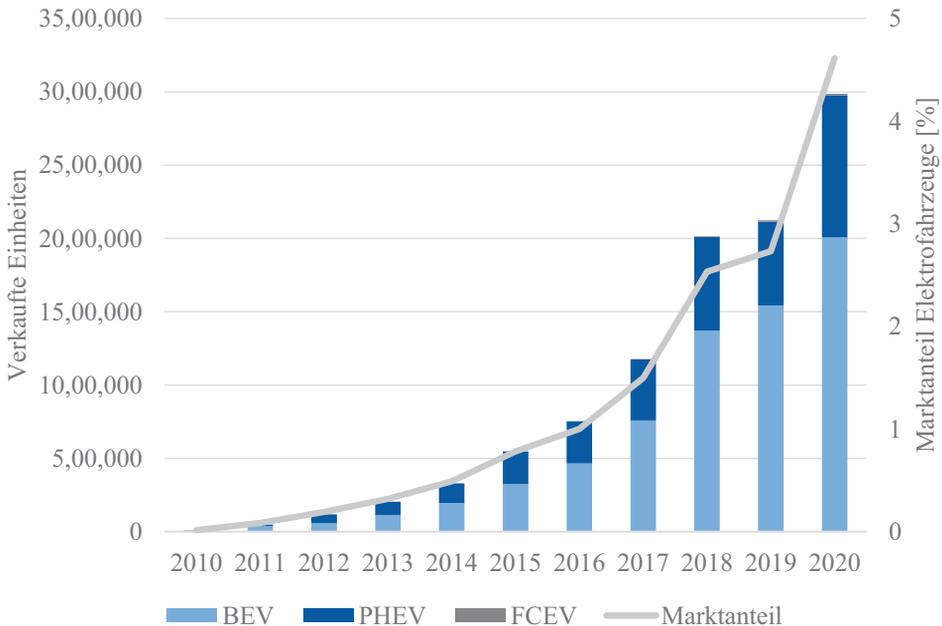


Abb. 32.5 Globale Verkaufszahlen von BEV, PHEV und FCEV zwischen 2010 und 2020 sowie der globale Marktanteil elektrisch angetriebener Fahrzeuge. (Vgl. International Energy Agency (IEA) 2021)

Der Wandel in der Automobilbranche vom Verbrennungsmotor als Antriebsart hin zum Elektromotor bringt auch neue Marktverhältnisse mit sich. Abb. 32.6 führt die zehn Produzenten auf, die 2019 und 2020 die meisten BEV und PHEV verkauft haben. Die beiden nach veräußerten Einheiten größten Automobilproduzenten der Welt – Toyota und Volkswagen³ – waren im Jahr 2019 nicht bei den fünf erfolgreichsten Herstellern von Elektrofahrzeugen vertreten, was sinnbildlich für die Umwälzung der bekannten Machtverhältnisse steht.

Tesla liegt für 2020 genauso wie schon im Jahr 2019 mit großem Vorsprung an der Spitze der Rangliste. Im Jahr 2020 verkaufte das US-amerikanische Unternehmen 499.535 Fahrzeuge, was einem Marktanteil von knapp 16 % auf dem E-Mobil-Sektor entspricht. Dahinter verändert sich das Bild: Nachdem BMW im Jahr 2019 als erfolgreichster europäischer Automobilhersteller auf Rang 5 landete und 128.833 Elektrofahrzeuge verkaufte, konnten vor allem die europäischen Hersteller im Jahr 2020 aufholen. So verdoppelte Volkswagen seinen Marktanteil auf nahezu 7 % (220.220 verkaufte Elektrofahrzeuge) und ist damit der weltweit zweitgrößte Anbieter elektrisch angetriebener Fahrzeuge. In Gestalt von Mercedes, Renault, Volvo und Audi konnten vier weitere Automobilproduzenten mit Sitz in Europa ihre Marktanteile mehr als verdoppeln.

³Vgl. Davis und Inajima 2021.

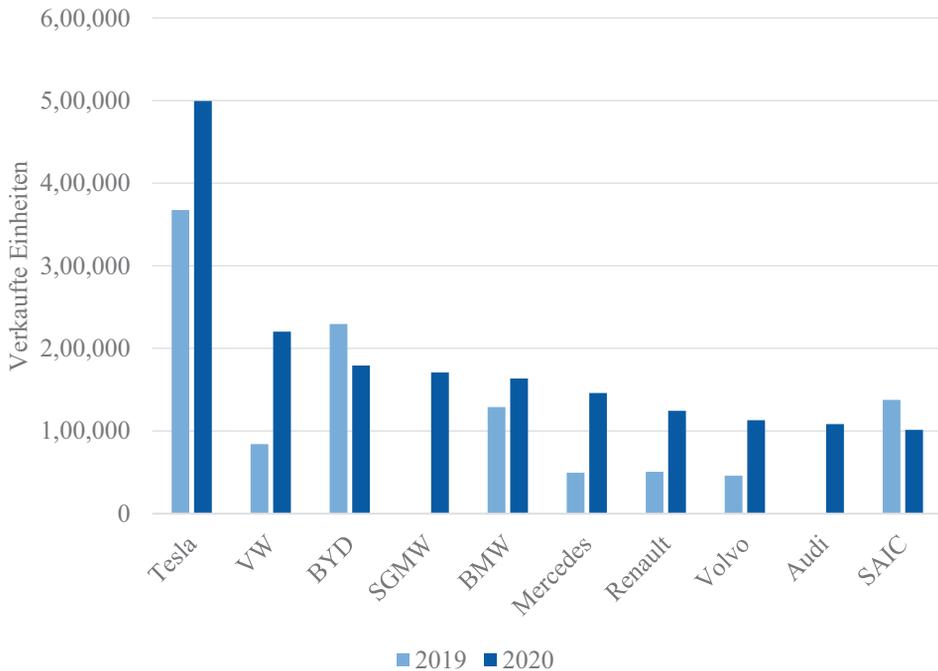


Abb. 32.6 Verkaufszahlen der zehn größten Elektrofahrzeughersteller aus den Jahren 2019 und 2020. (Vgl. Gersdorf et al. 2020, vgl. Kane 2021, vgl. Kane 2020, vgl. Pontes 2021)

BYD und SAIC hingegen verloren im Verlauf des Jahres 2020 nicht nur Marktanteile, sondern verkauften sogar in absoluten Zahlen weniger Elektrofahrzeuge als 2019.

Tesla konnte seine Spitzenposition im Jahr 2020 durch einen gesteigerten Absatz seines „Model 3“ (Platz 1) und die Markteinführung des auf derselben Plattform basierenden „Model Y“ (Platz 4) festigen. Abb. 32.7 bietet einen Überblick zu den zehn meistverkauften Elektroautomodellen aus dem Jahr 2020 und deren Entwicklung im Vergleich zum Vorjahr. Volkswagens starkes Wachstum im Markt für Elektrofahrzeuge ist hauptsächlich dem ersten ausschließlich elektrisch angebotenen Modell der Marke – dem „ID.3“ – zu verdanken. Mit rund 56.500 verkauften Einheiten liegt der „ID.3“ vor den auf Basis bisheriger konventioneller Modelle entwickelten Varianten „e-Golf“ und „Passat GTE“ – und das, obwohl der „ID.3“ erst seit September 2020 erhältlich ist.⁴

Mit Ausnahme des Hyundai „Kona EV“ und des Nissan „Leaf“ sind sämtliche Fahrzeuge in dieser Rangliste ausschließlich mit elektrischem Antrieb erhältlich. Es zeigt sich also, dass die erfolgreichsten Modelle auf dem Markt keine weiterentwickelten Verbrenner sind, sondern Fahrzeuge, die von Grund auf für den elektrischen Antrieb ausgelegt

⁴Vgl. Volkswagen AG 2021.

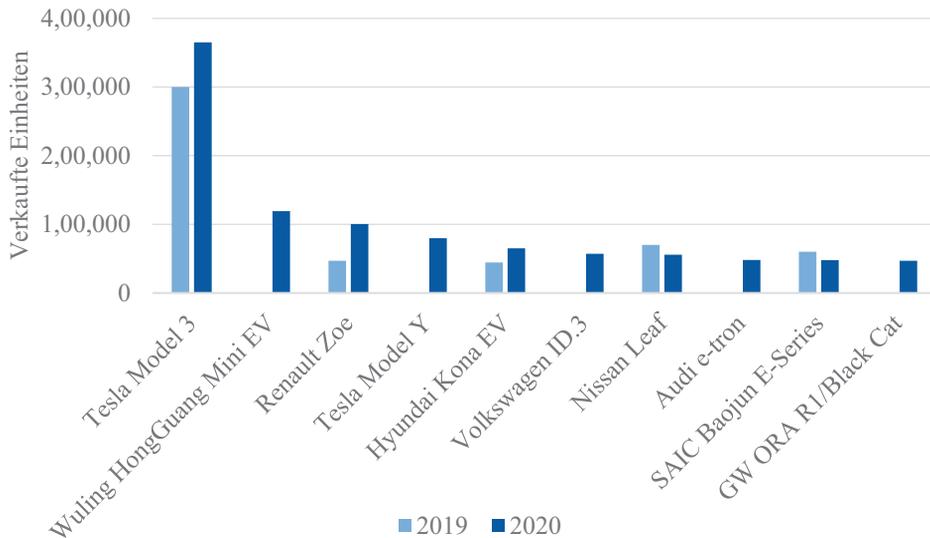


Abb. 32.7 Verkaufszahlen der zehn erfolgreichsten BEV- und PHEV-Modelle im Jahr 2020. (Vgl. Kane 2021, vgl. Kane 2020, vgl. Pontes 2021)

wurden. Volkswagen etwa hat dafür bereits ein eigenes Baukastensystem entwickelt. Neben mehreren Modulen Baukästen für konventionell angetriebene Fahrzeuge hat VW den „Modularen E-Antriebs-Baukasten“ (MEB) entwickelt.⁵

Einen Eindruck von der geografischen Verteilung der Produktionsvolumina von BEV und PHEV vermittelt Abb. 32.8, indem sie die sieben Länder mit der größten Anzahl produzierter elektrifizierter Fahrzeuge miteinander vergleicht. Dazu führt die Grafik die kumulierte Fahrzeugproduktion von 2018 bis 2023 auf. China liegt mit 13.008 Mio. Fahrzeugen deutlich an der Spitze. Deutschland und die USA folgen mit 4408 beziehungsweise 4143 Mio. Einheiten. Die deutliche Spitzenposition Chinas in dieser Rangliste ist auch mit der starken Beteiligung ausländischer Automobilkonzerne zu begründen. Die deutschen Hersteller überholten die chinesische Konkurrenz im Jahr 2020 und bauten mit kumuliert 856.000 Einheiten die meisten Elektrofahrzeuge.⁶

Für einen detaillierteren Überblick zur geografischen Produktionsverteilung soll an dieser Stelle exemplarisch auf die Fertigung der deutschen Hersteller Volkswagen, Porsche, Mercedes-Benz und BMW eingegangen werden.

Volkswagen plant ab dem Jahr 2022, an acht Standorten Fahrzeuge seines „Modularen E-Antriebs-Baukastens“ zu produzieren. In Europa sind dafür Zwickau, Dresden, Mlada Boleslav, Hannover und Emden vorgesehen. In Dresden lief in der Gläsernen Manufaktur im Jahr 2020 die Produktion des „ID.3“ an, nachdem dort zuvor bereits der „e-Golf“ ge-

⁵Vgl. Volkswagen AG 2021.

⁶Vgl. Gersdorf et al. 2020.

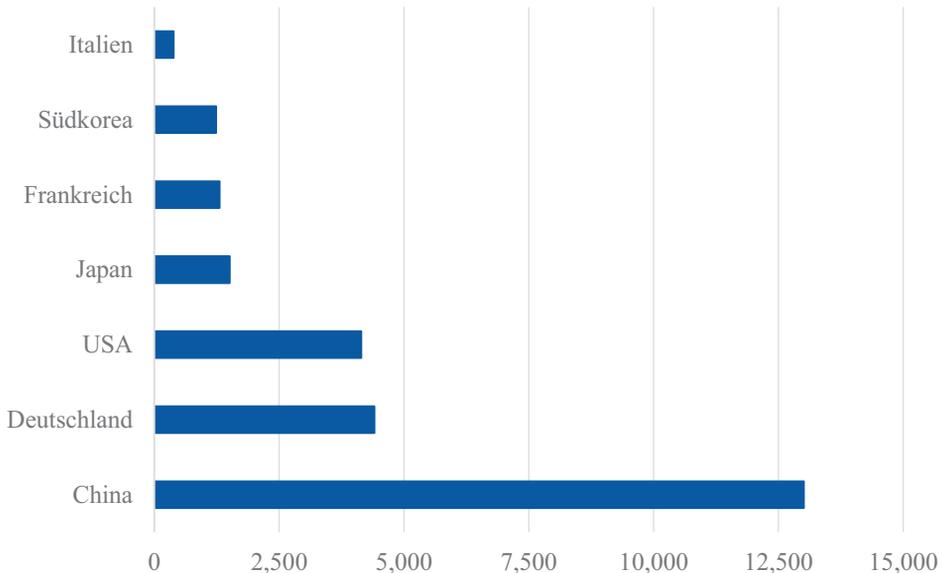


Abb. 32.8 Kumulierte Produktion elektrifizierter Fahrzeuge von 2018 bis 2023 in 1000 Fahrzeugen, sortiert nach Ländern. (Vgl. Bernhart et al. 2021, S. 8)

fertigt wurde. Das Werk Zwickau wurde bereits vollständig auf elektrifizierte Fahrzeuge („ID.3“ und „ID.4“) umgestellt und soll künftig bis zu 330.000 Autos pro Jahr produzieren. Dazu sollen auch Modelle der Marken Audi und Cupra gehören. Im Skoda-Werk Mlada Boleslav wird unter anderem der „Skoda Enyaq iV“ produziert. In Hannover und Emden soll die Produktion von Elektrofahrzeugen im Jahr 2022 anlaufen. Gleiches gilt auch für das Werk in Chattanooga in den USA. Die beiden Werke in China sind bereits in Betrieb. In Anting bei Shanghai ist das erste neugebaute Werk für MEB-Fahrzeuge entstanden. In Foshan werden hingegen konventionelle wie elektrische Fahrzeuge parallel hergestellt. Beide Werke verfügen über eine Kapazität von 300.000 Einheiten pro Jahr.⁷

Porsche produziert seine Fahrzeuge weiterhin ausschließlich in Deutschland. Für den vollständig elektrischen „Porsche Taycan“ wurde das Werk in Zuffenhausen erweitert, die Hybridderivate des „Panamera“ und des „Cayenne“ entstehen zusammen mit den konventionellen Fahrzeugen dieser Modellreihen in Leipzig.⁸

Mercedes-Benz verfolgt hingegen auch für seine rein elektrischen Modelle eine flexible Produktionsstrategie. So werden alle elektrischen Modelle in bestehenden Werken in die Fertigung konventionell angetriebener Fahrzeuge integriert. In Deutschland wird der „EQS“ in Sindelfingen, beginnend im Jahr 2021 der „EQA“ in Rastatt und der „EQC“ sowie der „EQE“ (seit 2021) in Bremen produziert. Weitere Produktionsstandorte in Eu-

⁷Vgl. Volkswagen AG 2021.

⁸Vgl. Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG 2021.

ropa sind Kecskemét in Ungarn für den „EQB“ und Vitoria in Spanien für den „EQV“. Seit 2021 werden im Werk von „Beijing Benz Automotive Co. Ltd.“ (BBAC), dem deutsch-chinesischen Joint Venture von Mercedes-Benz, in Peking gleich vier Modelle für den chinesischen Markt gefertigt: die Baureihen „EQA“, „EQB“, „EQC“ und „EQE“. Im US-Werk in Tuscaloosa wird ab 2022 mit der Produktion der SUV-Derivate von „EQE“ und „EQS“ begonnen. Die Hybridfahrzeuge sind in die Herstellung der konventionellen Autos derselben Modellreihe integriert.⁹

Auch BMW hat die Fertigung seiner elektrifizierten Modelle in die bestehende Produktion integriert. Der vollelektrische „i3“ wird seit 2013 in Leipzig gefertigt. In München wird neben den Hybridvarianten der 3er-Baureihe demnächst auch der „i4“ produziert. Seit 2020 wird zudem der „330e“ in Mexiko im Werk San Luis Potosí hergestellt. Der vollelektrische „Mini SE“ wird zusammen mit den konventionell angetriebenen Fahrzeugen der Baureihe im Mini-Werk im britischen Oxford gefertigt. Die Herstellung der Hybridvarianten der SUVs „X3“ und „X5“ findet im SUV-Werk von BMW im US-amerikanischen Spartanburg statt.¹⁰

Neben der geografischen Verteilung der Produktionsstätten einzelner OEM und der Auflistung der erfolgreichsten Modelle ist auch ein Vergleich zwischen verschiedenen Modellsegmenten hilfreich bei der Erfassung des Wertschöpfungssystems in der Elektrofahrzeugproduktion. Abb. 32.9 gibt dazu einen Überblick zur Anzahl von Fahrzeugmodellen in verschiedenen Segmenten im Jahr 2019, unterteilt nach Antriebsart. Zusätzlich wird die Entwicklung der Fahrzeugsegmente bis 2022 dargestellt, um einen Eindruck des derzeitigen Entwicklungsschwerpunkts zu vermitteln.

Sowohl für batterieelektrische als auch für hybridgetriebene Fahrzeuge ist bis 2022 ein Anstieg der Modellzahlen um mehr als 100 % zu erwarten. Vor allem für die batterieelektrischen Fahrzeuge ist zu erkennen, dass der bisherige Fokus auf der Entwicklung kleiner Fahrzeuge im A- beziehungsweise B-Segment (Kleinst- beziehungsweise Kleinwagen) gelegen hat und diese ungefähr 45 % der verfügbaren Modelle auf sich vereinen. Im D- und E-Segment (obere Mittel- und Oberklasse) waren lediglich 36 vollelektrische Modelle (16 %) weltweit verfügbar. Dies erklärt das bisherige starke Abschneiden von Herstellern kleinerer Fahrzeuge. Im Zuge strenger werdender Emissionsgesetze und technologischer Fortschritte wird für die Jahre von 2020 bis 2022 ein starker Anstieg in den Modellzahlen von C-Segment-Fahrzeugen (Mittelklasse) sowie in der oberen Mittel- und Oberklasse erwartet. Dies wird auch eine Verlagerung der Produktionszahlen zugunsten der Anbieter hochwertiger Fahrzeuge nach sich ziehen.

Bei PHEV ändert sich die Zusammensetzung der Modelllandschaft in der näheren Zukunft nicht grundlegend. Der hauptsächliche Bedarf für die Kombination von Verbrennungs- und Elektromotor besteht bei großen Fahrzeugen der Segmente C bis E. Diese stellen mit 100 Modellen bereits im Jahr 2019 rund 97 % der globalen Modellpalette. Bis 2022 wird sich diese Zusammensetzung nur geringfügig ändern.¹¹

⁹Vgl. Daimler AG 2020.

¹⁰Vgl. BMW AG 2021.

¹¹Vgl. Gersdorf et al. 2020.

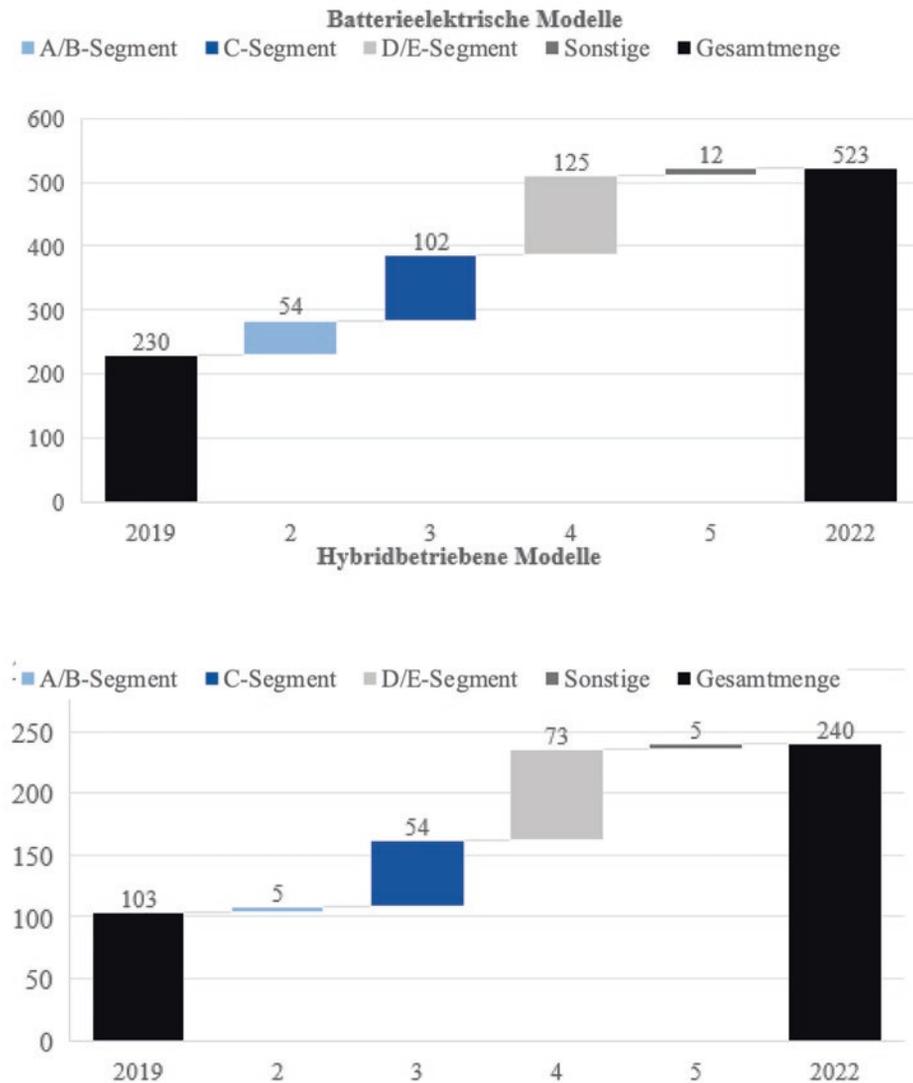


Abb. 32.9 Entwicklung der Modellzahlen von BEV- und PHEV-Modellen zwischen 2019 und 2022. (Vgl. Gersdorf et al. 2020, S. 10)

32.3.2 Zusammensetzung der Wertschöpfung bei der Elektromobilproduktion

Um die Wertschöpfung in der Produktion von Elektrofahrzeugen beurteilen zu können, wird im Folgenden die Veränderung des Materialwerts und des Arbeitsaufwands zwischen einem Auto mit Verbrennungsmotor und einem batterieelektrischen Antrieb verglichen.

Der „Content per Vehicle“ (CPV) ist ein Maß für den Materialwert, der in einem Fahrzeug enthalten ist. Ein Vergleich zwischen dem CPV eines konventionell und demjenigen eines batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugs der oberen Mittelklasse ist Abb. 32.10 zu entnehmen.

Bei Zugrundelegung eines herkömmlichen Verbrenners im oberen Mittelklasse-Segment nimmt der CPV aufgrund der Entfernung aller Bauteile und Komponenten für den Verbrennungsmotor um 31 % ab. Den größten Anteil haben der Motor selbst mit 18 % und das Getriebe mit 9 %. Die Integration eines batterieelektrischen Antriebs bewirkt die Zunahme des CPV um 61 %, so dass ein BEV einen Materialwert in Höhe von 130 % im Vergleich mit einem Verbrenner aufweist. Mit 51 % ist der größte Anteil der Wertzunahme auf die Batterie zurückzuführen. Die Leistungselektronik trägt weitere 6 % bei.¹²

Neben dem Materialwert müssen auch die benötigten Arbeitsstunden zur Produktion eines Fahrzeugs erfasst werden. Der gesamte Arbeitsaufwand verändert sich – entgegen bisheriger Annahmen – nur unwesentlich: Die Arbeitsstunden reduzieren sich durch den Wechsel zur Produktion eines BEV um 1 %. Veränderungen treten in der Verteilung der Arbeitszeit über die verschiedenen Arbeitsschritte auf. Abb. 32.11 gibt dazu einen detaillierten Überblick. Die Arbeitsstunden für die Komponenten- und für die Motorenfertigung sind aufgrund der vereinfachten Bauweise reduziert, jedoch wird diese Arbeitszeit für die Produktion von Batteriezellen, -modulen und -packs benötigt.

Da sich der absolute Arbeitsaufwand nicht verändert ist entscheidend, inwiefern sich die Arbeitsteilung zwischen OEMs und Tier-1-Unternehmen verschiebt. Bisher entfallen 47 % der Arbeitsstunden bei der Produktion eines konventionellen Autos auf OEMs und 53 % auf Tier-1-Unternehmen. Abhängig von der Tiefe der vertikalen Integration der Wertschöpfung des OEM wird dessen Anteil an der Arbeitszeit zwischen 40 und 54 % für batterieelektrische Fahrzeuge betragen. Für Tier-1-Unternehmen bleiben demzufolge 46 bis 60 %.¹³

Insgesamt ändert sich die Wertschöpfungsstruktur mit dem Trend der Elektrifizierung insofern, als dass einige Komponenten, die in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren benötigt werden, wegfallen und durch neue Komponenten ersetzt werden. Prominente Beispiele für neu hinzukommende Komponenten stellen Batterie, Elektromotor und Leistungselektronik dar. Auf der anderen Seite stehen der Verbrennungsmotor, das Getriebe und die Kraftstoffpumpe exemplarisch für Komponenten, die in Elektrofahrzeugen keine Verwendung mehr finden.

Durch die Veränderung der Wertschöpfung wird deutlich, dass es einen erheblichen Anpassungsdruck auf Zulieferer in der Automobilbranche gibt, sich dem Trend der Elektrifizierung anzupassen. Um weiterhin auf dem globalen Markt wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen neue Kompetenzen aufgebaut, die Belegschaft umgeschult und möglicher-

¹²Vgl. Küpper et al. 2020.

¹³Vgl. Küpper et al. 2020.

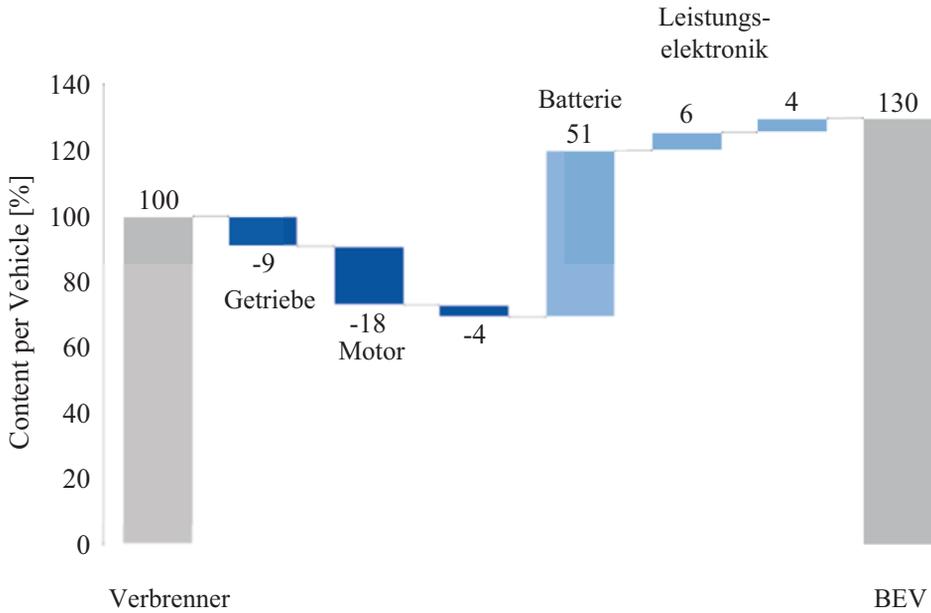


Abb. 32.10 CPV-Vergleich zwischen einem konventionell und einem batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeug. (Vgl. Küpper et al. 2020, S. 4)

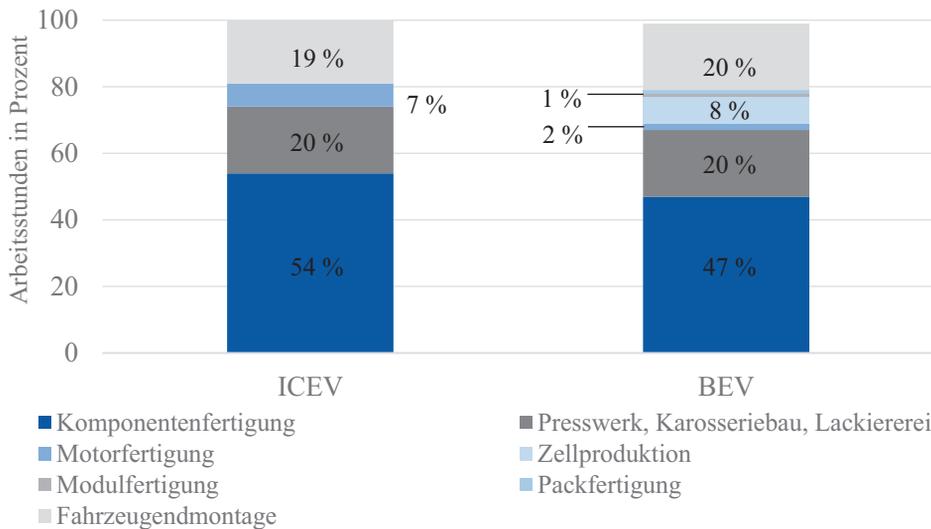


Abb. 32.11 Vergleich der benötigten Arbeitsstunden zwischen ICEV und BEV in Anlehnung an Küpper et al. (2020). (Vgl. Küpper et al. 2020, S. 10)

weise bisherige Produktionsstrategien angepasst werden. Die Herausforderung besteht demnach für Automobilproduzenten darin, ihre Kernkompetenzen innovativ an veränderten Bedürfnisstrukturen auszurichten und die Wachstumspotenziale der Elektromobilität durch Erschließung neuer Geschäftsfelder und Kooperationen mit vor- und nachgelagerten Akteuren entlang der Wertschöpfungskette zu nutzen. Dazu ist eine Neuordnung der Wertschöpfungsaktivitäten notwendig, bei der Kooperationen und Akquisitionen eine entscheidende Rolle spielen. Zusätzlich müssen die regionalen Wachstumspotenziale berücksichtigt werden, damit die Konfiguration des Wertschöpfungsnetzwerks eine optimale Risikoallokation erlaubt.

Zusätzlich zu den Zulieferern sind von der veränderten Fahrzeugstruktur vor allem Werkstätten betroffen, die für die Reparatur und Wartung der Fahrzeuge verantwortlich sind. Auch dort muss Personal umgeschult und müssen Prozesse angepasst werden, um künftig weiterhin wettbewerbsfähig aufgestellt zu sein.

Das Bundesministerium für Wirtschaft schätzt die Wertschöpfungssteigerung eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor zwischen 2019 und 2021 auf 700 €, die mit einem optimierten Antriebsstrang zu begründen ist. Zur Bestimmung der Wertschöpfungsveränderung eines batterieelektrischen Fahrzeugs müssen zunächst die Komponenten für den konventionellen Antriebsstrang herausgerechnet und anschließend die Wertsteigerung durch Integration von Batterie, Elektromotor und Leistungselektronik berücksichtigt werden. Dies führt zu einem Anstieg der Wertschöpfung in Höhe von 4700 € für das untersuchte Fahrzeug der oberen Mittelklasse, der ausschließlich durch den Wechsel der Antriebsart zu begründen ist. Bis 2021 ist mit einer weiteren Wertschöpfungssteigerung um rund 1800 € zu rechnen, die hauptsächlich auf die Bereiche der Elektrik und Elektronik sowie das Interieur zurückzuführen ist. Die qualitative Aufwertung des Antriebsstrangs und kostensenkende Effekte der Effizienzsteigerung heben sich gegenseitig auf.¹⁴ Gegenüber einem herkömmlich angetriebenen Fahrzeug der oberen Mittelklasse war folglich bis zum Jahr 2021 von einer gesteigerten Wertschöpfung von 5800 € auszugehen. Allerdings profitieren von dieser Wertschöpfungssteigerung nicht die Automobilhersteller, sondern insbesondere die Zulieferer von Batteriezellen und Leistungselektronik. Wie bereits erläutert, stellt die Batterie den größten Materialwert eines Elektrofahrzeugs dar. Solange die Automobilhersteller nicht selbst in die Produktion von Batteriezellen einsteigen, werden sie an der Wertschöpfung in diesem Bereich nicht teilhaben können. Im Gegenzug verlieren sie Anteile an der Wertschöpfung durch den Entfall der Verbrennungsmotors, der seit jeher Kernstück der eigenen Entwicklung und Produktion gewesen ist. Durch die Auslagerung des Herzstücks des Fahrzeugs verlieren die Automobilhersteller insgesamt Anteile an der Wertschöpfung und müssen sich trotz einer insgesamt steigenden Wertschöpfung auf geringere Margen einstellen.

¹⁴Vgl. Kaul et al. 2019, S. 123ff.

32.3.3 Batterie: Rohstoffe, Zellen, Komponenten

Eine entscheidende Komponente für die Elektrifizierung des automobilen Antriebsstrangs ist abgesehen vom Elektromotor vor allem die Traktionsbatterie. Als wertvollstes Bauteil des Elektrofahrzeugs macht sie rund 40 % der Wertschöpfung aus. Die Lithium-Ionen-Batterie stellt dabei kurz- und mittelfristig die attraktivste Alternative zur Energiespeicherung im Antriebsstrang dar. Im Vergleich zu anderen Energiespeichertechnologien überzeugt die Lithium-Ionen-Batterie durch eine hohe Energie- und Leistungsdichte. Die Energiedichte der Batterie bestimmt die mögliche Reichweite des Elektrofahrzeugs, während die verfügbare Leistungsdichte vorgibt, wie schnell die notwendige Energie aus der Batterie abgegeben beziehungsweise aufgenommen werden kann. Diese Eigenschaft gewinnt aufgrund der Schnellladefähigkeit an Bedeutung und birgt zusätzliches Marktpotenzial.¹⁵ Mittlerweile haben sich fast durchweg Lithium-Ionen-Akkumulatoren als Energiespeicher für Fahrzeuge durchgesetzt. Eine weitere Steigerung der Energiedichte wird von Neu- und Weiterentwicklungen wie der Festkörperbatterie („All-Solid-State-Battery“) sowie der Lithium-Schwefel- oder der Lithium-Luft-Batterie erwartet. Als problematisch gelten dabei neben technischen Schwierigkeiten jedoch noch die geringe Leistungsdichte und die daraus resultierenden relativ langen Ladezeiten. Zusammenfassend lassen sich die marktseitigen Anforderungen an die Technologie in Verbesserungen der Energiedichte, der Leistungsdichte, der Kostenstruktur, der Sicherheit, der Lebensdauer und der Umweltverträglichkeit kategorisieren.¹⁶

Der Markt für Lithium-Ionen Akkumulatoren ist schon heute enorm groß, und aktuelle Prognosen sind sich darin einig, dass das Marktvolumen in den kommenden wenigen Jahren weiterhin stark wachsen wird. Dabei ist die Elektromobilität der wesentliche Treiber – und hier sind es vor allem der Pkw-Bereich und der Sektor der leichten Nutzfahrzeuge. So prognostizieren sämtliche Studien trotz teils unterschiedlich optimistischer Annahmen mit Blick auf die künftige Entwicklung – unter anderem hinsichtlich politischer Rahmenbedingungen für die Elektromobilität –, dass die benötigten Batteriekapazitäten in den nächsten Jahren deutlich ansteigen werden und dass sie in der Intensität des Anstiegs jedoch variieren (vgl. Abb. 32.12). Obwohl Deutschland nur einen kleinen Marktanteil innehat, lag der Umsatz der deutschen Batteriebranche im Jahr 2020 bei 4,65 Mrd. €. ¹⁷ Allerdings teilen noch immer einige wenige Hersteller den internationalen Markt für Elektrofahrzeugbatterien unter sich auf. So sind die größten Produzenten von Lithium-Ionen-Akkumulatoren nach Absatz im Jahr 2017 Samsung SDI (aus Südkorea, mit 1,3 Mrd. Zellen), Panasonic (Japan, 1,3 Mrd. Zellen), LG Chem (Südkorea, eine Milliarde Zellen), ATL (USA, 660 Mio. Zellen) und Lishen (China, 400 Mio. Zellen). ^{18,19}

¹⁵ Vgl. Bertram et al. 2014.

¹⁶ Vgl. Jiang und Zhang 2015.

¹⁷ Vgl. Breitkopf 2021.

¹⁸ Vgl. Global Information, Inc. 2018.

¹⁹ Vgl. Breitkopf 2020.

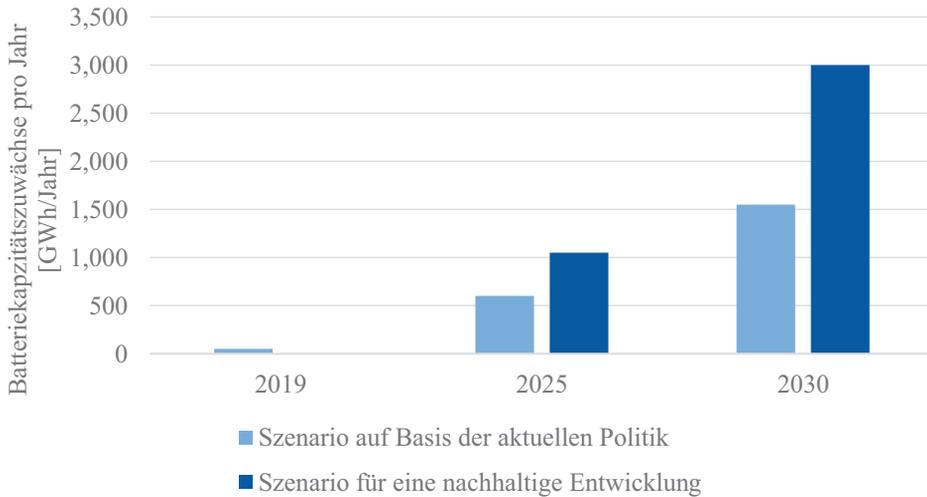


Abb. 32.12 Zuwächse in der globalen Batteriekapazität pro Jahr. (Vgl. International Energy Agency (IEA) 2020)

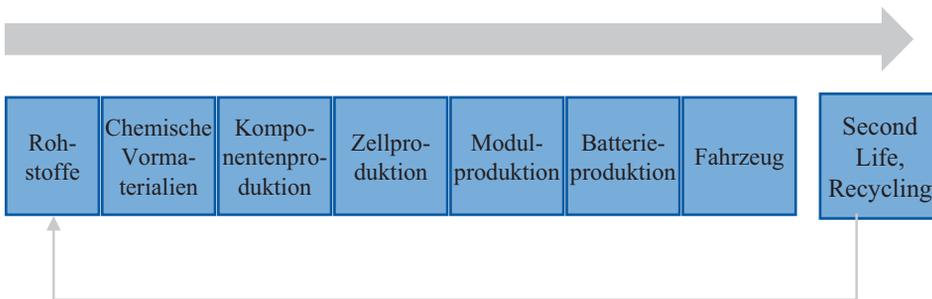


Abb. 32.13 Wertschöpfung im Bereich Fahrzeugbatterie in Anlehnung an Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) (2019). (Vgl. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) 2019)

Die Wertschöpfung einer Lithium-Ionen-Batterie reicht von der Extraktion und Verarbeitung der Rohstoffe über chemische Vormaterialien und über die Zell-, Modul- und Packproduktion bis hin zur Integration ins Fahrzeug und ein anschließendes Recycling (vgl. Abb. 32.13).

Die Kathodenmaterialien zählen zu den zentralen Bestandteilen von Lithium-Ionen-Batterien, bestimmen rund 70 % der Materialkosten einer Zelle und sind unter anderem ausschlaggebend für die Effizienz, die Kosten, die Lebensdauer und die Größe der Batterie. Aus diesem Grund nehmen diese Rohstoffe eine zentrale Rolle für eine europäische Wertschöpfungskette ein.²⁰ Die Materialien, die für die Anodenherstellung benötigt wer-

²⁰Vgl. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) 2019.

den, verursachen ebenfalls einen hohen Kostenanteil der Batterie und werden hauptsächlich von einem Oligopol weniger asiatischer – häufig chinesischer – Zulieferer gefertigt.²¹ Wichtige Rohstoffe, auf denen die Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien basiert, sind neben Lithium unter anderem Nickel, Mangan, Kobalt, Silizium und Graphit.

Die Batteriezellen machen 60 bis 70 % der Wertschöpfung einer Traktionsbatterie aus. Bisher werden die Zellen jedoch nahezu ausschließlich in Asien gefertigt, weshalb europäische Fahrzeughersteller auf Kooperationen oder Importe angewiesen sind. Eine rein europäische Wertschöpfungskette ist daher aktuell nicht möglich. Die europäischen Automobilhersteller, die an der Batterieproduktion partizipieren möchten, sind an der Stack- und Modulproduktion beteiligt, die einem geringen Anteil an der Wertschöpfung entspricht.^{22,23}

32.3.4 Elektromotor und Leistungselektronik

Abgesehen von der Batterie sind der Elektromotor und die Leistungselektronik weitere zentrale Komponenten im Fahrzeug und sollen im Folgenden ebenfalls kurz beleuchtet werden. Im Bereich der Antriebe spielen deutsche Unternehmen wie auch schon bei den Verbrennungsmotoren eine wichtige Rolle auf dem internationalen Markt. Im Zeitraum von 2011 bis 2018 entfielen 34 % der Patente, die in der Automobilindustrie im Bereich der Elektroantriebe in Europa angemeldet wurden, auf deutsche Hersteller und deren Zulieferer.²⁴ Darauf folgen Japan mit 25 % und die USA mit 16 % (vgl. Abb. 32.14). Insgesamt gelten Elektromotoren als Komponente mit sehr hoher Marktreife außerhalb der Automobilindustrie. Die eingesetzte Technologie und die Dimensionierung des Motors im Fahrzeug werden unter anderem durch die geforderte Leistung, die Kosten und den zur Verfügung stehenden Bauraum bestimmt, und sie werden in der Regel durch die Anforderung einer hohen Leistungsdichte als permanenterregte Synchronmaschine eingesetzt. Auch im Elektromotor sind seltene Rohstoffe vorhanden, was ähnlich wie bei der Batterie zu Abhängigkeiten und Engpässen führen kann, so dass auch hier die aktuelle Forschung bezüglich der Materialien ansetzt.²⁵

Die Leistungselektronik gilt als dritte wesentliche Komponente eines elektrischen Antriebsstrangs in E-Mobilen. Neben der Elektrifizierung resultieren auch die Trends zur Digitalisierung und zur Automatisierung in zusätzlichen Anwendungsfeldern und Ausbaup Optionen für die im Fahrzeug verbaute Leistungselektronik, was einer der Gründe dafür ist, dass der internationale Markt stark wächst. Abb. 32.15 zeigt beispielhaft die Wertschöpfungskette für die Leistungselektronik eines Elektrofahrzeugs. Für deutsche und

²¹ Vgl. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) 2019.

²² Vgl. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) 2019.

²³ Vgl. Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) 2016.

²⁴ Vgl. Kaul et al. 2019.

²⁵ Vgl. Kaul et al. 2019.

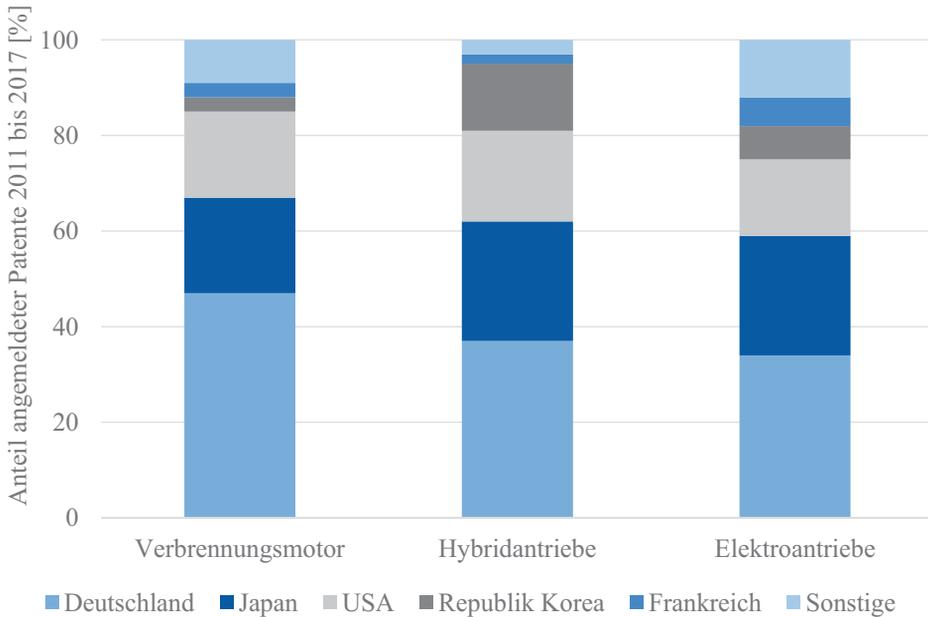


Abb. 32.14 Patentanmeldungen im Bereich des Antriebs. (Vgl. Kaul et al. 2019)

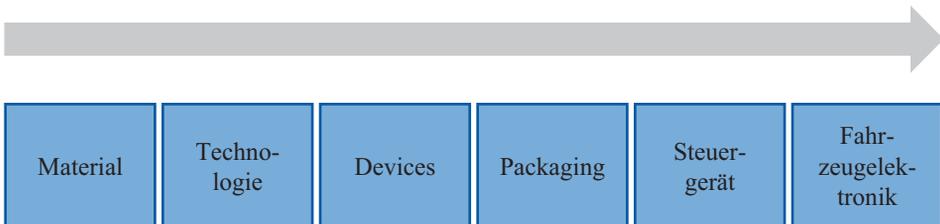


Abb. 32.15 Wertschöpfung im Bereich Leistungselektronik. (Vgl. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) 2019)

europäische Unternehmen ist die Konkurrenz insbesondere in Asien – unter anderem in Japan – zu finden, wo bereits funktionierende Wertschöpfungsnetzwerke für alle wesentlichen Komponenten existieren.²⁶ So besitzt Asien neben relevanten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben von Unternehmen auch eine Reihe renommierter wissenschaftlicher Institute, die Forschung auf dem Gebiet der Leistungselektronik oder einzelner Bauteile betreiben. Neben Japan sind auch China, das sich strategisch auf diesem Gebiet deutlich weiterentwickelt, und die USA zu nennen, wo es ebenfalls zentrales Know-how im Bereich der Leistungselektronik gibt.²⁷

²⁶Vgl. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) 2019.

²⁷Vgl. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) 2019.

Literatur

Teil VI: Geschäftsmodelle entlang der elektromobilen Wertschöpfungskette

- Bernhart, W; Riederle, S; Hotz, T; Olschewski, I; Busse, A.:** *E-Mobility Index 2021*. München, 2021
- Bertram, M; Bongard, S.:** *Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr. Grundlagen, Einflussfaktoren und Wirtschaftlichkeitsvergleich*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014
- BMW AG:** *Produktionsnetzwerk für die Zukunft*. München, 2021
- Breitkopf, A.:** *Größte Hersteller von Lithium-Ionen-Akkus weltweit nach Absatz im Jahr 2017, 2020*
- Breitkopf, A.:** *Deutsche Batteriebranche – Umsatz bis 2020, 2021*
- Daimler AG:** *Elektrisches Produktionsnetzwerk. Sechs neue EQ-Modelle*. Stuttgart, 2020
- Davis, R; Inajima, T.:** *Volkswagen Loses Title of World's Top-Selling Carmaker to Toyota*, 2021
- Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG:** *Die Fabrik der Zukunft – smart, lean und green*. Zuffenhausen, 2021
- Gersdorf, T; Hensley, R; Hertzke, P; Schaufuss, P; Tschiesner, A.:** *The road ahead for e-mobility*, 2020
- Gersdorf, T; Hertzke, P; Schaufuss, P; Schenk, S.:** *McKinsey Electric Vehicle Index: Europe cushions a global plunge in EV sales*, 2020
- Global Information, Inc.:** *Global Small-sized Lithium Ion Secondary Battery Shipment*, 2018
- International Energy Agency (IEA):** *Electric Vehicles*. Paris, 2020
- International Energy Agency (IEA):** *Global EV Data Explorer*. Paris, 2021
- Jiang, J; Zhang, C.:** *Fundamentals and applications of lithium-ion batteries in electric drive vehicles*. Singapur: John Wiley & Sons Inc., 2015
- Kane, M.:** *Global EV Sales For 2019 Now In: Tesla Model 3 Totally Dominated*, 2020
- Kane, M.:** *Global Plug-In Electric Car Sales December 2020: Over 570,000 Sold*, 2021
- Kaul, A; Hagedorn, M; Hartmann, S; Heilert, D; Harter, C; Olschewski, I; Eckstein, L; Baum, M; Henzelmann, T; Schlick, T.:** *Automobile Wertschöpfung 2030/2050*. Berlin, 2019
- Küpper, D; Kuhlmann, K; Tominaga, K; Arora, A; Schlageter, J.:** *Shifting Gears in Auto Manufacturing*, 2020
- Müller-Stewens, G; Lechner, C.:** *Strategisches Management. Wie strategische Initiativen zum Wandel führen*. 3., aktualisierte Aufl. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2005
- Nationale Plattform Elektromobilität (NPE):** *Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion Deutschland*. Berlin, 2016
- Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM):** *1. Zwischenbericht zur Wertschöpfung – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur*. Berlin, 2019
- Pontes, J.:** *Global Electric Vehicle Top 20 – EV Sales Report*. In: CleanTechnica, 2021
- Volkswagen AG:** *E-Auto-Produktion für die Welt*. Wolfsburg, 2021
- Volkswagen AG:** *Mit dem Modularen E-Antriebs-Baukasten (MEB) baut Volkswagen ein Fundament für die Mobilität der Zukunft. Aber wie genau funktioniert der MEB – und wozu brauchen wir ihn? Wir beantworten die zehn wichtigsten Fragen*. Wolfsburg, 2021
- Volkswagen AG:** *Volkswagen brand triples deliveries of all-electric vehicles in 2020*. Wolfsburg, 2021

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Wertschöpfungspotenziale entlang der elektromobilen Wertschöpfungskette

33

Garnet Kasperk, Sarah Fluchs und Julius Hausmann

33.1 Fahrzeugbezogene Potenziale

Das starke Wachstum der Elektromobilität aus der jüngeren Vergangenheit wird sich auch in den kommenden Jahren bis 2030 fortsetzen. Abb. 33.1 gibt einen Überblick zur Entwicklung der Verkaufszahlen von Automobilen, sortiert nach Antriebsart. Zu erkennen ist, dass die Folgen des Corona-Pandemie-Schocks bereits im Jahr 2021 insofern überwunden sind, als dass ein Wachstum in allen Antriebssegmenten zu erwarten war. 2024 soll der gesamte Fahrzeugmarkt – vorbehaltlich anderer weltweit bedeutsamer Entwicklungen – wieder sein Vorkrisenniveau erreichen. Für die Zeit ab dem Jahr 2026 wird prognostiziert, dass die Anzahl der verkauften Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor zurückgeht, im Gegenzug jedoch die Verkaufszahlen für BEV und PHEV weiterhin so stark steigen, dass die Zahl der Gesamtverkäufe weiterwächst. Für 2030 wird erwartet, dass insgesamt 31,2 Mio. Elektrofahrzeuge verkauft werden. Bei einem Gesamtmarkt von knapp 100 Mio. Autos

G. Kasperk (✉)

Leiterin Center for International Automobile Management, Lehrstuhl für Internationale Wirtschaftsbeziehungen, RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: garnet.kasperk@rwth-aachen.de

S. Fluchs

Economist im Bereich Umwelt, Energie, Infrastruktur, Institut der deutschen Wirtschaft, Köln, Deutschland

E-Mail: Fluchs@iwkoeln.de

J. Hausmann

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: julius.hausmann@rwth-aachen.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Kampker, H. H. Heimes (Hrsg.), *Elektromobilität*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-65812-3_33

565

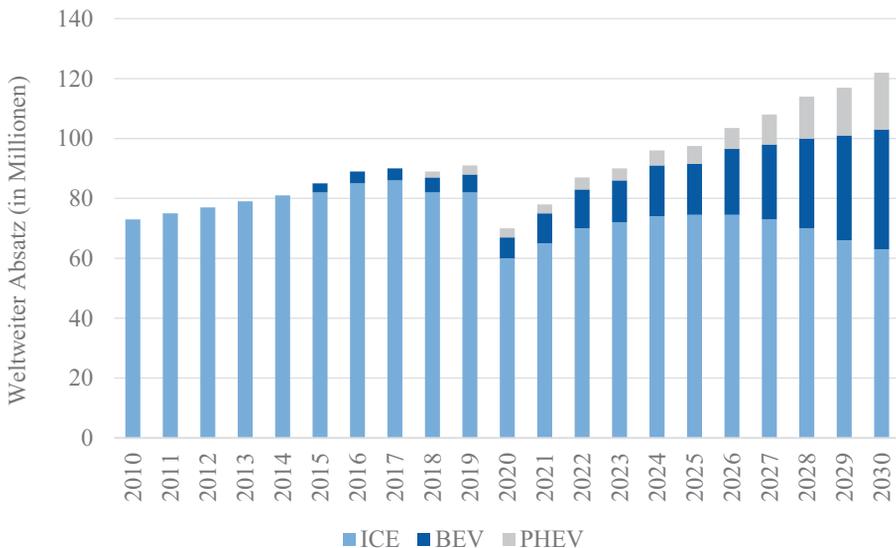


Abb. 33.1 Weltweiter prognostizierter Absatz von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen bis 2030, unterschieden nach Verbrennern, BEV und PHEV. (vgl. Woodward et al. 2020)

entspricht dies einem Marktanteil von rund 35 %. Insgesamt wird für das kommende Jahrzehnt eine durchschnittliche jährliche Wachstumsrate von 29 % prognostiziert.¹

Um dieses kontinuierliche Nachfragewachstum bedienen zu können, müssen OEMs und neue Marktteilnehmer ihre Kapazitäten sukzessive erweitern. Dazu werden bestehende Hersteller wachsen müssen, allerdings werden sich auch neue Marktteilnehmer engagieren. Die überwiegende Mehrheit dieser neuen Marktteilnehmer, die bisher unbekannt sind, wird aus China stammen. Größter bekannter Hersteller wird im kommenden Jahrzehnt Volkswagen sein, vor Tesla und BYD. Insgesamt rechnet die Branche für das Jahr 2030 mit Produktionskapazitäten in Höhe von 35 Mio. Einheiten.²

Zur Realisierung dieser Prognose sind zunächst noch massive Investitionen notwendig – und zwar in nahezu allen Bereichen: Forschung und Entwicklung, Produktion, Vermarktung und Personal.³ Vor allem ist es unausweichlich, die Kosten eines E-Mobils zu senken, um die Profitabilität dieses Fahrzeugsegments zu steigern. Wie bereits in Abschn. 32.3.2 gezeigt, unterscheidet sich der Preis eines Elektrofahrzeugs der oberen Mittelklasse noch deutlich von dem eines herkömmlich angetriebenen Fahrzeugs. Allerdings ist für die erfolgreiche Etablierung des Elektrofahrzeugs im Breitenmarkt ein attraktives Angebot elektrifizierter Kleinwagen elementar. Insbesondere dieses Fahrzeugsegment ist deutlich teurer, wenn es elektrifiziert wird. Daher ist es von großer Bedeutung,

¹ Vgl. Woodward et al. 2020.

² Vgl. Woodward et al. 2021.

³ Vgl. Woodward et al. 2021.

weitere Potenziale zur Kostenreduktion zu finden, um so die Profitabilität von Elektrofahrzeugen aller Größen zu steigern.⁴

Abb. 33.2 bietet dazu eine Übersicht, welche Potenziale zur Kostensenkung sich bereits jetzt ergeben und ausgeschöpft werden können. Aktuell kostet ein BEV aus dem Klein- bis Mittelklassewagensegment rund 34.500 US\$ – und damit 12.000 US\$ mehr als ein vergleichbarer Verbrenner. Es bieten sich jedoch schon kurzfristig Möglichkeiten, diese Differenz um bis zu 7100 US\$ auf 4900 US\$ zu reduzieren.

Dazu bilden eine Vereinfachung des Designs und die Entfernung überflüssig gewordener Komponenten den ersten Schritt. Dafür sollten sich die Hersteller von Elektrofahrzeugen an führenden Konzepten der Branche orientieren. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie als eigenständige BEVs entwickelt werden und somit keine inzwischen verzichtbaren Komponenten enthalten. Somit lassen sich alleine an der Karosserie, im Cockpit und an der Elektronik Bauteile im Wert von insgesamt rund 600 US\$ einsparen. Vorteil ist dabei aus Sicht der OEMs, dass es sich um Produkte von Zulieferern handelt, ihre

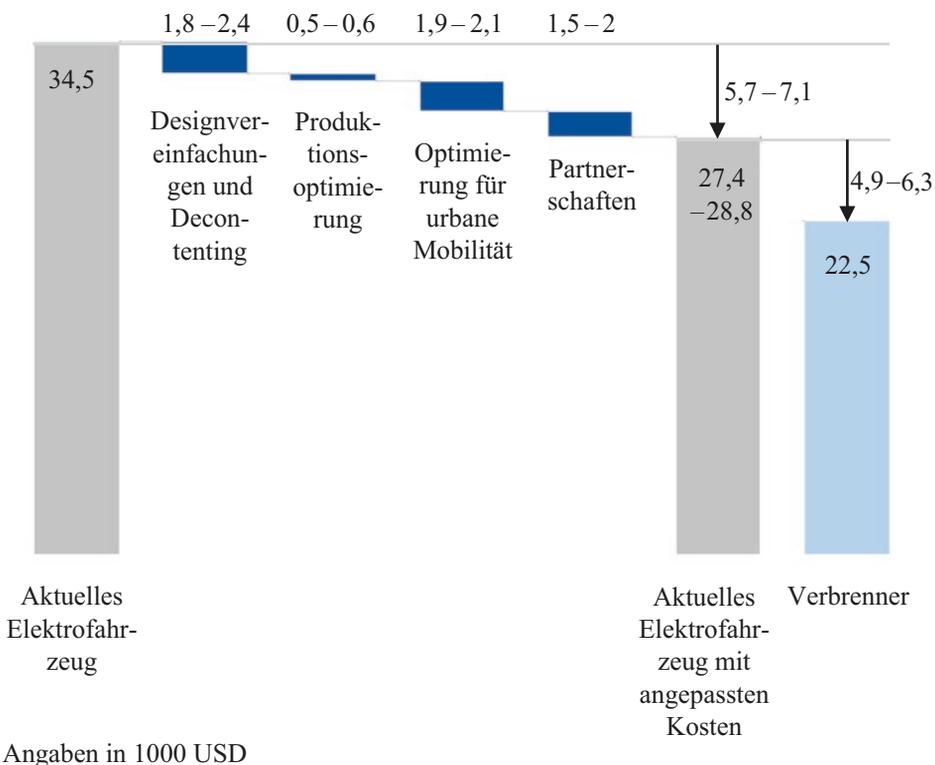


Abb. 33.2 Kurzfristig erreichbare Kostenpotenziale. (vgl. Baik et al. 2019)

⁴Vgl. Baik et al. 2019.

eigene Wertschöpfung also nicht reduziert wird. Die Komplexität der Fahrzeuge lässt sich jedoch weiter vermindern, vor allem durch Änderungen an der Struktur. Grundlage dafür ist allerdings, dass Hersteller eine Modellplattform einzig für BEVs entwickeln und nicht versuchen, sowohl Verbrenner- als auch Elektroautos auf derselben Plattform zu konstruieren und zu fertigen. Durch eine solche eigenständige Plattform werden die gesamte Entwicklung und die Konstruktion erleichtert, und es wird nur eingebaut, was für ein BEV tatsächlich notwendig ist. Beispiele für eine eigenständige Elektrofahrzeugproduktion kommen von reinen Elektroherstellern wie Tesla, aber auch bekannte Größen der Branche wie beispielsweise Volkswagen haben diese Notwendigkeit erkannt.⁵ Zusammen mit weiteren Lerneffekten ergibt sich somit ein Einsparpotenzial in Höhe von bis zu 2400 US\$. Die Entwicklung eigener Modellplattformen für Elektrofahrzeuge bietet Herstellern zudem weitere Wertschöpfungsmöglichkeiten, wenn sie diese an kleinere Fahrzeugproduzenten verkaufen, für die eine eigene Entwicklung finanziell nicht leistbar ist.^{6,7} Die großen Hersteller würden an dieser Stelle die Rolle eines Zulieferers übernehmen und ihre eigene Entwicklung subventionieren können.⁸

Die erwähnte Einführung einer Fahrzeugplattform für ausschließlich elektrische Antriebe ermöglicht darüber hinaus zusätzliche Einsparungen in der Fahrzeugmontage. Sie erlaubt nämlich eine einfachere und optimale Anordnung aller benötigten Komponenten und reduziert auf diese Weise den Aufwand in der Fertigung. Gleiches gilt auch für die Produktionsstraße, auf der die Fertigung erfolgt: Wird sie exklusiv für BEVs genutzt, lässt sie sich optimal an die entsprechenden Bedürfnisse anpassen, wodurch Zeit und Geld gespart werden. Kumuliert sind dadurch Kostenreduktion von bis zu 600 US\$ realistisch.⁹

Darüber hinaus kann eine ausschließlich für BEVs genutzte Fahrzeugplattform auch die entscheidenden Leistungsdaten des Produkts verbessern. Durch eingesparte und besser angeordnete Bauteile werden das Gewicht und der Bauraum reduziert, was eine größere Reichweite, bessere Beschleunigungswerte und einen großzügigeren Innenraum ermöglicht.¹⁰ Um die Entscheidung über die Entwicklung spezieller Elektrofahrzeugplattformen gegenüber universell einsetzbaren Plattformen zu treffen, muss der Hersteller einen Trade-off abwägen. Den Einsparungen in den variablen Kosten, was die Einführung einer zusätzlichen Plattform zur Folge hätte, stehen deutlich höhere Fixkosten in der Entwicklung gegenüber. Zur Beantwortung dieser Frage müssen die geplanten Stückzahlen betrachtet werden. Sofern die Entwicklung einer neuen Fahrzeugplattform beispielsweise mit einer Milliarde US\$ angesetzt wird, müsste ein OEM rund 4000 US\$ pro Fahrzeug einsparen, um bei 50.000 verkauften Exemplaren innerhalb von fünf Jahren die Investition zu amortisieren. Für die großen Konzerne lohnt sich angesichts der in Abb. 33.1 aufgeführten er-

⁵Vgl. Baik et al. 2019.

⁶Vgl. Hanley 2021.

⁷Vgl. Norris 2019.

⁸Vgl. Norris 2019.

⁹Vgl. Baik et al. 2019.

¹⁰Vgl. Hyundai Motor Group 2020.

warteten Volumina also die Einführung einer eigenen Elektrofahrzeugplattform. Für kleinere Anbieter hingegen kann dies vor allem zu Beginn bei niedrigen Produktionszahlen eine Herausforderung darstellen.¹¹

Eine weitere Möglichkeit, die Profitabilität insbesondere kleiner Elektrofahrzeuge zu steigern, ist die Anpassung der Reichweite. Bisher beträgt die realistische Reichweite entweder weniger als 160 km oder sie ist größer als 480 km. Diese Auslegung entspricht indes nicht dem urbanen Mobilitätsmuster, das den Zielmarkt entsprechender BEVs ausmacht. Die städtische Bevölkerung in den USA beispielsweise legt durchschnittlich 32 km täglich im Auto zurück. Erweitert man dies um zusätzliche demografische Gruppen – unter anderem um die Einwohner von Vororten –, erhöht sich dieser Wert auf 48 km. Um über ausreichende Reserven zu verfügen, müsste demzufolge eine Batterie bei derzeitiger Effizienz idealerweise 25 kWh speichern können. Um gelegentliche Ausflüge und längere Strecken zu ermöglichen, würde dieser Wert auf 40 kWh erhöht, was einer Reichweite von 250 km entspricht. Dies wiederum würde zu einer Verkleinerung der Batterien in einem durchschnittlichen Kleinwagen von 50 auf 40 kWh führen. Damit lassen sich bis zu 2100 US\$ pro Fahrzeug einsparen, ohne dass die eigentliche Kundengruppe sich in ihrer Mobilität einschränken muss.¹²

Um ein weiteres Wertschöpfungspotenzial auszunutzen, wird OEMs eine stärkere Ausrichtung auf Partnerschaften und strategische Allianzen empfohlen (siehe Abschn. 34.6). Diese können bereits kurzfristig zu Einsparungen führen und sind vor allem in den kommenden drei bis fünf Jahren sinnvoll. Auf diesem Weg können Ausgaben für Produktionsstandorte, Werkzeuge, aber auch Fixkosten im Bereich der Forschung und Entwicklung sowie Kapitalkosten gesenkt werden. Partnerschaften können dabei mit Konkurrenten ebenso wie mit Unternehmen an anderen Stellen der Wertschöpfungskette geschlossen werden. So wäre es etwa möglich, durch die geschickte Auslegung der Fahrzeugplattform diese für verschiedene Modelle unterschiedlicher Hersteller nutzbar zu machen. Bei noch stärkerer Kooperation lassen sich Skaleneffekte sogar im Bereich der Batteriezellen und -module sowie der Leistungselektronik erzielen. Diese Partnerschaften in der Übergangsphase können Ersparnisse von bis zu 2000 US\$ bewirken.¹³ Damit ergibt sich eine Differenz von 4900 bis 6300 US\$ zwischen einem aktuellen Elektrofahrzeug und einem Verbrenner.

Neben diesen schon jetzt möglichen Steigerungen der Profitabilität wird OEMs eine intensivere Kommunikation der Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen empfohlen.¹⁴ Viele Kunden vergleichen lediglich die Kaufpreise von Elektrofahrzeugen mit denen von Verbrennern und lassen dabei mögliche staatliche Subventionen sowie geringere Unterhaltskosten aus den Augen oder setzen diese zu gering an.¹⁵ Die „Total Cost of

¹¹ Vgl. Baik et al. 2019.

¹² Vgl. Baik et al. 2019.

¹³ Vgl. Baik et al. 2019.

¹⁴ Vgl. Baik et al. 2019.

¹⁵ Vgl. BEUC – The European Consumer Organisation 2021.

Ownership“ (TCO) muss daher besser vermittelt werden, um potenzielle Kunden auch bei höheren Kaufpreisen von einem Umstieg auf Elektrofahrzeuge zu überzeugen.

In der näheren Zukunft bis zum Jahr 2025 ergeben sich zu den bereits genannten Punkten weitere Potenziale, die Profitabilität von Elektrofahrzeugen zu steigern. Abb. 33.3 gibt eine Aufschlüsselung über Möglichkeiten zur Kostenreduktion.

Von der aus Abb. 33.2 verbleibenden Kostendifferenz in Höhe von 4900 bis 6300 US\$ zwischen einem BEV und einem Verbrenner können rund 6200 US\$ durch die im Folgenden vorgestellten Maßnahmen eingespart werden. Mit 5200 US\$ entfällt ein Großteil auf die Traktionsbatterie, den Elektromotor und die Leistungselektronik. Die Batterie stellt den größten Kostenpunkt des gesamten Fahrzeugs dar. Daher wird im folgenden Kapitel explizit auf die Wertschöpfungspotenziale der Batterie eingegangen. Die Einsparungspotenziale stammen zusammengefasst aus einer Reduktion der Batteriepreise, erhöhter Effizienz und einer Verbesserung von Leistungselektronik und Traktionsmaschine.

Zusätzlich sind Einsparungen in Höhe von 500 US\$ durch Skaleneffekte in der Produktion und 500 US\$ als Konsequenz einer gesteigerten Produktivität bis 2025 realistisch. Somit ergibt sich unter Berücksichtigung aller Einsparungspotenziale für 2025 der Break-even-Punkt. OEMs können ab diesem Zeitpunkt vergleichbare Profite wie bei Verbrennern

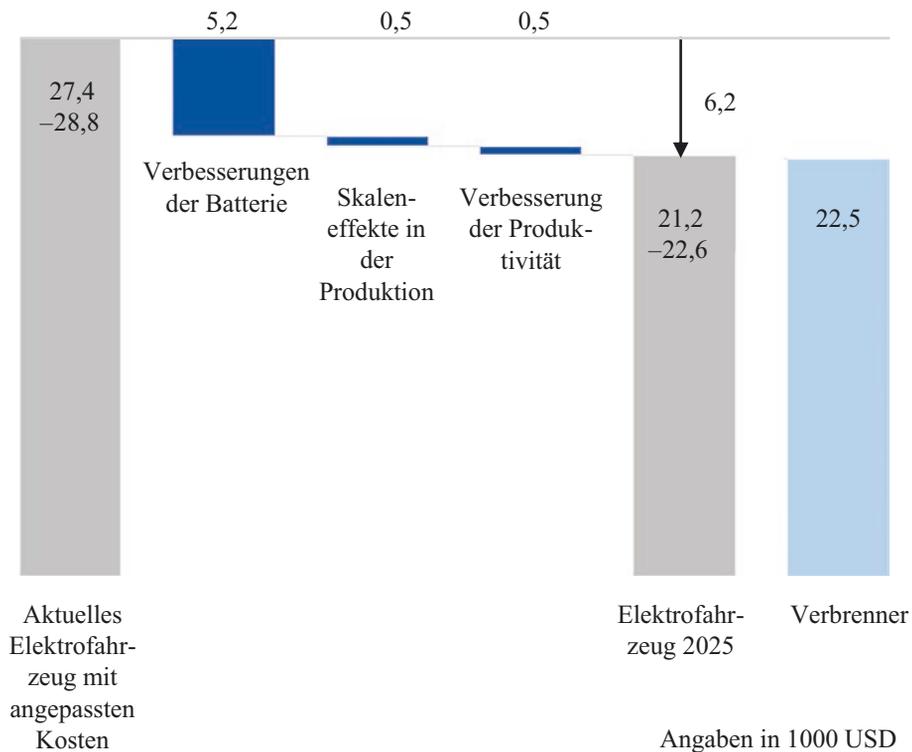


Abb. 33.3 Kostenpotenziale bis 2025. (vgl. Baik et al. 2019)

erwarten. Diese liegen typischerweise im Bereich von 2 bis 3 %.¹⁶ Für die Fahrzeughersteller bieten sich vor allem Wertschöpfungspotenziale durch die Entwicklung und den Vertrieb von Modellplattformen an kleinere Konkurrenten. Alternativ kann dies in Form von Partnerschaften erfolgen, um Entwicklungskosten zu teilen. Weitere Einsparungspotenziale betreffen hauptsächlich die Automobilzulieferer.

33.2 Wertschöpfungspotenziale der Lithium-Ionen-Batterie

Die Traktionsbatterie bietet in vielerlei Hinsicht Möglichkeiten für zusätzliche Preisreduktionen – etwa durch neue Technologien oder höhere Stückzahlen. Allerdings kann es durch die stark erhöhte Nachfrage zu kurzfristigen Lieferengpässen bei einzelnen Rohstoffen und somit zu Preissteigerungen kommen.¹⁷ Bisher sind die Batterien das mit Abstand teuerste Bauteil eines Elektrofahrzeugs und bestimmen dessen Preis in hohem Maße. In Abb. 33.4 sind die Preise für eine Batteriezelle, das Modul und die sich daraus ergebenden Gesamtkosten für die Jahre 2013 bis 2020 in US\$/kWh aufgeführt. Für die Jahre 2023 und 2030 werden lediglich die Gesamtkosten des Moduls geschätzt. Ab 2023 wird ein Gesamtpreis von rund 100 US\$ realistisch sein. Dies wird als Grenzwert betrachtet, um eine Preisparität zwischen Elektrofahrzeug und Verbrenner zu ermöglichen.¹⁸

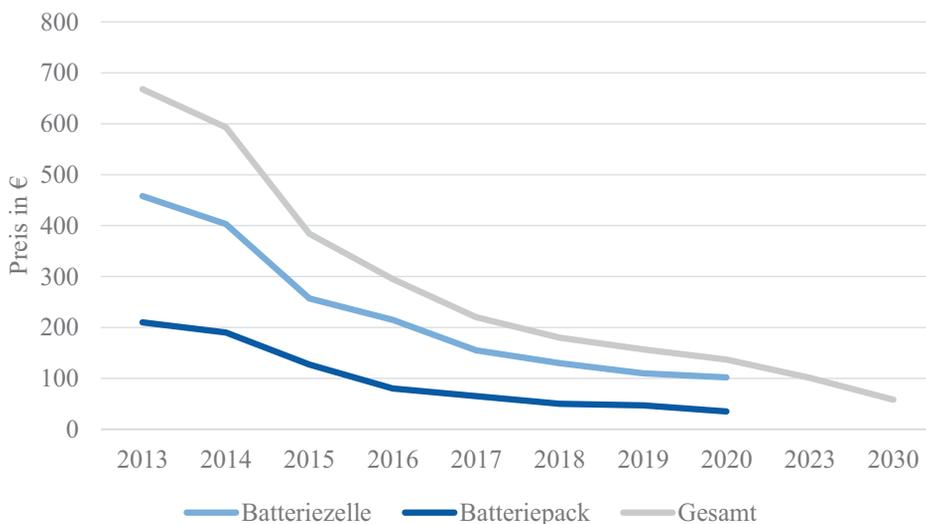


Abb. 33.4 Preise in US\$/kWh für Batteriezellen und -packs sowie das gesamte Modul von 2013 bis 2030 (Werte für 2023 und 2030 prognostiziert). (vgl. Henze 2020)

¹⁶Vgl. Baik et al. 2019.

¹⁷Vgl. Baik et al. 2019.

¹⁸Vgl. Henze 2020.

Die Preise werden allerdings keineswegs statisch bleiben. Dafür haben schwankende Rohstoffpreise einen viel zu großen Einfluss. Wie die Prognose von 58 US\$/kWh im Jahr 2030 erreicht werden soll, ist derzeit unbekannt. Dafür stehen verschiedene technologische Lösungen zur Verfügung.

Die zunehmende Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen in Europa und weltweit wird die Nachfrage von Lithium-Ionen-Batterien erhöhen und große Investitionspotenziale in die Wertschöpfungsnetzwerke mit sich bringen. So prognostiziert die „European Battery Alliance“, dass das europäische Marktvolumen für Elektrofahrzeugbatterien bis zum Jahr 2025 bis zu 250 Mrd. € beträgt.¹⁹ Infolgedessen müssen deutsche und europäische Unternehmen entsprechende Strategien entwickeln, um ihre Bedarfe zuverlässig und langfristig zu sichern und nicht von wenigen – häufig asiatischen – Zellherstellern abhängig zu sein. Basierend auf Forschung und Innovation soll in Europa trotz vergleichsweise hoher Lohn- und Energiekosten eine Batterieproduktion für große Stückzahlen entstehen, wozu bisher zwei „Wichtige Vorhaben gemeinsamen europäischen Interesses“ („Important Projects of Common European Interest“ – IPCEI) gefördert werden, die knapp 60 Unternehmen aus zwölf europäischen Ländern involvieren, davon 15 aus Deutschland. Beteiligt sind unter anderem BMW, Tesla, BASF und Varta. Laut Bundeswirtschaftsministerium sollen durch diese Projekte Zellproduktionskapazitäten von mehr als 180 GWh realisiert werden. Zusätzlich zu diesen geförderten Projekten gibt es sowohl von deutschen als auch von asiatischen Herstellern vielfältige Ankündigungen und bereits erste Umsetzungen für weitere Batteriezellproduktionen in Deutschland.

So baut CATL in Arnstadt seine weltweit erste Batteriefabrik außerhalb Chinas mit einer Kapazität von 14 GWh in der ersten Ausbaustufe, wobei ein weiterer Ausbau bereits geplant ist. BMW ist an CATL beteiligt und hat für die nächsten Jahre bereits Batteriezellen in hohen Stückzahlen bestellt. Ein weiteres prominentes Beispiel ist Tesla mit dem Standort in Grünheide, der laut einer Ankündigung von Elon Musk der weltweit größte Standort zur Batterieproduktion werden und bereits in der ersten Ausbaustufe eine Kapazität von 100 GWh umfassen soll. „Farasis Energy Europa“ mit Daimler als größten Kunden plant eine in der ersten Ausbaustufe 10 GWh große Produktion in Bitterfeld-Wolfen. Volkswagen hat angekündigt, gemeinsam mit Partnern insgesamt sechs Batteriezellproduktionsstätten in Europa zu errichten, die eine Gesamtkapazität von 240 GWh haben sollen. Eine dieser Fabriken entsteht in Salzgitter, wo ab 2024 eine Kapazität von 16 GWh installiert sein soll, die laut offiziellen Plänen bis 2040 noch erweitert wird.

Neben diesen Beispielen gibt es eine Reihe weiterer Projekte und Kooperationen in einem Markt, der hochgradig dynamisch ist. Es zeigt sich jedoch, dass viele große Automobilhersteller mit Zellproduzenten kooperieren – unter anderem, um von deren Know-how zu profitieren. Nichtsdestotrotz gibt es mit Tesla und VW auch Hersteller, die nicht nur auf Kooperationen, sondern teilweise auch auf Unabhängigkeit setzen und eigene Produktionen planen. Um die künftigen Bedarfe zu sichern, sind andere Hersteller – wie

¹⁹Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2021.

BMW und Daimler – an den Zellherstellern beteiligt und haben durch fixe Bestellungen ihre prognostizierten Bedarfe für die nächsten Jahre gesichert.²⁰

Da die Materialkosten den wesentlichen Anteil der Zellkosten ausmachen, muss die Sicherstellung des Zugriffs auf die notwendigen Rohstoffe Kern dieser Strategien sein.^{21,22} Zwar belegen verschiedene Studien, dass die wichtigen Rohstoffe selbst bei schnellem Markthochlauf der Fahrzeuge ausreichen, auch wenn der Absatz von Elektrogeräten parallel dazu ansteigen würde (Fraunhofer ISI, 2020), jedoch ist deren globale Verteilung auf wenige Länder konzentriert.²³ Wichtig ist an dieser Stelle die Unterscheidung zwischen zwei Arten von Rohstoffvorkommen: Während die Reserven mit bestehenden Technologien gewinnbringend gefördert werden können, sind die Ressourcen zwar vorhanden, lassen sich mit bisherigen Technologien heute allerdings noch nicht gewinnbringend abbauen. Markthochlaufszenerarien beziffern einen weltweiten kumulierten Lithiumbedarf bis zum Jahr 2050 von 14 bis 20 Mio. t; in terrestrischen Reserven befinden sich 17 Mio. Tonnen zusätzlich zu den 80 Mio. t Ressourcen. Bei Kobalt wird der kumulierte Bedarf bis 2050 mit sechs bis neun Millionen Tonnen angegeben, es existieren Reserven von sieben Millionen Tonnen und Ressourcen von 25 Mio. t. Bei Nickel ist der prognostizierte weltweite kumulierte Bedarf ebenfalls niedriger als die vorhandenen Reserven und Ressourcen.²⁴ Die nicht exakt vorhersehbare Marktdiffusion von Elektrofahrzeugen sowie Schwankungen in den Preisen der Rohstoffe können dennoch zu temporären Rohstoffengpässen führen. Trotz der ausreichenden Verfügbarkeit der genannten Rohstoffe ist die Tatsache, dass die Vorkommen geografisch auf wenige Regionen beschränkt sind und sie sich in risikoreichen Ländern befinden, in denen zum Teil instabile politische Situationen vorherrschen, ein Faktor, der die Rohstoffversorgung beeinflussen kann. So steht insbesondere der Kobaltabbau im Kongo, wo mehr als 50 % der globalen Reserven zu finden sind, aufgrund umstrittener Abbaubedingungen häufig in der Kritik. Die größten Lithiumvorkommen existieren in Chile, Australien, Argentinien und China, die größten Nickelreserven befinden sich in Indonesien, Australien und Brasilien (vgl. Abb. 33.5).²⁵

Die Folge für deutsche und europäische Unternehmen, die die genannten Rohstoffe zur Produktion ihrer Güter benötigen, ist eine hohe internationale Abhängigkeit hinsichtlich der Rohstoffversorgung.²⁶ Durch effiziente Recycling-Verfahren lassen sich diese Abhängigkeiten reduzieren, indem Primärrohstoffe durch Rezyklate ersetzt und so bereits verwendete Materialien wieder in neuen Batterien als Sekundärrohstoffe eingesetzt werden. Beispielhaft soll an dieser Stelle für Lithium, Kobalt und Nickel angegeben werden, wie hoch das Potenzial der Ressourceneinsparung durch ein Recycling der

²⁰ Vgl. TÜV Nord Group 2021.

²¹ Vgl. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) 2019.

²² Vgl. TÜV Nord Group 2021.

²³ Vgl. Fraunhofer ISI 2020.

²⁴ Vgl. U.S. Geological Survey 2020.

²⁵ Vgl. U.S. Geological Survey 2020.

²⁶ Vgl. Fluchs 2021.

Elektromobilität: Die größten Rohstofflieferanten

Die drei Länder kein Beistriche in Mio. Tonnen

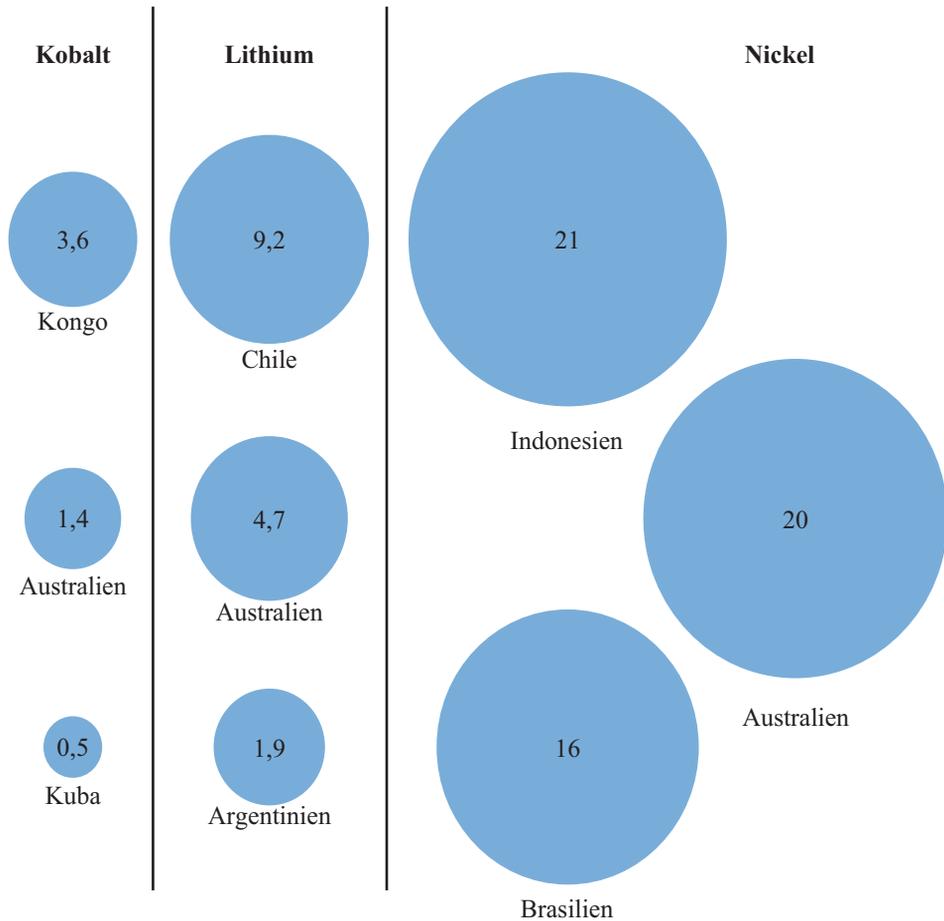


Abb. 33.5 Die jeweils drei größten Rohstofflieferanten für Kobalt, Lithium und Nickel in Millionen Tonnen. (vgl. U.S. Geological Survey 2020)

Lithium-Ionen-Batterien sein kann. Mit angenommenen Sammelquoten zwischen 65 und 90 %, einer durchschnittlichen Batterielebensdauer von 15 Jahren und einer Materialrückgewinnung für Lithium von 70 %²⁷ ist recyceltes Lithium aus Altbatterien schon im Jahr 2040 in der Lage, 10 bis 18 % des europäischen Bedarfs zu decken.²⁸ Dieser Anteil wird aufgrund der Markthochlaufphase in den darauffolgenden Jahren weiter stark wachsen. Für Nickel und Kobalt empfiehlt die EU-Kommission eine Rückgewinnung von

²⁷ Vgl. Europäische Kommission 2020.

²⁸ Vgl. Fluchs 2021.

95 %, was zu einem Potenzial von sogar 13 bis 24 % für beide Rohstoffe führen würde (vgl. Abb. 33.6).²⁹ Somit wird deutlich, dass effizientes Recycling ein zentraler Aspekt für deutsche und europäische Unternehmen sein muss, ihre internationale Abhängigkeit zu reduzieren und zusätzlich eigene Wertschöpfungsketten für die Batterieproduktion basierend auf Sekundärrohstoffen aufzubauen.

Eine weitere Entwicklung, die zu reduzierter Rohstoffabhängigkeit und zur Abkehr von umstrittenen Abbaubedingungen führt, ist die Reduktion des Kobaltanteils. Von ursprünglich 200 g Kobalt je Kilogramm Batteriezelle enthalten die heutigen Lithium-Ionen-Zellen nur noch etwa 60 g je Kilo. Ebenso wurde die Manganmenge reduziert, während die Nickelmenge mehr als verdoppelt wurde. Diese Entwicklung ergibt auch aus finanzieller Sicht Sinn, da eine Tonne Kobalt aktuell rund 42.500 US\$ die gleiche Menge Nickels etwas mehr als 18.000 US\$ kostet. Diese Kostenbetrachtung ist relevant, da die Batterie bekanntermaßen die teuerste Komponente eines Elektrofahrzeuges ist und es auch in Zukunft vorerst bleiben wird, auch wenn der Kostenanteil am Gesamtfahrzeug in den vergangenen Jahren deutlich zurückgegangen ist (vgl. Abb. 33.6).

33.3 Wertschöpfungspotenziale im Bereich Energieversorgung und Ladeinfrastruktur

Ein Großteil der Energieversorgungsunternehmen ist bereits im Geschäftsfeld der Elektromobilität aktiv. In Deutschland und Österreich boten im Jahr 2018 laut einer Studie von PWC etwa 80 % von ihnen öffentliche Ladeinfrastrukturen sowie solche für die kommer-

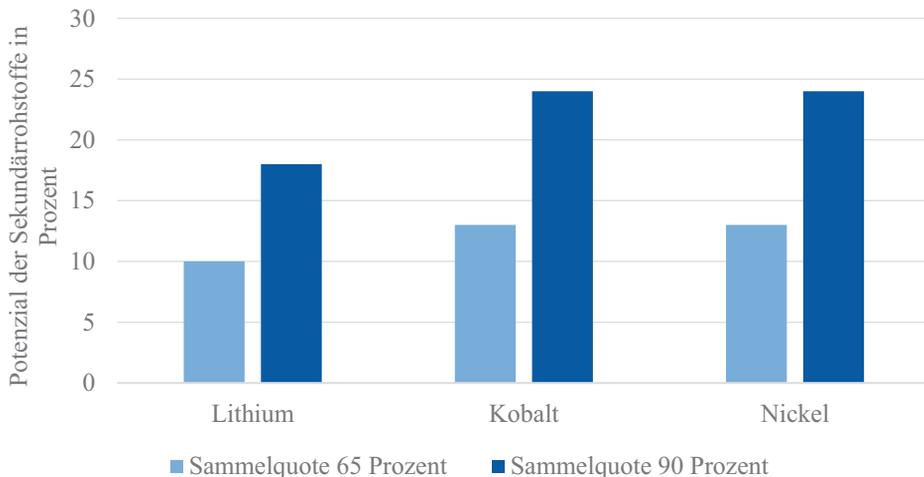


Abb. 33.6 Potenzial der Sekundärrohstoffanteile für neue Elektrofahrzeugbatterien im Jahr 2040. (vgl. Fluchs 2021)

²⁹Vgl. Fluchs 2021.

zielle und die private Nutzung an. Zu diesem Zeitpunkt waren die Investitionsvolumina aufgrund der geringen Gewinnaussichten im Bereich der öffentlichen Ladeinfrastruktur zurückhaltend und traten oftmals in Verbindung mit Förderprogrammen auf.³⁰

Der überwiegende Anteil der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge ist im privaten Raum installiert. Die „International Energy Agency“ schätzt global die Anzahl der privat installierten Ladestellen auf etwa 9,5 Mio., von denen sieben Millionen mit etwa 40 GW Kapazität in Privathaushalten und der Rest von zirka 15 GW an Arbeitsplätzen zur Verfügung stehen.³¹ Bis zum Jahr 2030 wird ein Wachstum auf 105 Mio. installierte Lademöglichkeiten prognostiziert, dann mit einer Gesamtkapazität von 670 GW. Auch zu diesem Zeitpunkt werden etwa 90 % der gesamten Ladepunkte im privaten Raum zu finden sein. Auf China entfallen derzeit mehr als 50 % der öffentlich zugänglichen Langsam-Ladesäulen und etwa 80 % der weltweit installierten Schnellladekapazität (vgl. Abb. 33.7). Die Zahl der Ladepunkte im öffentlichen Raum wird nach konservativem Szenario global bei 14 Mio. und zusätzlichen 2,3 Mio. Schnellladestationen liegen.³²

Diesem Szenario zufolge wird der Strombedarf durch E-Fahrzeuge von 80 TWh aus dem Jahr 2020 auf 525 TWh im Jahr 2030 und damit von 1 % auf 2 % des globalen Stromverbrauchs wachsen.

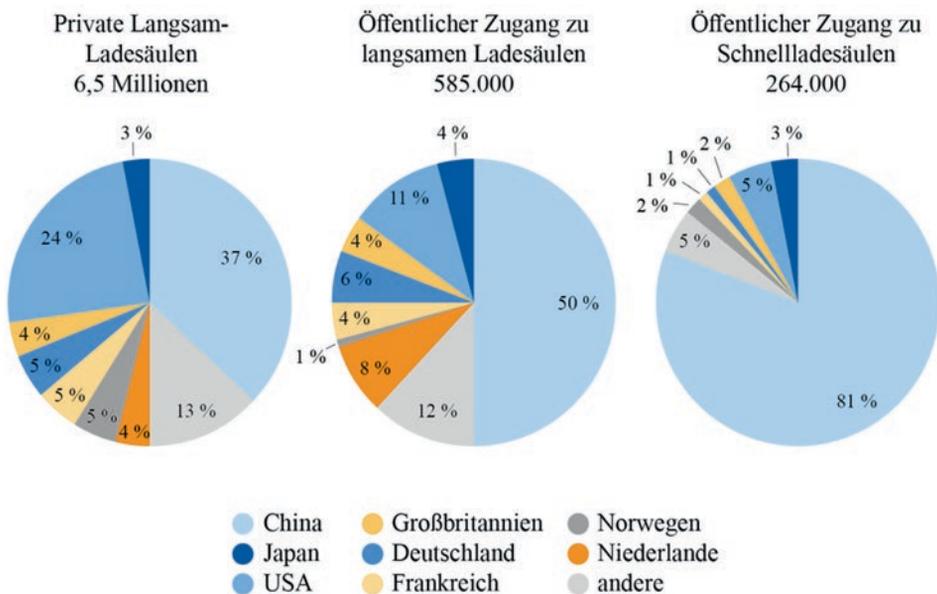


Abb. 33.7 Öffentlicher und privater Zugang zu Ladesäulen pro Land. (vgl. International Energy Agency (IEA) 2021, S. 13)

³⁰Vgl. Otto et al. 2018.

³¹Vgl. International Energy Agency (IEA) 2021, S. 83.

³²Vgl. International Energy Agency (IEA) 2021.

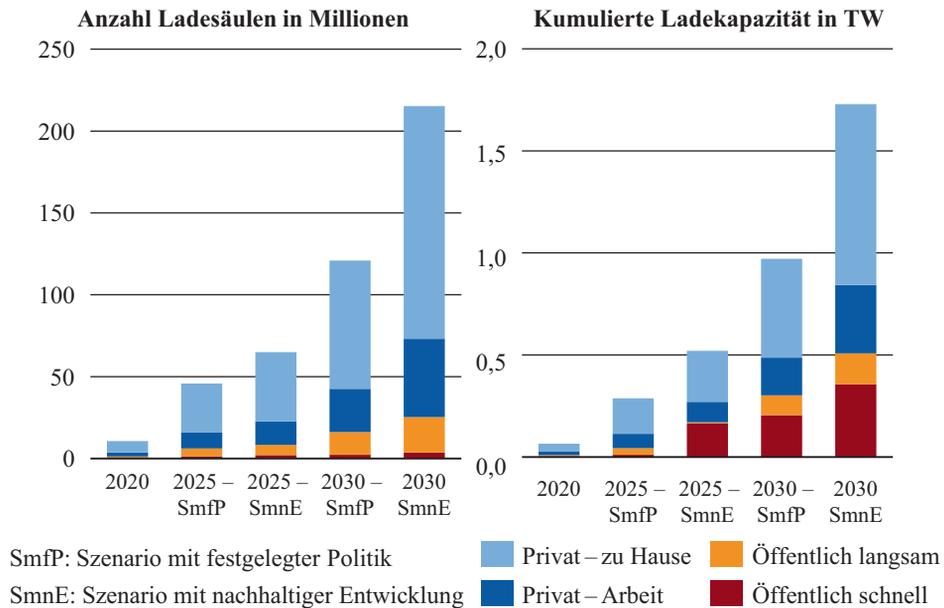


Abb. 33.8 Elektrische LDV-Lader und kumulierte installierte Ladegeschwindigkeit pro Szenario 2020 bis 2030. (vgl. International Energy Agency (IEA) 2021, S. 82)

Der Anteil der im privaten Umfeld stattfindenden Ladevorgänge wird mit steigender Marktdurchdringung der Elektrofahrzeuge und entsprechendem Ausbau der öffentlich zugänglichen Infrastruktur von derzeit etwa 85 % auf 60 bis 70 % sinken (Abb. 33.8).³³

Die öffentliche Ladeinfrastruktur in Europa wächst rasant. Im Jahr 2020 wurde bereits ein Zuwachs von 35 % im Vergleich zum Vorjahr erzielt. Spitzenreiter sind die Niederlande mit 66.000 öffentlichen Ladesäulen, gefolgt von Frankreich mit 46.000 und Deutschland mit 43.000. Bei den Schnellladepunkten – besonders wichtig für BEVs – führt Deutschland mit derzeit zirka 6000.³⁴

In Deutschland teilen sich – bezogen auf die Anzahl der BEVs – sieben E-Autos einen öffentlichen Ladepunkt; PHEV miteingerechnet, sind es 13 Fahrzeuge. Unter Berücksichtigung des prognostizierten Markthochlaufs bis 2030 müssten bis dahin mindestens zehnmal so viele Ladepunkte in Deutschland installiert sein: 440.000 bis 840.000 – abhängig davon, wie viele private Ladepunkte verfügbar sein werden. Politisches Ziel ist es, bis 2030 bei angenommenen neun Millionen E-Fahrzeugen (BEV und PHEV) sechs bis zehn Millionen Ladepunkte zur Verfügung zu stellen.³⁵

Der Ausbau der öffentlichen sowie der privaten Ladeinfrastruktur ist für die Verbreitung der Elektromobilität, die Handhabung über längere Strecken und die Akzeptanz der

³³Vgl. dena 2020.

³⁴Vgl. Windt et al. 2020.

³⁵Vgl. Power2Drive 2021.

Ladenotwendigkeit entscheidend. Bisher hat ein Großteil der europäischen Länder nicht die empfohlene Anzahl öffentlicher Ladepunkte pro Elektrofahrzeug erreicht.³⁶ Der Ausbau der Infrastruktur insgesamt wird durch verwaltungs- und genehmigungstechnische Hindernisse, technische Hürden hinsichtlich unzureichender Elektroinstallationen in Gebäuden und Leistungsanforderungen an die Verteilnetze sowie die hohen finanziellen Kosten aller Maßnahmen erschwert. Daher sind auf vielen Ebenen staatliche Fördermaßnahmen geplant. So werden zum Beispiel vier Milliarden Euro alleine für die öffentliche Infrastruktur zur Verfügung gestellt, und jede private Ladebox wird derzeit mit 900 € gefördert. Zudem wird seit 2021 für größere neue oder umgebaute Wohngebäude der Einbau einer Ladeinfrastruktur zwingend vorgeschrieben.

Weitere Hemmnisse für die Planungen sind die schlechte und unzuverlässige Datenlage mit Blick auf die Stellplätze im Gebäudebestand, die erheblichen räumlichen Unterschiede in der Verteilung der Elektrofahrzeuge (Großstadt versus Land) und das noch unbekanntes Mobilitätsverhalten (Tagesfahrleistung) bei deutlicher Zunahme der E-Fahrzeuge. Ein überregionaler Elektro-Pkw-Verkehr, besonders über Ländergrenzen hinweg, hat im Vergleich zum wahrscheinlich weit dominierenden lokalen E-Verkehr hinsichtlich Platzierung der Ladepunkte, Schnellladefähigkeit, technischer Kompatibilität und Bezahlmodalität noch einmal sehr spezielle Anforderungen.³⁷

Die Investitions- und Betriebskosten für Ladepunkte bilden die Grundlage jedes Betreiber-Geschäftsmodells. Da die öffentliche Ladeinfrastruktur nicht ausreichen wird, die ambitionierten Ausbauziele zu erreichen, kommt der privaten Ladeinfrastruktur nach wie vor große Bedeutung zu. Damit entsteht eine bedeutsame Schnittstelle zwischen Energie- und Wohnungswirtschaft. Letztgenannte ist primär mit den Einrichtungskosten konfrontiert, die stark von den jeweiligen Rahmenbedingungen abhängig sind. Am zuverlässigsten lassen sich die Kosten für die Einrichtung eines privaten Ladungspunkts im Fall eines Einfamilien- oder eines kleinen Mehrfamilienhauses kalkulieren: Sie belaufen sich auf rund 2000 €. Das gilt allerdings nur für den Standard-11-kW-Ladepunkt; eine höhere Leistung oder ein höherer Einrichtungsaufwand lassen die Kosten schnell auf 4000 bis 5000 € steigen.³⁸

Bei größeren Wohneinheiten sind die fehlenden Stellplätze schnell ein limitierendes Element: Beim derzeit frühen Markt stehen mehr als 90 % der Elektro-Pkw auf privaten Stellplätzen. Die Gesamtheit der privaten Stellplätze bildet das theoretische Potenzial für den Aufbau privater Ladepunkte. Diese sind allerdings umso rarer, je städtischer das Wohnumfeld ist: In Metropolen parken mehr als 50 % der Einwohner im öffentlichen Straßenraum. Die Errichtung der notwendigen Voraussetzungen für das Laden ist daher im ländlichen Raum einfacher und kostengünstiger als im innerstädtischen Bereich. Dort

³⁶ Vgl. International Energy Agency (IEA) 2021.

³⁷ Vgl. dena 2020.

³⁸ Vgl. EY 2020.

konzentrieren sich größere Wohnobjekte mit mehr als zehn Stellplätzen, die bislang nur in 4 % ihrer Tiefgaragen über Lademöglichkeiten verfügen.³⁹

In der Konsequenz wird der Aufbau einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur in den Ballungszentren nur durch öffentliche Ladepunkte und ihre massive staatliche Förderung möglich sein. Denn neben den Kosten für Anschaffung, Installation und Verkehrssicherheit müssen die Betriebskosten inklusive Wartung und Abrechnung refinanziert werden. Dadurch liegen die Ladepreise an öffentlichen Stationen über denen, die der Endverbraucher privat bezahlt, was das Laden an öffentlichen Ladepunkten wenig attraktiv macht. Das ladeinfrastrukturbezogene Angebot wird oftmals durch Abrechnungsoptionen, Datenmanagement und weitere Dienste ergänzt, etwa Apps zur Routenoptimierung im Zusammenhang mit öffentlich zugänglichen Ladeinfrastrukturen.

33.4 Wertschöpfungspotenziale im Bereich Dienstleistungen

Ein Angebot der Elektromobilität für Kunden integriert Fahrzeug, Ladeinfrastruktur und Abrechnungsdienstleistungen. Unabhängig von der Elektrifizierung des Antriebsstrangs ermöglicht die Analyse fahrzeug- und nutzerbezogener Daten sowie die zunehmende Vernetzung des Fahrzeugs mit seiner Umgebung die Entwicklung dienstleistungsorientierter Angebote. Mobilitätsorientierte Angebote wie etwa Carsharing flexibilisieren die Nutzung von Fahrzeugen; Informationen zu Parkräumen oder angrenzenden Mobilitätsangeboten optimieren das Nutzungsverhalten im Mobilitätskontext. Direkt der Elektromobilität zurechenbar sind infrastrukturorientierte Dienstleistungen, beispielsweise Abrechnungssysteme und das Anzeigen freier Ladesäulen. Fahrzeugbezogene Dienstleistungen wie Informationen über den Ladestand der Batterie sowie die Reichweite, anstehende Werkstattbesuche oder allgemeine Auskünfte zum Fahrzeug unterstützen den Nutzenden im Umgang mit seinem Fahrzeug, während weitergehende Angebote in Bezug auf Entscheidungen des täglichen Lebens datenbasiert und personalisiert („Connected Life“) in den kommenden Jahren ein großes Mehrwertpotenzial bieten. Energie- und ladebezogene Dienste mit Blick auf das Fahrzeug werden zunehmend auf den gesamten heimischen Kontext ausgeweitet. Anbieter der Elektromobilität weiten ihren Service im Rahmen ihrer Ökosysteme aus und überschreiten mit ihren Angeboten auch die Grenzen zu anderen Ökosystemen (vgl. Abb. 33.9). Es werden systemische Angebote entwickelt, die über Mobilitätslösungen oder Lösungen der Energieversorgung weit hinausgehen.

Der Markt für Mobilitätsdienstleistungen wird laut Schätzungen von Deloitte bis zum Jahr 2035 um jährlich 11 % wachsen.⁴⁰ Er ist allerdings sehr kompetitiv. Neue Anbieter einerseits und netzwerkbasierte Provider wie „Uber“ andererseits machen eine Positionierung für klassische Automobilunternehmen mit einem profitablen Geschäftsmodell

³⁹Vgl. EY 2020.

⁴⁰Vgl. Schiller et al. 2020, S. 47.

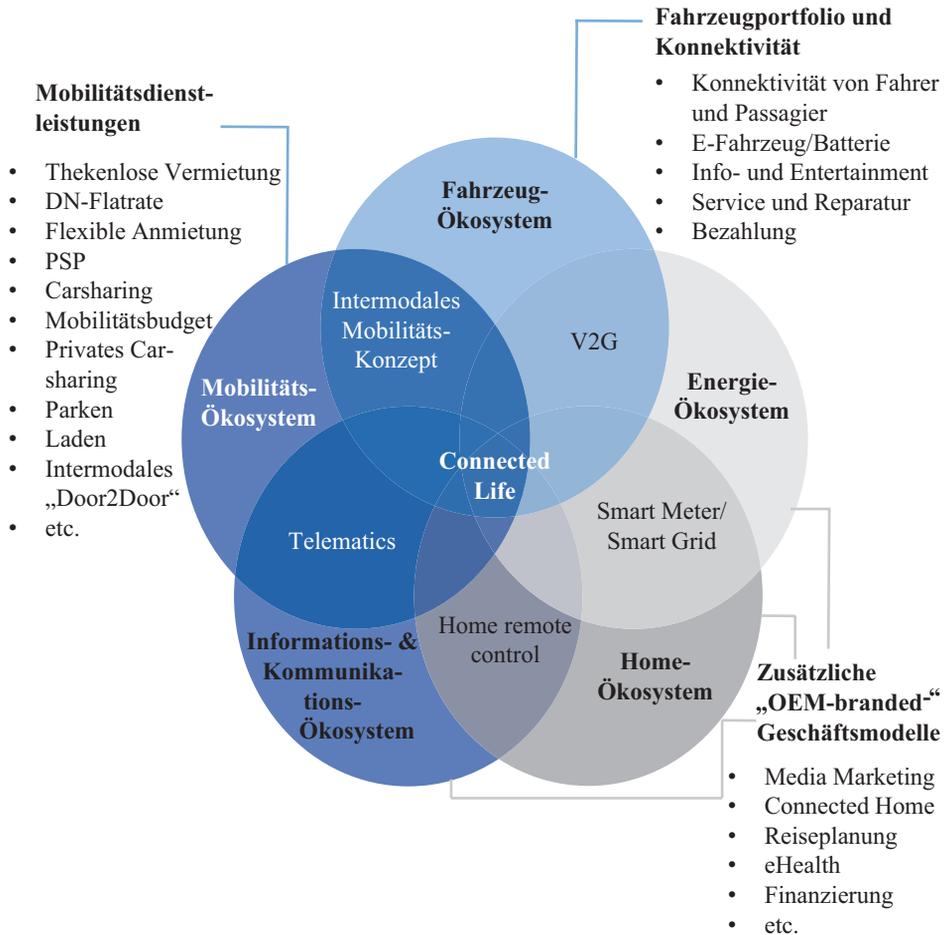


Abb. 33.9 Industrieübergreifende digitale Geschäftsmodelle. (vgl. Bentenrieder et al. 2017, S. 8)

schwierig. Dennoch haben sich insbesondere die deutschen Automobilproduzenten mit einem breiten Portfolio von Mobilitätsdienstleistungen positioniert.

Wertschöpfungspotenziale durch plattformbasierte Angebote („Car as a Platform“) werden als hoch eingestuft. Deloitte rechnet mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 20 % vom bisher niedrigen Niveau ausgehend bis 2035.⁴¹ Im Jahr 2030 werden etwa 95 % aller verkauften Fahrzeuge vernetzt sein und 60 bis 70 % der in den USA und Europa veräußerten Neuwagen das in Abb. 33.10 dargestellte dritte Level erreicht haben. In Abhängigkeit von diesem Level schätzt McKinsey für das Jahr 2030 das durchschnittliche zusätzliche Umsatzpotenzial je Fahrzeug auf 130 bis 210 US\$ für

⁴¹Vgl. Schiller et al. 2020, S. 47.

Das McKinsey Connected Car Kundenerlebnis-Gerüst beschreibt fünf Ebenen des Kundenerlebnisses in Connected Cars.

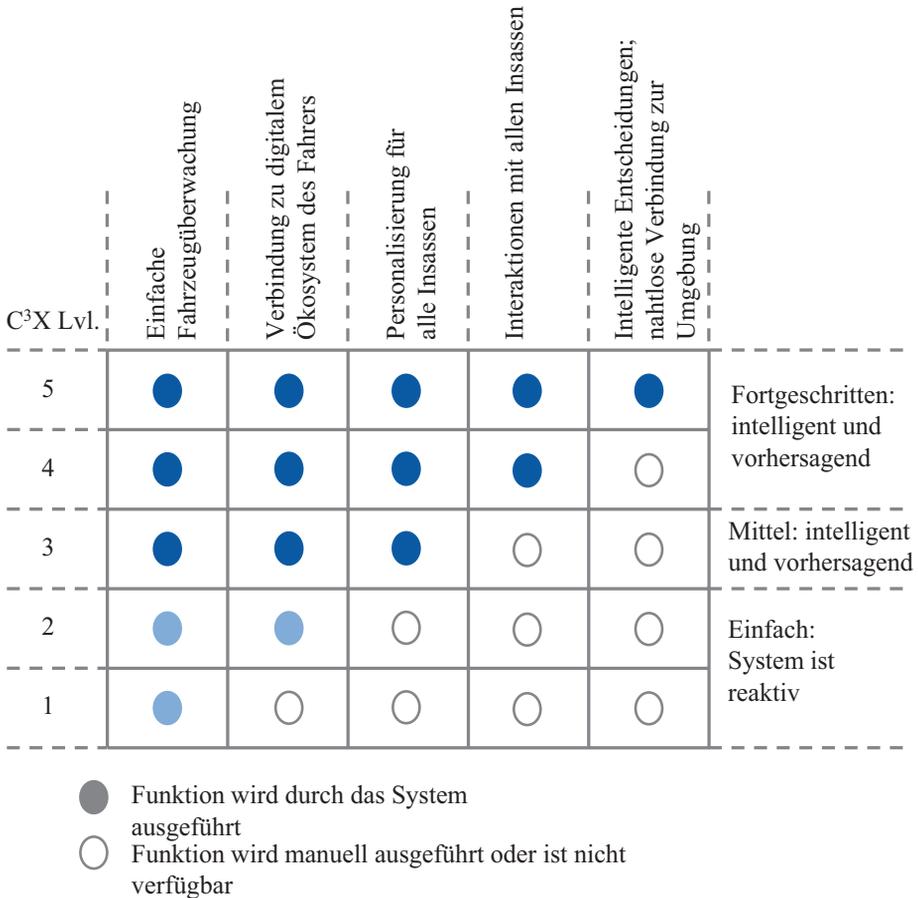


Abb. 33.10 Kundenerlebnis „Connected Car“ in Anlehnung an das fünfstufige McKinsey-„Connected-Car“-Kundenerlebnis-Gerüst. (vgl. Bertoncetto et al. 2021, S. 6)

Level-1-Fahrzeuge und 400 bis 600 US\$ für Level 4 und 5 pro Jahr. Zusätzlich werden Kosteneinsparungen von durchschnittlich 180 US\$ pro Jahr erwartet.⁴²

Plattformbasierte Lösungen eröffnen Nutzern eines vernetzten Fahrzeugs den Zugang zu digitalen Diensten. Verschiedene Produkthanbieter und Dienstleistungsunternehmen erbringen Leistungen für den Service-Nutzenden, die durch den Plattformbetreiber zu Mehr-

⁴²Vgl. Bertoncetto et al. 2021, S. 10.

wertdiensten aggregiert werden. Das Frontend als Interaktionsbereich mit dem Benutzenden wird sichtbar durch Smartphone-Applikationen, Infotainmentsysteme und Webportale.⁴³ Unternehmen wie Google und Apple bieten mit „CarPlay“ und „Android Auto“ ihre Lösungen zur Integration des Smartphones an. Das Backend umfasst beispielsweise Standards, Werkzeuge, Schnittstellen und Rahmenbedingungen für rechtssichere Kooperationen, die für die Kollaboration der Beteiligten des Plattform-Ökosystems notwendig sind.⁴⁴ IT-Dienstleister bieten den Backend-Betrieb an, wobei die deutschen Premium-Hersteller an der Entwicklung ihrer eigenen Software-Architekturen arbeiten, um in Bezug auf das Management ihrer Kundenbeziehungen unabhängig zu werden und über „Connected Car“-Angebote zusätzliche Umsätze zu generieren. Für ein systemisches Angebot, das zahlreiche Lebensbereiche abdeckt, ist dabei ein weitreichendes Kooperationsnetzwerk innovativer Provider appbasierter Lösungen entscheidend. Automobilunternehmen mit eigener Software-Architektur werden insofern auch zu Software-Produzenten.

Das entscheidende Potenzial zur Kompensation von Wertschöpfungsverlusten des Fahrzeugbaus infolge der Elektrifizierung für Automobilproduzenten und rückläufiger Verkaufszahlen durch zunehmenden Einsatz von autonomen und geteilten Fahrzeugen liegt in der intelligenten Nutzung der Kundendaten zur Generierung von kundenspezifischen Mehrwerten, die weit über direkt fahrzeugbezogene Leistungen hinausgehen. Konnektivität gewinnt als Differenzierungsmerkmal zunehmend an Bedeutung für die Markentreue. Schätzungen gehen davon aus, dass Automobilproduzenten im Jahr 2050 etwa die Hälfte ihres Umsatzes durch datenbasierte Leistungen erzielen.⁴⁵

Literatur

Teil VI: Geschäftsmodelle entlang der elektromobilen Wertschöpfungskette

- Baik, Y; Hensley, R; Hertzke, P; Knupfer, S.:** *Making electric vehicles profitable*, 2019
- Bentenrieder, M; Boilard, M; Buss, J; Brandt, F; Chien, A; Daffner, R; Joas, A; Nienhaus, A; Reiner, J; Stolz, L; Williams, H.:** *Digital Business Models for Automakers*, 2017
- Bertoncello, M; Martens, C; Möller, T; Schneiderbauer, T.:** *Unlocking the full life-cycle value from connected-car data*, 2021
- BEUC – The European Consumer Organisation:** *Electric Cars: Calculating the Total Cost of Ownership for Consumers*, 2021
- Bosler, M; Burr, W; Ihring, L.:** *Vernetzte Fahrzeuge – empirische Analyse digitaler Geschäftsmodelle für Connected-Car-Services*. In: HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik, Jg. Jg. 55, 2018, S. 329–348

⁴³Vgl. Bosler et al. 2018, S. 329ff.

⁴⁴Vgl. Schäfer et al. 2015, S. 391.

⁴⁵Vgl. Kaul et al. 2019.

- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie:** Batterien „made in Germany“ – ein Beitrag zu nachhaltigem Wachstum und klimafreundlicher Mobilität. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/batteriezellfertigung.html>. Abruf 12.09.2021
- dena, P.:** Privates Ladeinfrastrukturpotenzial in Deutschland. Berlin, 2020
- Europäische Kommission:** Proposal for a regulation of the European Parliament and of the council concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020. Brüssel, 2020
- EY:** Stadtwerkstudie 2020, 2020
- Fluchs, S.:** Batterierecycling: Potenziale zur Reduzierung der Rohstoffabhängigkeit. Köln, 2021
- Fraunhofer ISI** 2020.
- Hanley, S.:** Magna Introduces Its Own BEV & PHEV Platforms, 2021
- Henze, V.:** Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh, 2020
- Hyundai Motor Group:** Realizing New EV Lifestyles: 5 Advantages of the E-GMP, 2020
- International Energy Agency (IEA):** Global EV Outlook 2021. Paris, 2021
- Kaul, A; Hagedorn, M; Hartmann, S; Heilert, D; Harter, C; Olschewski, I; Eckstein, L; Baum, M; Henzelmann, T; Schlick, T.:** Automobile Wertschöpfung 2030/2050. Berlin, 2019
- Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM):** 1. Zwischenbericht zur Wertschöpfung – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Berlin, 2019
- Norris, J.:** BEV development: lowering the cost of progress, 2019
- Otto, H; Sponring, M; Freier, S.:** Elektromobilität: Ein zukunftsfähiges Geschäftsmodell für Energieversorger?, 2018
- Power2Drive:** Charging Infrastructure Business Electrifies Europe. München, 2021
- Schäfer, T; Jud, C; Mikusz, M.:** Plattform-Ökosysteme im Bereich der intelligent vernetzten Mobilität: Eine Geschäftsmodellanalyse. In: HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik, Jg. Jg. 52, 2015, S. 386–400
- Schiller, T; Kummer, P; Berdichevskiy, A; Weidenbach, M; Sadoun, J.:** Future of Automotive Sales and Aftersales. Impact of current industry trends on OEM revenues and profits until 2035, 2020
- TÜV Nord Group:** Elektromobilität – Batteriezellen in Deutschland: Wer baut wo?, 2021
- U.S. Geological Survey:** Mineral Commodity Summaries 2020, 2020
- Windt, A; Arnhold, O.:** Ladeinfrastruktur nach 2025/2030: Szenarien für den Markthochlauf. Berlin, 2020
- Woodward, M; Hamilton, J; Walton, B; Ringrow, J; Alberts, G; Fullerton-Smith, S; Day, E.:** Electric Vehicles – Setting a course for 2030, 2020
- Woodward, M; Hamilton, J; Wu, H; Alberts, G; Walton, B.:** New market. New entrants. New challenges. Battery Electric Vehicles, 2021

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Elemente der elektromobilerorientierten Geschäftsmodelle

34

Garnet Kasperk, Sarah Fluchs und Julius Hausmann

34.1 Elemente von Geschäftsmodellen

Ein Modell ist die abstrakte Darstellung der Wirklichkeit, die sich aus Einzelementen und deren Verknüpfungen zusammensetzt. Ein Geschäftsmodell ist demnach eine abstrahierte Darstellung der Funktionsweise eines Geschäfts. Grundlage eines Geschäftsmodells ist das Wertschöpfungsmodell. Werden wie im Fall der Elektromobilität integrierte Wertschöpfungsketten dekonstruiert, lösen sich ehemals fest verbundene Elemente der Kette voneinander. An ihren Grenzen wird ein Übergang in neue Geschäftsfelder möglich.¹ Grundsätzlich werden drei Elemente für eine methodische Darstellung des Geschäftsmodells genutzt (Abb. 34.1).

Das Nutzenversprechen („Was?“) definiert den Wert für die identifizierten Kundengruppen („Wer?“). Durch das Angebot von Produkten oder Dienstleistungen werden diese

¹ Vgl. Müller-Stewens et al. 2011.

G. Kasperk (✉)

Leiterin Center for International Automobile Management, Lehrstuhl für Internationale Wirtschaftsbeziehungen, RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: garnet.kasperk@rwth-aachen.de

S. Fluchs

Economist im Bereich Umwelt, Energie, Infrastruktur, Institut der deutschen Wirtschaft, Köln, Deutschland

E-Mail: Fluchs@iwkoeln.de

J. Hausmann

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: julius.hausmann@rwth-aachen.de

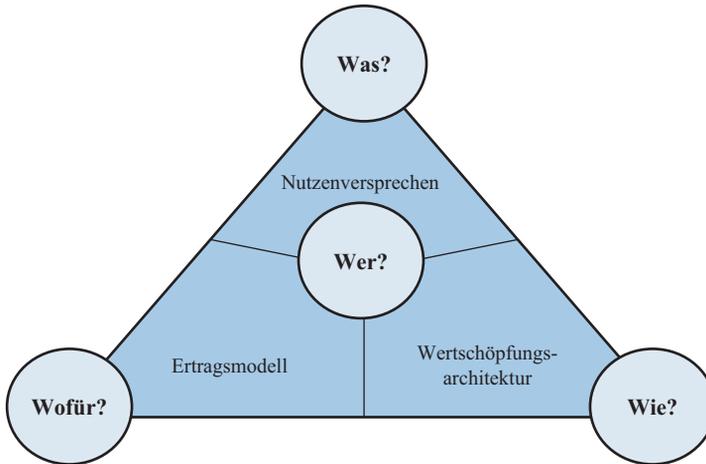


Abb. 34.1 Dimensionen der Geschäftsmodelle in Anlehnung an Gassmann et al. (2013). (Vgl. Gassmann et al. 2013)

spezifischen Kundenbedürfnisse bedient, wobei ein erfolgreiches Geschäftsmodell neben der Zielgruppenorientierung eine klare Wettbewerbspositionierung bedingt. Die Wertschöpfungsarchitektur („Wie?“) beschreibt, auf welche Weise dieses Angebot durch Kombination von Ressourcen und Kompetenzen erstellt wird. Eine Erweiterung des internen Spektrums der Ressourcen und Fähigkeiten ist über Kooperationen unterschiedlicher Art möglich. Das Ertragsmodell („Wofür?“) definiert schließlich, wie durch die angebotenen Produkte und Dienstleistungen Erlöse generiert werden.

Eine Erweiterung bestehender Geschäftsmodelle resultiert aus einem verbreiterten Nutzenversprechen meist etablierter Automobilproduzenten, die ihre Aktivitäten upstream und insbesondere downstream der Wertschöpfungskette verstärken und ihre Ertragsmodelle entsprechend anpassen. Der Kundennutzen wird durch zusätzliche Dienstleistungsangebote erhöht. Je umfassender dieses zusätzliche Angebot gestaltet wird, desto höher ist der Einfluss auf die Gesamtpositionierung des Unternehmens bis hin zu einem ökologisch-nachhaltigen und dienstleistungsorientierten Anbieter von Mobilität mit parallelen Geschäftsmodellen. Die Berücksichtigung ökologischer und sozialer Ziele im Rahmen des Nutzenversprechens und des Angebots für Kunden einerseits sowie der ökologieorientierten Optimierung der Wertschöpfungsstrukturen andererseits mündet in nachhaltigen Geschäftsmodellen. Dieser schleichende Geschäftsmodell- und Strategiewechsel verändert somit sukzessive die Ressourcenallokation, das Markenverständnis und die Kernkompetenzen eines Automobilproduzenten (Abb. 34.2).

Ökonomische, ökologische und soziale Ziele sind integrale Bestandteile der Unternehmensvision und damit des Nutzenversprechens. In diesem Sinne bilden nachhaltige Wertschöpfungsstrukturen ab, wie die Produkte und Dienstleistungen durch die Kombination von Ressourcen und Fähigkeiten sowie durch die Integration von Partnern und Zulieferern letztlich die Umsetzung des nachhaltigen Nutzenversprechens erlauben. Eine

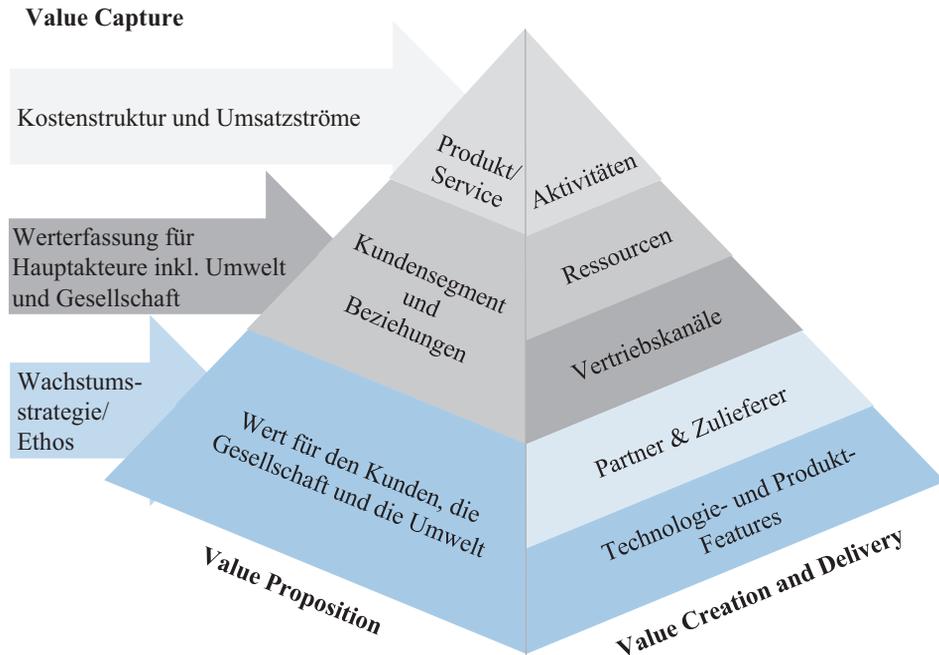


Abb. 34.2 Konzeptioneller Rahmen für ein nachhaltiges Geschäftsmodell in Anlehnung an Aagaard (2017). (Vgl. Aagaard 2017, S. 12)

nachhaltige und an den Bedürfnissen verschiedener Stakeholder orientierte Vision wird zum Rahmen für die abgeleitete Strategie und die entsprechenden Prozesse der gesamten Organisation.²

Im Zentrum eines Geschäftsmodells steht somit das Nutzenversprechen. Im herkömmlichen automobilen Geschäftsmodell besteht das Nutzenversprechen darin, ein Automobil mit den vom Kunden gewählten qualitativen und sonstigen Eigenschaften gegen einen zuvor vereinbarten Preis zur Verfügung zu stellen. Der Produzent liefert dem Endkunden ein spezifisches Produkt und unterbreitet bezüglich Reparatur und Wartung unterschiedliche Angebote, die vom Kunden individuell gewählt werden. Das Elektromobilitätssystem erfordert ein erweitertes Nutzenversprechen, wobei die involvierten Akteure im Rahmen ihres Geschäftsmodells entscheiden, welche integralen Bestandteile sie zum Teil ihres Nutzenversprechens machen. Kunden entscheiden wiederum, in welchem Umfang sie reine Mobilitätsdienstleistungen in Anspruch nehmen oder aber ein Eigentum an einem Produkt erwerben. Relevant ist das Preisbewusstsein, denn das Fahren eines Elektroautos darf in einer wahrgenommenen Kosten-Nutzen-Rechnung nicht schlechter dastehen als eine Fahrt mit einem Verbrenner. Finanzierungs- und Leasingkonzepte können zur Risikominimierung beitragen. Des Weiteren muss die Mobilität des Kunden stets gewährleistet

²Vgl. Aagaard 2019, S. 1ff.

sein. Daher spielen neben Kriterien der Reichweite auch Verfügbarkeits- und Versorgungssicherheit eine zentrale Rolle für den Kunden – bei gleichen beziehungsweise gehobenen Flexibilitätsansprüchen. Ein weiterer wichtiger Kundennutzen resultiert aus der Weiterentwicklung von Informationssystemen – basierend auf dem Bedürfnis nach Kommunikation und Information sowie Systemsicherheit und -stabilität.

34.2 Fahrzeugbezogene Geschäftsmodelle

34.2.1 Fahrzeugverkauf

Das Geschäftsmodell des Fahrzeugverkaufs orientiert sich am Angebot des Elektrofahrzeugs und an den Kunden, die entweder einen einmaligen Betrag oder eine fixe monatliche Zahlung als Abrechnungsmodus favorisieren. Die Wertschöpfung orientiert sich an den in Abschn. 32.2 erläuterten Strukturen, wesentliche Fähigkeiten sind technologieorientiert.

Der klassische Fahrzeugverkauf wird auch in Bezug auf Elektrofahrzeuge vorläufig für Automobilproduzenten dominant sein, allerdings sinkt der Anteil am gesamten Umsatzvolumen laut Schätzungen von Deloitte von 78 % aus dem Jahr 2018 auf 64 % im Jahr 2030.³ Verschiedenen Prognosen folgend (siehe Abschn. 33.1), wird der Anteil von BEV im Jahr 2030 bei 35 % der Gesamtverkäufe liegen. Während der Pkw-Absatz in Europa stagniert und mit zunehmender Bedeutung autonomer Fahrfunktionen voraussichtlich ab 2035 rückläufig ist, werden vor allem für Asien wachsende Verkäufe erwartet.⁴ Da die erzielbaren Deckungsbeiträge für Pkw in wachsenden Märkten höher liegen und die mit dem Verkauf von Elektrofahrzeugen verbundenen Deckungsbeiträge geringer sind als in Verbindung mit Verbrennungstechnologien, werden Produktionskapazitäten für Elektrofahrzeuge auch in asiatischen Ländern angesiedelt.

Automobilproduzenten haben insbesondere in den vergangenen zwei Jahren zahlreiche neue Elektrofahrzeugmodelle auf den Markt gebracht. Im Jahr 2020 waren global etwa 360 BEV- und PHEV-Modelle mit durchschnittlichen Reichweiten unterhalb von 350 km verfügbar (Abb. 34.3).⁵

Die Diversifizierung der Angebotspalette wird sich in den kommenden Jahren fortsetzen. Vor allem in den Segmenten für mittlere und große Fahrzeuge kommen im Zeitraum 2021 bis 2025 etwa 225 neue Modelle auf den Markt.⁶ Etablierte Automobilproduzenten verfolgen dabei unterschiedliche Strategien in Bezug auf ihre Angebotsportfolios.

³Vgl. Schiller et al. 2020, S. 44.

⁴Vgl. International Energy Agency (IEA) 2021.

⁵Vgl. International Energy Agency (IEA) 2021.

⁶Vgl. Gersdorf et al. 2020, S. 5.

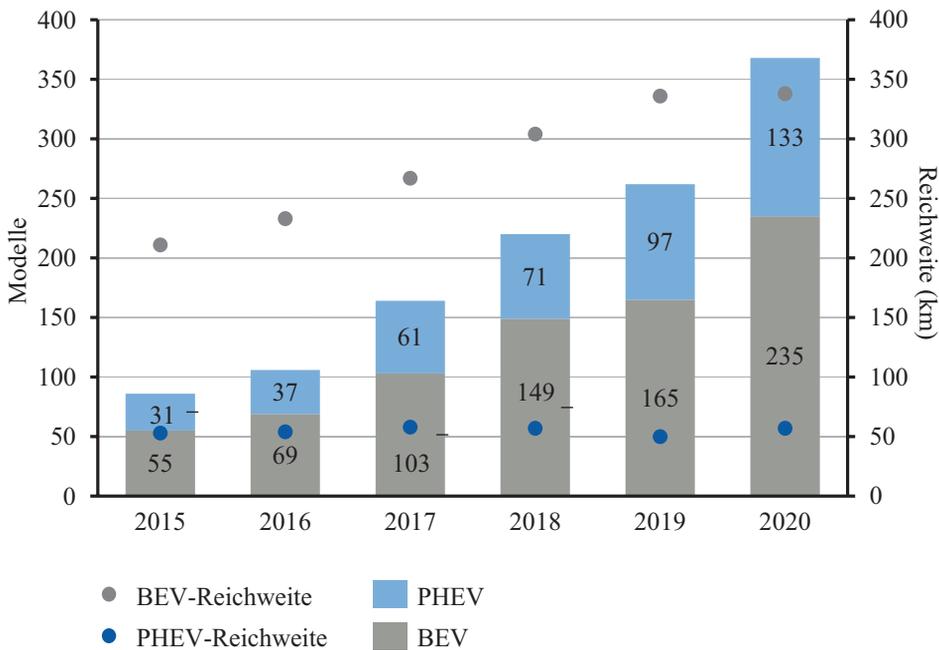


Abb. 34.3 Global verfügbare Elektroauto-Modelle und durchschnittliche Reichweiten 2015 bis 2020. (Vgl. International Energy Agency (IEA) 2021)

Die Marke Volvo strebt mit ihrem chinesischen Eigentümer Geely bis zum Jahr 2030 eine nahezu ausschließliche Konzentration auf ihre hybriden und rein elektrifizierten Modelle an (vgl. Abb. 34.4).

VW plant bis zum Jahr 2025 jährlich etwa eine Million Elektrofahrzeuge, die auf Basis der beiden MBE- und PPE-Plattformen entstehen. Im Jahr 2030 soll der Anteil der Elektrofahrzeuge an den Fahrzeugverkäufen etwa 70 % betragen. Dieses Ziel verfolgt auch die durch Fusion von PSA und Fiat-Chrysler entstandene Stellantis-Gruppe. Dort hat insbesondere der PSA-Konzern zwei Plattformen für Elektrofahrzeuge eingebracht.

Auf der neu entwickelten Elektro-Plattform EVA (Electric Vehicle Architecture) bringt Mercedes beginnend mit der S-Klasse vier Premium-Fahrzeuge auf den Markt; weitere Modelle werden die für kompakte und mittlere Fahrzeugsegmente in Entwicklung befindliche „Electric-First“- Plattform MMA (Mercedes-Benz Modular Architecture) nutzen. Darüber hinaus werden aktuelle Plattformen elektrifiziert, so dass bis zum Jahr 2030 mehr als die Hälfte der verkauften Fahrzeuge einen Elektroantrieb haben wird. Mit dem Ziel „Ambition 2039“ strebt Mercedes eine CO₂-neutrale Neuwagenflotte innerhalb von knapp 20 Jahren bei grundsätzlicher Technologieoffenheit an. Nach der erneuten Diskussion der CO₂-Ziele der Europäischen Union im Jahr 2021 verkündete der Vorstands-

Original Equipment Manufacturer (OEM)	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
BMW Group			25		15–25 %					10
BAIC Group	2				1.3					50 %
Changan Automobile (Group)					33					
Daimler		10			25 %					50 %
Dongfeng Motor Co	1	30 %	1		1				1	1
FAW					40 %					60 %
Ford		40				100 %*				
GM Group			22		30	1				1
Honda										40 % [†]
Hyundai-Kia					1	29				
Mazda		1								5%
Renault-Nissan		20 %	20							
Maruti Suzuki	1									1.5
SAIC					30 %					30
Stellantis					38 %*					70 %*
					31 %**					35 %**
Toyota Group	1				15					>1
Volkswagen			1		20 %	3			26	70 %*
					75					50 %**
Volvo	1	1	1	1	50 %					100 %*

Anteil Elektrofahrzeuge
 Jährliche Verkäufe (in Millionen)
 Neue EV-Modelle (Anzahl)
 Kumulative Verkäufe (in Millionen)

* Europäischer Markt
 ** Chinesischer und US-Markt
[†] Inkl. EV und FCEV

Abb. 34.4 Ankündigungen der OEMs bezüglich leichter Elektronutzfahrzeuge. (Vgl. International Energy Agency (IEA) 2021)

vorsitzende Olaf Källenius die Anpassung der Strategie: Bereits bis zum Jahr 2030 soll auf Verbrennungstechnologien verzichtet werden.⁷

BMW hat mit dem „i3“ frühzeitig das erste vollelektrische Fahrzeug vorgestellt. Mit dem „iX3“ – der in China gefertigt werden wird – und weiteren Modellen bringt BMW ein breites Spektrum elektrifizierter Modelle auf den Markt (siehe Abschn. 32.3.1). BMW

⁷Vgl. Automobilwoche, 2021.

baut auf zwei Architekturen auf (Cluster-Architektur mit Hinterradantrieb und Frontantrieb), die jeweils flexibel mit Verbrennungstechnologie oder Elektroantrieb ausgestattet werden können. Auch BMW betont ausdrücklich Offenheit bezüglich technologischer Entwicklungen.

Honda und Toyota werden auf Hybride, Elektrofahrzeuge und die Brennstoffzelle setzen und sehen sich als übergreifende Mobilitätsanbieter.

Der Bedeutungszuwachs der Elektromobilität ändert im Rahmen des Geschäftsmodells „Fahrzeugverkauf“ in erster Linie die Wertschöpfungsstrukturen. Neben diesen in Abschn. 33.1 beschriebenen Änderungen erweitert sich die Angebotspalette um die zum Betrieb von Elektrofahrzeugen notwendigen Ladeinfrastrukturen und weitergehende Dienstleistungen, die in den Abschn. 33.3 und 33.4 erläutert werden. In der Kundenwahrnehmung ist das Bewusstsein für Elektromobilität mittlerweile verbreitet und die grundsätzliche Kaufbereitschaft seit dem Jahr 2016 deutlich gestiegen. Zurückhaltung bei der Umsetzung der Kaufabsicht resultieren aber nach wie vor in erster Linie aus Unsicherheiten in Bezug auf Reichweiten im Zusammenhang mit Ladeinfrastrukturen sowie der Lebensdauer der Batterie.⁸ Wenn auch das Umweltbewusstsein einen geringeren Einfluss auf die Kaufentscheidung für Elektrofahrzeuge ausübt als lebenszyklusübergreifende Kostenvorteile, monetäre Anreize und Mobilitätsvorteile in urbanen Räumen,⁹ so zeigt der Erfolg der Marke Tesla deutlich, dass sich auch der Kundennutzen im Rahmen des Geschäftsmodells „Verkauf“ ändert. Tesla hat mit seiner konsequent kommunizierten Vision eines reinen Elektromobilitätsanbieters in Kombination mit dezentralen Erzeugungsanlagen für regenerative Energie, dauerhaft kundengetriebener Innovation und keiner expliziten Orientierung an Gewinnen demonstriert, dass Kunden und Investoren in entwickelten Märkten glaubhaft nachhaltige Visionen und die entsprechende Community wertschätzen.

Die Vision adressiert den Kundennutzen und gibt den Rahmen für Geschäftsmodelle des Unternehmens vor. Etablierte Automobilproduzenten ergänzen ihr produktbezogenes Markenversprechen in Richtung eines nachhaltigen Angebots von Mobilität und Mobilitätsdienstleistungen und definieren ihren Markenkern um.

Die in Tab. 34.1 angeführten Visionen geben Anhaltspunkte für die Geschäftsmodelltypen der Unternehmen. Während BMW und Mercedes ihren Schwerpunkt weiterhin auf das Fahrzeuggeschäft und auf damit verbundene Dienste legen, entwickeln sich Unternehmen wie Toyota, Volkswagen und Ford zu übergreifenden Mobilitätsanbietern.

Entscheidend für die Entwicklung mobilitäts- und serviceorientierter Geschäftsmodelle ist der direkte Kundenzugang. Eine intelligente Nutzung der Kundendaten erlaubt es Anbietern, personalisierte Dienstleistungen über das Fahrzeug zu verkaufen und Kunden zu Teilhabern eines Systems zu machen, das umfassende Aspekte der täglichen Mobilität und des täglichen Lebens unterstützt (siehe Abschn. 33.4). Je umfassender und personen-

⁸Vgl. Gersdorf et al. 2020.

⁹Vgl. Gersdorf et al. 2020, S. 12.

Tab. 34.1 Visionen ausgewählter OEMs^a

Toyota	Toyota will lead the future mobility society, enriching lives around the world with the safest and most responsible ways of moving people. Through our commitment to quality, ceaseless innovation, and respect for the planet, we strive to exceed expectations and be rewarded with a smile ...
Volkswagen	To make the world a mobile, sustainable place with access to all the citizens
Ford	To make people's lives better by making mobility accessible and affordable
BMW	... the leading provider of premium products and premium services for individual mobility
Mercedes	First move the world ... building outstanding and fascinating vehicles what we do best
Tesla	... to accelerate the world's transition to sustainable energy ... to create the most compelling car company of the 21st century by driving the world's transition to electric vehicles

^aVgl. International Energy Agency (IEA) 2021

zentrierter diese Angebote sind, desto größer sind die Barrieren, das System zu verlassen und zu neuen Anbietern zu wechseln.

Unternehmen wie VW, Mercedes und BMW entwickeln ihre eigenen Systeme, um mittelfristig unabhängig zu sein. Gleichzeitig werden Verkaufsstrukturen geändert, um Käufer- und Nutzerdaten zu zentralisieren und einen konsistenten Prozess in Bezug auf die Kundenbindung zu entwickeln. Automobilproduzenten stellen in den kommenden Jahren ihren Handel auf Agentur-Systeme um, bei denen Vertriebspartner künftig eine fahrzeugbezogene Provision erhalten. Mit ihrem Portfolio von Händlern und Werkstätten haben OEMs etwa 7 % ihres Umsatzvolumens und 25 % ihrer Gewinne generiert.¹⁰ Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs treibt auch das Online-Geschäft voran. Beispielsweise verkauft VW den „ID.3“ über einen neuen Online-Kanal. Während Automobilproduzenten im Rahmen ihrer Agentur-Modelle integrierte „Omni-Channel“-Vertriebskanäle etablieren, positionieren sich neue Akteure im Onlinehandel. Handelsallianzen entstehen, die eigene Vertriebsmarken im Offline- und Online-Geschäft etablieren.¹¹ Insgesamt wird sich der Handel in den kommenden Jahren dramatisch wandeln. Ebenso wird sich durch die geringeren Wartungsnotwendigkeiten von Elektrofahrzeugen das Werkstattgeschäft reduzieren.

Bestehende Leasingangebote werden ergänzt durch kurz- und mittelfristige Mietoptionen für Fahrzeuge sowie Abo-Modelle, um möglichst frühzeitig den Zugang zu Kunden zu gewinnen und Angebote fahrzeugnaher Dienstleistungen zu unterbreiten. Da in Corona-Pandemie-Zeiten auch Carsharing-Anbieter ihre Mietdauer angepasst haben, lösen sich die Grenzen zwischen derartigen Geschäftsmodellen zunehmend auf. Automobilproduzenten gelingt so auf Basis der vernetzten Technologie die Erzielung von Umsätzen während des gesamten Lebenszyklus des Fahrzeugs.

¹⁰Vgl. Schiller et al. 2020, S. 62.

¹¹Vgl. Ström et al. 2017.

34.2.2 E-Flotten

Auch das Flottenkonzept ist grundsätzlich ein Geschäftsmodell, das den Automobilherstellern downstream bekannt ist. Die Eignung dieses Modells für den Bereich der Elektromobilität erhöht sich durch die Tatsache, dass insbesondere das rein elektrisch betriebene Automobil für hochfrequentierte Fahrten mit geringer Reichweite innerhalb von Ballungszentren einsetzbar ist. Zielgruppen sind im gesamten Stadtverkehr vor allem im Bereich der Nutzfahrzeuge zu finden. Innerstädtische Lieferdienste, Service- oder Handwerksbetriebe, kommunale Fuhrparks und Taxis gehören dazu. Eine Umrüstung oder Neugestaltung kommunaler Flotten sowie Taxi-Fuhrparks etwa wird die Sichtbarkeit in Städten erheblich erhöhen. Innovative Flottenkonzepte sollten sich darüber hinaus von Geschäftsmodellen mit Verbrennungsmotoren unterscheiden. So können Fuhrparks mit Elektromotoren beispielsweise dort eingesetzt werden, wo Fahrzeuge mit Geräusch- oder CO₂-Emissionen nicht eingesetzt werden können oder nicht erwünscht sind – etwa in Hallen und Gebäuden, Naturschutzgebieten, Zoo- und Grünanlagen, auf Flughäfen, im Bergbau oder in Fußgängerzonen.

Außerdem muss ein effektives Flottenmanagement die Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Flexibilität im Sinne des Kundennutzens sicherstellen. Elektrofahrzeuge können diese Bedürfnisse im urbanen Raum durch ihren geringen Wartungsbedarf decken. Als weiterer Kundennutzen gilt der Image-Effekt für gewerbliche Fuhrparks: Durch die Nutzung von E-Flotten-Fahrzeugen wird eine Unternehmensstrategie unterstützt, die für Umweltschutz und Nachhaltigkeit steht.

Die klassischen Betreiber des Geschäftsmodells „Flottenkonzept“ sind die Automobilhersteller selbst und Fuhrparkbetreiber wie Europcar oder Sixt, die gleichzeitig im Dienstleistungsbereich der Autovermietungen tätig sind. In den vergangenen Jahren haben sich neue Anbieter von Elektro-Kleintransportern wie etwa die Streetscooter GmbH als Unternehmen der Deutschen Post DHL oder auch „Rivian Automotive LLC“ etabliert, deren Fahrzeuge unter anderem durch den Onlinehandelskonzern Amazon genutzt werden. Elektrofahrungspezialisten können den gewerblichen Endkunden mit einem Full-Service-Gesamtflottenkonzept erreichen, indem sie kundenspezifische Lösungen bereitstellen, die die gewünschte Mobilität in dem vom Kunden gesteckten Rahmen bieten. Die Amortisationsdauer von vielgenutzten Elektrofahrzeugen muss dabei unter derjenigen von Automobilen mit Verbrennungsmotor liegen. Das setzt in erster Linie einen deutlich geringeren Preis pro Kilometer bei Elektrofahrzeugen voraus. Auch hierbei ist die Risikübernahme durch einen Rahmenvertrag mit einem konstanten Preis pro Kilometer durchaus möglich. Die Finanzierungs- und Leasingkonzepte spielen demnach auch beim E-Flotten-Konzept eine große Rolle bei der Entscheidung für oder gegen einen Fuhrpark mit Elektrofahrzeugen. Das im Folgenden beschriebene Geschäftsmodell des E-Carsharing wird das Eigentum in den urbanen Zentren zunehmend von Privatpersonen auf Flottenbetreiber verschieben, die zu einer der wichtigsten Kundengruppen der Automobilproduzenten werden.¹²

¹²Vgl. Schiller et al. 2020.

34.2.3 E-Carsharing

Ein weiteres Mobilitätsgeschäftsmodell bildet das Carsharing. Der generelle Begriff beschreibt die organisierte und gemeinschaftliche Nutzung von Kraftfahrzeugen. Das E-Carsharing stellt eine Sonderform dar, bei dem den Kunden ausschließlich Elektrofahrzeuge zur Verfügung gestellt werden. Der Fahrzeugnutzen steht im Vordergrund, während die weitere Wartung, Pflege und anfallende Reparaturen weiterhin dem Flottenbetreiber obliegen. Die Abrechnung mit dem Kunden erfolgt je nach Anbieter über einen Basispreis, die Ausleihzeit, die zurückgelegte Distanz sowie den Energieverbrauch. Oftmals ist auf diese Weise im Gegensatz zum konventionellen Mietwagengeschäft eine minutengenaue Abrechnung möglich. Weitere Ausgaben wie Steuern, Versicherungs-, Reparatur- und Stromkosten trägt der Flottenbetreiber. Grundsätzlich ähnelt das (E-)Carsharing dem klassischen Mietfahrzeugkonzept. Jedoch wird beim (E-)Carsharing vor der Nutzung ein Rahmenvertrag mit dem Anbieter geschlossen, der im Folgenden auch die kurzfristige Mietung ermöglicht, die minutenweise abgerechnet werden kann. Beim klassischen Mietwagengeschäft gilt der Fahrzeugmietvertrag meist über einen längeren Zeitraum, beispielsweise einen ganzen Tag. In Corona-Pandemie-Zeiten haben Carsharing-Anbieter ihre möglichen Mietdauern verlängert, so dass der Übergang zu einem normalen Mietverhältnis mittlerweile fließend ist. Entscheidend für das Geschäftsmodell ist ein optimal abgestimmtes Netzwerk zum Management der Fahrzeuge und die entsprechende Software für Buchung und Abrechnung.

Das (E-)Carsharing wird in drei Kategorien unterteilt. Beim Free-Floating-(E-)Carsharing kann das Fahrzeug in einem vorher definierten Nutzungsgebiet zurückgegeben werden. Kurzfristige Reservierungen vor Fahrtantritt ohne Angabe der beabsichtigten Nutzungsdauer bieten dem Kunden eine hohe Flexibilität. Das Stationsbasierte (E-)Carsharing hingegen sieht den Zugang zum Fahrzeug und seine Rückgabe an derselben Station vor. Dazu stehen die Fahrzeuge auf festen Parkplätzen der Flottenbetreiber, an denen meist auch eine Ladesäuleninfrastruktur zur Verfügung steht. Eine Buchung kann beim stationsbasierten (E-)Carsharing auch langfristig im Voraus erfolgen, was den Kunden eine höhere Planungssicherheit gewährleistet. Zugleich wird für den Anbieter die Wartung und die Pflege der Fahrzeuge vereinfacht. Die dritte Variante ist eine Hybridform. Sie ist äquivalent zum stationsbasierten (E-)Carsharing, bietet jedoch die Möglichkeit, das Fahrzeug an verschiedenen Stationen zurückzugeben, wodurch der Kunde auch Einwegfahrten vornehmen kann. Darüber hinaus bietet ein privates Carsharing die Option, dass Privatpersonen ihre Fahrzeuge vermieten.¹³

Neben den unterschiedlichen Carsharing-Formen existieren das Ridehailing, das Ridepooling und das Ridesharing als weitere (E-)„Shared-Mobility“-Konzepte. „Ridehailing“ bezeichnet den appbasierten Verkauf von Fahrten durch Privatpersonen, die dafür in Deutschland eine Lizenz benötigen. Beim „Ridepooling“ werden mehrere Kunden mittels einer App gebündelt und in einem Auto befördert. Das „Ridesharing“ bezeichnet die

¹³Vgl. Krauss et al. 2021.

Mitnahme von Personen im Rahmen bestehender Fahrten im reinen „Peer-to-Peer“-Kontext: Anbieter vermitteln dabei Privatpersonen, die bereit sind, andere Personen bei ihren Fahrten mitzunehmen.

Das E-Carsharing bietet neben Nutzensvorteilen für die Konsumenten auch Potenziale zur Reduzierung des Gesamtfahrzeugbestands und zur Änderung von Mobilitätsroutinen als Ergänzung zum ÖPNV. Die frühzeitige Entwicklung geeigneter Plattformen für multimodal einsetzbare Buchungs- und Bezahlssysteme – auch zum Beispiel in Kooperation mit ÖPNV-Anbietern – sind erforderlich, um im E-Carsharing eine hohe Marktdurchdringung zu erreichen. Zusätzlich können Versicherungsprodukte als Teil der Wertschöpfung dienen.

Die E-Carsharing-Branche ist in den vergangenen Jahren in Deutschland stark gewachsen. Der Großteil der klassischen Carsharing-Anbieter wie Sixt oder Europcar bietet inzwischen elektrische Alternativen an. So ist in Deutschland der Marktanteil der elektrisch betriebenen Fahrzeuge von Carsharing-Anbietern auf 18,5 % gestiegen.¹⁴

Erfolgsentscheidend auf dem europäischen Markt für Carsharing scheint derzeit zu sein, wer sich als Erster in einem Ballungszentrum positionieren und dort künftig als Anbieter für Mobilität agieren kann. OEMs forcieren den Einsatz von E-Carsharing-Flotten – insbesondere in Großstädten und Ballungszentren oder an strategisch relevanten Orten wie Flughäfen – aufgrund der gegebenen Reichweitenbegrenzung eines Ladezyklus der Elektrofahrzeuge. In diesem Bereich sind derzeit Automobilhersteller wie Ford, Renault, Daimler oder BMW präsent.¹⁵

Im Geschäftsmodell des E-Carsharings konkurrieren also vor allem etablierte Automobilhersteller mit ihren downstreamorientierten Organisationseinheiten mit Dienstleistungsunternehmen wie Autovermietungen oder spezialisierten neuen Akteuren.

Die größten Carsharing-Anbieter in Deutschland sind „Share Now“ (Daimler & BMW) mit 7400 Fahrzeugen, gefolgt von „Flinkster“ (Deutsche Bahn) mit 4500 Fahrzeugen, „Miles“ mit 1500 Fahrzeugen und „Cambio“ (Ford) mit 1700 Fahrzeugen. Insgesamt 26.220 Carsharing-Fahrzeuge sind in Deutschland unterwegs, von denen 14.200 auf das „Free-Floating“-Carsharing und 12.020 auf stationsbasierte Systeme entfallen. Prognosen gehen von einer weiteren Steigerung des Angebots und damit auch des Umsatzes von etwa 7 % pro Jahr aus.¹⁶

Für Unternehmen wird das „Corporate Carsharing“ dabei immer relevanter: Dabei bieten Betriebe ihren Mitarbeitenden eine private Fahrzeugflotte als Alternative zum Firmenwagen an. Eine Reduzierung der Fuhrpark-Fahrzeuge um 20 bis 30 % ist damit realistisch. Unternehmen wie die Alphabet Fuhrparkmanagement GmbH bieten ganzheitliche „Corporate-Carsharing“-Lösungen inklusive passender Ladesäulenstruktur für Elektrofahrzeuge an.

Die Profitabilität der Carsharing-Anbieter ist von mehreren Faktoren abhängig. Im Gegensatz zu unabhängigen Betreibern profitieren OEMs mit ihren Flotten von höheren

¹⁴Vgl. Bundesverband CarSharing 2021.

¹⁵Vgl. A.T. Kearney 2019.

¹⁶Vgl. Bundesverband CarSharing 2021.

Kostenkalkulation

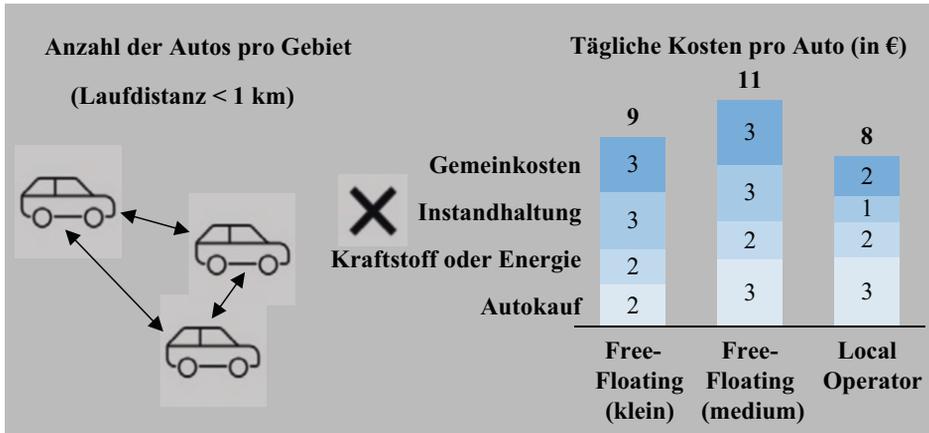


Abb. 34.5 Kostenkalkulation der Carsharing-Anbieter. (Vgl. A.T. Kearney 2019)

Rabatten auf die Fahrzeuge. Das E-Carsharing punktet im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit geringeren Energiekosten, beim Free-Floating-Carsharing entstehen dafür jedoch höhere operative Kosten vor allem durch das Bewegen der Fahrzeuge zu den Ladepunkten.

Außerdem werden zusätzliche Hardware und Software zum Entsperren der Fahrzeuge mittels Smartphones und ein entsprechender Zugang zum Internet benötigt. Im Allgemeinen ist die Profitabilität auch vom Standort abhängig. Carsharing-Standorte in bevölkerungsreichen Metropolen ermöglichen höhere Margen. So werden in Berlin und München Margen von etwa 32 % realisierbar, in kleineren Städten erweist sich das Geschäftsmodell jedoch oftmals als unrentabel.¹⁷ Dort werden die Angebote häufig von ehrenamtlichen Vereinen oder Kommunen unterstützt. Abb. 34.5 gibt einen exemplarischen Überblick zur generellen Kostenkalkulation von Carsharing-Anbietern.

34.2.4 Multimodaler Transport

Das Geschäftsmodell des multimodalen Transports zielt auf den integrierten Mobilitätsansatz als Bestandteil des öffentlichen Verkehrs in Ballungsräumen ab. Zielgruppe dieses Geschäftsmodells sind die „Multimodalen“ – eine Nutzergruppe, die in der Mobilitätsforschung schon seit einigen Jahren definiert ist. Diese Personen nutzen auf einer Wegstrecke oder auf mehreren Wegen im Laufe einer Woche verschiedene Verkehrsmittel. Der multimodale Transport stellt dementsprechend das System für diese Form der integrierten

¹⁷Vgl. A.T. Kearney 2019.

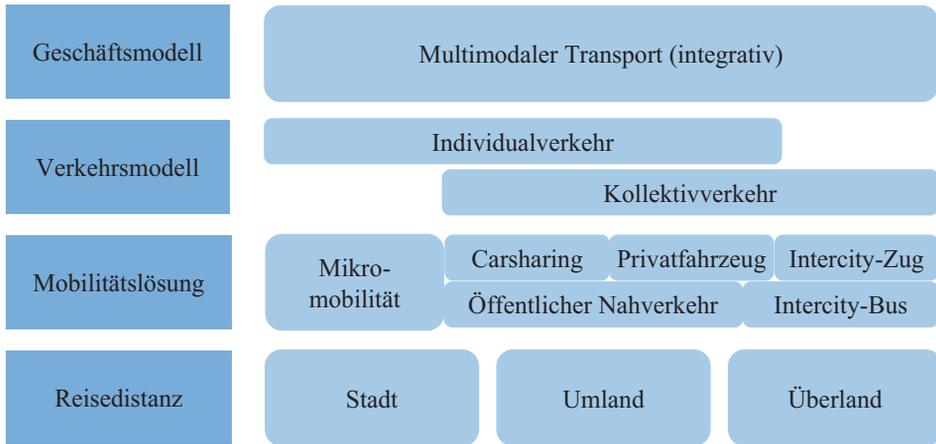


Abb. 34.6 Integration von multimodalen Mobilitätslösungen

Mobilität bereit. Eine Übersicht zu den möglichen Verkehrsmitteln in Abhängigkeit von der zurückgelegten Distanz ist in Abb. 34.6 dargestellt.

Die Nutzenden eines multimodalen Transportsystems können auf verschiedene Verkehrsmittel zugreifen und sie als Alternative zu oder in Kombination mit dem eventuell vorhandenen Privatauto auswählen. Dabei schließt das E-Carsharing die Lücke im motorisierten Individualverkehr innerhalb urbaner Zentren und bildet eine Ergänzung zum öffentlichen Nahverkehr. Die innerstädtischen Nutzungsszenarien der Verkehrsmittel kompensieren darüber hinaus die noch kurzen Reichweiten und langen Ladezeiten von Elektrofahrzeugen. Eine natürliche Reichweitenverlängerung wird durch den Einsatz von Intercity-Zügen und -Bussen garantiert.

Langfristig gesehen vereint dieses Geschäftsmodell die meisten der angesprochenen Kundenbedürfnisse und bietet eine weitere Lösung für den grenzenlosen Einsatz von Elektrofahrzeugen innerhalb des Stadtverkehrs. Es orientiert sich an der Maxime, dass Kunden ein Mobilitätsangebot aus einer Hand fordern. Die Nutzung eines Verkehrsmittels muss deshalb einen direkten finanziellen Gegenwert haben, den der Kunde im Vergleich zur entgegengenommenen Leistung – Transport vom Standort aus zum Ziel – abwägen und bewerten kann.¹⁸ Individuell müssen Kunden entscheiden können, welches Verkehrsmittel oder welche Kombination von Verkehrsmitteln sie wählen. Aus diesem Grund reicht das Geschäftsmodell des multimodalen Transports über das Angebot der Nutzung von Elektrofahrzeugen mittels Fahrzeugvermietung oder E-Carsharing hinaus. Durch die strategische Standortwahl der Fahrzeugparkplätze beziehungsweise der Verleihplätze erfolgt eine Eingliederung in das gegebene Raum- sowie Energie- und Mobilitätskonzept der Stadt. Ziel ist es, das multimodale Transportmodell über den bestehenden Kundenkreis der „Multimodalen“ hinaus bekannt zu machen und die Schnittstelle zwischen Individual- und

¹⁸Vgl. Arnold et al. 2010.

Kollektivverkehr zu bedienen. Ein Anreizsystem in urbanen Zentren ist etwa eine Verkürzung der Gesamtreisezeit durch die Verwendung kostenloser Parkplätze, die dem integrierten Verkehrsmodell angehören.

Als Betreiber dieses integrativen Geschäftsmodells kommen große Verkehrsbetriebe wie die Deutsche Bahn infrage. Solche Unternehmen müssen als Mobilitätsdienstleister fungieren und haben den Vorteil, die Verkehrsmittel des Kollektivverkehrs bereits zu kontrollieren. Eine Ausweitung auf Mobilitätsangebote des Individualverkehrs muss in urbanen Zentren unmittelbar erfolgen, um den Wettbewerbsvorteil zu erhalten. Denn auch andere Gewerbe – beispielsweise reine Carsharing-Dienstleister oder Automobilhersteller und Mietwagengesellschaften – positionieren sich in diesem Geschäftsmodell. Erfolgskritisch ist der mit dem Angebot verbundene telematische Service für die Kunden, der die vollständige Information über alle relevanten Infrastrukturdaten bereitstellt. Insbesondere die Hürden beim Wechsel zwischen den verschiedenen Verkehrsträgern müssen mit Hilfe des Internets und ausgereiften Kommunikations- und Buchungssystemen minimiert werden. So müssen gleichzeitig Applikationen für Mobiltelefone in das Angebot des Geschäftsmodells mit aufgenommen und möglichst miteinander kombinierbar gemacht werden, die beispielsweise über Verfügbarkeit, Park- und Lademöglichkeiten oder den erwähnten Vergleich von Fahrzeiten und Kosten verschiedener Verkehrswege informieren.

34.3 Energie-/infrastrukturbezogene Geschäftsmodelle

34.3.1 Aufbau, Instandhaltung und Betrieb von Ladesäulen

Schwerpunkt derzeitiger Geschäftsmodelle ist der Verkauf sowie die Installation und Wartung von Ladeinfrastrukturen. Neben den eigentlichen Herstellern von Geräten der Ladeinfrastruktur sind vor allem die Autohersteller, Energieversorger, Wohnungseigentümer, größere Arbeitgeber, reine Software-Unternehmen sowie die Kommunen/Gemeinden mit ihren Stadtwerken sowie zahlreiche Spezialunternehmen der Elektroindustrie zu nennen. Teilweise sind auch Betriebe der Energieversorgung in die Produktion von Ladeinfrastrukturen eingestiegen. Dieser in dynamischer Entwicklung befindliche Markt wird in nächster Zukunft noch unübersichtlicher, zum einen durch Eintritt weiterer Teilnehmer mit innovativen Konzepten und zum anderen durch eine bereits einsetzende Bewegung der Übernahme und Beteiligung infolge des enormen Innovations- und Investitionsdrucks. Die Automobilhersteller haben im Markt für private Ladeinfrastrukturen den Vorteil, dass sie unmittelbaren Zugriff auf die Endverbrauchenden haben und die Ladeeinrichtung beim Autokauf direkt mit anbieten können.¹⁹

Häufig bestehen Überschneidungen zwischen den Marktteilnehmern, beispielsweise zwischen Auto- und Geräteherstellern oder Energieversorgern und Geräteherstellern. Daneben entwickelt sich ein breiter Markt von Kooperationen unterschiedlicher Art, etwa

¹⁹Vgl. dena 2020.

zwischen Geräteherstellern und Immobilienentwicklern oder Energieversorgern und größeren Handelsunternehmen. Ob die Einrichtung von Ladepunkten für Einzelhändler sinnvoll ist, muss aufgrund der zweifelhaften Refinanzierungsmöglichkeit bei hohen Einstandskosten und meist nicht vorhandener Stellplätze zurückhaltend beurteilt werden. Anders stellt es sich möglicherweise für große Ketten wie Aldi oder Lidl mit ohnehin vorhandenen Parkplätzen dar.²⁰

Regionale Energieversorger (Stadtwerke) in Verbindung mit der jeweiligen Kommune kommen ins Spiel, wenn für die vor allem in städtischen Lagen stets zahlreich vorhandenen „Laternenparker“ Lösungen gefunden werden müssen – zum Beispiel, indem Straßenlaternen direkt als Ladepunkt aufgerüstet werden. Einer Umfrage mit Stadtwerken zufolge betreiben bereits jetzt rund 80 % von ihnen öffentliche Ladepunkte, 80 % verkaufen Ladestrom, und 65 % verkaufen und installieren private Ladeinfrastruktur. Energielieferung und Messstellenbetrieb bilden das Kerngeschäft der regionalen Energieversorger, doch als Spezialist für netzgebundene Infrastruktur könnte die Energiewirtschaft auch weitere Aufgaben übernehmen, zum Beispiel das Projektmanagement während der gesamten Planungs- und Errichtungsphase. Damit ist es nicht mehr weit bis zur Übernahme der vollständigen Verantwortung für die Ladestationen in den Immobilien inklusive deren Einrichtung, Betrieb, Finanzierung, Wartung und Service als ein „Full-Service-Modell“.²¹

Eine weitere Möglichkeit liegt in der Öffnung privat betriebener, aber zugänglicher Ladeinfrastruktur für die Nutzung durch Externe („Gäste“). Zugang und Abrechnung können über eine App erfolgen. Damit wird eine bessere Auslastung der Ladesäulen möglich.

Auch Mineralölkonzerne erweitern ihr Geschäftsfeld und werden neben ihrem klassischen Angebot der Tankstelle als „Energienakler“ aktiv. Sowohl Aral als auch Shell betreiben bereits jeweils einige hundert Ladestellen und haben für die Zeit bis zum Jahr 2030 ehrgeizige Ausbauziele. Allerdings ist noch äußerst unklar, welche Art von Ladesäulen an welcher der deutschlandweit rund 14.500 Tankstellen stehen sollte. Tankstellen haben üblicherweise keine nennenswerte Zahl von Stellplätzen zur Verfügung, so dass ein mehrstündiger Ladevorgang dort keinen Sinn ergibt.

34.3.2 Ladeinfrastrukturbezogene Dienstleistungen

Mit der Infrastruktur werden Abrechnungssysteme sowie Datenmanagementsysteme notwendig. Hier ist eine Reihe von Akteuren aktiv, die zunehmend kooperieren, um gebietsübergreifend und kundenfreundlich den Zugang zu und die Nutzung von Ladeinfrastrukturen zu ermöglichen.

Das ladeinfrastrukturbezogene Dienstleistungsangebot adressiert spezifische Anforderungen der Kunden in Verbindung mit Elektromobilität. Die parallele Weiterentwicklung des Wunsches nach grenzenloser sowie intelligenter Kommunikation und

²⁰Vgl. Deutsche Bank AG 2021.

²¹Vgl. EY 2020.

Information bietet Ansatzpunkte für Unternehmen der Automobilindustrie und der Telekommunikationsbranche, die sich langfristig als Systemintegratoren positionieren können. Der notwendige technische Fortschritt bei kundenfreundlichen, informationstechnischen Systemen impliziert Chancen für Unternehmen wie etwa Apple, Deutsche Telekom, SAP oder Siemens. Eine Übersicht zu den Aufgaben und Charakteristika der mit der Elektromobilität verbundenen intelligenten Fahrzeug- beziehungsweise Transport-Software bietet Tab. 34.2.

Ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, wird die benötigte Software in drei Schlüsselbereiche unterteilt, welche die bilaterale Datenkommunikation der Elemente der Wertschöpfungskette miteinander und mit dem Kunden zulässt. Neuartige Netz- und Lade-Software sind Wegbereiter für ein intelligenteres Netz, ein sogenanntes *Smart Grid*, das für Energieversorgungsunternehmen eine notwendige Voraussetzung für die wirtschaftliche, effiziente und sichere Integration von erneuerbarer Energie und damit für die Netzintegrität von Elektrofahrzeugen ist. Die Software unterstützt die Netzauslastungsplanung und -steuerung (zum Beispiel via „Vehicle-to-Grid“) und das Kommunikationsmanagement zwischen Elektrofahrzeug und Stromnetz. Zusätzlich entstehen neuartige Energiemanagementsysteme nahe am Kunden, wie etwa *Smart Metering* (als Messung des tatsächlichen Energieverbrauchs und Kostenanzeige) oder das *Smart Home System* (als Einbindung eines intelligent gesteuerten Energiesystems in Haushalte). Die Kunden-Software bedient den informellen Nutzen, der weit über das Bedürfnis nach geringen Kosten und Risiken oder nachhaltiger Mobilität hinausgeht. So muss das Fahrzeug in den öffentlichen Transport integriert werden. Eine Software-Plattform, beispielsweise auf dem Mobiltelefon oder innerhalb des Fahrzeugs selbst, stellt dem Kunden sämtliche Informationen rund

Tab. 34.2 Funktionsanforderungen an intelligente Fahrzeug- und Transport-Software

Abbildungsquelle (unter Abbildung):	
Eigene Darstellung	
Netz-Software	<ul style="list-style-type: none"> • Messung und Management der Elektrizitätsnachfrage • Erfassung der Anzahl von Elektrofahrzeugen am Stromnetz • Unterstützung bei der Netzwerkplanung
Lade-Software	<ul style="list-style-type: none"> • Kommunikationsmanagement zwischen Elektrofahrzeug und Netz • Messung und Abgleich von Ladestatus und Netzauslastung • Regelung des konstanten Netzausgleichs und Rückspeisung in das Netz („Vehicle-to-Grid“) • Messung von Stromkonsum • Abrechnung und Roaming
Kunden-Software	<ul style="list-style-type: none"> • Ladefunktionen (Start/Stop, Status, Nachtstromnutzung) • Fahrzeuginformationen (Restreichweite, Navigation) • Verfügbarkeit, Lokalisierung und Reservierung von Ladeinfrastruktur oder Fahrzeugen • Reise-, Verkehrs- und Unfallinformationen • Elektronische Bezahlssysteme • Transitmanagement multimodaler Transportmöglichkeiten • Eco-Routing

um den effektiven Gebrauch, die Bezahlung und die Verfügbarkeit bereit. Art und Umfang der Kunden-Software sind grundsätzlich keine Grenzen gesetzt und müssen sich deutlich am Nutzungsverhalten der Kunden orientieren. Die Unternehmen der Telekommunikations- und Mobilfunkbranche haben in diesem Bereich schon viele Erfahrungen sammeln können. Kurze Produktentwicklungszyklen machen den Trial-and-Error-Prozess von Geschäftsmodellen in der IT im Gegensatz zur Einführung eines Elektrofahrzeugkonzepts wesentlich einfacher. Trotzdem bilden diese Modelle die grundlegende Voraussetzung für Existenz und Funktionsfähigkeit von Elektromobilität im urbanen Raum.

Auch innovative Tarif- und Abrechnungssysteme werden als Bausteine eines integrierten Mobilitätsangebots identifiziert. So existieren Abrechnungsmodelle, wie etwa das des „Green Service“, das ein Elektrizitätstarifpaket für den Privathaushalt und das Elektrofahrzeug aus Ökostrom anbietet. Unternehmensübergreifende Abrechnungsmodelle müssen bei der Elektromobilität genauso gut operieren wie in der Mobilfunkbranche, die auch an dieser Stelle wieder eine Vorreiterfunktion übernimmt. Bei der Nutzung verschiedener Netze über kommunale und nationale Grenzen hinweg muss die Fakturierung trotzdem gebündelt geschehen. Dies wird über das sogenannte E-Roaming ermöglicht. E-Roaming-Plattformen verbinden die Ladeinfrastrukturen unterschiedlicher Anbieter und stellen dem Kunden ein einheitliches Zugangs- und Abrechnungssystem zur Verfügung. Das größte offene internationale Netzwerk mit mehr als 750 Partnern ist „Hsubject“. Die Einrichtung von Roaming-Zonen und -Gebühren muss über die Einrichtung von Clearinggesellschaften erfolgen. Sie sorgen gegen Gebühr für einen automatischen Austausch von E-Roaming-Daten zwischen Abrechnungsstellen. Betreiber eines Clearingmodells arbeiten nahe an der Schnittstelle von Energieversorgungsunternehmen und Kunden. Deshalb sind es typischerweise die kommunalen und regionalen Energieversorger selbst oder ein Dienstleister, die den Wissensvorteil aus der Mobilfunkbranche mitbringt.

Optionale Bausteine von Geschäftsmodellen sind folglich in Energiemanagementsystemen, spezifischen IT-Diensten, „Green Services“ oder in Verbindung mit innovativen Abrechnungssystemen wie etwa E-Roaming zu finden. Sie bedienen die erweiterten Kundenbedürfnisse an den Nahtstellen eines integrativen Angebots für Elektromobilität und sind daher ein wesentlicher Bestandteil der meisten kundennahen, kooperativen Geschäftsformen.

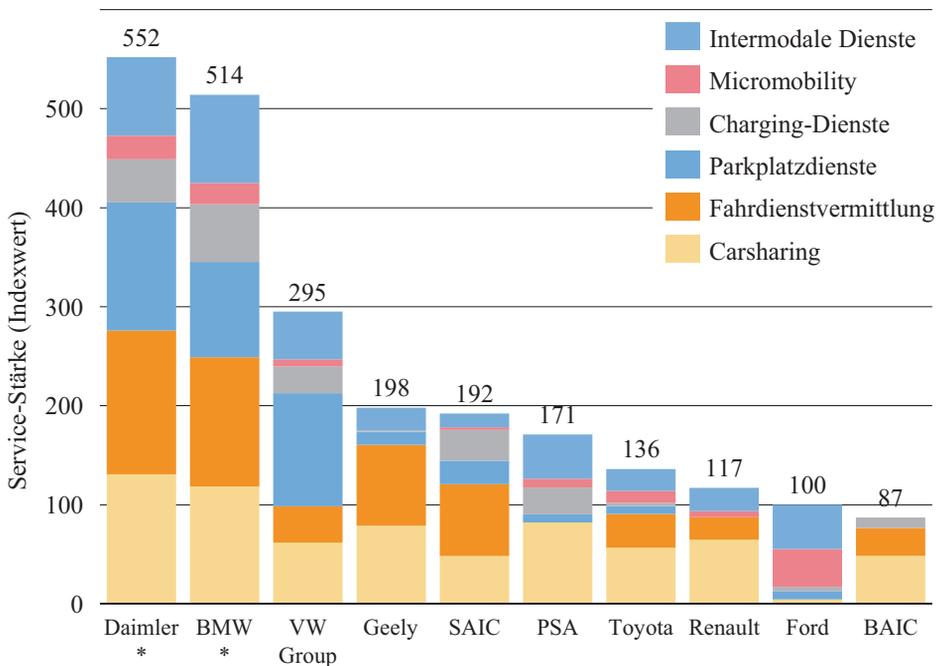
34.4 Weitergehende dienstleistungsorientierte und integrierte Geschäftsmodelle

Sowohl das Geschäftsmodell des Carsharings als auch Abo-Modelle bieten die Nutzung von Fahrzeugen unabhängig vom Eigentum an und sind demzufolge auch als dienstleistungsorientierte Geschäftsmodelle zu interpretieren. Unabhängig von der Elektromobilität erweitern Automobilproduzenten laufend das Spektrum ihrer Mobilitätsdienstleistungen, ebenso positionieren sich neue Unternehmen mit ihren Dienstleistungen, um ihren Anteil am gesamten Wertschöpfungspotenzial zu erweitern.

Für Automobilproduzenten sind bisher die ladeinfrastrukturbezogenen Angebote als Voraussetzung für den Verkauf ihrer E-Fahrzeuge von entscheidender Bedeutung. In Zukunft werden verstärkt auch Mobilitätsdienstleistungen wie Carsharing oder Abo-Modelle an Elektrofahrzeugen orientiert sein. Abb. 34.7 zeigt die dienstleistungsorientierten Angebote ausgewählter OEMs.²²

Deutsche automobilproduzierende Unternehmen sind gut für ein ganzheitliches Dienstleistungsangebot im Bereich der Mobilität positioniert. Daimler, BMW und VW bieten neben Carsharing und Lade-Services auch intermodale Dienste an und verbreitern damit ihre Wertschöpfung in Bezug auf das Ökosystem Mobilität. Um die gesamte innerstädtische Mobilität zu adressieren, ist Ford beispielsweise an dem Scooter-Anbieter SPIN beteiligt, das neben TIER, Voi und Lime zunehmend auch in europäischen Städten anzutreffen ist. Auch Daimler und BMW sowie in geringerem Umfang weitere Unternehmen sind im Bereich der Mikromobilität tätig. Gleichzeitig werden im Rahmen des Fahrzeug-

Service-Stärke nach Haupttypen der Top 10 OEM



*BMW-Daimler mit NOW-Joint-Venture

Abb. 34.7 Service-Stärke der Top-10-OEMs in Anlehnung an Bratzel und Tellermann (2020). (Vgl. Bratzel und Tellermann 2020, S. 69)

²²Vgl. Bratzel und Tellermann 2020.

Ökosystems (vgl. Abb. 34.8) diejenigen Angebote integriert, die dem Kunden Elektromobilität aus einer Hand ermöglichen.

Um ihren Kunden ein integrales Angebot der Elektromobilität zu gewährleisten, hat Tesla initial bereits das „Model S“ mit einem Netz von Schnellladesäulen, Wallbox und einem zusätzlichen Stromspeicher angeboten, so dass Photovoltaikanlage und Elektrofahrzeug optimal zusammenwirken. BMW bietet seine i-Serie mit einer Wallbox, einer Photovoltaikanlage und dem Zugang zur öffentlichen Ladeinfrastruktur an – und andere Unternehmen folgen.

Auch kleinere Betriebe versuchen, den Anteil ihrer Wertschöpfung auszuweiten. Ubitricity beispielsweise bietet Ladekabel mit intelligenten Stromzählern an, und zahlreiche Start-up-Unternehmen positionieren sich im Bereich der kundennahen Dienstleistungen.

Während Flottenbetreiber, Werkstätten und Autovermietungen der klassischen automobilen Kunden- und Wertschöpfungsstruktur angehören, tritt im erweiterten Fahrzeug-Ökosystem eine Vielzahl neuer Partner und Konkurrenten auf, die etwa im Bereich der Finanzdienstleistungen, der Freizeit oder des Handels ihre Angebote positionieren (vgl. Abb. 34.8).

In Bezug auf die Elektromobilität haben sich neben dienstleistungsorientierten Ladeinfrastrukturanbietern auch Betriebe wie etwa Alphabet positioniert, die umfassende Beratungen zur Unternehmensmobilität anbieten – etwa zur Modellstrategie

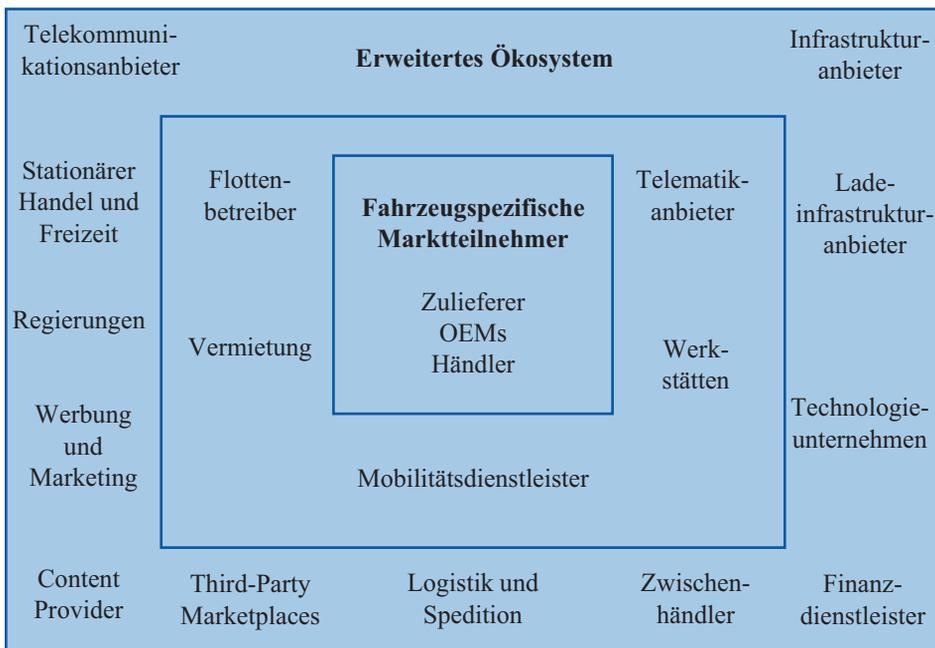


Abb. 34.8 Fahrzeug-Ökosystem in Anlehnung an Bertonecello et al. (2021). (Vgl. Bertonecello et al. 2021)

und zu Ladekonzepten. Daneben existieren Unternehmen, die sich mit der Datensicherheit und -integrität bei der Übermittlung von Informationen beim Laden von Elektrofahrzeugen beschäftigen. Weitere Unternehmen bieten Plattformen für das E-Carsharing an. Unabhängig von der Antriebsform ermöglichen es Kooperationen mit industriefernen Anbietern, wie etwa Freizeitbetrieben oder lokalen Händlern, die mobilitäts- und fahrzeugbezogenen Dienstleistungen um zusätzliche Angebote zu erweitern.

34.5 Kooperative Geschäftsmodelle

Eine Rekonfiguration von Wertschöpfungsaktivitäten ist von der Analyse der eigenen und der angrenzenden sowie verbundenen Branchen abhängig, um verknüpfte Wachstumsfelder und Überlappungen mit bestehenden Wertschöpfungsaktivitäten zu erkennen. Kernfragen der in einem Geschäftsmodell abgebildeten abstrahierten Realität sind inhaltlich grundsätzlich strategisch orientiert. Relevant ist eine konkrete Operationalisierung von strategischen Teilaspekten, die eine Kapitalisierung des Wertschöpfungsmodells erlaubt. Neben den in Abb. 34.9 dargestellten Kernelementen sind dies die Bestimmung der Kooperationspartner und -mechanismen in Abhängigkeit von der Auswahl der Wertschöpfungsaktivitäten (Kooperationsstrategie) sowie die Bestimmung und Entwicklung der Kernkompetenzen.

In der strategischen Wertschöpfungsgestaltung Elektromobilität ist die Entscheidung über die vertikale und horizontale Integration versus Auslagerung (Desintegration) von enormer Bedeutung. Die Integration qualitativ gleichwertiger Wertschöpfungsaktivitäten verändert die Wertschöpfungsbreite, während die vertikale Integration die Wertschöpfungstiefe verändert. Die Auslagerung von Aktivitäten der klassischen Wertschöpfung ist besonders für Automobilhersteller wichtig, da Mittel für Forschung und Entwicklung sowie horizontale Entwicklungen im Bereich Elektromobilität finanziert werden müssen. Die Auflösung der starren Wertschöpfungsbeziehungen in der elektromobilen Wertschöpfung und die systemischen Zusammenhänge treiben vertikale und horizontale Kooperationen dynamisch voran.

Um einen möglichst großen Anteil der neuen Wertschöpfungskette „Elektromobilität“ zu kapitalisieren, sind Unternehmen dazu gezwungen, ihre Kompetenzen und ihr Kapital durch Kooperationen zu bündeln. So wird die Fähigkeit entscheidend sein, verschiedenartige Kooperationen zu managen, um moderne Mobilität anzubieten. Über die Intensität der Beziehung und damit die Kontrollmöglichkeit entscheidet die gewählte Form der Kooperation.

Entwicklungskooperationen und strategische Allianzen zwischen Unternehmen derselben Wertschöpfungsstufe (horizontale Kooperation) zielen meist auf die gemeinsame Entwicklung nicht markenrelevanter Komponenten ab. Dabei sollen Verbund- und Skaleneffekte realisiert werden. Durch die Bündelung sich ergänzender Kompetenzen lassen sich

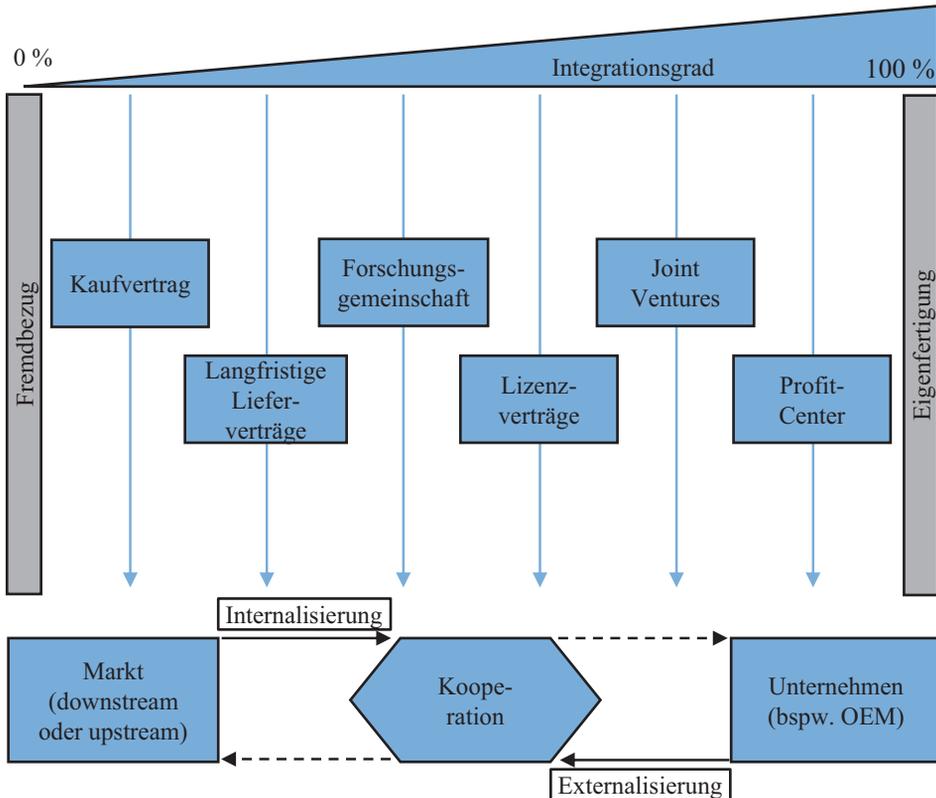


Abb. 34.9 Formen und Grade der Integration in Anlehnung an Glaum und Hutzschenreuter (2010). (Vgl. Glaum und Hutzschenreuter 2010)

die vorgegebenen Entwicklungsziele effizienter erreichen. Diese Kooperationen sind meist zeitlich und inhaltlich klar definiert, um die Kernkompetenzen der kooperierenden Unternehmen zu schützen.

Ein höherer Formalisierungsgrad wird durch ein gemeinsam neu gegründetes Unternehmen als ein sogenanntes Joint Venture erreicht. In einer solchen Partnerschaft werden fachspezifische Kompetenzen meist unterschiedlicher Wertschöpfungsstufen oder Industriebereiche zur gemeinsamen Entwicklung einer neuen Technologie zusammengeführt, die dann auch von diesem neuen Unternehmen vermarktet wird.

Das Wertschöpfungssystem „Elektromobilität“ erfordert eine Vernetzung des Elektrofahrzeugs mit der Batterie, der Ladeinfrastruktur und Mess- beziehungsweise Abrechnungssystemen. Während diese Integration technologiegetrieben ist, vernetzen sich Dienstleistungsunternehmen, um integrierte Mobilitätsbedürfnisse zu bedienen. Zukünftige Mobilität ist elektrisch, digital und vernetzt. Ein integriertes Angebot, das durch intelligente Nutzung der Daten kundenspezifische Mehrwerte generiert, ist Voraussetzung

für eine langfristige Kundenbindung. Die verschiedenen Akteure kooperieren aus unterschiedlichen Richtungen, um ihr jeweiliges Angebot in diesem Sinne auszudehnen. Zum einen werden durch die Bündelung verschiedener Kompetenzprofile technologieorientierte Entwicklungen angestrebt, oftmals in Bezug auf die Batterietechnologie (vgl. Tab. 34.3) oder die gemeinsame Entwicklung und Nutzung von Plattformen der Elektromobilität. Diese Kooperationen reduzieren den nötigen Kapitaleinsatz, können Entwicklungszeiten verkürzen und externe Kompetenzträger an das eigene Unternehmen binden. Kooperationen im Bereich des Ökosystems „Fahrzeug“ sind jedoch zunehmend auf weitere technologische Entwicklungen wie etwa das autonome Fahrzeug oder die Entwicklung dienstleistungsorientierter Angebote ausgerichtet. Es entstehen komplexe, ökosystem-übergreifende Netzwerke.

Zum anderen folgen Kooperationen in der Elektromobilwirtschaft dem Ziel, endkundenorientierte Mobilitätsleistungen anbieten zu können und dieses Angebot mit weiteren Zusatzleistungen zu verknüpfen. Das Zusammenspiel bisher unabhängiger Akteure erfordert koordinatives Lernen. In den vergangenen Jahren wurden vielfältige Erfahrungen dazu gewonnen, wie die Schnittstellen zwischen Automobilherstellern, Energieversorgern, Informations- und Telekommunikationsanbietern sowie anderen Akteuren wie etwa dienstleistungsorientierten Start-up-Unternehmen optimal gestaltet werden können. Diese marktorientierten Kooperationen spiegeln verschiedene integrierte Geschäftsmodelle wider, die sich schnell zu komplexen Angebotsnetzwerken weiterentwickeln.

Tab. 34.3 Kooperationsbeispiele in der Elektromobilität

Abbildungsquelle (unter Abbildung):		
Kooperationsrichtung entlang der Wertschöpfung	Kooperationsziele	Beispiele
Vertikal (OEM und Zulieferer)	• Kompetenzbündelung	• Tesla/Panasonic
	• Ressourcenkomplementaritäten	• Daimler/CATL
	• Kostenreduktion	
	• Entwicklungsgeschwindigkeit	
Horizontal (Wettbewerber der gleichen Wertschöpfungsstufe)	• Kompetenz- und Ressourcenbündelung	• Daimler/Geely
	• Risikoteilung	• Audi/BMW/ Daimler: Here
	• Kostenreduktion	• Daimler/BMW: Share Now
	• Angebots- und Markterweiterung	• Hella/Farasis • Stadtwerke
Lateral (Partner aus unterschiedlichen Wertschöpfungsbereichen)	• Kompetenzbündelung	• Waymo/FCA
	• Innovationsradius	• Bosch/ Microsoft
	• Entwicklungsgeschwindigkeit	
	• Integrierte und systemische Angebote	

34.6 Kooperationen von Automobilherstellern

Automobilproduzenten bilden strategische Allianzen, um gemeinsam verbrauchsarme, optimierte, konventionelle und elektrifizierte Antriebe zu entwickeln. Diese horizontalen Kooperationen dienen in erster Linie der Realisierung von Skalen- und Verbundeffekten. Baukastenkonzepte zur Produktion, die modell- und markenübergreifend eingesetzt werden, können Kosten und Komplexität reduzieren und folgen dem Trend, möglichst große Skaleneffekte im Bereich des Unterbaus zu erwirken, der vom Kunden nicht wahrgenommen wird. Die Differenzierung erfolgt im Bereich des Aufbaus und insbesondere mit Blick auf die Innenraumgestaltung sowie die Konnektivität. Neben dem Ziel, Skalen- und Verbundeffekte zu realisieren, liegen weitere Gründe in der Nutzung spezifischer Vorteile wie der Kompetenz in Bezug auf Kleinwagenproduktion oder der Positionierung in Märkten. Ein Beispiel dafür ist die Kooperation von Daimler und Geely zur Produktion des E-Smart in China.²³

Entwicklungsorientierte Kooperationen reduzieren Kapitalbedarf und Entwicklungszeiten, während in der Produktion Skaleneffekte erzielbar sind. Die gemeinsamen Entwicklungen konzentrieren sich oftmals auf die Kompaktklasse, so dass Kernkompetenzen für Premium-Fahrzeuge erhalten bleiben. Die gewählten Kooperationsformen reichen in Abhängigkeit vom Kooperationsziel von strategischen Allianzen bis hin zu Gemeinschaftsunternehmen. Daimler und Renault-Nissan kooperieren seit mehreren Jahren in Bezug auf Elektrofahrzeuge, BMW und PSA arbeiteten ebenfalls seit Jahren im Motorenbereich zusammen.²⁴ Mit zunehmender Bedeutung von Elektrofahrzeugen für die Wertschöpfung werden diese kooperativen Entwicklungsaktivitäten von Automobilproduzenten im Kernbereich eher zurückgehen und dann im Alleingang fortgesetzt.

In wachsendem Maße entstehen auch Netzwerke zwischen Automobilproduzenten, um dienstleistungsorientierte Angebote aus angrenzenden Ökosystemen anbieten zu können. Daimler, BMW und Audi übernahmen zum Beispiel 2015 den Kartenanbieter Here von Nokia; Bosch und Continental stiegen später ebenfalls ein. Daimler und BMW bündelten im Jahr 2019 mit „Share Now“ ihre Kompetenzen im Carsharing.

Automobilproduzenten können durch Kooperationen mit Zulieferern von deren Know-how etwa in der Batterietechnik, in der Elektromotorentchnik und im Leichtbau profitieren. Ziel ist die schnellere Markteinführung von Elektrofahrzeugen und eine Erweiterung der Wertschöpfung in Wachstumssegmente – insbesondere beim Antriebsstrang. Außerdem ist der Verkauf der gemeinsam entwickelten Produkte an andere Industriebereiche aus Sicht der Automobilbauer eine interessante Möglichkeit, ihr Geschäftsmodell auszuweiten. Aufgrund der strategischen Relevanz ist der Integrationsgrad solcher Kooperationen relativ hoch. Vor allem in Bezug auf Kooperationen für Batterietechnologien zeichnete sich eine rückläufige Tendenz von innereuropäischen Partnerschaften ab, da die Zellfertigung von asiatischen Anbietern dominiert wird. Demzufolge entstanden Ko-

²³Vgl. Daimler AG 2020.

²⁴Vgl. Daimler AG 2016.

operationen westlicher Automobilproduzenten mit asiatischen Zellanbietern – etwa die Kooperation zwischen Daimler und BYD (China) sowie zwischen Daimler und CATL oder Tesla und Panasonic. Insbesondere in den vergangenen zwei Jahren entstanden auch innereuropäische Kooperationen wie zwischen VW und Northvolt, um Wertschöpfungspotenziale der Zellproduktion auch in Europa zu nutzen und eine größere Unabhängigkeit von asiatischen Zulieferern zu erlangen.

Außerdem entwickeln sich Kooperationen in Bezug auf innovative Lademodule und -prozesse. Dazu kooperiert zum Beispiel BMW mit Solarwatt bei der Entwicklung innovativer Glasmodule für die Batterieladung, und Daimler arbeitet mit dem Chip-Spezialisten Qualcomm (USA) mit Blick auf induktive Ladeprozesse für Elektroautos zusammen. Tendenziell treibt die zunehmende Bedeutung elektromobiler Wertschöpfung aufgrund der globalen Kompetenzverteilung die Kooperation mit außereuropäischen Partnern an. Probleme können sich durch die Wettbewerbsverschiebung als Folge geänderter Wertschöpfungsstrukturen ergeben: Wenn Automobilproduzenten künftig selbst als Tier-1-Zulieferer für andere Autobauer auftreten, ist eine Abgrenzung der Kernkompetenzen schwierig. Kooperationen im endkundennahen Bereich dienen dem Angebot von Ladeinfrastrukturen und intelligenten Abrechnungssystemen sowie einer besseren Verbreitung von Elektrofahrzeugen.

Beteiligungen an neuen Akteuren – beispielsweise bei Daimler an Tesla – wurden initiiert, um deren Innovationskraft in den eigenen Ressourcen-Pool aufzunehmen. Zudem erleichterte diese Kooperation die Beobachtung der Anbieter von Elektrofahrzeugen, die ohne die Kompetenz großer Fahrzeugbauer auskommen. Diese Kooperationen gelingen meist nur über Beteiligungen, da innovative und junge Unternehmen neue Finanzquellen erschließen müssen. Es etablieren sich auch gänzlich neue Produktionsnetzwerke im Bereich der Elektromobilität; ein Beispiel dafür lieferte die im Jahr 2010 in Aachen zur Entwicklung und Produktion von Elektrofahrzeugen gegründete Streetscooter GmbH. Die Herausforderung, Wissen aus unterschiedlichen Industriebereichen zu bündeln und den Herausforderungen einer Kleinserienproduktion in einem noch jungen Markt zu entsprechen, hat zu einem eigenen Netzwerkverständnis sowie neuen Management- und Organisationsansätzen geführt. Eine Vielzahl von Akteuren aus Wissenschaft und Industrie haben in dezentralen Konfigurationsstrukturen, basierend auf modularer Produktionsarchitektur, einen flexiblen Ansatz für Elektrofahrzeuge gezeigt. Durch die Partizipation der Akteure an Standard-Spezifizierungen kann ein solches Netzwerk sein Innovationspotenzial in höherem Maße entfalten. Die Streetscooter GmbH wurde Ende 2014 an die Deutsche Post AG verkauft.

34.7 Kooperationen von Automobilzulieferern

Zulieferer kooperieren horizontal, vertikal oder auch mit bisher branchenfernen Unternehmen, um ihre Kompetenzen und ihre Marktposition im Bereich von elektronischen Systemen und Batteriesystemen zu stärken. Da der Anspruch an die Fahrzeugtechnik und

das Wertschöpfungspotenzial bei elektronischen Systemen und dem elektrifizierten Antriebsstrang zunimmt, können sie unabhängig von Fahrzeugproduzenten ihren Wertschöpfungsanteil verbreitern und vertiefen. Bosch und Samsung hatten ein Gemeinschaftsunternehmen gegründet, das die Entwicklung, die Fertigung und den Vertrieb von Lithium-Ionen-Batteriesystemen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen zum Ziel hatte. Dieses Joint Venture wurde aufgrund unterschiedlicher Auffassungen mit Blick auf das Geschäft wieder beendet. Bosch hat in seinem Projekthaus „Hybrid“ bereits umfassendes Know-how etwa in den Bereichen Leistungselektronik, Batteriemangement, elektrische Maschinen, Getriebe oder Gleichspannungswandler aufgebaut. Durch ihre Kooperation mit Automobilproduzenten stärken insbesondere Batterieproduzenten ihre Wertschöpfungsposition downstream oder erweitern ihr Geschäftsmodell in andere Industriebereiche. Die „GS Yuasa Corporation“ aus Japan kooperiert beispielsweise mit Bosch und Mitsubishi zur Erforschung der nächsten Generation der Lithium-Ionen-Batterie. Das deutsche Unternehmen Hella, das Kompetenz in Bezug auf Steuergeräte einbringt, kooperiert mit dem chinesischen Batteriehersteller „Farasis Energy“ im Rahmen einer strategischen Allianz zur Entwicklung modularer Plattformen für Batteriemangementssysteme.²⁵

Die Infineon Technologies AG und die RWE Effizienz GmbH – ein Tochterunternehmen der RWE AG – etablierten Ladestationen für Elektrofahrzeuge in Warstein, einem der Produktions- und Entwicklungsstandorte von Infineon. Dort entwickelt und fertigt das IT-Unternehmen innovative Leistungshalbleiter für industrielle und automobiler Anwendungen, unter anderem für den Antriebsstrang von Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Halbleiterlösungen können helfen, die Kosten für Antrieb und Elektronik zu senken und die Energieeffizienz des Gesamtsystems zu erhöhen. Auch bei der Ladeinfrastruktur und für das Thema „Smart Grid“ werden Halbleiterlösungen benötigt. Sensoren, Mikrocontroller und Leistungshalbleiter des Unternehmens spielen eine zentrale Rolle bei der Gewinnung, Übertragung und Einspeisung von Energie in die Batterien sowie der Rückspeisung ins Netz.

Automobilproduzenten kooperieren intensiv mit Unternehmen aus anderen Branchen im Bereich des autonomen Fahrens. Für große Zulieferer besteht durch ihre systemintegrative Kompetenz längst die Möglichkeit, mit endkundenorientierten IT-Unternehmen zu kooperieren und als Fahrzeuglieferant aufzutreten. Bosch und Microsoft beispielsweise arbeiten gemeinsam an einer Software-Plattform zur nahtlosen Vernetzung von Autos und Cloud.²⁶ Fiat Chrysler entwickelt mit dem zu „Alphabet“ gehörenden Unternehmen Waymo Technologien für autonome Fahrzeuge.²⁷

²⁵ Vgl. Werwitzke 2021.

²⁶ Vgl. Tyborski 2021.

²⁷ Vgl. Pillau 2020.

34.8 Kooperationen von Energieversorgungsunternehmen

Unternehmen der Energieversorgung müssen ihre Wertschöpfung über die Bereitstellung der Infrastruktur hinaus erweitern, um kostendeckend respektive mit Gewinn zu operieren. Im Wesentlichen werden produkt- beziehungsweise technologiebezogene Entwicklungskooperationen zur Herstellung und Standardisierung von Ladesystemen initiiert und Projektkooperationen zum Aufbau von Ladestationen geschlossen – wie etwa mit Infineon. RWE arbeitet mit einer Reihe unterschiedlicher Unternehmen zum Aufbau von Ladestationen zusammen, neuerdings auch mit der Tochtergesellschaft des Konkurrenten E.ON (Uniper). In Deutschland kooperierten Energieversorgungsunternehmen darüber hinaus auch innerhalb der von der „Nationalen Plattform Elektromobilität“ geförderten Modellregionen. Beispielsweise arbeitete „E.ON“ in der Modellregion München mit Audi, den Stadtwerken München (SWM) und der Technischen Universität München (TUM) zusammen. Dabei gewannen die Partner in erster Linie Erkenntnisse zur Datenübertragung zwischen Fahrer, Fahrzeug, Stromtankstelle und Stromnetz. Auf lokaler Ebene kooperieren Stadtwerke, um Ladeinfrastrukturen auf einer größeren geografischen Fläche anbieten zu können.

Zugleich wirken Energieversorgungsunternehmen mit einer Reihe von anderen Mobilitätsanbietern zusammen, um ihre Position im Rahmen eines integrierten Mobilitätsangebots zu stärken. Energieversorgungsunternehmen beschränken sich bisher weitgehend auf kompetenzgetriebene Kooperationen im Downstream der elektromobilen Wertschöpfungskette. Vereinzelt positionieren sie sich auch als Anbieter eines integrierten Mobilitätsangebots. Der Stromversorger WEMAG hat bereits im Jahr 2014 die mehrheitlichen Anteile am Fahrzeugbauer Karabag übernommen. Automobilzulieferer streben einerseits nach dem weiteren Ausbau ihres Wertschöpfungsanteils, andererseits nutzen sie jedoch auch die entstehenden Chancen einer veränderten Wertschöpfungsstruktur, um sich als „Schichtenspezialisten“ mit anderen Industriebereichen zu vernetzen und in diese vorzudringen.

Gemeinsame Wertschöpfung wird in der Weiterentwicklung von Elektromobilität in noch stärkerer Zusammenarbeit realisiert werden, als dies schon heute der Fall ist. Ein stark vernetztes Wertschöpfungssystem der Elektromobilität entsteht. Den Kernkompetenzen der verschiedenen Akteure entsprechend, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass Automobilproduzenten als sogenannte Mega-OEMs eine Systemintegration anstreben, sich also durch Kooperationen wertschöpfungsübergreifend positionieren.

Literatur

Teil VI: Geschäftsmodelle entlang der elektromobilen Wertschöpfungskette

- A.T. Kearney:** *The demystification of car sharing*. <https://www.de.kearney.com/automotive/article/?a/the-demystification-of-car-sharing>. Abruf 20.08.2021
- Aagaard, A.:** *Understanding and Evaluating Sustainable Business Models: A Cross-industry Case Study*. The 24th Innovation and Product Development Management Conference (IPDMC), June 11–13 2017.
- Aagaard, A.:** *Identifying Sustainable Business Models Through Sustainable Value Creation*. In: Aagaard, A. (Hrsg.): *Sustainable Business Models: Innovation, Implementation and Success* Cham: Palgrave Macmillan, 2019, S. 1–14
- Arnold, H; Kuhnert, F; Kurtz, R; Bauer, W.:** *Elektromobilität Herausforderungen für Industrie und öffentliche Hand*. Frankfurt am Main, 2010
- Bertocello, M; Martens, C; Möller, T; Schneiderbauer, T.:** *Unlocking the full life-cycle value from connected-car data*, 2021
- Bratzel, S; Tellermann, R.:** *Connected Car Innovation Studie 2020*. Bergisch Gladbach, 2020
- Bundesverband CarSharing:** *CarSharing in Deutschland*, 2021
- Daimler AG:** *Strategische Kooperation zwischen Daimler und Renault-Nissan Allianz in 2016 intensiviert*, 2016
- Daimler AG:** *Mercedes-Benz und Geely. Globales Joint Venture für smart*. Stuttgart, 2020
- dena, P.:** *Privates Ladeinfrastrukturpotenzial in Deutschland*. Berlin, 2020
- Deutsche Bank AG:** *Schnell Laden*. Frankfurt am Main, 2021
- EY:** *Stadtwerkstudie 2020*, 2020
- Gassmann, O; Csik, M; Frankenberger, K.:** *Geschäftsmodelle entwickeln. 55 innovative Konzepte mit dem St Galler Business Modell Navigator*. München: Hanser Verlag, 2013
- Gersdorf, T; Hensley, R; Hertzke, P; Schaufuss, P; Tschiesner, A.:** *The road ahead for e-mobility*, 2020
- Glaum, M; Hutzschenreuter, T.:** *Mergers & Acquisitions. Management des externen Unternehmenswachstums*. Stuttgart: Kohlhammer, 2010
- International Energy Agency (IEA):** *Global EV Outlook 2021*. Paris, 2021
- International Energy Agency (IEA):** *Global EV Outlook 2021 – Trends and developments in electric vehicle markets*. Paris, 2021
- Krauss, K; Scherrer, A; Burghard, U; Doll, C; Schuler, J; Niessen, P.:** *Shared Mobility Facts*. Karlsruhe, 2021
- Müller-Stewens, G; Lechner, C.:** *Strategisches Management. Wie strategische Initiativen zum Wandel führen*. 4., überarb. Aufl. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2011
- Pillau, F.:** *Fiat Chrysler baut Roboterwagen mit Waymo – und wirft Aurora raus*, 2020
- Schiller, T; Kummer, P; Berdichevskiy, A; Weidenbach, M; Sadoun, J.:** *Future of Automotive Sales and Aftersales. Impact of current industry trends on OEM revenues and profits until 2035*, 2020
- Ström, S; Fischer, M; Hourmouzis, C; Kuhnert, F; Schlegel, A.:** *The Future of Automotive Retail*, 2017
- Tyborski, R.:** *Bosch und Microsoft entwickeln gemeinsam neue Softwareplattform*, 2021
- Werwitzke, C.:** *Farasis knüpft weitere Kooperationen in Europa*, 2021

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Garnet Kasperk, Sarah Fluchs und Julius Hausmann

35.1 Geschäftsmodellinnovationen

Sowohl die Elektrifizierung des Antriebsstrangs als auch die mit der Vernetzung des Fahrzeugs erweiterten Dienstleistungsangebote eröffnen Automobilproduzenten, Energieversorgern, IT-Unternehmen und Start-up-Betrieben aus verschiedenen Bereichen die Möglichkeit, durch erweiterte und neue Geschäftsmodelle zusätzliche Wertschöpfungspotenziale zu erschließen. Unternehmen der Zulieferindustrie und der Energieversorgung weiten ihr Angebotsportfolio meist im Rahmen bestehender Geschäftsmodelle upstream und downstream aus, um ihren Anteil an Wertschöpfungspotenzialen zu erhöhen. Automobilproduzenten entwickeln parallel zu – und in Verbindung mit – ihren bestehenden Geschäftsmodellen neue Wege zur Bedienung von Kundennutzen, um zusätzliche Wertschöpfungspotenziale des in Transformation befindlichen Mobilitätssektors zu erschließen (Abb. 35.1).

G. Kasperk (✉)

Leiterin Center for International Automobile Management, Lehrstuhl für Internationale Wirtschaftsbeziehungen RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: garnet.kasperk@rwth-aachen.de

S. Fluchs

Economist im Bereich Umwelt, Energie, Infrastruktur, Institut der deutschen Wirtschaft, Köln, Deutschland

E-Mail: Fluchs@iwkoeln.de

J. Hausmann

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: julius.hausmann@rwth-aachen.de

Wertschöpfungsentwicklung

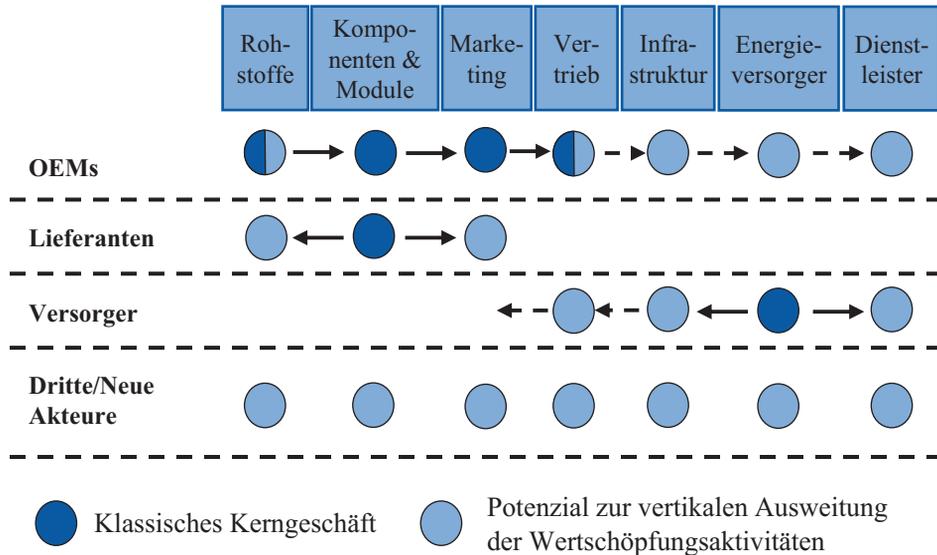


Abb. 35.1 Vertikale Integrationsmöglichkeiten der Akteure. (Vgl. Valentine-Urbschat und Bernhart 2009)

Die technologischen Entwicklungen in Bezug auf Datenanalyse und Konnektivität führen insgesamt dazu, dass kundenzentrierte Dienstleistungsangebote zunehmen. Diese durch Digitalisierung getriebene und als „Servitization“ der Geschäftsmodelle bezeichnete Entwicklung bedeutet für produkt- und produktionsorientierte Unternehmen, dass sie ihre grundsätzliche Strategie neu ausrichten, um die Gewichtung zwischen produktions- und digitalbasierten dienstleistungsorientierten Wertschöpfungsanteilen zu definieren. Wie erläutert, erfordern insbesondere ökosystemübergreifende Lösungen für Kunden die Kombination von Produkten, Dienstleistungen, Software und Datenanalyse (künstliche Intelligenz), um autonome Systeme zu entwickeln, auf deren Basis optimale Zusatzangebote für die Organisation des täglichen Lebens unterbreitet werden.¹ Die Netzwerksteuerung obliegt dabei dem Integrator, der üblicherweise auch den Kundenkontakt entwickelt. Die wesentliche Fähigkeit liegt in der Kompetenz, die Schnittstellen des eigenen Geschäftsmodells mit denen verbundener Unternehmen zu koordinieren. Auch Betriebe der Energieversorgung müssen die unterschiedlichen Bedürfnisse von Parkraumbetreibern, Flottenbetreibern oder Unternehmen der Immobilienwirtschaft adressieren.

¹Vgl. Kohtamäki et al. 2019, S. 380ff.

Abb. 35.2 zeigt Geschäftsmodelle in Abhängigkeit vom gewählten Preismechanismus, von der Anwendung digitaler Lösungen sowie vom Grad der Standardisierung beziehungsweise der Kundenorientierung.²

Der Produkthanbieter orientiert sich an Skaleneffekten der Produktion und nutzt Digitalisierung zur Effizienzsteigerung durch Monitoring und Controlling der Prozesse. Produktdifferenzierung basiert auf technologischen Spezifikationen. Eng an das Produkt gekoppelte Dienstleistungen werden auf Basis einer produktbezogenen Preisgestaltung standardisiert angeboten.

Wird der produktbezogene Service um Angebote wie etwa Mobilitätsdienstleistungen erweitert, entstehen parallel vertragsbasierte Beziehungen. Der Einsatz der Digitalisierung reicht über effizienzgetriebene Monitoring- sowie Kontrollfunktionen hinaus und bezieht Angebote der proaktiven Wartung und Vorhersage weiterer Services ein; gleichzeitig werden technologische Möglichkeiten für erweiterte Dienste wie Carsharing genutzt. Die

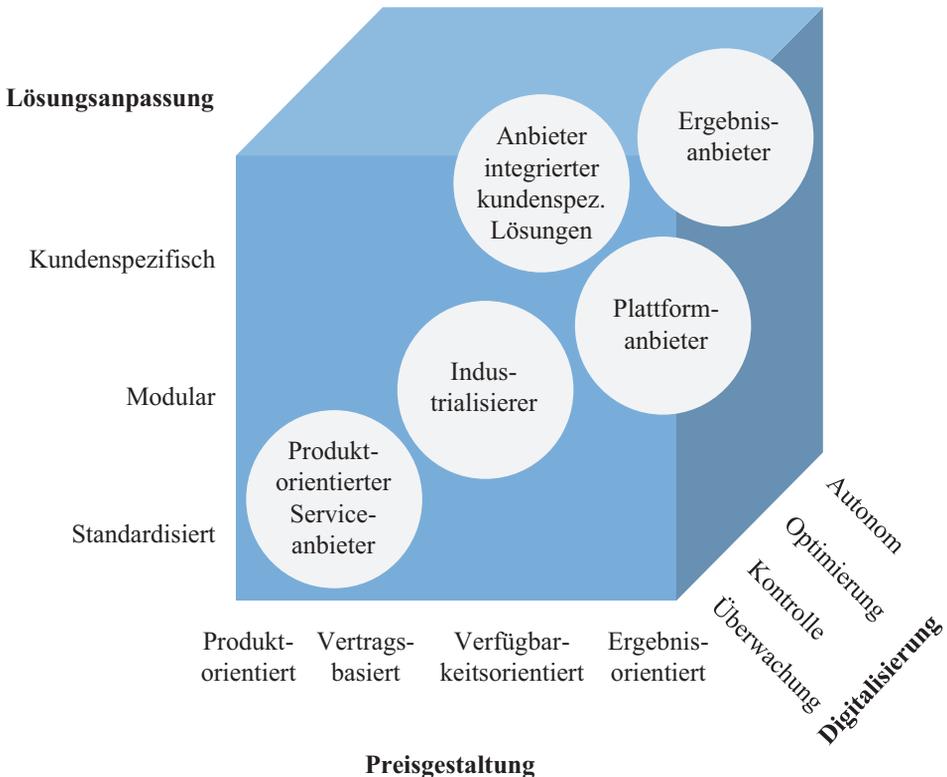


Abb. 35.2 Digitale dienstleistungsorientierte Geschäftsmodelltypen. (Vgl. Kohtamäki et al. 2019, S. 384)

²Vgl. Kohtamäki et al. 2019, S. 380ff.

Strategie stellt Skaleneffekte durch Produktstandardisierung sowie technologische Entwicklungen der Angebotserweiterung in den Mittelpunkt.

Anbieter integrierter kundenbezogener Lösungen bieten in ihrem Ökosystem Lösungen an, die kundenspezifisch variabel sind; die Preisgestaltung orientiert sich an Verfügbarkeiten. Digitalisierung wird genutzt, um Lösungen bedarfsgerecht zur Verfügung zu stellen und Prozesse laufend zu optimieren. In diese Richtung entwickeln sich derzeit die Strategien und Geschäftsmodelle von Automobilproduzenten. Ebenso bieten Unternehmen der Energieversorgung in ihrem Ökosystem zunehmend kundenorientierte Produkt-Service-Lösungen an.

Plattformanbieter verfolgen ein dienstleistungsorientiertes Geschäftsmodell. Ihre Plattform ermöglicht Interaktionen zwischen Anbietern und Kunden sowie geteilte Dienste. IT-Unternehmen verfolgen dieses Geschäftsmodell.

Lösungsanbieter nutzen ihre eigenen Plattformen, um ihre kundenbezogenen oder modularen Dienste auf Basis eines leistungsorientierten Preismechanismus zu offerieren. Sie wirken mit Partnern zusammen, um ihr Angebot zu erweitern. Es entsteht ein Wertschöpfungsnetzwerk von interdependenten Stakeholdern.³ Dieses Geschäftsmodell streben solche Automobilproduzenten an, die ihre eigenen Software-Plattformen entwickeln, um von IT-Anbietern unabhängig zu werden.⁴

35.2 Geschäftsmodelloptionen aus Sicht der Automobilhersteller

Innovative Geschäftsmodelle sind durch die Neuartigkeit des Kundennutzens und der entsprechend angepassten wertschöpfungsorientierten Rekonfiguration geprägt. Während sich für alle Marktteilnehmer Aspekte der Wertschöpfungsstrukturen – etwa durch neue Partner – und auch Ertragsmodelle ändern, definieren Automobilproduzenten – motiviert durch Elektrifizierung, Digitalisierung und Konnektivität – sämtliche Elemente ihres ursprünglichen Geschäftsmodells neu. Sie definieren insbesondere einen erweiterten Kundennutzen und steigern sukzessive den Anteil ihrer dienstleistungsorientierten Angebote (Abb. 35.3).

Mit Blick auf die Wertschöpfungsstrukturen ändern sich für Automobilunternehmen die Produktionsstrukturen. Neue Werke entstehen und die bereits in Verbindung mit Verbrennungsmotoren forcierten Plattformlösungen werden im Zusammenhang mit der Elektromobilität markenübergreifend ausgeweitet. Gleichzeitig wird der Kapazitätsaufbau für E-Fahrzeuge in China beschleunigt. Im Rahmen der Wertschöpfung verändert die Elektrifizierung des Antriebsstrangs auch das Zulieferportfolio. Neue Kompetenzen, die teilweise durch externe Kooperationen hinzugefügt werden, erlauben die Integration von Ladeinfrastruktur und entsprechenden Dienstleistungen für ein integriertes Elektromobilitätsangebot.

³Vgl. Grieger und Ludwig 2019, S. 473ff.

⁴Vgl. Kohtamäki et al. 2019, S. 380ff.

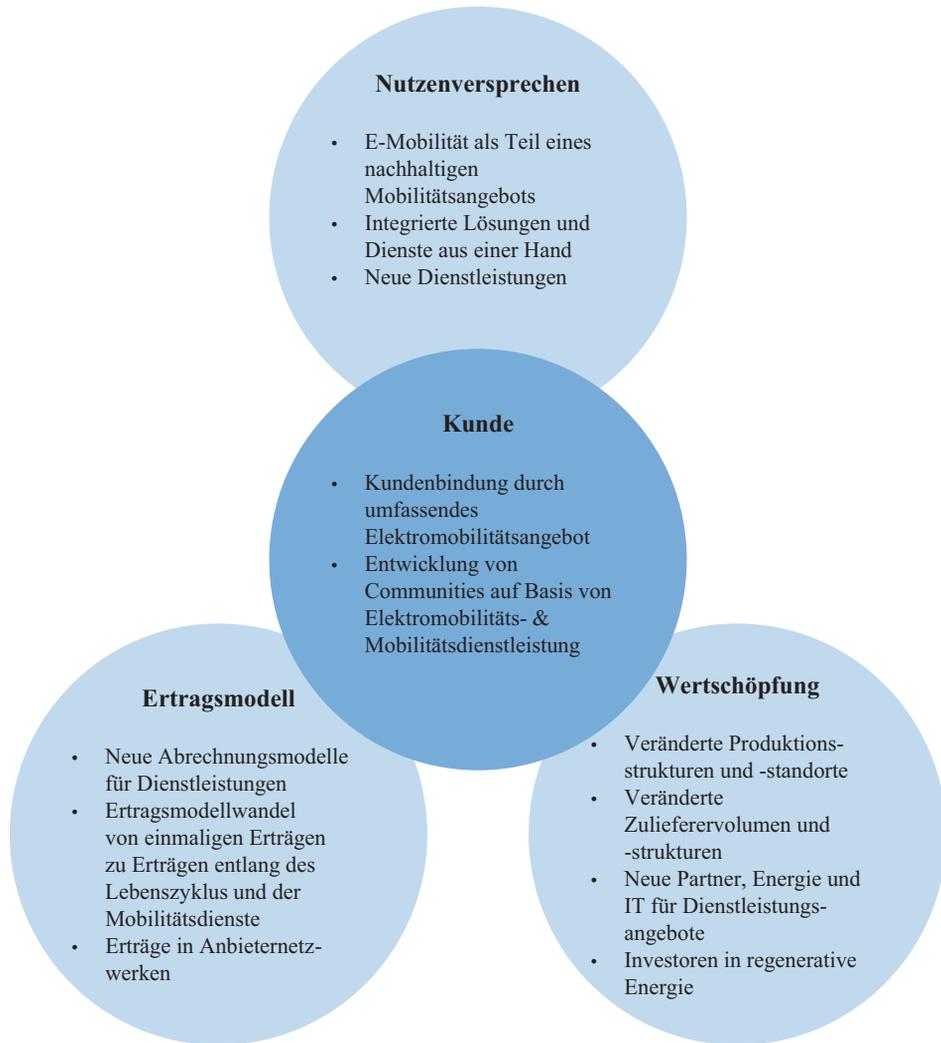


Abb. 35.3 Strukturierung der Elektromobilität auf Geschäftsmodelle

E-Mobilität als derzeit wichtigster Lösungsansatz zur Erreichung der ökologischen Ziele verändert den von Automobilproduzenten definierten Kundennutzen. In Kombination mit Konnektivität werden nachhaltige Produkt- und Mobilitätsangebote adressiert und je nach strategischer Ausrichtung neue Geschäftsmodelle eingeführt, die den Fokus von produkt- zu dienstleistungsorientierten Angeboten verschieben. Mit wachsendem Anteil des Dienstleistungsangebots an der gesamten Wertschöpfung ändert sich das Geschäftsmodell mit seinen erforderlichen Kompetenzen und Orientierungen fundamental – beziehungsweise der Anbieter von Produkten verfolgt parallel verschiedene Geschäftsmodelle, wobei die Bedeutung des dienstleistungsorientierten Angebots

entscheidend für eine Differenzierung von Geschäftsmodelltypen sein wird und die Definition des Markenkerns betrifft. Automobilproduzenten, die eine eigene Technologieplattform in ihre Fahrzeuge integrieren und ihre Kundenkontakte sowie -daten für personalisierte fahrzeugbezogene und zunehmend auch lifestylebezogene Angebote nutzen, werden zu Lösungsanbietern. Das wahrnehmbare Angebot betrifft das gesamte Ökosystem der Mobilität und der angrenzenden Lebensbereiche („Live and Move“). Je umfassender das über ihre Fahrzeuge vermittelte Dienstleistungsangebot ist, desto höher werden die Barrieren mit Blick auf einen Wechsel zu einem anderen System. Die deutschen Automobilproduzenten haben sich dabei für Unabhängigkeit entschieden und entwickeln bis etwa 2025 ihre eigenen Plattformlösungen, während andere Produzenten in Kooperationen mit Unternehmen wie Apple und Google Anbieter von mobilitätsbezogenen Lösungen bleiben, das umfassendere Leistungsangebot und der Kundenkontakt aber Unternehmen der IT-Branche überlassen werden. Diese Automobilproduzenten werden sich auf den Verkauf ihrer Fahrzeuge für Flottenanbieter beschränken und langfristig voraussichtlich andere Kundenkontakte abgeben. Der Kundennutzen beschränkt sich in diesem Geschäftsmodell „Drive“ auf das Eigentum beziehungsweise auf die Nutzung von Fahrzeugen und direkt verbundene Dienste. Treten Fahrzeugbauer selbst als Flottenbetreiber sowie Anbieter von weiteren Mobilitätsdienstleistungen auf, erweitert sich der Kundennutzen um flexible Mobilitätsangebote („Use and be supported“) (Tab. 35.1).

Der Bedeutungszuwachs der serviceorientierten Wertschöpfung bedeutet für Automobilproduzenten eine strategische Umorientierung, die Entwicklung paralleler Geschäftsmodelle und eine Zunahme der Komplexität.

Tab. 35.1 Geschäftsmodelltypen der Automobilproduzenten

Abbildungsquelle (unter Abbildung):			
	Drive	Use and be supported	Live and Move
Produkt	Fahrzeug	Fahrzeug	Fahrzeug
	Wartung	Wartung	Wartung
	Finanzierung	Finanzierung	Finanzierung
	Services	Services	Services
		Automatisierte Fahrfunktionen	Automatisierte Fahrfunktionen
			Energieproduktion und -speicherung
Mobilität		Sharing	Sharing
		Parking	Parking
		Ridesharing	Ridesharing
		Taxi/Limousine	Taxi/Limousine
Integrierte Dienste		Integrierte Mobilitätsangebote	Integrierte Mobilitätsangebote
			Life-Style-Planung und Abwicklung

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs sowie die Digitalisierung ziehen einen Mehrbedarf elektrotechnischer Kompetenz sowie Kompetenzen im Bereich der Informationstechnologie und der Datenanalyse nach sich. Die zunehmende Dienstleistungs- und Lösungsorientierung erfordert ein weit darüber hinausreichendes Spektrum technologie- und produktunabhängiger Kompetenzen. Für die marktseitige Entwicklung kundenspezifischer Lösungen sind empathisches Dienstleistungsvermögen und Fähigkeiten der Systemintegration und -entwicklung wichtig. Da Wertschöpfung zunehmend in komplexen Angebotsnetzwerken stattfindet, ist die Kompetenz der Einbindung verbundener Geschäftsmodelle der Partner entscheidend (Abb. 35.4).

Letztlich entstehen Netzwerke und das Management von komplexen Stakeholder-Beziehungen innerhalb existenter und angrenzender Netzwerke ist – je nach Geschäftsmodell – eine der wichtigsten Fähigkeiten für künftige Erfolge.

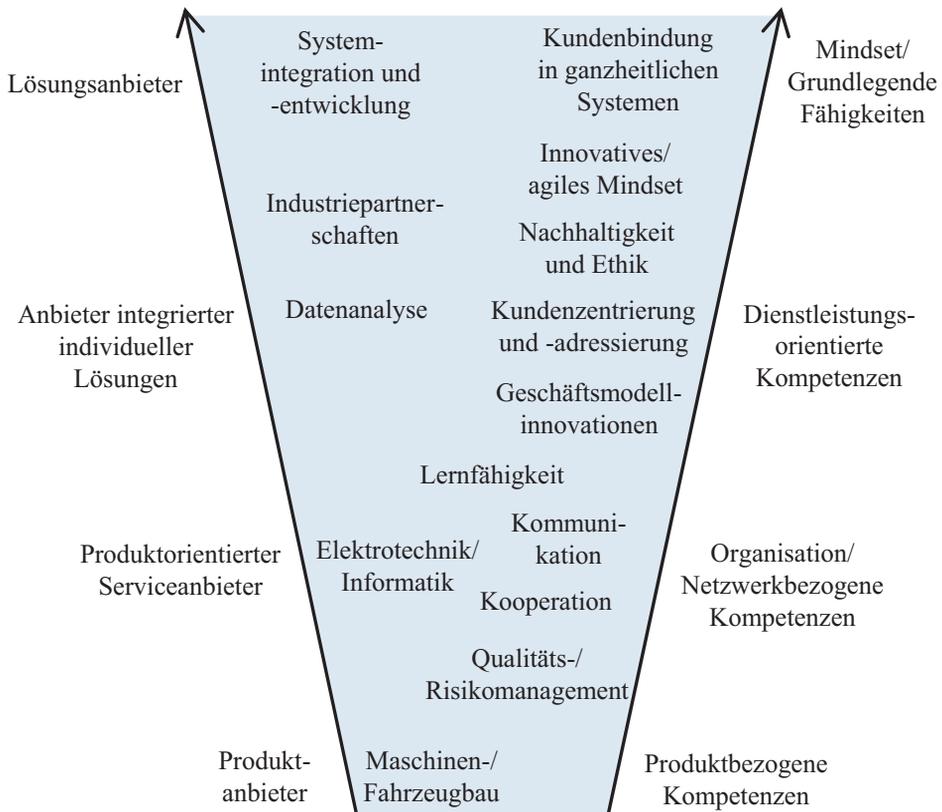


Abb. 35.4 Geschäftsmodellorientiertes Fähigkeitsspektrum

35.3 Geschäftsmodelloptionen aus Sicht der Automobilzulieferer

Automobilzulieferer investieren seit mehreren Jahren umfangreich in die Transformation ihrer Geschäftsfelder – orientiert an Elektrifizierung, Digitalisierung und Technologien in Bezug auf autonomes Fahren. Die Umsatzrückgänge in Zeiten der Corona-Pandemie haben die verfügbaren Finanzreserven reduziert und machen die Finanzierung der umfassenden Transformationsprozesse schwierig.⁵

Die produkttechnologische Kompetenz für Elektromobilität liegt zum großen Teil bei klassischen Automobilzulieferern. Der Wegfall, die Neueinführung und die Veränderung von Komponenten lassen die Systemkompetenz von Tier-1-Komponenten- und Modulherstellern hervortreten, erfordern aber auch hier eine strategische Umorientierung und neue Kompetenzen. Ein erfahrener Zulieferer kann sich als Portfolioanbieter der Elektromobilität mit Ambition zur Technologieführerschaft positionieren, wenn er sein Angebot frühzeitig angepasst hat. Zu einem Geschäftsmodell für Automobilzulieferer gehört auch die Batterieproduktion, die in Bezug auf technologische Kompetenzen heute hauptsächlich bei asiatischen Zellherstellern liegt. Insbesondere wenn große Zulieferer eine extensive Batteriekompetenz aufbauen, können sie sich als Systemanbieter für entsprechende Module branchenwertschöpfungsübergreifend aufstellen. Große Zulieferer sind aufgrund der Diversität ihrer Angebots- und ihrer Systemkompetenz für die Elektrifizierung des Antriebsstrangs gut aufgestellt. Weitgehend innerhalb des bestehenden Produkt-Serviceorientierten Geschäftsmodells werden Angebots- und Kompetenzverlagerungen hochdynamisch vorangetrieben. Entwicklungskompetenzen in Bezug auf automatisierte Fahrfunktionen sind zudem bei deutschen Zulieferern ausgeprägt. Die Technologieführerschaft der Zulieferer eröffnet die Möglichkeit, in Kooperation mit Plattformanbietern ein lösungsorientiertes Geschäftsmodell anzustreben. Mit steigender Bedeutung der Konnektivität für die Marke werden Diversifizierungsvorteile klassischer Automobilmarken abnehmen. Kooperationen wie etwa zwischen Bosch und Microsoft können sich mit ihrem Angebot kundennah positionieren. Insgesamt sind die Geschäftsmodelle großer Zulieferer auch durch eine zunehmende Dienstleistungsorientierung geprägt.

Zulieferer, deren Produktpalette sich schwerpunktmäßig auf elektrotechnische Komponenten oder auch neue Materialien fokussiert, erweitern ihre Wertschöpfung durch Angebote für andere Industriebereiche. Gleichzeitig werden anstelle von Einzelteilen komplexere Baugruppen angeboten, um eine größere Differenzierung und stärkere Marktposition zu erlangen.

Eine ausgeprägte Spezialisierung im Bereich des Verbrennungsmotors ist für das Geschäftsmodell kleinerer Zulieferer kritisch. Die gesamte Angebotspalette sowie die Kompetenzen müssen angepasst werden. Kurzfristig kann durch Konsolidierung, Erschließung neuer Märkte oder Effizienzsteigerungen weiterhin mit den Kernprodukten Umsatz generiert werden, um so die Transformation zu neuen Produktmärkten zu finanzieren. Diese

⁵Vgl. strategy& 2020, S. 8.

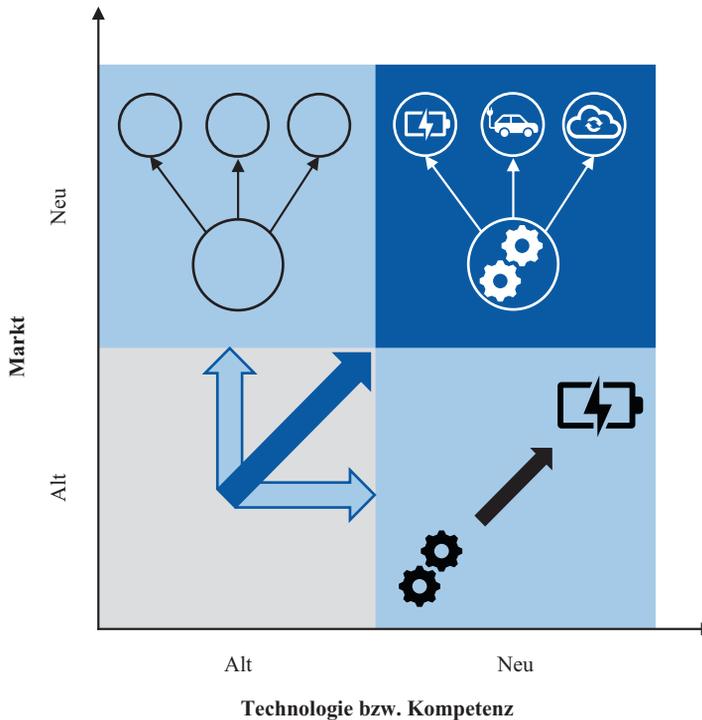


Abb. 35.5 Positionierungsoptionen von Zulieferern im Rahmen einer Diversifikation in Anlehnung an Schuh et al. (2019). (Vgl. Schuh et al. 2019)

wiederum kann durch die interne Entwicklung von Know-how oder durch den Zukauf externer Kompetenzen gelingen (Abb. 35.5).⁶

Der Effizienzbestrebungen bei Herstellern von Elektrofahrzeugen hat zur Folge, dass Zulieferer unabhängig von ihrer Position in der Zulieferpyramide in der Lage sein müssen, an verschiedenen globalen Standorten wachsende Mengen ihrer Produkte kurzfristig liefern zu können. Die mit dem Aufbau globaler Netzwerke verbundenen Investitionen stellen vor allem in Zeiten einer strategischen Angebotsrepositionierung eine große Herausforderung dar und insbesondere kleinere Zulieferer werden zunehmend von Automobilproduzenten unterstützt, damit sie ihr Zulieferangebot aufrechterhalten können.

35.4 Geschäftsmodelloptionen aus Sicht der Energieversorger

Energieversorger verfügen über ein breites Kompetenzspektrum. Insbesondere im Bereich der Stromnetzintegrität und der Bereitstellung einer Elektrizitätsinfrastruktur verfügen diese Unternehmen über eine hohe Geschäftsfeldkompetenz. Um jedoch an der

⁶Vgl. Grundmann et al. 2020.

Wertschöpfung der Elektromobilität teilzuhaben, müssen sie Ballungsgebiete mit kapitalintensiven Ladeinfrastrukturen versorgen. Diese Investition wird teilweise durch die Einnahmen aus der über die Ladestationen verkauften Elektrizität rückfinanziert. Um das Wachstumspotenzial im Bereich der öffentlichen Ladeinfrastruktur zu erschließen, ist es von entscheidender Bedeutung, sich innerhalb der urbanen Zentren als Erster zu positionieren und sich einen lokalen Pioniervorteil durch ein integriertes Angebot zu verschaffen. Energieversorgungsunternehmen verfügen über langjährige Erfahrung in Abrechnungsmodellen mit Privatkunden und bieten im Zusammenhang mit Elektromobilität bereits unterschiedliche Tarifoptionen an – beispielsweise Festpreissysteme oder verbrauchs-basierte Abrechnungsmodalitäten.

Das B2B-Geschäft bietet auch für Energieversorger Potenziale. Betreiber von Fahrzeugflotten, Parkplatzbetreiber und Immobilienentwickler haben einen großen Bedarf an Hardware und Software in Verbindung mit Lademöglichkeiten. Das integrierte Leistungsangebot würde für Energieversorger bedeuten, auch Fahrzeuge anzubieten, um das Risiko des Wechsels zu einem anderen Energieanbieter zu reduzieren. Da Energieversorger mit ihren Kompetenzen nicht in die Fahrzeugproduktion einsteigen, sind Kooperationen entscheidend, um durch möglichst umfassende Angebote die Barrieren für einen Wechsel der Kunden zu erhöhen.

Das eigentliche Ziel der Energiewirtschaft ist die Nutzung der Batterien in Elektrofahrzeugen als dezentraler Energiespeicher innerhalb eines intelligenten Netzes. Dadurch wird Elektromobilität zu einem wichtigen Bestandteil der langfristigen Netzplanung der Energieversorger. Der Verbraucher wird ein Akteur im Bereich der Energieversorgung und kann seine individuellen Kosten senken, indem er in kleinem Maß Elektrizität zu geringen Preisen erwirbt und durch die Bidirektionalität zu einem geringfügig höheren Preis zurückspeisen kann. Das „Vehicle-to-Grid“-Prinzip wird deshalb ein wichtiger und akzeptabler Bestandteil werden, um den restriktiven energiepolitischen Regularien entgegenzuwirken. Die Energieknappheit und unausgewogene Auslastung der Netze führen dazu, dass die Effizienz überregional und über Grenzen hinweg gesteigert werden muss. Hinzu kommt, dass Elektrizität aus erneuerbarer Energie zu bestimmten Abnehmersenken transportiert werden muss. Ein „Smart Grid“ wird die dezentrale Speicherung ermöglichen.

Im Investitionsportfolio eines Energieversorgungsunternehmens ist folglich nicht nur Elektromobilität thematisiert. In großem Maße müssen diese sich finanziell in den Aufbau von transregionalen Stromverteilungs- und Stromspeichersystemen einbringen, ebenso wie in verbesserte Messmöglichkeiten und -dienstleistungen („Smart Metering“), den Ausbau von überregionalen Abrechnungssystemen („E-Roaming“) und in die Kommunikation der Einheiten auf allen Ebenen – wie auch die zwischen Fahrzeug und Ladesäule. Entscheidend für eine weitergehende Wertschöpfung ist mit Blick auf Gewerbekunden, Gebäudebetreibende und private Kunden eine systemische Betreuung, die neben transparenten Abrechnungssystemen auch eine Beratung in Bezug auf Möglichkeiten der Selbstversorgung integriert. Die Ausweitung der klassischen Geschäftsmodelle erfordert

eine genaue Analyse der Kundenbedürfnisse, um spezifische Angebote entwickeln und vermarkten zu können. Intelligente Kooperationen ermöglichen zusätzliche Umsatzpotenziale durch Sharing-Angebote und weitergehende Mobilitätsdienstleistungen.

Literatur

Teil VI: Geschäftsmodelle entlang der elektromobilen Wertschöpfungskette

Grieger, M; Ludwig, A.: *On the move towards customer-centric business models in the automotive industry – a conceptual reference framework of shared automotive service systems.* In: Electron Markets, Jg. Jg. 29, 2019, S. 473–500

Grundmann, G; Proff, H; Funk, J.: *Automotive Supplier Transformation Strategies*, 2020

Kohtamäki, M; Parida, V; Oghazi, P; Gebauer, H; Baines, T.: *Digital servitization business models in ecosystems: A theory of the firm.* In: Journal of Business Research, Jg. Jg. 104, 2019, S. 380–392

Schuh, G; Zeller, P; Scholz, P; Krebs, L; Studerus, B.: *Eine Branche im Umbruch – Den technologischen Wandel in der Automobilindustrie gestalten.* In: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT 2019.

strategy&: *Automobilzulieferer im Krisenmodus*, 2020

Valentine-Urbschat, M; Bernhart, W.: *Powertrain 2020 – The Future Drives Electric.* In: Roland Berger 009.

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Garnet Kasperk, Sarah Fluchs und Julius Hausmann

Der Anteil elektrisch betriebener Fahrzeuge an der Gesamtflotte wächst getrieben durch ökologische Regulierungen, politische Anreizstrukturen und zunehmende Käuferakzeptanz rasant. Etablierte und neue Fahrzeugproduzenten passen ihre Strategien dynamisch an und bringen in diesem Jahrzehnt eine Vielzahl neuer Modelle auf den Markt.

Durch Wegfall des Motors sowie zugehöriger Bauteile und Komponenten entfallen etwa 35 % der Wertschöpfung. Insgesamt liegt der Materialwert von Elektrofahrzeugen durch elektronische Komponenten und insbesondere die Batterie aber rund 30 % höher. Zukünftige Wertschöpfungspotenziale entfallen zum Großteil auf Zulieferer sowie Hersteller von Batteriezellen im asiatischen und demnächst auch europäischen Raum. Für etablierte Anbieter lassen sich bei der Umsetzung effizienzsteigernder Maßnahmen im Fahrzeugverkauf, in der Batterieproduktion und im Bereich elektrischer und elektronischer Komponenten Wertschöpfungspotenziale erschließen.

Da ein elektromobiles Angebot eine Ladeinfrastruktur mit zugehörigen Abrechnungsmechanismen erfordert, eröffnen sich weitergehende Potenziale für Unternehmen der

G. Kasperk (✉)

Leiterin Center for International Automobile Management, Lehrstuhl für Internationale Wirtschaftsbeziehungen RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: garnet.kasperk@rwth-aachen.de

S. Fluchs

Economist im Bereich Umwelt, Energie, Infrastruktur, Institut der deutschen Wirtschaft, Köln, Deutschland

E-Mail: Fluchs@iwkoeln.de

J. Hausmann

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: julius.hausmann@rwth-aachen.de

Automobil- und Energiebranche in diesem Bereich. Digitalisierung und Konnektivität führen darüber hinaus zu vielfältigen dienstleistungsorientierten Geschäftsmodellen im Zusammenhang mit Elektromobilität, beispielsweise E-Carsharing. Weitergehende Dienstleistungsangebote stehen zwar nicht direkt im Zusammenhang mit der Elektrifizierung des Antriebsstrangs – die sich entwickelnden Geschäftsmodelle sind aber untrennbar miteinander verwoben. Fahrzeugbezogene sowie unabhängige Dienstleistungen werden im Kontext der Fahrzeuge von verschiedenen Anbietern platziert und künftig kundenorientiert kompiliert. Es entstehen Ökosysteme, die Lösungen für Mobilität und weitere Aspekte des täglichen Lebens liefern.

Für Automobilproduzenten ändern sich durch Elektrifizierung und Konnektivität sämtliche Elemente des Geschäftsmodells. Parallel zum klassischen Geschäftsmodell des Fahrzeugverkaufs mit direkt verbundenen Diensten werden serviceorientierte Angebote entwickelt. Wertschöpfungsstrukturen und insbesondere die Definition des Kundennutzens verändern sich. Die Gewichtung und Ausprägung des dienstleistungsbasierten Angebotsspektrums führt zu unterschiedlichen Geschäftsmodelltypen. Während Automobilzulieferer ihr Angebotsportfolio weitgehend im Rahmen ihrer Geschäftsmodelle anpassen, erweitern Unternehmen der Energieversorgung ihre Dienstleistungsangebote, diversifizieren ihr Kundenportfolio und positionieren sich als Anbieter integrierter Elektromobilität.

Sowohl die Elektrifizierung des Antriebsstrangs als auch die Digitalisierung und Konnektivität treiben Kooperationen entlang der Wertschöpfungskette voran. Im endkunden-nahen Bereich entstehen Anbieternetzwerke, die Kunden möglichst umfassende Mobilitätslösungen und weitere Dienstleistungen offerieren.

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.



Nachhaltigkeitspotenziale der Elektromobilität

Die Nachhaltigkeit von Produkten ist in der Öffentlichkeit ein stark diskutiertes Thema. Auch im Bereich der Elektromobilproduktion selbst wird kontrovers beurteilt, ob das Elektrofahrzeug „nachhaltiger“ als ein Automobil mit Verbrennungskraftmaschine ist. Vor diesem Hintergrund sind eine genaue Aufschlüsselung der Bewertungsbausteine und damit eine methodische und ganzheitliche Betrachtung notwendig. Nur so kann eine kritische Reflexion der Nachhaltigkeit von Elektrofahrzeugen erfolgen.

Im ersten Schritt werden dazu die drei Säulen der Nachhaltigkeit und deren Bewertungsansätze mit Fokus auf die Ökobilanzen von Elektrofahrzeugen dargestellt. Die lebenszyklusbasierte Nachhaltigkeitsbewertung – das „Life Cycle Sustainability Assessment“ (LCSA) – bildet dabei die geeignete Methode zur Berücksichtigung sämtlicher Auswirkungen der Produkte. Eine detaillierte Darstellung ist Kap. 37 zu entnehmen. Aufbauend auf der grundsätzlichen Erläuterung dieser Methode, werden in Kap. 38 die ökologischen Aspekte des Elektromobils über den gesamten Lebenszyklus beleuchtet. Dabei wird die Frage der Nachhaltigkeitsleistungen von Elektrofahrzeugen im Gegensatz zu konventionellen Verbrennungskraftfahrzeugen diskutiert.

Neben der Betrachtung der Bilanzrechnung von Elektrofahrzeugen ist es notwendig, konkrete Ansätze in Bezug auf die Lebenszyklusverlängerung von Batterien zu identifizieren, die die kostenintensivsten Komponenten darstellen. Es kann zwischen Second-Use-Anwendungen, Repair, Refurbishment, Remanufacturing und Recycling unterschieden werden. Die Demontage der Batteriesysteme ist für verschiedene Pfade eine Notwendigkeit. Alle Ansätze sind notwendig, um ein ganzheitliches Kreislaufmanagement der Batterien zu gewährleisten. In den folgenden Kapiteln sollen die Potenziale von Second-Use-Anwendungen (Kap. 39), des Refurbishments (Kap. 40), der Demontage (Kap. 41), des Remanufacturings (Kap. 42) und des Recyclings (Kap. 43) im Detail dargestellt werden.



Drei Säulen der Nachhaltigkeit und Bewertungsansätze

37

Jana Gerta Backes, Rose Nangah Mankaa und Marzia Traverso

Die lebenszyklusbasierte Nachhaltigkeitsbewertung – das „Life Cycle Sustainability Assessment“ (LCSA) – ermöglicht die Bewertung sowohl positiver als auch negativer Auswirkungen von Produkten, beispielsweise Elektro-Autos, und Dienstleistungen über deren Lebenszyklus vom Ressourcenabbau bis hin zum „End of Life“. Die LCSA-Methode ergänzt die eindimensionale Ökobilanz oder ökologische Nachhaltigkeitsbewertung (Life Cycle Assessment – LCA) um die ökonomische Dimension der Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing – LCC) und die Sozialbilanz (Social Life Cycle Assessment – S-LCA). Der Ansatz, anhand Ökologie, Ökonomie und Sozialem alle drei Ebenen der Nachhaltigkeit miteinander zu kombinieren, geht auf die „Produktlinienanalyse“ des deutschen Öko-Instituts zurück.¹ Daraus abgeleitet wurde der weithin akzeptierte „Triple-Bottom-Line“ (TBL)-Ansatz,² den Kloepffer und Finkbeiner in den Jahren 2008 bis

¹Vgl. Öko-Institut e.V. 2021.

²Vgl. Elkington 1997.

J. G. Backes

Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Institut für Nachhaltigkeit im Bauwesen (INAB), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: jana.backes@inab.rwth-aachen.de

R. N. Mankaa

Oberingenieurin, Institut für Nachhaltigkeit im Bauwesen (INAB), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: rose.mankaa@inab.rwth-aachen.de

M. Traverso (✉)

Universitätsprofessorin, Institut für Nachhaltigkeit im Bauwesen (INAB), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: marzia.traverso@inab.rwth-aachen.de

2011 in eine erste Definition für „Life Cycle Sustainability Assessment“ übersetzt haben.³ Das LCSA-Rahmenwerk, das seit 2008/2010 genutzt wird und das auf dem dreidimensionalen Nachhaltigkeitskonzept basiert, wird durch die folgende formale Gl. (37.1) beschrieben:

$$LCSA = LCA + LCC + S-LCA \quad (37.1)$$

LCSA = Life Cycle Sustainability Assessment

LCA = Life Cycle Assessment

LCC = Life Cycle Costing

S-LCA = Social Life Cycle Assessment

Das „Life Cycle Assessment“ bietet einen strukturierten Ansatz zur Bewertung von Prozessen und Systemen und zur Quantifizierung der potenziellen Umweltemissionen und -auswirkungen.⁴ Von 1994 bis 2006 hat die Internationale Organisation für Normung (ISO) die Ökobilanz harmonisiert und standardisiert, was zu den heutigen aktualisierten Normen ISO 14040 (2006) und ISO 14044 (2018) führte.⁵

Das „Life Cycle Costing“ zählt als ökonomische Säule des LCSA zur Gruppe der Nachhaltigkeitsmethoden, die sich auf die mit der Produktion und dem Konsum von Gütern und Dienstleistungen verbundenen Ströme konzentrieren.⁶ Das LCC folgt der Systematik der ISO 14040/44 und erfasst sämtliche Kosten, die während des gesamten Lebenszyklus anfallen. Eine eigene Norm oder Standardisierung gibt es für das LCC nicht, im Bausektor folgt es jedoch der ISO 15686-5. Da die Kosten häufig von verschiedenen Akteuren getragen werden, muss mit widersprüchlichen Ergebnissen gerechnet werden. Im Gegensatz zum LCA gibt es beim LCC keine vergleichbare Phase der Wirkungsabschätzung, da jegliche Inventardaten eine einzige Maßeinheit umfassen: die Währung.⁷

Das „Social Life Cycle Assessment“ ist das jüngste der drei vorgestellten Nachhaltigkeitsbewertungsmethoden. Bisher existiert keine Standardisierung des S-LCA, allerdings gab es in den vergangenen Jahren viel Entwicklungsarbeit in diesem Bereich – was zur aktuellen Entwicklung der künftigen ISO Norm 14075 führte. Das S-LCA ist als ergänzender Bewertungsansatz zu LCA und LCC zu betrachten, um positive und negative soziale Auswirkungen eines Produkts entlang seines Lebenszyklus zu bewerten.⁸ Die Definition und Auswahl von Stakeholdern im S-LCA ist ein relevanter Aspekt, da die Ergebnisse stark von ihnen beeinflusst werden (beispielsweise Arbeitende, lokale Gemeinschaft oder Kinder). Zudem ist das S-LCA von den lokalen Gegebenheiten und dem Unter-

³Vgl. Finkbeiner et al. 2008.

⁴Vgl. ISO 14040 2006.

⁵Vgl. ISO 14040 2006; Vgl. ISO14044 2018.

⁶Vgl. Hunkeler et al. 2008.

⁷Vgl. Swarr et al. 2011.

⁸Vgl. ISO 14040 2006.

nehmensverhalten abhängig, weniger von Produktionsprozessen selbst.⁹ Im Folgenden wird mit Hilfe einer „Case Study“ auf die S-LCA-Bewertungsmethodik eingegangen.

Das LCSA aggregiert die Ergebnisse der drei Nachhaltigkeitssäulen auf Basis von harmonisierten Systemgrenzen¹⁰ – etwa vom Ressourcen-Abbau bis zur Nutzungsphase („Cradle-to-use“) oder bis zum Lebensende („Cradle-to-End-of-Life“) – und einer einheitlichen funktionalen Einheit¹¹ (beispielsweise 10 kWh Batteriekapazität). Die sogenannte funktionale Einheit (Functional Unit – FU) dient der Vergleichbarkeit von Alternativen und der Definition von Mindestleistungskriterien, etwa in Bezug auf mechanische Sicherheit, Zuverlässigkeit, Dauerhaftigkeit oder Gebrauchstauglichkeit.¹² In der LCSA-Auswertungsphase gibt es keine Gewichtung zwischen den drei Säulen LCA, LCC, S-LCA: Die drei Bewertungen sind gleichwertig, und die schlechtere „Leistung“ einer Säule lässt sich nicht durch eine bessere einer anderen Säule kompensieren.¹³ Der Vorteil von LCSA liegt in der Transparenz und der Identifikation möglicher Zielkonflikte zwischen den Säulen.¹⁴ Eine große, von Forschung und Praxis noch zu lösende Herausforderung ergibt sich aus der Vielfalt von Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen den drei Dimensionen und ihren Parametern, die in teilweise fallbezogenen Einzelkonzepten betrachtet werden müssen.

37.1 Ökologische Dimension: „Life Cycle Assessment“

Im Rahmen der Ökobilanz werden Energie- und Stoffströme (als Input) und damit verbundene Abfallströme und Emissionen (als Output) nach verschiedenen Kriterien bewertet. LCA gilt allgemein als anerkanntes, robustes Bewertungsinstrument mit einer hohen Anwendungstiefe. Von den Bewertungsmethoden innerhalb des LCSA gilt die LCA als die am weitesten entwickelte.¹⁵ Die Ursprünge des LCA gehen auf eine US-amerikanische Modellstudie zur Quantifizierung der Umweltauswirkungen verschiedener Getränkebehälter im Jahr 1970 und eines LCA für Verpackungsmaterialien zurück. Im Jahr 1995 einigte man sich im Rahmen der internationalen Normungsorganisation auf einen Standardrahmen für produktbezogene LCA, woraus bis 2006 die ISO 14040/14044 entstand, die heute die vier Schritte der LCA beinhaltet (vgl. Abb. 37.1).¹⁶

In der ersten Phase, der Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen, werden alle notwendigen Annahmen für die Ökobilanz-Fallstudie getroffen: die funktionale Einheit,

⁹Vgl. Traverso et al. 2018; Vgl. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative 2020.

¹⁰Vgl. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative 2011.

¹¹Vgl. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative 2011.

¹²Vgl. ISO14044 2018.

¹³Vgl. Finkbeiner et al. 2010; Vgl. Kloepffer 2008.

¹⁴Vgl. Neugebauer et al. 2015.

¹⁵Vgl. Traverso et al. 2012.

¹⁶Vgl. ISO 14040 2006; Vgl. ISO14044 2018.

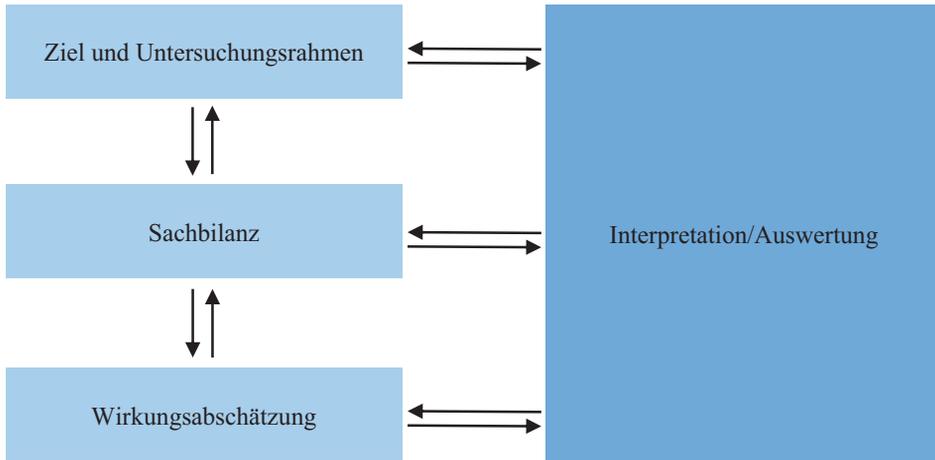


Abb. 37.1 Vier Schritte der Ökobilanz in Anlehnung an ISO 14040/44. (Vgl. ISO 14040 2006)

die Systemgrenzen, die verwendeten Datenbanken und die Software einschließlich der Art der Daten (Primär- oder Sekundärdaten), ihre Erhebung, Fragen der Datenqualität und angewendete Abschneidekriterien.

In der Sachbilanz (Life Cycle Inventory – LCI) als die zweite Phase werden alle Input- und Output-Flüsse von Energie und Materialien erfasst. Um alle relevanten und bewerteten Prozesseinheiten zu visualisieren, lässt sich ein Flussdiagramm verwenden. Die LCI-Daten können aus Literatur, aus (unternehmens-)internen Daten oder aus offiziellen und kommerziellen Datenbanken entnommen werden. Mehrere Datenbanken – beispielsweise „Ecoinvent“ – oder verschiedene Software-Lösungen wie „GaBi“, „SimaPro“, „Umberto“ oder „OpenLCA“ – vereinfachen die Beschaffung und Verarbeitung der Daten und beschleunigen die Wirkungsabschätzung enorm.

Die Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment – LCIA) als die dritte Phase der Ökobilanz beinhaltet zwei obligatorische Stufen: die Klassifizierung und die Charakterisierung. Für die Klassifizierung werden alle Emissionen – zum Beispiel CO₂-Ausstöße in Luft, Wasser, Boden – sogenannten Wirkungsabschätzungskategorien (Wirkungskategorie-Midpoint) – etwa dem Treibhauspotenzial – zugeordnet, auf die sie einwirken können (vgl. Abb. 37.2). Für die Charakterisierung wird jede Auswirkung durch Charakterisierungsfaktoren definiert. Es gibt eine Reihe von konkurrierenden, in sich geschlossenen Katalogen von Wirkungskategorien und Indikatoren. Die bekanntesten LCIA-Methoden sind „CML“, „Eco-indicator99“, „ILCD“, „IMPACT2002+“, „ReCiPe“ und „TRACI 2.1“. Die CML-Methode beinhaltet sogenannte problemorientierte Mittelwertindikatoren (Midpoint Indicator, vgl. Abb. 37.2) entlang der Wirkungskategorien, wie zum Beispiel Treibhauspotenzial (Global Warming Potential – GWP), Versauerungspotenzial (Acidification Potential – AP), Eutrophierungspotenzial (Eutro-

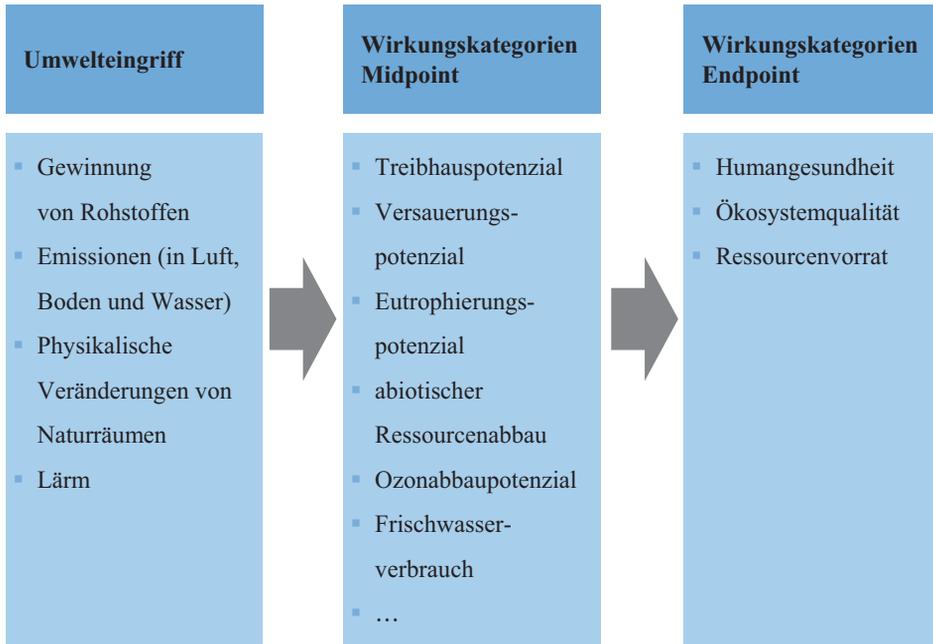


Abb. 37.2 Von der Emission (Umwelteinriff) zur Wirkungskategorie

phication Potential – EP) oder abiotischer Ressourcenabbau (Abiotic Depletion Potential – ADP).¹⁷ Schadensorientierte Ansätze zur LCIA, wie zum Beispiel „Eco-indicator99“, verwenden sogenannte Endpunktindikatoren (Endpoint Indicator, vgl. Abb. 37.2), etwa Humangesundheit/menschliche Gesundheit (Human Health), Ökosystemqualität (Ecosystem Quality) und Ressourcenvorrat/Ressourcen (Resource Depletion). Ansätze wie „ReCiPe“ oder „IMPACT2002+“ wiederum verknüpfen Midpoint-Indikatoren mit Endpoint-Indikatoren. Der heute gängigste Midpoint-Indikator (Wirkungsindikator) ist das GWP, gemessen in kg CO₂-Äquivalenten (kg CO₂e). In zahlreichen Ökobilanz-Studien werden die detaillierten Midpoint-Indikatoren berichtet und auf den Zusammenschluss zu Endpoint-Indikatoren wird verzichtet. Diese Endpoint-Indikatoren dienen primär zum besseren und vereinfachten Verständnis für Nicht-LCA-Experten. In der Interpretationsphase können Unsicherheitsanalysen (sogenannte Sensitivitätsanalysen, „Sensitivity Analyses“) mit entsprechender Schlussfolgerung der Ergebnisse vorgenommen werden.

Obwohl das LCA von der ISO standardisiert ist, bietet dieser Rahmen dem Anwender und Analysten ein hohes Maß an Freiheit bei der Festlegung von Annahmen (zum Beispiel Systemgrenzen, funktionale Einheit, Datenbezug) und der Auswahl von Wirkungskategorien, Methoden und Datenbanken¹⁸ – was zu großen Herausforderungen führen kann.

¹⁷Vgl. Sphera 2020.

¹⁸Vgl. Weidema 2014.

Dies ist der Grund dafür, dass die LCA-Ergebnisse zweier Produkte, wenn sie unabhängig voneinander erstellt wurden, nicht unbedingt miteinander vergleichbar sind. Das wichtigste Element für die Validität der LCA-Studie ist ihre Transparenz und die Reproduzierbarkeit ihrer Durchführung. Praxisnahe Beispiele zu Ökobilanzen in der Elektromobilität werden in Kap. 38 dargestellt.

37.2 Ökonomische Dimension: „Life Cycle Costing“

Die Lebenszykluskostenrechnung dient der systematischen Erfassung und Bewertung der ökonomischen Dimension der Nachhaltigkeit. Es werden die Auswirkungen, Kosten und Erlöse über den gesamten Lebenszyklus aggregiert und diskontiert – von der Herstellung über die Nutzung und Wartung bis zur Entsorgung. Das LCC unterscheidet sich von der traditionellen, in der Wirtschaft bekannten Kostenrechnung dadurch, dass die Kosten und Erlöse eines Kostenträgers über mehrere Kalenderperioden und nicht nur über eine Kostenperiode verfolgt werden.¹⁹

Im Allgemeinen folgt das LCC den vier Schritten der LCA-Normen ISO 14040/44.²⁰ Die Definition von Ziel und Umfang ist analog zum LCA. Bemerkenswert ist, dass beide Bewertungen (LCA und LCC) sich auf eine einheitliche Definition des Produktsystems konzentrieren und dass es keine vergleichbare Wirkungsabschätzung durch die Maßeinheit der Währung gibt. Eine Charakterisierung der Bestandsdaten ist daher nicht notwendig (vgl. Abb. 37.2). Ein herausfordernder Aspekt des LCC ist die vorgeschlagene Erfassung aller Kosten, die während des gesamten Lebenszyklus entstehen, denn es existieren unterschiedliche Auffassungen darüber, was dabei einzubeziehen ist: ob nur Kosten, aber keine Erträge, ob nur Kosten, die direkt von einem oder mehreren Akteuren getragen werden und anderes mehr.²¹ Hunkeler et al. (2008)²² unterscheiden zwischen drei Typen des LCC:

- Konventionelles LCC (Typ I)
- Ökologisches LCC (Typ II)
- Gesellschaftliches LCC (Typ III)

Das konventionelle LCC (Typ I) summiert die direkten Kosten (und Erlöse) auf. Typ I wird üblicherweise aus Hersteller- oder Kundensicht zur Planung und zum Vergleich von Investitionsalternativen angewendet. Sowohl Typ II als auch Typ III erfassen zusätzlich externe Effekte auf Basis unterschiedlicher Systemgrenzen. Die ökologische LCC (Typ II) beinhaltet externe Effekte mit Umweltrelevanz (beispielweise für Treibhausgasemissionen). Diese Effekte werden entweder als externe Kosten erfasst und integriert oder mit Hilfe einer parallel erstellten LCA bewertet. Die komplexeste Form, das gesellschaft-

¹⁹Vgl. Hunkeler et al. 2008; Vgl. Swarr et al. 2011.

²⁰Vgl. ISO 14040 2006.

²¹Vgl. Hunkeler et al. 2008; Vgl. Swarr et al. 2011.

²²Vgl. Hunkeler et al. 2008.

liche LCC (Typ III), enthält zusätzlich alle sozialen externen Kosten, etwa negative Elektrofahrzeug-Nutzerkosten durch Verkehrsbehinderungen und Umleitungen im Straßenbau. Typ III integriert sämtliche positiven und negativen Folgen für die gesamte Gesellschaft. Typ II und III können mit der Ökobilanz (LCA) und der Sozialbilanz (S-LCA) abgestimmt werden, um Doppelzählungseffekte (Double Counting) zu vermeiden. Typ II und Typ III lassen sich auch eigenständig verwenden, um externe Effekte zu monetarisieren.²³

37.3 Soziale Dimension: „Social Life Cycle Assessment“

Das „Social Life Cycle Assessment“ bildet eine Methodik zur Bewertung positiver und negativer sozialer Auswirkungen von Produkten und Dienstleistungen entlang ihres jeweiligen Lebenszyklus. Soziale Auswirkungen entstehen vor allem durch Verhaltensweisen von Organisationen beziehungsweise Unternehmen, die am Produktlebenszyklus beteiligt sind, und können sich auf das menschliche Wohlbefinden auswirken. Im Gegensatz zu anderen sozialen Bewertungstechniken ermöglicht das S-LCA eine breite und umfangreiche Betrachtungsweise.²⁴ So impliziert es einen Bestandteil der lebenszyklusbasierten Nachhaltigkeitsbewertung (Life Cycle Sustainability Assessment – LCSA) und kann sowohl alleine als auch in Kombination mit einem LCA und/oder einem LCC realisiert werden.²⁵

Das S-LCA hat seinen Ursprung in der Ökobilanz und wurde anfangs als soziale Ergänzung zum LCA konzipiert.²⁶ 2009 wurde daraufhin vom „United Nations Environment Programme“ (UNEP) als dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen sowie von der „Society of Environmental Toxicology and Chemistry“ (SETAC) der erste Leitfaden für die Umsetzung von S-LCA für Produkte veröffentlicht.²⁷ Es bildet zusammen mit den im Jahr 2013 publizierten Methodenblättern²⁸ eine wichtige Grundlage für die Erstellung eines S-LCA und führte zu einer verstärkten Anwendung sowie zu einer deutlichen Zunahme von Publikationen. Im Gegensatz zum LCA und LCC befindet sich das S-LCA noch deutlicher in der Entwicklung, allerdings hat sich die Praxis in den vergangenen zehn Jahren stark weiterentwickelt, so dass eine Überarbeitung der Leitlinie (2009) erforderlich war. Infolgedessen wurde vor Kurzem (2020) ein neuer optimierter Leitfaden seitens des UNEP veröffentlicht. Dieser beinhaltet Ergänzungen im Bereich des methodischen Fortschritts sowie praktische Erfahrungen. Insofern stellt die überarbeitete Version ein

²³ Vgl. Hunkeler et al. 2008.

²⁴ Vgl. Tonioloa et al. 2020.

²⁵ Vgl. Finkbeiner et al. 2010; Vgl. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative 2009; Vgl. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative 2011; Vgl. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative 2020.

²⁶ Vgl. Garrido 2017.

²⁷ Vgl. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative 2009.

²⁸ Vgl. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative 2013.

ausgereiftes Rahmenwerk mit ausführlichen Anleitungen zur Verfügung und bietet zusätzlich eine Methode zur Bewertung der Auswirkungen von Organisationen entlang ihres Lebenszyklus (Social Organization LCA – SO-LCA).²⁹ Das S-LCA muss die gleichen funktionalen Einheiten und äquivalenten Systemgrenzen berücksichtigen wie die beiden anderen Bewertungsmethoden LCA und LCC.³⁰ In dieser Hinsicht lehnt sich das S-LCA eng an das LCA an und folgt seinen vier Schritten (vgl. Abb. 37.1).

Zwischen S-LCA und LCA existieren wichtige methodische Unterschiede. Zunächst müssen relevante Stakeholder (Kategorien) (vgl. Abb. 37.3) definiert und ausgewählt werden. Die Gesamtergebnisse der S-LCA sind stark von dieser Auswahl abhängig. Im ersten Schritt des S-LCA (Ziel und Untersuchungsrahmen, vgl. Abb. 37.1) erfolgt die Identifikation der wichtigsten Stakeholder-Kategorien, die bewertet werden. Zweitens sind die resultierenden positiven und negativen Auswirkungen stark von den lokalen (geografischen) Bedingungen und dem Organisationsverhalten im Unternehmen mitbestimmt, nicht alleine von den Produktionsprozessen. Die sozialen Auswirkungen zweier technologisch identischer Produktionsprozesse auf verschiedene Länder oder Regionen können dadurch sehr unterschiedlich sein – zum Beispiel bei der Herstellung von Autoteilen in Deutschland gegenüber derjenigen in Mexiko und in China, wo jeweils andere Arbeitsbedingungen mit Blick auf Stundenanzahl, Entlohnung und anderes mehr vorzufinden

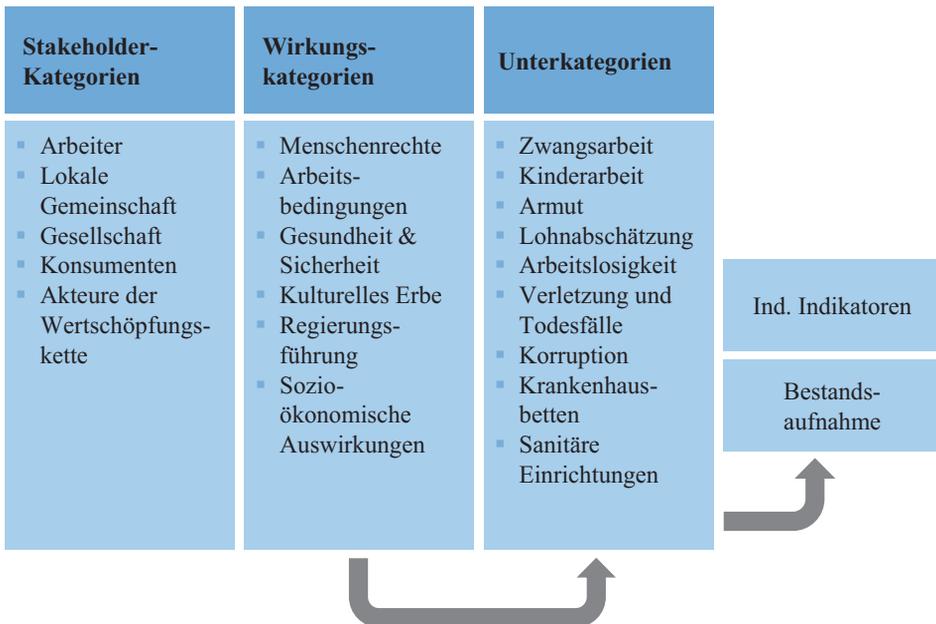


Abb. 37.3 S-LCA: Stakeholder-Kategorien und Beispiele für Wirkungs- und Unterkategorien

²⁹Vgl. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative 2020.

³⁰Vgl. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative 2009; Vgl. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative 2011.

sind. Während der LCIA-Phase im dritten Schritt werden Auswirkungskategorien oder Unterkategorien durch passende Schutzbereiche definiert (vgl. Abb. 37.3).

Anders als bei einer ökologischen Betrachtungsweise, sind aus einem sozialen Blickwinkel vor allem die Standorte der Lebenswegabschnitte von Bedeutung. Dafür ist es wichtig, die Prozessketten zu modellieren und ein Produktsystem aufzubauen. Nachfolgend ist ein Beispiel an einem Case-Study-Ausschnitt zu einer Sozialbilanz von Lithium-Ionen-Batterien gegeben:

37.4 Beispiel-Case-Study soziale Nachhaltigkeit in der Elektromobilität – Fokus: Soziale-Hotspot-Analyse von Lithium-Ionen-Batterien

Trotz der vielen Umweltvorteile, die mit der Nutzungsphase von Lithium-Ionen-Batterien verbunden sind, gibt es erhebliche negative Folgen im Zusammenhang mit ihrem Produktionsprozess. Verschiedene ökologische und soziale Auswirkungen sind mit den Lieferketten sämtlicher in der Lithium-Ionen-Batterie verwendeter Rohstoffe verbunden.³¹

Ausgehend von der eigens umgesetzten Hotspot-Analyse, die mit Hilfe der „Social Hotspot Database“ (SHDB)³² gemäß den Leitlinien für die Soziale Lebenszyklusbewertung von Produkten und Organisationen³³ vorgenommen wurde, gab es eine Bewertung der sozialen Risiken von Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid-Batteriematerialien (Li-NMC) für die Bergbau- und Raffinierungsphasen der mit Lithium-Ionen-Batterien verbundenen Rohstoffe.

Die „Social Hotspot Database“ der Non-Profit-Organisation „New Earth“ ist die erste Datenbank, die Ressourcen zur Durchführung einer S-LCA bietet.³⁴ Sie gibt Daten von mehr als 191 Ländern und 57 Sektoren in Form von Risikopotenzialen an – passend zu den UNEP-Unterkategorien.³⁵ Die Kategorien reichen von „niedrig“ und „mittel“ über „hoch“ bis hin zu „sehr hoch“. Für manche Länder liegt indes kein Hinweis auf ein Risiko vor oder es sind keine relevanten Daten vorhanden. Die mehr als 200 Quellen der SHDB reichen von der „World Health Organisation“ (WHO) über die Internationale Arbeitsorganisation und die Weltbank. Mittels dieser Sachbilanzdaten können Länder miteinander verglichen und die potenziellen Hotspots identifiziert werden. Zu diesem Zweck bietet die SHDB auch die Möglichkeit, die Risiken mit Hilfe von Arbeitsstunden zu gewichten und dadurch miteinander vergleichbarer zu machen. So lässt sich ein Bezug zur Rolle im Lebenszyklus herstellen und das Risikoniveau bewerten.³⁶

³¹ Vgl. Thies et al. 2019.

³² Vgl. SHDB 2019.

³³ Vgl. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative 2020.

³⁴ Vgl. SHDB 2019.

³⁵ Vgl. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative 2009; Vgl. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative 2020.

³⁶ Vgl. Benoît Norris 2014.

Unter Berücksichtigung der Stakeholder-Kategorien „Arbeitnehmer“ und „Gesellschaft“ (vgl. Abb. 37.3) und unter Verwendung der generisch absteigenden Referenzskala (sehr geringes bis sehr hohes Risiko) wurden die verschiedenen sozialen Risikoindikatoren (vgl. Abb. 37.3) auf Länderebene für spezifische Auswirkungskategorien abgeleitet. Ergebnisse dieser internen Studie gestalten sich wie folgt: Die gewichteten durchschnittlichen Risikowerte aller Indikatoren (berechnet, indem die Summe der Produkte der Länderbeiträge zum Indikatorrisikowert ermittelt wird) für Kobalt weisen im Abbau und in der Veredelung hohe und sehr hohe Risikowerte auf, mit Ausnahme des Indikators „Risiko, dass der Durchschnittslohn im Sektor unter dem Mindestlohn des Landes liegt, nach Sektor“. Beim Abbau von Kobalt hält die Demokratische Republik Kongo (DRK) einen Anteil von mehr als 60 % am Weltmarkt,³⁷ während China etwa 75 % raffinierten Kobalts beiträgt.³⁸ Im Fall des Kongo ist der handwerkliche Kleinbergbau (Artisanal Small-Scale Mining – ASM) eine weitverbreitete Form der Produktion, die in der Regel verschiedene Risiken in Bezug auf die Arbeitsbedingungen, die Exposition gegenüber toxischen Stoffen,³⁹ die illegale Präsenz von Streitkräften an handwerklichen Standorten, die schlimmsten Formen der Kinderarbeit und ein hohes Maß von Korruption⁴⁰ birgt. Die hohen sozialen Risiken – etwa Kinderarbeit, Zwangsarbeit oder Korruption⁴¹ –, denen diese Länder ausgesetzt sind, sollten minimiert werden, um die sozialen Risiken von Kobalt in der Lieferkette insgesamt zu verringern.

Lithium-Ionen-Batterien verfügen über eine hohe spezifische Kapazität und eine große Anzahl von Lade- und Entladezyklen.⁴² Im Gegensatz zur Lieferkette von Kobalt sind bei Lithium nur wenige S-LCA-Indikatoren wie „Nicht tödliche arbeitsbedingte Verletzungen, nach Sektor“ und „Streikrecht“ in der Bergbauphase mit hohen sozialen Risiken behaftet, während das Gesamtrisiko von „Kinderarbeit, nach Sektor“ oder „Tarifverhandlungsrechte“ vor allem in der Raffinationsphase ein hohes Risikoniveau aufweisen. Indonesien (38,6 %) und die Philippinen (20,3 %) sind die Hauptlieferanten abgebauten Nickels,⁴³ während Indonesien (23,6 %) und Russland (17,2 %) die wichtigsten Produzenten raffinierten Nickels darstellen.⁴⁴ Der Indikator, der für den Nickelabbau ein niedriges Risikoniveau aufweist, ist das „Risiko, dass der Durchschnittslohn im Sektor unter dem Mindestlohn des Landes“ liegt, während alle anderen Indikatoren höhere soziale Risiken mit sich bringen. Im Nickelraffinerie-Sektor weisen jedoch Indikatoren wie „tödliche und nicht tödliche Verletzungen“, „Vereinigungsfreiheit“, „Tarifverhandlungsrechte“, „Streikrecht“, „Gesamtrisiko eines hohen Konflikts“ und „geschätzte Prävalenz“ nur ein hohes

³⁷ Vgl. U.S. Geological Survey 2021.

³⁸ Vgl. Brown et al. 2021.

³⁹ Vgl. Banza Lubaba Nkulu et al. 2018.

⁴⁰ Vgl. Mancini et al. 2020.

⁴¹ Vgl. SHDB 2019.

⁴² Vgl. Kennedy et al. 2000

⁴³ Vgl. U.S. Geological Survey 2021.

⁴⁴ Vgl. Brown et al. 2021.

(nicht ein sehr hohes) Risikoniveau auf. Der Grund für den Rückgang der sehr hohen Risiken im Nickelraffinerie-Sektor ist auf den Beitrag Norwegens, Finnlands, Japans und Australiens zur Nickelraffination zurückzuführen (niedriges Risikoniveau).⁴⁵

Der Hauptanteil des geförderten Mangans stammt indes mit etwa 35 % der weltweiten Minenproduktion aus Südafrika.⁴⁶ Das soziale Risiko ist bei fast allen Indikatoren sehr hoch, hoch oder mittel – mit Ausnahme des Risikos, dass der „Durchschnittslohn des Sektors unter dem Mindestlohn des Landes“ liegt. Das raffinierte Mangansulfat für Lithium-Ionen-Batterien wird hauptsächlich in China hergestellt, weshalb das globale soziale Risiko von raffiniertem Mangan auch dem Risikoniveau von China entspricht. Der Indikator „tödliche und nicht tödliche Verletzungen, nach Sektor“ weist sowohl in der Bergbau- als auch in der Veredelungsphase von Mangan ein sehr hohes Risikoniveau auf. Seit den Anfängen der Lithium-Ionen-Batterien hat unterdessen Graphit aufgrund seiner konkurrenzlosen Kombination aus niedrigen Kosten, Verfügbarkeit, hoher Energiekapazität, Leistungsdichte und extrem langer Lebensdauer die Anodenmaterialien dominiert.⁴⁷ China ist die wichtigste Quelle abgebauten und veredelten Graphits für die Batterieindustrie.⁴⁸ Der weltweite Anteil liegt dort bei mehr als 75 %.⁴⁹ Alle Indikatoren mit Ausnahme des „Risikos, dass der Durchschnittslohn im Sektor unter dem Mindestlohn des Landes“ liegt, und des „Index der geschlechtsspezifischen Ungleichheit (GII)“ weisen auf hohe und sehr hohe soziale Risiken in den Raffineriestandorten hin. Beim Graphitabbau weisen Indikatoren wie die „Bevölkerung, die unter der Einkommensarmutsgrenze lebt“, die „nationale Armutsgrenze (in %) im Land“, das „Risiko, dass der sektorale Durchschnittslohn unter dem landesweiten Mindestlohn liegt“ und der „Index der geschlechtsspezifischen Ungleichheit (GII)“ ein geringes Risiko auf, während das Risiko der „gesamten Kinderarbeit, aufgeschlüsselt nach Sektoren“, und die „geschätzte Prävalenz (Opfer pro 1000 Einwohner)“ ein mittleres soziales Risiko darstellen.

Diese exemplarische „Case Study“ hat ergeben, dass die Nachfrage nach Kobalt aus verantwortungsvollen Quellen rapide ansteigen wird, wenn – wie von der Europäischen Kommission vorgeschlagen – die Sorgfaltspflicht für batteriebezogene Mineralien und insbesondere die Kobaltlieferkette für Batterien, die in naher Zukunft auf den EU-Märkten verkauft werden, verbindlich vorgeschrieben wird. Dies stellt eine große Chance für den handwerklichen Bergbau und den Kleinbergbau dar, weil die Rohstoffe und ihre Legierungen in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt werden, die zur Aufrechterhaltung eines angemessenen Lebensstandards erforderlich sind.

Zur Deckung des künftigen Metallbedarfs wird weiterhin ein Mix aus Primärrohstoffen aus dem Bergbau und recycelten Materialien erforderlich sein, wobei fortschrittliche Strategien und Technologien zu einer verbesserten Recycling-Leistung und Ressourcennutzung

⁴⁵ Vgl. SHDB 2019.

⁴⁶ Vgl. U.S. Geological Survey 2021.

⁴⁷ Vgl. Zhang et al. 2021.

⁴⁸ Vgl. U.S. Geological Survey 2021.

⁴⁹ Vgl. Brown et al. 2021.

beitragen. Wie in den vorangegangenen Abschnitten dargelegt, werden jedoch einige dieser Metalle oder Mineralien als kritische Rohstoffe eingestuft, und die meisten von ihnen sind mit großen sozialen Bedenken verbunden. Diese sozialen Risiken werden hauptsächlich auf den handwerklichen Kleinbergbau zurückgeführt, was viele nachgelagerte Unternehmen dazu veranlasst hat, jenen ASM in ihrer Lieferkette auszuschließen. Wie von der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organisation for Economic Co-operation and Development – OECD) und dem Weltwirtschaftsforum (World Economic Forum – WEF) hervorgehoben, ist ASM jedoch von großer Bedeutung für die sozioökonomische Entwicklung von Bergbauländern, und es besteht die Notwendigkeit, ihre Formalisierung zu unterstützen und sich für die Gestaltung von Sorgfaltspflichtenregelungen zu engagieren, die das Risiko des „Whitewashing“, die Bedeutung des Einkommens und die Geschlechterperspektive berücksichtigen.

Literatur

Teil VII: Nachhaltigkeitspotenziale der Elektromobilität

- Banza Lubaba Nkulu, C; Casas, L; Haufroid, V; Putter, T. de; Saenen, N. D; Kayembe-Kitenge, T; Musa Obadia, P; Kyanika Wa Mukoma, D; Lunda Ilunga, J.-M; Nawrot, T. S; Luboya Numbi, O; Smolders, E; Nemery, B.:** *Sustainability of artisanal mining of cobalt in DR Congo*. In: Nature sustainability, Jg. 1, 2018, Nr. 9, S. 495–504
- Benoît Norris, C.:** *Data for social LCA*. In: Int J Life Cycle Assess, Jg. 19, 2014, Nr. 2, S. 261–265
- Brown, T. J; Idoine, N. E; Wrighton, C. E; Raycraft, E. R; Hobbs, S. F; Shaw, R. A; Everett, P; Deady, E. A; Kresse, C.:** *WORLD MINERAL PRODUCTION 2015.19*. Keyworth, Nottingham, 2021
- Elkington, J. (Hrsg.):** *CANNIBALS WITH FORKS. The Triple Bottom Line of 21st Century Business*, Oxford, UK: Capstone, 1997
- Finkbeiner, M; Schau, E. M; Lehmann, A; Traverso, M.:** *Towards Life Cycle Sustainability Assessment*. In: Sustainability, Jg. 2, 2010, Nr. 10, S. 3309–3322
- Garrido, S. R.:** *Social Life-Cycle Assessment: An Introduction*. In: Martin A. Abraham (Hrsg.): *Encyclopedia of Sustainable Technologies* Elsevier, 2017
- Hunkeler, D; Lichtenvort, K; Rebitzer, G. (Hrsg.):** *Environmental life cycle costing*, Pensacola, USA, Brussels, Belgium: SETAC, 2008
- ISO 14040:** 14040:2006-10 Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Berlin, Deutschland: Beuth Verlag GmbH, 2006
- ISO 14044:** 14044:2018-05 Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderung und Anleitung. Berlin, Deutschland: Beuth Verlag GmbH, 2018
- Kennedy, B; Patterson, D; Camilleri, S.:** *Use of lithium-ion batteries in electric vehicles*. In: Journal of Power Sources, Jg. 2000, Nr. 90, S. 156–162
- Kloepffer, W.:** *Life cycle sustainability assessment of products*. In: Int J Life Cycle Assess, Jg. 13, 2008, Nr. 2, S. 89–95
- Mancini, L; Eslava, N. A; Traverso, M; Mathieux, F.:** *Responsible and sustainable sourcing of battery raw materials. Insights from hotspot analysis, company disclosures and field research*. Ispra, Italy, 2020

- Neugebauer, S; Martinez-Blanco, J; Scheumann, R; Finkbeiner, M.:***Enhancing the practical implementation of life cycle sustainability assessment – proposal of a Tiered approach.* In: Journal of Cleaner Production, Jg. 102, 2015, S. 165–176
- Öko-Institut e.V.:** *Nachhaltige Produktentwicklung mit Ökobilanzen und Product Carbon Footprints.* <https://www.oeko.de/forschung-beratung/themen/konsum-und-unternehmen/produktentwicklung-mit-oeobilanzen/>. Abruf 22.03.2021
- SHDB:** *Social Hotspot Database.* <http://www.socialhotspot.org/>. Abruf 09.09.2020
- Sphera:***Description of the CML 2001 Method.* www.gabi-software.com/support/gabi/gabi-lcia-documentation/cml-2001/%0D. Abruf 11.08.2020
- Swarr, T. E; Hunkeler, D; Klöpffer, W; Pesonen, H.-L; Ciroth, A; Brent, A. C; Pagan, R.:***Environmental life-cycle costing: a code of practice.* In: Int J Life Cycle Assess, Jg. 16, 2011, Nr. 5, S. 389–391
- Thies, C; Kieckhäfer, K; Spengler, T. S; Sodhi, M. S.:***Assessment of social sustainability hotspots in the supply chain of lithium-ion batteries.* In: Procedia CIRP, Jg. 80, 2019, S. 292–297
- Tonioloa, S; Tosatoa, R. C; Gambaroa, F.:***Life cycle thinking tools: Life cycle assessment, life cycle costing and social life cycle assessment.* In: Jingzheng Ren, S. T. (Hrsg.): Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making Elsevier, 2020, S. 39–56
- Traverso, M; Asdrubali, F; Francia, A; Finkbeiner, M.:***Towards life cycle sustainability assessment: an implementation to photovoltaic modules.* In: Int J Life Cycle Assess, Jg. 17, 2012, Nr. 8, S. 1068–1079
- Traverso, M; Bell, L; Saling, P; Fontes, J.:***Towards social life cycle assessment: a quantitative product social impact assessment.* In: Int J Life Cycle Assess, Jg. 23, 2018, Nr. 3, S. 597–606
- U.S. Geological Survey:** *Cobalt*, 01/2021
- U.S. Geological Survey:** *Graphite (Natural)*, 01/2021
- U.S. Geological Survey:** *Manganese*, 01/2021
- U.S. Geological Survey:** *Nickel*, 01/2021
- UNEP/SETAC Life Cycle Initiative:** *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products*, 2009
- UNEP/SETAC Life Cycle Initiative:** *Towards a Life Cycle Sustainability Assessment. Making informed choices on products*, 2011
- UNEP/SETAC Life Cycle Initiative:** *The Methodological Sheets for Subcategories in Social Life Cycle Assessment (S-LCA)*, 2013
- UNEP/SETAC Life Cycle Initiative:** *Guidelines for Social Life cycle Assessment of Products and Organizations*, 2020
- Weidema, B.:***Has ISO 14040/44 Failed Its Role as a Standard for Life Cycle Assessment?* In: Journal of Industrial Ecology, Jg. 18, 2014, Nr. 3, S. 324–326
- Zhang, H; Yang, Y; Ren, D; Wang, L; He, X.:***Graphite as anode materials: Fundamental mechanism, recent progress and advances.* In: Energy Storage Materials, Jg. 36, 2021, S. 147–170

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Die ökologischen Aspekte des Elektromobils während des gesamten Lebenszyklus

38

Jana Gerta Backes, Rose Nangah Mankaa und Marzia Traverso

Zahlreiche Länder haben sich zum Ziel gesetzt, den Anteil von Elektrofahrzeugen zu erhöhen – auch dadurch bedingt, dass eine Verringerung des Verbrauchs fossiler Ressourcen und der Umweltauswirkungen vorhergesagt wird, wenn der Wechsel von Verbrennungsmotoren zu alternativen Antriebstechnologien einschließlich Elektrofahrzeugen (Electric Vehicle – EV) gelingt.¹ Übergeordnet hat auch die Europäische Union das Ziel ausgerufen, den Anteil der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren bis zum Jahr 2030 zu halbieren und bis 2050 gänzlich zu vermeiden.² Der Absatz von Elektrofahrzeugen nimmt folglich zu, wobei China und Norwegen die Haupttreiber sind und fortwährend ein enormer Anstieg der Verkäufe prognostiziert wird.³ Mit steigenden Absatzzahlen bei wachsendem

¹ Vgl. OECD/IEA 2018.

² Vgl. EEA 2016.

³ Vgl. Bloomberg 2021; Vgl. Kazama et al. 2017; Vgl. J.P.Morgan 2018; Vgl. OECD/IEA 2018.

J. G. Backes

Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Institut für Nachhaltigkeit im Bauwesen (INAB), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: jana.backes@inab.rwth-aachen.de

R. N. Mankaa

Oberingenieurin, Institut für Nachhaltigkeit im Bauwesen (INAB), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: rose.mankaa@inab.rwth-aachen.de

M. Traverso (✉)

Universitätsprofessorin, Institut für Nachhaltigkeit im Bauwesen (INAB), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: marzia.traverso@inab.rwth-aachen.de

Interesse sowie zunehmender Relevanz von Nachhaltigkeitsthemen und -zielen steigt auch die Zahl von Ökobilanzen zu Elektrofahrzeugen,⁴ und die Frage zur Nachhaltigkeitsleistung von EV im Vergleich zu konventionellen Verbrennern wird immer wieder diskutiert.

38.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

Verschiedene vergleichende Ökobilanz-Studien (LCAs) in diesem Bereich konzentrieren sich nur auf bestimmte Komponenten von batterieelektrischen Fahrzeugen, wie zum Beispiel die Antriebsbatterie und die Leistungselektronik, während einige andere die Umweltauswirkungen des gesamten Fahrzeugs bewerten und einige nur bestimmte Phasen des Lebenszyklus des Fahrzeugs – etwa dessen Nutzung oder Produktion – behandeln.⁵ Im Fall des Lebensendes (End of Life – EoL) sollte ernsthaft geprüft werden, ob die Demontage und anschließende Nutzung von Batterien innerhalb der Systemgrenzen liegt oder nicht. Wird davon ausgegangen, dass sowohl Niederspannungs- als auch Hochspannungsbatterien am Lebensende aus dem Fahrzeug entfernt und einer sekundären Nutzung zugeführt werden, fallen diese Prozesse außerhalb der Systemgrenze^{6,7,8,9,10,11} und bilden einige Beispiele für Studien, die den gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeugs betrachten – einschließlich der Batterie und der übrigen Fahrzeugkomponenten. Darüber hinaus bewerten diese Studien verschiedene Umweltauswirkungen auf der Grundlage detaillierter Bestandsaufnahmen und Modellparameter.

In einer Ökobilanz zu Batterien wird deutlich, dass Lithium-Nickel-Kobalt-Mangan-Oxid (NCM)- und Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid (NCA)-Batterien schlechter abschneiden als andere Batterien – wenn eine massebasierte funktionale Einheit (Functional Unit – FU) gewählt wurde.¹² Dies führt zurück zur Relevanz einer ausgewählten, transparenten und deutlich definierten sowie nachvollziehbaren LCA und Wahl von FU und Systemgrenzen. Da diese Batterietypen eine höhere Energiedichte aufweisen, würden Ergebnisse anders ausfallen, wenn eine auf Energie basierende funktionale Einheit gewählt würde. Bei Verwendung einer massebasierten funktionalen Einheit standen Lithium-Eisen-Phosphat (LFP)- und Natrium-Ionen-Batterien vergleichsweise besser da.¹³

⁴Vgl. Dolganova et al. 2020.

⁵Vgl. Del Pero et al. 2018.

⁶Vgl. Genikomsakis et al. 2013.

⁷Vgl. Notter et al. 2010.

⁸Vgl. Hawkins et al. 2012.

⁹Vgl. Bauer et al. 2015.

¹⁰Vgl. Tagliaferri et al. 2016.

¹¹Vgl. Lombardi et al. 2017.

¹²Vgl. Peters und Weil 2016.

¹³Vgl. Peters und Weil 2016.

38.2 Sachbilanz und Datensammlung

Die Durchführung der Sachbilanz (LCI, Kap. 37) ist mit Herausforderungen in Bezug auf Datenverfügbarkeit, Qualität und Transparenz verbunden. Für die Produktionsphase wurden Daten zu Materialien, Massen und Fertigungstechnologien für die spezifischen Monomaterialteile gesammelt – mit Hilfe entsprechender Fragebögen sowie von Literaturstudien, bestehenden Datensätzen, Forschungsberichten und veröffentlichten Informationen zum Fahrzeughersteller.¹⁴ Die Neuheit von Elektrofahrzeugen im Allgemeinen und die damit verbundene geringe Marktgröße führt zu einer Knappheit von Daten, die den Energieverbrauch von E-Mobilen im Gegensatz zu ihren „Internal-Combustion-Engine“ (ICE)-Pendents beschreiben. Infolgedessen haben einige Studien folgende Aspekte in die Sachbilanz aufgenommen:

- Standardverbrauchsdaten aus dem Datenblatt eines bestimmten Fahrzeugs (18,7 kWh/100 km)
- Die durchschnittlichen realen Verbräuche (wie in „Ecoinvent“: 19,9 kWh/100 km) oder
- im Labor gemessene Verbräuche, die für ein bestimmtes Fahrzeug bei verschiedenen Fahrzyklen und unter Betriebsbedingungen im Labor auftreten (15,7 kWh/100 km).

Andere Untersuchungen wiederum betrachten die Zusammensetzung der tatsächlichen Elektrofahrzeug-Flotte wie beispielsweise die Verbräuche von E-Fahrzeugen, die in einigen EU-Mitgliedstaaten zwischen 17,1 kWh/100 km und 21,5 kWh/100 km variieren.¹⁵ Einige Studien basieren auf vertraulichen Sachbilanzdaten – was eine Nachmodellierung oder einen direkten Vergleich unmöglich macht; andere wiederum modellieren die EoL-Phase nach verschiedenen Ansätzen und Instrumenten, wie etwa nach der Richtlinie 2000/53/EG und ISO 22628:2002 „Road vehicles Recyclability and recoverability: Calculation method“.^{16,17}

38.3 Wirkungsabschätzung oder „Life Cycle Impact Assessment“

Obwohl alle aktuell publizierten Ökobilanzen von Elektroautos das Treibhauspotenzial beziehungsweise den Treibhauseffekt (in kg CO₂e) bewerten, umfassen einige auch den Abbau von Ressourcen (Mineralien, fossile und erneuerbare Energieträger), das Versauerungspotenzial, den photochemischen Ozonabbau und die Auswirkungen auf die Toxizität. Eine vergleichende Analyse, die sich nur auf das Treibhauspotenzial (CO₂-Fußabdruck) stützt, bringt in den meisten Fällen irreführende Schlussfolgerungen mit

¹⁴Vgl. Del Pero et al. 2018; Vgl. Rupp et al. 2018.

¹⁵Vgl. Ensslen et al. 2017; Vgl. Del Duce et al. 2016; Vgl. Gennaro et al. 2015; Vgl. IEA 2016.

¹⁶Vgl. ISO 22628 2002.

¹⁷Vgl. Del Pero et al. 2018.

Tab. 38.1 Elektrofahrzeug vs. Verbrenner: Vorhandene Studien und Ergebnisse in Anlehnung an Dolganova et al. (2020) und van Loon et al. (2018). (Vgl. Dolganova et al. 2020; vgl. van Loon et al. 2018)

Abbildungsquelle (unter Abbildung): (Dolganova et al. 2020; van Loon et al. 2018)	
Wirkungskategorien und Umwelteinflüsse	Elektrofahrzeug (E) vs. Verbrennungsmotor
Treibhauspotenzial	Niedriger für E
Abbau des stratosphärischen Ozons	Leicht niedriger für E
Humantoxizität	Höher für E
Photochemische Oxidantienbildung	Niedriger für E
Versauerung	Abhängig von Energiequellen
Eutrophierung	Leicht höher für E
Ökotoxizität	Leicht höher für E
Beanspruchung elementarer und fossiler Ressourcen	Niedriger für E
Wasserverbrauch	Höher für E
Feinstaubemissionen	Uneindeutig

sich, da Elektrofahrzeuge im Vergleich zu Verbrennern in anderen Wirkungskategorien auch schlechtere Ergebnisse erzielen (siehe Tab. 38.1).¹⁸ Soll eine Verlagerung der Belastung von einer Wirkungskategorie zur anderen verhindert werden, liegt der größte Spielraum für Verbesserungen bei Elektroautos in der technologischen Entwicklung innovativer Verfahren zur Herstellung von Batterien, die einen hohen Wirkungsgrad, innovative ökoefiziente Materialien und die Recycling-Fähigkeit der Komponenten bieten.¹⁹

Das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential – GWP) wird häufig auch als „Treibhauseffekt“ oder „Klimawandel“ angegeben und beschreibt die potenzielle globale Erwärmung durch Emissionen von Treibhausgasen in der Luft. Der Ausstoß von Treibhausgasen bildet den Hauptfaktor für den Indikator, wobei die Emissionen einen erhöhten Strahlungsantrieb verursachen, was unmittelbar zu Temperaturanstiegen in Atmosphäre und Ozeanen führt. Das Treibhauspotenzial wird in CO₂-Äquivalenten angegeben, was die Schätzung der atmosphärischen Lebensdauer einer Chemikalie und des Strahlungsantriebs im Vergleich mit der Referenz CO₂ beschreibt.²⁰ Die stratosphärische Ozonschicht spielt eine entscheidende Rolle bei der Regulierung der Bedingungen auf der Erde und schützt die Lebewesen vor schädlichen UV-Strahlen. Chemikalien wie etwa Fluorchlorkohlenwasserstoffe können bei Eintritt in die Atmosphäre zu ozonerstörenden Reaktionen führen. Der Abbau des stratosphärischen Ozons (Ozone Depletion Potential – ODP) ist eine Verhältniszahl für die Ozonveränderung, die durch Emissionen bestimmter Substanzen hervorgerufen wird, verglichen mit der Ozonveränderung, die durch die Emission

¹⁸Vgl. Dolganova et al. 2020; Vgl. van Loon et al. 2018.

¹⁹Vgl. Del Pero et al. 2018.

²⁰Vgl. Levasseur 2015.

einer Einheit FCKW-11 (Fluorchlorkohlenwasserstoff) bedingt wird.²¹ Toxizitätsbezogene Indikatoren – beispielsweise das Humantoxizitätspotenzial und das Ökotoxizitätspotenzial – beschreiben Giftwirkungen auf Menschen und Umwelt.²² Die Wirkungskategorie der photochemischen Oxidantienbildung wird auch als „Sommersmog“ bezeichnet und beschreibt die Entstehung photochemischen, anthropogenen Ozons. Es entsteht als Produkt von Reaktionen in der Atmosphäre zwischen OH-Radikalen, den anthropogenen Luftschadstoffen, Stickstoffoxiden (NO_x – Stickoxide) und verschiedenen flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC – Non-methane volatile organic compound).²³ Die Versauerung als Wirkungskategorie (Acidification Potential – AP) beschreibt die Versauerung von terrestrischen und aquatischen Systemen, wofür die Emissionen von säurebildenden Substanzen aus beispielweise Landwirtschaft und Industrie verantwortlich sind. CO₂ ist die Hauptursache für die Versauerung von Meeren, während Stickstoff- und Schwefeleinträge die Ursache für die Versauerung des Süßwassers und des Bodens bilden. Das Versauerungspotenzial selbst wird in SO₂-Äquivalenten (SO₂ – Schwefeldioxid) angegeben.²⁴ Der anthropogene Anstieg des Stickstoff- und Phosphoreintrags in Ökosystemen (Boden und Wasser) bedingt die Eutrophierung – die Überdüngung –, was auch das Auftreten von Ökosystemveränderungen aufgrund eines Überangebots von Nährstoffen beschreibt. Die Eutrophierung hat beispielsweise Auswirkungen auf die Artenzusammensetzung (Algenblüten, Sauerstoffmangel) und wird als Eutrophierungspotenzial (Eutrophication Potential) angegeben.²⁵ Die Beanspruchung elementarer und fossiler Ressourcen als Wirkungskategorie befasst sich mit den Umweltproblemen, die durch Nutzung von Ressourcen wie beispielsweise Metallen, Mineralien und fossiler Energie entstehen.²⁶ Der Wirkungsindikator des Wasserverbrauchs bedingt Verschmutzung und Konsum. In der Ökobilanz werden im Rahmen dieses Indikators primär der Verbrauch und die Verschmutzung von Süßwasser betrachtet, nicht jedoch die Auswirkungen auf Meer- oder Brackwasser.²⁷ Feinstaub beschreibt feste Partikel sowie Flüssigkeitstropfen in der Luft. Jene Schadstoffe, die in der Wirkungskategorie „Feinstaubemissionen“ betrachtet werden, sind in der Regel Schwebstoffe, die – angegeben in „Particulate Matter“ (PM) – beispielsweise in PM₁₀ oder PM_{2,5} differenziert werden und unter anderem Auswirkung auf die menschliche Gesundheit haben.²⁸ Dolganova et al. (2020)²⁹ setzten sich in ihrem Review-Artikel die Feststellung zum Ziel, ob Aspekte der Ressourcennutzung in Ökobilanz-Fallstudien zu Elektrofahrzeugen (EV) angemessen berücksichtigt werden. Insgesamt wurden dafür

²¹ Vgl. Lane 2015.

²² Vgl. Jolliet und Fantke 2015; Vgl. Rosenbaum 2015.

²³ Vgl. Preiss 2015.

²⁴ Vgl. van Zelm et al. 2015.

²⁵ Vgl. Henderson 2015.

²⁶ Vgl. Swart et al. 2015.

²⁷ Vgl. Pfister 2015.

²⁸ Vgl. Humbert et al. 2015.

²⁹ Vgl. Dolganova et al. 2020.

103 Ökobilanzstudien zu Elektrofahrzeugen aus den Jahren 2009 bis 2018 hinsichtlich ihrer Zielsetzung, ihres Umfangs, der berücksichtigten Wirkungskategorien und der Bewertungsmethoden ausgewertet – mit einem Schwerpunkt auf Ressourcenverbrauch und Kritikalität. Als Ergebnis ihres Reviews stellen die Autorinnen und Autoren fest, dass Elektrofahrzeuge in den meisten Studien höhere Werte für den Abbau von Mineralien und Metallen als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor aufweisen. Die explizite Analyse von Ökobilanzen zu Batterien zeigte, dass Lithium, Mangan, Kupfer und Nickel die höchsten Umweltbelastungen verursachen. Deutlich wird außerdem, dass sich nur ein geringer Teil der Veröffentlichungen mit der Kritikalität von Ressourcen beschäftigt.³⁰ Das Hauptaugenmerk des Automobilssektors liegt nach wie vor auf dem globalen Erderwärmungspotenzial für die Reduzierung der Treibhausgase (kg CO₂e) während des gesamten Lebenszyklus des Fahrzeugs,³¹ aber auch andere Wirkungskategorien werden betrachtet – obgleich in deutlich geringerem Umfang.³² Die Verwirklichung eines Fahrzeugs mit besserer Ökobilanz als sein Vorgängermodell ist nur möglich, wenn sowohl die Nutzungsphase als auch die Herstellungsphase in Betracht gezogen werden. Beispiele zur Erreichung einer besseren Umweltbilanz können etwa die Verwendung von mehr Sekundärrohstoffen wie Metallen und Thermoplasten sein, ebenso wie die Förderung weniger energieintensiver Materialien, aber auch Komponenten, die mit erneuerbarer Energie hergestellt werden, sowie die Verbesserung der Recycling-Fähigkeit der Fahrzeugkomponenten am Ende des Lebenszyklus.³³

Zwei weitere Studien betrachten explizit einzelne Wirkungskategorien, wobei weitere Aussagen im Vergleich zu denen von Dolganova et al. (2020) und van Loon et al. (2018)³⁴ zu finden sind: Im Fall von schweren Nutzfahrzeugen zeigen die LCA-Ergebnisse, dass die Differenz in CO₂e/t km negativ ist, was bedeutet, dass das Hybridfahrzeug im Vergleich zum Diesel-Lkw pro Tonne Ladung 4,34 g CO₂e/t km während seiner gesamten Lebensdauer weniger Emissionen freisetzt. Dabei sind die Auswirkungen auf den Klimawandel durch die Herstellung der Komponenten des Hybrid-EV-Antriebsstrangs im Vergleich zur Nutzungsphase sehr gering (0,07 g CO₂e/t km gegenüber 4,4 g CO₂e/t km).³⁵ Gemäß Del Pero et al. (2018) ist im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen der Einfluss der Herstellung auf den Klimawandel bei Elektroautos mit Blick auf Batterie, Elektromotor sowie Wechselrichter und Kühlsystem höher. Diese Auswirkungen werden in der Nutzungsphase weitgehend kompensiert, was zu einer Reduzierung der Gesamtauswirkungen um 36 % im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen führt.³⁶ Der Grund dafür ist das Fehlen von Abgasemissionen während des Betriebs sowie die geringere Umweltbelastung

³⁰ Vgl. Dolganova et al. 2020.

³¹ Vgl. Dolganova et al. 2020; Vgl. van Loon et al. 2018; Vgl. Traverso et al. 2015.

³² Vgl. Dolganova et al. 2020.

³³ Vgl. Traverso et al. 2015.

³⁴ Vgl. Dolganova et al. 2020; Vgl. van Loon et al. 2018.

³⁵ Vgl. Rupp et al. 2018.

³⁶ Vgl. Del Pero et al. 2018.

durch die Stromerzeugung im Vergleich zur Kraftstoffbereitstellung.³⁷ Das Versauerungspotenzial ist bei Elektrofahrzeugen höher (fast 50 %),³⁸ was auf die Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien und Hochspannungsmotoren zurückzuführen ist, bei denen Aluminium, Kupfer und Nickel verwendet werden. Die hohen Werte des Versauerungspotenzials in der Nutzungsphase sind auf die SO₂-Emissionen zurückzuführen. Die Batterieproduktion bringt zudem äußerst hohe Auswirkungen in der Kategorie „Humantoxizität“ mit sich: Sie liegt bei Elektroautos bis zu fünfmal höher als bei Verbrennern. Bei Feinstaub zeigt sich ein ähnlicher Trend wie bei der Humantoxizität: Auch hier ist die Belastung durch Batterie-Elektrofahrzeuge mehr als doppelt so hoch wie durch Verbrennungsfahrzeuge und die Auswirkungen werden bei beiden Antriebstechnologien von der Produktionsphase dominiert. Was die Bildung von Sommersmog betrifft, so sind die Auswirkungen von „Battery Electric Vehicles“ (BEVs) etwas höher als die von ICEVs (+26 %). Bei beiden Antriebstechnologien sind hauptsächlich die NO_x-Emissionen für die Auswirkungen verantwortlich.³⁹ Die Auswirkungen der BEV-Nutzungsphase werden stark von der Stromquelle beeinflusst. Wird Strom aus Quellen erneuerbarer Energie verwendet, reduziert sich der Ausstoß von Treibhausgasen erheblich. Das ist von Vorteil, da es zu einem niedrigen „Break-even-Point“ führt. Er beschreibt die Fahrleistung, bei der die großen Umweltbelastungen durch die Produktion des Hybridantriebsstrangs im Vergleich zum konventionellen Antrieb kompensiert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die erhöhten CO₂-Emissionen, die aus der Produktion des schweren Hybrid-EV-Antriebsstrangs resultieren, aufgrund der effizienteren Energieumwandlung und der Möglichkeit der Energierückgewinnung bei einer Fahrleistung von etwa 15.800 km (etwa 1,5 Monate) kompensiert werden.⁴⁰ Für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge zeigt die von Del Petro et al. (2018)⁴¹ vorgenommene Analyse des Break-even-Points, dass der Umweltnutzen in Bezug auf den Klimawandel bei einer geringeren Fahrleistung (etwa 45.000 km) eintritt. Bei den anderen Wirkungskategorien gibt es nur bei der Verwendung von saubereren Energieformen einen Break-even-Point. Dies lässt den Schluss zu, dass der Umweltnutzen nur dann gegeben ist, wenn der vom Auto verbrauchte Strom aus Quellen nicht fossiler Energie stammt. In Gebieten mit einem Stromnetzmix, der durch einen hohen Anteil von Kohlestrom gekennzeichnet ist, könnten Elektrofahrzeuge kontraproduktiv sein, weshalb die Begrenzung der Abgasemissionen konventioneller Autos die wirksamste Strategie zur Verringerung der Auswirkungen sein könnte.⁴² Es ist jedoch zu beachten, dass der Anteil erneuerbarer Energie am Strommix in naher Zukunft schrittweise steigen wird, wodurch das Potenzial der Elektromobilität zur Verringerung der globalen Erwärmung und der Er-

³⁷ Vgl. Del Pero et al. 2018.

³⁸ Vgl. Del Pero et al. 2018.

³⁹ Vgl. Del Pero et al. 2018.

⁴⁰ Vgl. Rupp et al. 2018.

⁴¹ Vgl. Del Pero et al. 2018.

⁴² Vgl. Del Pero et al. 2018.

schöpfung fossiler Brennstoffe erhöht wird.⁴³ Ein weiterer Aspekt, der bei der Zusammensetzung des Stromnetzes zu berücksichtigen ist, liegt in der Auswirkung des grenzüberschreitenden Stromhandels auf die Kohlenstoffintensität des gelieferten und des für den Verbrauch in den verschiedenen EU-Mitgliedstaaten verfügbaren Stroms: Importe aus einem Land mit einer geringeren Kohlenstoffintensität des Strommixes führen zu einem geringeren Kohlenstoffgehalt des importierenden Landes und umgekehrt.⁴⁴

Die Herausforderung wachsender Materialverbräuche und der Ressourceneffizienz sind Themen, die in den vergangenen Jahren intensiv diskutiert wurden.⁴⁵ Der Umstieg von konventionellen Fahrzeugen auf Elektrofahrzeuge in den nächsten Jahren und Jahrzehnten bedeutet eine relevante Veränderung im weltweiten Ressourcenverbrauch. Vor allem bezüglich der Batterieherstellung wird die Nachfrage zu Lithium, Kobalt, seltenen Erden und Graphit voraussichtlich stark ansteigen: bis zum Jahr 2025 um das Siebenfache und bis 2030 um das Elf- bis 13-Fache⁴⁶ – was eine große Auswirkung auf Ressourcen und Umwelteinflüsse⁴⁷ sowie auf soziale Aspekte hat (siehe Kap. 37). Dabei sind die größten negativen Beiträge auf die Gewinnung und die Verarbeitung von Metallen zurückzuführen.⁴⁸

Hinsichtlich der künftig steigenden Anzahl von Elektrofahrzeugen auf den Straßen ist es wichtig, die Lücke umfassender und konsistenter Bewertungen des damit verbundenen Ressourcenbedarfs zu schließen (Ökobilanzen und lebenszyklusbasierte Nachhaltigkeitsbewertungen). Ohne transparente, valide und nachvollziehbare Bewertungen und daraus abgeleitete Maßnahmen zur umweltgerechten Gestaltung sind Elektrofahrzeuge nicht als die ultimative Lösung für eine nachhaltige Mobilität zu definieren.⁴⁹

38.3.1 Sieben Grundsätze zu Ökobilanzen von Elektrofahrzeugen

- Die Ökobilanz im Allgemeinen und explizit diejenige von Elektrofahrzeugen wird durch diverse Parameter bedingt – zum Beispiel Systemgrenzen, funktionale Einheit (FU), Energiebezug und Abbaugebiete. Eine direkte und vergleichende Aussage zur Nachhaltigkeitsleistung von Elektrofahrzeugen im Vergleich zum Verbrenner ist nicht mit einem Parameter alleine zu treffen.
- Die transparente, valide und begründete Auswahl der funktionalen Einheit und Systemgrenzen bedingt vollständig die Ergebnisse der Ökobilanz und auch deren Glaubwürdigkeit.

⁴³ Vgl. Moro und Lonza 2018.

⁴⁴ Vgl. Moro und Lonza 2018.

⁴⁵ Vgl. Oberle et al. 2019; Vgl. OECD 2019.

⁴⁶ Vgl. Kazama et al. 2017; Vgl. Küpper et al. 2018.

⁴⁷ Vgl. Messagie et al. 2015; Vgl. Peters und Weil 2016.

⁴⁸ Vgl. Dolganova et al. 2020.

⁴⁹ Vgl. Dolganova et al. 2020.

- Für eine vollumfängliche und valide LCA ist eine nachvollziehbare und vor allem transparente sowie begründete Datengrundlage (Sachbilanz) notwendig, die sich jederzeit von Dritten abbilden sowie nachmodellieren und dadurch auch optimieren lässt.
- Der Bezug der Energiequellen hat insbesondere bei Elektrofahrzeugen eine große Wirkung hinsichtlich der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung.
- Ein CO₂-Fußabdruck (in kg CO₂e) ist keine Ökobilanz und führt zu falschen Schlussfolgerungen. Software-Lösungen können die Wirkungsabschätzung vereinfachen und eine vollständige Ökobilanz unterstützen.
- Sensitivitätsanalysen helfen bei der Optimierung und tiefergehenden Analyse, indem beispielsweise Energiequellen oder Materialeinsätze variiert werden und dies die Ergebnisse bedingt.
- Aussagekräftige, vergleichende Ökobilanzen sind nur bei identischer funktionaler Einheit, Systemgrenzen und Wirkungsmethodik möglich.

Literatur

Teil VII: Nachhaltigkeitspotenziale der Elektromobilität

- Bauer, C; Hofer, J; Althaus, H.-J; Del Duce, A; Simons, A.:** *The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework.* In: Applied Energy, Jg. 157, 2015, S. 871–883
- Bloomberg:** *Electric Vehicle Outlook 2018. BNEF's Annual Long-Term Forecast of Global Electric Vehicle (EV) Adoption to 2040.* <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/#toc-download>. Abruf 15.09.2021
- Del Duce, A; Gauch, M; Althaus, H.-J.:** *Electric passenger car transport and passenger car life cycle inventories in ecoinvent version 3.* In: Int J Life Cycle Assess, Jg. 21, 2016, Nr. 9, S. 1314–1326
- Del Pero, F; Delogu, M; Pierini, M.:** *Life Cycle Assessment in the automotive sector: a comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car.* In: Procedia Structural Integrity, Jg. 12, 2018, S. 521–537
- Dolganova, I; Rödl, A; Bach, V; Kaltschmitt, M; Finkbeiner, M.:** *A Review of Life Cycle Assessment Studies of Electric Vehicles with a Focus on Resource Use.* In: Resources, Jg. 9, 2020, Nr. 3, S. 32
- EEA:** *Electric vehicles in Europe 2016.*
- Ensslen, A; Schücking, M; Jochem, P; Steffens, H; Fichtner, W; Wollersheim, O; Stella, K.:** *Empirical carbon dioxide emissions of electric vehicles in a French-German commuter fleet test.* In: Journal of Cleaner Production, Jg. 142, 2017, S. 263–278
- Genikomsakis, K. N; Ioakimidis, C. S; Murillo, A; Trifonova, A; Simic, D.:** *A life cycle assessment of a Li-ion urban electric vehicle battery.* In: EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium (Hrsg.): International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium. 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 17.11.2013–20.11.2013 2013, S. 1–11
- Gennaro, M. de; Paffumi, E; Martini, G; Manfredi, U; Vianelli, S; Ortenzi, F; Genovese, A.:** *Experimental Test Campaign on a Battery Electric Vehicle: Laboratory Test Results (Part 1).* In: SAE Int. J. Alt. Power., Jg. 4, 2015, Nr. 1, S. 100–114

- Hawkins, T. R; Gausen, O. M; Strømman, A. H.:** *Environmental impacts of hybrid and electric vehicles – a review*. In: Int J Life Cycle Assess, Jg. 17, 2012, Nr. 8, S. 997–1014
- Henderson, A. D.:** *Eutrophication*. In: Huijbregts, M. A; Hauschild, M. Z. (Hrsg.): *Life Cycle Impact Assessment* (Reihe: Springer eBook Collection Earth and Environmental Science). Dordrecht: Springer, 2015, S. 177–196
- Humbert, S; Fantke, P; Jolliet, O.:** *Particulate Matter Formation*. In: Huijbregts, M. A; Hauschild, M. Z. (Hrsg.): *Life Cycle Impact Assessment* (Reihe: Springer eBook Collection Earth and Environmental Science). Dordrecht: Springer, 2015, S. 97–113
- IEA:** *International Energy Agency. Energy Technology Perspectives 2016: Towards Sustainable Urban Energy Systems* 2016.
- ISO 22628:** 22628ISO 22628 – Road vehicles – Recyclability and recoverability – Calculation method, 2002
- J.P.Morgan:** *Driving into 2025: The Future of Electric Vehicles*. <https://www.jpmorgan.com/insights/research/electric-vehicles>. Abruf 15.09.2021
- Jolliet, O; Fantke, P.:** *Human Toxicity*. In: Huijbregts, M. A; Hauschild, M. Z. (Hrsg.): *Life Cycle Impact Assessment* (Reihe: Springer eBook Collection Earth and Environmental Science). Dordrecht: Springer, 2015, S. 75–96
- Kazama, T; Suzuki, K; Cho, T; Yoshihashi, S.:** *Electric Drive Vehicle Market Outlook toward 2030 and Impact on Relevant Industries*. In: NRI Papers 2017, Nr. 217
- Küpper, D; Kuhlmann, K; Wolf, S; Pieper, C; Xu, G; Ahmad, J.:** *The Future of Battery Production for Electric Vehicles*. <https://www.bcg.com/de-de/publications/2018/future-battery-production-electric-vehicles>. Abruf 15.09.2021
- Lane, J. L.:** *Stratospheric Ozone Depletion*. In: Huijbregts, M. A; Hauschild, M. Z. (Hrsg.): *Life Cycle Impact Assessment* (Reihe: Springer eBook Collection Earth and Environmental Science). Dordrecht: Springer, 2015, S. 51–73
- Levasseur, A.:** *Climate Change*. In: Huijbregts, M. A; Hauschild, M. Z. (Hrsg.): *Life Cycle Impact Assessment* (Reihe: Springer eBook Collection Earth and Environmental Science). Dordrecht: Springer, 2015, S. 39–50
- Lombardi, L; Tribioli, L; Cozzolino, R; Bella, G.:** *Comparative environmental assessment of conventional, electric, hybrid, and fuel cell powertrains based on LCA*. In: Int J Life Cycle Assess, Jg. 22, 2017, Nr. 12, S. 1989–2006
- Messagie, M; Oliveira, L; Rangaraju, S; Forner, J. S; Rivas, M. H.:** *Environmental performance of lithium batteries: life cycle analysis*. In: Alejandro A. Franco (Hrsg.): *Rechargeable Lithium Batteries: From Fundamentals to Applications* (Reihe: Woodhead Publishing Series in Energy: Number 81). 1. Aufl. Cambridge, Waltham, Kidlington: Elsevier, Woodhead Publishing, 2015, S. 303–318
- Moro, A; Lonza, L.:** *Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles*. In: Transportation research. Part D, Transport and environment, Jg. 64, 2018, S. 5–14
- Notter, D. A; Gauch, M; Widmer, R; Wäger, P; Stamp, A; Zah, R; Althaus, H.-J.:** *Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles*. In: Environmental science & technology, Jg. 44, 2010, Nr. 17, S. 6550–6556
- Oberle, B; Bringezu, S; Hatfield-Dodds, S; Hellweg, S; Schandl, H; Clement, J.:** *Global Resources Outlook 2019. Natural Resources for the Future We Want*. New York: United Nations, 2019
- OECD:** *Global Material Resources Outlook to 2060. Economic Drivers and Environmental Consequences*. https://read.oecd-ilibrary.org/environment/global-material-resources-outlook-to-2060_9789264307452-en#page4. Abruf 15.09.2021
- OECD/IEA:** *Global EV Outlook 2018. Towards Cross-Modal Electrification*. https://read.oecd-ilibrary.org/energy/global-ev-outlook-2018_9789264302365-en#page2. Abruf 15.09.2021

- Peters, J; Weil, M.:** *A Critical Assessment of the Resource Depletion Potential of Current and Future Lithium-Ion Batteries*. In: Resources, Jg. 5, 2016, Nr. 4, S. 46
- Pfister, S.:** *Water Use*. In: Huijbregts, M. A; Hauschild, M. Z. (Hrsg.): Life Cycle Impact Assessment (Reihe: Springer eBook Collection Earth and Environmental Science). Dordrecht: Springer, 2015, S. 223–245
- Preiss, P.:** *Photochemical Ozone Formation*. In: Huijbregts, M. A; Hauschild, M. Z. (Hrsg.): Life Cycle Impact Assessment (Reihe: Springer eBook Collection Earth and Environmental Science). Dordrecht: Springer, 2015, S. 115–138
- Rosenbaum, R. K.:** *Ecotoxicity*. In: Huijbregts, M. A; Hauschild, M. Z. (Hrsg.): Life Cycle Impact Assessment (Reihe: Springer eBook Collection Earth and Environmental Science). Dordrecht: Springer, 2015, S. 139–162
- Rupp, M; Schulze, S; Kuperjans, I.:** *Comparative Life Cycle Analysis of Conventional and Hybrid Heavy-Duty Trucks*. In: WEVJ, Jg. 9, 2018, Nr. 2, S. 33
- Swart, P; Alvarenga, R. A. F; Dewulf, J.:** *Abiotic Resource Use*. In: Huijbregts, M. A; Hauschild, M. Z. (Hrsg.): Life Cycle Impact Assessment (Reihe: Springer eBook Collection Earth and Environmental Science). Dordrecht: Springer, 2015, S. 247–269
- Tagliaferri, C; Evangelisti, S; Acconcia, F; Domenech, T; Ekins, P; Barletta, D; Lettieri, P.:** *Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: A cradle-to-grave systems engineering approach*. In: Chemical Engineering Research and Design, Jg. 112, 2016, S. 298–309
- Traverso, M; Kim, P; Brattig, S; Wagner, V.:** *Managing Life Cycle Sustainability Aspects in the Automotive Industry*. In: Sonnemann, G; Margni, M. (Hrsg.): Life Cycle Management (Reihe: LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment). Dordrecht: Springer Netherlands, 2015, S. 331–339
- van Loon, P; Olsson, L; Klintbom, P.:** *LCA Guidelines for electric vehicles*, 2018
- van Zelm, R; Roy, P-O; Hauschild, M. Z; Huijbregts, M. A. J.:** *Acidification*. In: Huijbregts, M. A; Hauschild, M. Z. (Hrsg.): Life Cycle Impact Assessment (Reihe: Springer eBook Collection Earth and Environmental Science). Dordrecht: Springer, 2015, S. 163–176

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Potenziale von Second-Use-Anwendungen für Lithium-Ionen-Batterien

39

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns, Nikolaus Lackner, Domenic Klohs, Mark Junker und Kim Kreisköther

Mit der zunehmenden Marktdurchdringung von Lithium-Ionen-Batterien für verschiedene Anwendungsfelder wächst die Anforderung, den Energie- und Materialeinsatz für diese Schlüsselkomponenten der Elektromobilität so weit wie möglich zu reduzieren. In der Automobilindustrie stellen hohe Kosten für den Energiespeicher heute noch ein wesentliches Hindernis in der weiteren Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen dar,

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

C. Offermanns (✉)

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: c.offermanns@pem.rwth-aachen.de

N. Lackner

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: n.lackner@pem.rwth-aachen.de

D. Klohs

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: d.klohs@pem.rwth-aachen.de

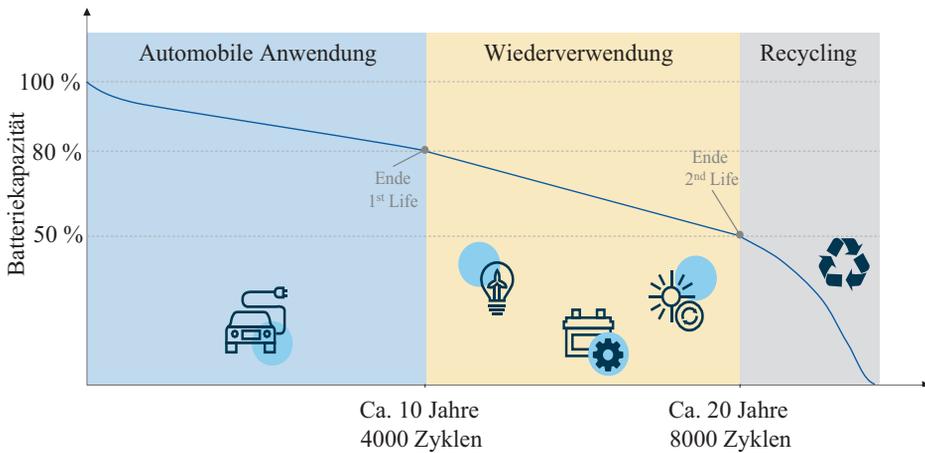


Abb. 39.1 Lebensdauer und -abschnitte aktueller Lithium-Ionen-Batterien

das es zu überwinden gilt. Als Kernkomponente des E-Mobils stellt die Lithium-Ionen-Batterie (kurz: LIB oder Batterie) nicht nur das im Vergleich zu Verbrennungsmotorautos teuerste Einzelbestandteil dar, sie bestimmt außerdem wesentlich die Reichweite sowie die abrufbare Leistung respektive das Ladeverhalten. Nach einer material- und anwendungsabhängigen Zeit beziehungsweise Zyklenzahl erreichen die im Elektrofahrzeug verbauten Batteriezellen einen Zustand, in dem sie den hohen Anforderungen im Auto nicht mehr gerecht werden. Für das Ende der First-Life-Anwendung werden üblicherweise 80 % der Ausgangskapazität der Batterien angenommen. Wie Abb. 39.1 verdeutlicht, wird bei aktuellen LIB mit bis zu 4000 Zyklen (abhängig von der Zellchemie) gerechnet, bevor diese Grenze erreicht wird.¹

Nach dem „First Life“ existieren mehrere Handlungsoptionen: Aufgrund der in den Batterien und insbesondere in deren Kathodenmaterialien enthaltenen Wertstoffe ist ein Recycling nach Ende der Verwertbarkeit der Batterie als Energiespeicher unbedingt anzustreben. Vor der Überführung in den Recycling-Prozess kann es jedoch in vielen Anwendungsfällen sinnvoll sein, die Batterien in einem „Second Life“ weiterhin als Energie-

¹ Vgl. Martinez-Laserna et al. 2018.

M. Junker

Chair for Electrochemical Energy Conversion and Storage Systems, Institute for Power Electronics and Electrical Drives (ISEA), RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland
E-Mail: mark.junker@isea.rwth-aachen.de

K. Kreisköther

Specialist Battery Cell/System – Adhesives Automotive Components, Henkel, Düsseldorf, Deutschland

E-Mail: kim.kreiskoether@henkel.com

speicher zu nutzen. Dabei kann eine Zerlegung der Batteriepacks zu Batteriemodulen oder sogar einzelnen Batteriezellen sowie eine Neuzusammenstellung zu aggregierten Einheiten erfolgen. Die Möglichkeit der Sortierung und selektiven Verwertung einzelner Batteriezellen und Batteriemodule auf der Basis ihres jeweiligen Alterungszustands wird als „Remanufacturing“ bezeichnet. Ebenso ist es möglich, komplette Batteriepacks ohne vorangehende Demontage in einer Zweitnutzung zu verwerten. Bei diesen Nutzungsmodellen spricht man von „Re-Use“ beziehungsweise „Second-Use“-Anwendungen.²

Batterien, die automobilen Zwecken nicht mehr gerecht werden können, haben somit weiterhin Aussichten auf einen profitablen Betrieb in weniger anspruchsvollen Anwendungen, deren Anforderungsprofil sie erfüllen können. Die zweite Lebensdauer von Batterien kann dabei sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht sinnvoll sein: Eine Nutzung in zwei aufeinanderfolgenden Anwendungen reduziert durch den Wiederverkaufswert die Kosten für den Erstanwendenden und stellt gleichzeitig eine für Second-Life-Anwendungen günstige Batterie zur Verfügung. Second-Life-Lösungen bieten somit ein einzigartiges Wertversprechen für die drei Stakeholder-Gruppen, die regelmäßig an Interaktionen mit gebrauchten Batterien beteiligt sind: der Fahrzeug-OEM, der den gebrauchten Akku liefert, und der Ausrüster, der die Batterie in einer Second-Life-Anwendung wiederverwendet und weiterverkauft, sowie der Kunde, der den Second-Life-Akku nutzt.³ Darüber hinaus besteht die Möglichkeit einer Verbesserung der Öko- und Energiebilanz batterieelektrischer Anwendungen aufgrund des verminderten Bedarfs neuwertiger Batterien.⁴

Derzeit bedeutet die Wiederverwendung einer EV (Electric Vehicle)-Batterie für eine Second-Life-Anwendung eine wirtschaftliche Herausforderung, da der potenzielle Gewinn noch zu gering ist, um den damit verbundenen Aufwand lohnenswert zu gestalten. Mit einer zunehmenden Zahl von Second-Life-Batterien auf dem Markt und besseren Prozessen zur Überführung in eine Zweitnutzung weisen Second-Use-Anwendungen jedoch hohe Zukunftschancen auf.

39.1 Aufkommen und Zustand von Batterien für die Second-Life-Phase

Durch die stetig steigenden Verkaufszahlen elektrisch angetriebener Fahrzeuge in den vergangenen Jahren sowie eines sich weiter verstärkenden Marktwachstums in der kommenden Dekade könnte das Angebot von Second-Life-Batterien für stationäre Anwendungen bis 2030 insgesamt 200 Gigawattstunden pro Jahr übersteigen. Zu beachten ist, dass nicht das gesamte Volumen der rückläufigen Batterien für eine Weiterverwendung infrage kommt (vgl. Abb. 39.2). Dieses Volumen übersteigt die Nachfrage im Bereich der Lithium-

²Vgl. Kampker et al. 2019.

³Vgl. Engel et al. 2019.

⁴Vgl. Desarnaud 2019.

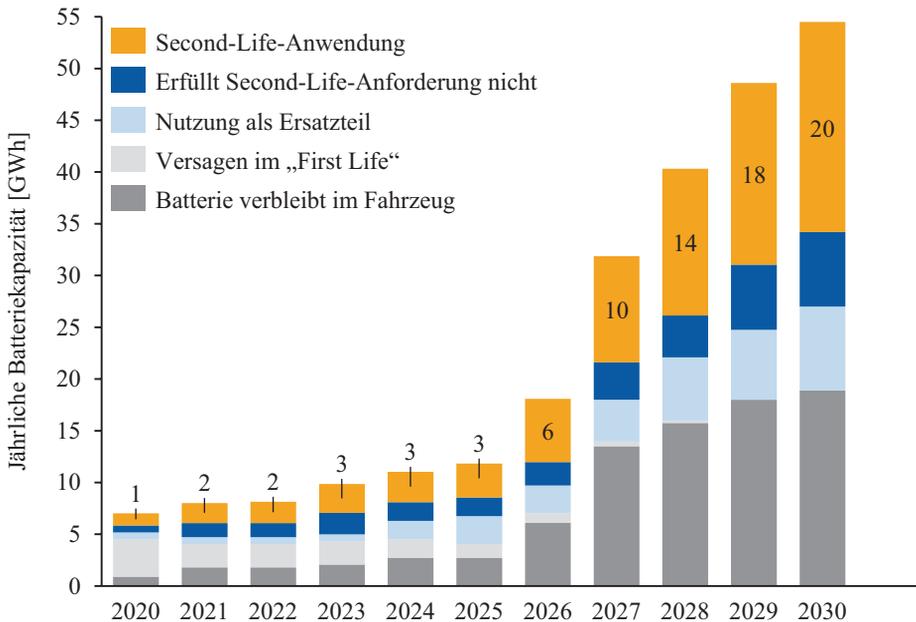


Abb. 39.2 Erwartetes Batterieaufkommen für Second-Life-Anwendungen 2020 bis 2030. (Vgl. Plenter et al. 2019)

Ionen-Stromspeicher in den für eine Zweitnutzung geeigneten stationären Anwendungen, für die bis zum Jahr 2030 ein Markt mit einem globalen Umfang von mehr als 30 Mrd. US\$ zu erwarten ist. Aus diesem prognostizierten Überangebot lässt sich schließen, dass vor allem der Preis ein kritischer Faktor in der Weiterverwendung von Lithium-Ionen-Stromspeichern sein wird. Entsprechende Herausforderungen betreffen allerdings auch die Standardisierung von Batteriezellen und Batteriemodulen sowie regulatorische Aspekte im Markt der Weiterverwendung.⁵

Die erste Herausforderung besteht in der hohen Variabilität der verschiedenen Batteriepackdesigns auf dem aktuellen Markt, die durch unterschiedliche Batteriezellen, deren jeweiligen internen Aufbau und das daraus resultierende individuelle Design des Gesamtpacks charakterisiert sind. Batterien werden von ihren Herstellern und den Automobil-OEMs so entworfen, dass sie die Anforderungen spezifischer Elektrofahrzeuge erfüllen, was die Komplexität der Aufarbeitung aufgrund mangelnder Standardisierung und Fragmentierung des Volumens erhöht. Bis zum Jahr 2025 wird es voraussichtlich bis zu 250 neue EV-Modelle geben, die mit Batterien von mehr als 15 Herstellern ausgestattet sind.⁶

⁵Vgl. Martinez-Laserna et al. 2018.

⁶Vgl. Kampker et al. 2019.

Die zweite Herausforderung basiert auf den sinkenden Kosten für neue Batterien. Durch die immer niedrigeren Preise neuer Akkus verringert sich der Kostenunterschied zwischen gebrauchten und neuen Batterien, da die Kosten für die Wiederaufbereitung voraussichtlich langsamer sinken werden als die Kosten für die Herstellung neuer Batterien, auch wenn die Reduzierung der Herstellkosten über die Jahre immer stärker abnimmt. Es wird geschätzt, dass bei der derzeitigen Entwicklung in Folge des ‚Economy of Scale‘-Effekts der Kostenvorteil von 30 bis 70 %, den Second-Life-Batterien Mitte der 2020er-Jahre aufweisen dürften, bis 2040 auf etwa 25 % fallen könnte. Die Herstellkosten hängen hierbei von verschiedenen Faktoren wie z. B. der Materialverfügbarkeit, der Marktnachfrage, den Produktionstechnologien oder auch den Produktionskapazitäten ab. Manche der Faktoren können sich negativ beeinflussen. Die Kostendifferenz zwischen neuen Akkus und Second-Use-Batterien muss jedoch ausreichend groß bleiben, um die Leistungseinschränkungen von Second-Life-Akkus im Vergleich zu neuen Batterien zu rechtfertigen. Um angesichts der sinkenden Kosten für neue Lithium-Ionen-Batterien wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen Wiederaufbereitungsprozesse industrialisiert, automatisiert und skaliert werden, so dass sich die Gesamtkosten senken lassen und in Zukunft damit Second-Life-Batterien deutlich günstiger als Neubatterien angeboten werden können. Dies ist durchaus möglich, da das Technologiefeld der Second-Life-Batterien noch jung ist und die Potentiale dieser noch nicht vollumfänglich ausgenutzt werden.⁷

Die dritte Herausforderung betrifft das Fehlen von Standards zur Zustandsbestimmung von Second-Life-Batterien. Es existieren keine Garantien für die Qualität oder die Leistung von Second-Use-Akkus, und nur wenige Industriestandards konzentrieren sich auf Prozesse zur Bestimmung des Alterungszustands – etwa mit Hilfe des Batteriemangement-systems. Diese Problematik wird durch den Bedarf von Standardleistungsspezifikationen der Batterien in Second-Life-Anwendungen erschwert.⁸

Die vierte Herausforderung liegt im unausgereiften regulatorischen System zur Weiterverwertung von Batterien nach der Erstnutzung begründet. Zum aktuellen Zeitpunkt existiert in den meisten Märkten eine Form der Regulierung, die das Recycling oder die Wiederaufbereitung von Unterhaltungselektronik im Allgemeinen vorschreibt. Die meisten Märkte verfügen jedoch nicht über batteriespezifische Anforderungen oder Abgrenzungen der Verantwortung zwischen Hersteller und Verbraucher. Ausnahme bilden einige wenige Beispiele, in denen Ziele festgelegt wurden – etwa in Kalifornien und in China. Das weitverbreitete Fehlen einer Regulierung schafft Unsicherheiten für OEMs, Second-Life-Batterieunternehmen und potenzielle Kunden. Die Abwesenheit von Vorschriften führt außerdem zu regionalen Unterschieden in der Frage, ob und mit welchem Anteil sich die Weiterverwertung von Batterien etabliert.⁹

⁷Vgl. Engel et al. 2019.

⁸Vgl. Hollah 2020.

⁹Vgl. Engel et al. 2019.

Neben den genannten und zu überwindenden technischen und regulatorischen Herausforderungen stellt sich die Frage, mit welchen Methoden die Restlebensdauer eines Akkus zu bewerten und der ihm zugeordnete Restwert zu bestimmen ist. Werden Traktionsbatterien bei einer Restkapazität von 80 % für Second-Life-Anwendungen wiederaufbereitet, beträgt ihr maximaler Verkaufswert rund 50 % der Kosten einer Neubatterie. Die vollständige Historie der bisherigen Nutzung jeder Batterie ist dabei ein wichtiger Input für die Berechnung des Restwertes. Die Automobilhersteller zögern jedoch mit der Offenlegung dieser Daten, da sie zumeist als Wettbewerbsvorteil erachtet werden.¹⁰

Die Verfügbarkeit dieser Daten für eigene Nachnutzungskonzepte bietet Automobilherstellern erhebliche Vorteile gegenüber anderen Anbietern bereits verwendeter Batterien. Die Autobauer haben zudem einen ausgezeichneten Zugang zur größten Quelle von Batterien, die sich am Ende des ersten Lebenszyklus befinden. Eine Rückführung der Batterien nach der EV-Nutzung kann beispielsweise durch Inzahlungnahme und Servicevereinbarungen erfolgen. Die entsprechenden Unternehmen können dabei ihre internen Design- und Integrationsfähigkeiten für die Aufgabe der Wiederverwendung von alten Batterien einsetzen. Des Weiteren können historische Daten aus dem Batteriemangementssystem der Fahrzeuge genutzt werden, um die aktuelle und zukünftige Leistung der Batteriezellen zu kennen, die wiederverwendet werden sollen. In Zukunft ist eine Öffnung des Markts durch die Industrie in Form von vertrauenswürdigen Plattformen für den Zustand und die Bewertung von Batterien erstrebenswert, um den Austausch gebrauchter Akkus zu unterstützen und neuen Teilnehmenden den Eintritt in den Markt von Second-Life-Batterien zu erleichtern.¹¹

Der Restwert eines Second-Life-Akkus am Ende der zweiten Nutzung wird maßgeblich von der Entwicklung der Recycling-Kosten beeinflusst. In einigen Ländern tragen Produzenten, die EV-Batterien liefern, derzeit eine „erweiterte Herstellerverantwortung“, um Altbatterien zu recyceln, wiederzuverwenden oder zu entsorgen. Es ist zu erwarten, dass die meisten weiteren Länder in den kommenden Jahren eine „Extended-Producer-Responsibility“ (EPR)-Anforderung einführen. Durch die Verwendung der Batterie in einer Second-Life-Lösung kann ein Automobilhersteller den mit dieser Verantwortung verbundenen Kostenaufwand hinauszögern oder die Verantwortung möglicherweise auf den Käufer übertragen.¹²

39.2 Nutzungskonzepte für Second-Life-Batterien

Zur Steigerung der Nutzungsdauer und Wertschöpfung aus Batterien bietet sich eine Weiternutzung in einer weniger anspruchsvollen Zweitanwendung an, nachdem die Batterie den Anforderungen in der Erstanwendung nicht mehr gerecht wird, da sie beispiels-

¹⁰Vgl. Fischhaber et al. 2016.

¹¹Vgl. Nathan Niese et al. 2020.

¹²Vgl. Nathan Niese et al. 2020.

weise nicht mehr die spezifizierte Mindestkapazität oder Mindestleistung bereitstellen kann. Dafür bietet sich die Wiederverwendung vor allem in stationären Energiespeichern an.¹³

Hinsichtlich der Vermarktung dieser Second-Life-Batterien (SLB) lassen sich verschiedene Marktteilnehmer identifizieren: Privathaushalte könnten Batterien zum Beispiel als Heimspeichersystem (HSS) im Zusammenhang mit Photovoltaik (PV)-Anlagen verwenden. Im industriellen Einsatz ist es außerdem möglich, SLB als Energiespeichersysteme (ESS) bei Laststeuerungsanwendungen oder „Peak Shaving“ zu nutzen.¹⁴ Die größte SLB-Nachfrage existiert jedoch bei Kunden aus dem Energiesektor: Dort können SLB als stationäre Energiespeichersysteme in Wind- und Solarparks eingesetzt werden, um die Auswirkungen der Variabilität der erneuerbare Energie auf das Netz zu mildern. Darüber hinaus wird eine Verwendung von SLB zur Bereitstellung von Primärregelleistung möglich.¹⁵ Second-Life-Bereiche lassen sich zudem in „On-Grid“, „Off-Grid“ und mobile Anwendungen unterteilen. Für die Nutzung von SLB in diesen Anwendungen spricht, dass generell niedrigere Kosten angesetzt werden können und eine geringere Leistungsfähigkeit benötigt wird. Im Jahr 2025 könnten SLB in diesen Anwendungen 30 bis 70 % günstiger sein als neue Batterien und deutlich weniger Kapital pro Zyklus binden.¹⁶ Nachstehend werden verschiedene Zweitnutzungsanwendungen exemplarisch detaillierter beschrieben.

Second-Life-Batterien können im Primärregelleistungsmarkt (PRL) zur Aufrechterhaltung der Frequenzstabilität von Stromnetzen eingesetzt werden. Im Primärregelmarkt sind leistungsstarke SLB mit hohen C-Raten besonders attraktiv. Aufgrund der notwendigen Mindestangebotsgröße von ± 1 MW ist es jedoch notwendig, eine große Anzahl von SLB zu aggregieren, um am Primärregelmarkt teilhaben zu können.¹⁷ Die Leistung muss für einen Mindestzeitraum von 30 min bereitgestellt werden.¹⁸ Während sich die installierte Leistung durch Batteriespeicherkraftwerke in Deutschland im Jahr 2014 noch im 10-MW-Bereich befand, wurden den Daten der Netzbetreiber zufolge am Ende des Jahres 2019 mehr als 380 MW im PRL-Markt durch Batteriespeicher bereitgestellt. Dadurch, dass PRL sowohl in positiver als auch in negativer Richtung verfügbar sein muss, werden Batteriespeicher zu diesem Zweck im SoC-Bereich von 25 bis 75 % betrieben, was sich – kombiniert mit den Teilzyklen und dem geringen tatsächlich abgerufenen Ladungsdurchsatz – positiv auf die Lebensdauer der Batterien auswirkt. Ein Pilotprojekt, das SLB als ESS zur Bereitstellung von PRL testet, ist der Ende 2016 eröffnete Second-Life-Speicher von Vattenfall, BMW und Bosch, der aus 2600 Batteriemodulen von mehr als 100 EVs

¹³Vgl. Engel et al. 2019.

¹⁴Vgl. Hossain et al. 2019.

¹⁵Vgl. Martinez-Laserna et al. 2018.

¹⁶Vgl. Engel et al. 2019.

¹⁷Vgl. Stefan Richter et al. 2016.

¹⁸Vgl. Fischhaber et al. 2016.

besteht. Der stationäre Speicher wurde in Hamburg errichtet, dient zur Energievermarktung am Primärregelenergiemarkt und kann eine Leistung von 2 MW abgeben sowie eine verfügbare Kapazität von 2,8 MWh bereitstellen.¹⁹

Ein weiterer möglicher Einsatz für SLB ist die Nutzung in stationären Energiespeichersystemen in Kombination mit Systemen für erneuerbare Energie – beispielsweise Windkraftanlagen, um überschüssige Energie zu speichern und so den volatilen Charakter erneuerbarer Energie auszugleichen. Hohe Zyklenbelastung sowie hohe Lade- und Entlade-Peaks stellen jedoch erhebliche Anforderungen an die SLB. Vattenfall und BMW haben in einem Pilotprojekt einen Batteriespeicher aus „BMW i3“-Batterien mit einer Leistung von 3,2 MW installiert. Die Installation erfolgte am 122-MW-Onshore-Windpark „Prinzessin Alexia“ in der Nähe von Amsterdam. In einem weiteren Projekt wurden 500 „BMW i3“-Batterien mit Kapazitäten von 33 kWh pro Akku untergebracht, um als stationärer Energiespeicher für einen 228-MW-Windpark zu fungieren. Die Leistung des ESS beträgt dabei 22 MW.²⁰

Wie im Bereich von Windkraftanlagen, lassen sich SLB-Energiespeicher auch mit Solaranlagen in der Industrie koppeln. Dabei kommen drei unterschiedliche Anwendungsszenarien in Betracht: Lastverfolgung, Lastausgleich und „Peak Shaving“ (Lastspitzenkappung). Sie stellen dabei sehr unterschiedliche Anforderungen an die installierte Leistung und Speicherkapazität. Der Markt für PV-Stromspeicher in Deutschland weist einen starken Aufwärtstrend auf. 2013 betrug die Anzahl der installierten Solarstromspeicher noch 5000. Im Vergleich dazu wurden im Jahr 2019 laut dem Bundesverband Solarwirtschaft e.V. rund 180.000 Solarspeicher gezählt. Demnach stellt das Nachnutzungsszenario „Solaranlagen“ in Industrie und Gewerbe einen vielversprechenden Markt für SLB dar.²¹

SLB können auch für die Realisierung einer EV-Ladeinfrastruktur interessant sein. Mit der zunehmenden Marktdurchdringung von EVs ist ein massiver Ausbau der Ladeinfrastruktur zu erwarten.²² Durch den Einsatz von ESS als Zwischenspeicher für die DC-Schnellladestationen lassen sich Potenziale der Lastverschiebung und -reduzierung voll ausschöpfen, Leistungsspitzen puffern und damit die Bezugskosten und Anschlusskosten reduzieren. Im Jahr 2014 betrug die Anzahl der herkömmlichen Ladestationen in Deutschland 4800 und die Anzahl der Schnellladestationen 100. Dem standen rund 24.000 EVs gegenüber.²³ Laut dem Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) sind mit Stand von November 2020 exakt 33.107 Ladestationen erfasst. Rund ein Zehntel davon sind Schnellladestationen. Den Berechnungen des BDEW zufolge werden für eine Million EVs rund 70.000 Ladestationen und 7000 Schnellladestationen benötigt. In Anbetracht des rasanten Zuwachses im EV-Markt bietet das Nachnutzungsszenario

¹⁹ Vgl. Gohla-Neudecker et al. 2015.

²⁰ Vgl. Martinez-Laserna et al. 2018.

²¹ Vgl. Neubauer et al. 2015.

²² Vgl. Stefan Richter et al. 2016.

²³ Vgl. Fischhaber et al. 2016.

„Schnellladestation“ ein vielversprechendes Marktpotenzial. Allerdings müssen diese Stationen hohe Ladeleistungen bereitstellen können. Je nach Dimensionierung des Energiespeichers und Frequentierung der Ladestation wird der Energiespeicher mit hohen C-Raten, tiefen Zyklen und einer hohen Anzahl von Vollzyklen belastet, was sich negativ auf die Lebensdauer der SLB auswirkt.²⁴

Auch in der privaten Nutzung lassen sich Energiespeichersysteme als stationäre Heimspeicher verwenden. Beim Einsatz im Zusammenhang mit einer PV-Anlage ermöglicht dies die Zwischenspeicherung überschüssiger Energie. Das ermöglicht Privatkunden ein optimales und wirtschaftliches Energiemanagement. Der Heimspeichermarkt wächst laut Marktforschenden von „EuPD Research“ rasant an. Die Anzahl der Neuinstallationen von Heimspeichern in Deutschland lag im Jahr 2019 bei rund 78.500 Einheiten, während für das Gesamtjahr 2020 eine Anzahl von 88.000 erwartet wurde.^{25,26}

Second-Life-Batterien als HSS stellen eine besonders praktikable Lösung dar, weil sich der Energiebedarf eines gewöhnlichen Privathaushaltes schon mit wenigen SLB abdecken lässt. Ein durchschnittlicher Vier-Personen-Haushalt in Deutschland verbraucht mit Stand von 2020 etwa 5000 kWh pro Jahr. Fischhaber et al. (2016)²⁷ setzen in ihrer Studie für die Anwendung von SLB in HSS eine übliche Leistung von 1 bis 10 kW sowie eine Kapazität von 1 bis 45 kWh voraus. Die Werte sind stark vom Eigenbedarf der Haushalte abhängig. Des Weiteren gehen die Autoren bei der Anwendung von einem Vollzyklus pro Tag in Wintermonaten und mehreren Teilzyklen täglich in Sommermonaten aus. Insgesamt ergeben sich somit 200 bis 300 Vollzyklen pro Jahr. Neben der hohen Zyklenbelastung stellt die Verwendung von SLB in HSS hohe Sicherheitsanforderungen.²⁸

Ein bekanntes Pilotprojekt zur Untersuchung des Nachnutzungsszenarios „HSS“ ist das „Effizienzhaus Plus“ in Berlin. Dabei handelt es sich um ein Modellgebäude, das im Rahmen eines durch die Bundesregierung geförderten Forschungsprojekts aus dem Bereich der erneuerbaren Energie errichtet wurde. Zu den Zielen des Vorhabens zählt die Gestaltung eines Gebäudes mit autarker Energieversorgung. Mit Hilfe von PV-Anlagen soll das Haus seinen Energiebedarf eigenständig abdecken und die überschüssig generierte Energie für Gebäudetechnik und Elektromobilität nutzen können. Das verwendete HSS verfügt über eine Kapazität von 43,2 kWh. Die dafür verwendeten SLB stammen aus der Testfahrzeug-Flotte „MINI E“. Es kamen 70 Batteriemodule mit einem SoH von 90 % zum Einsatz, wobei ein Modul aus 106 einzelnen Lithium-Ionen-Zellen bestand.²⁹

Auch für die Realisierung von Notstromversorgungskonzepten (NSV) – unterteilt in unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) und Netzersatzanlagen (NEA) – kommt die

²⁴ Vgl. Gohla-Neudecker et al. 2017.

²⁵ Vgl. Casals et al. 2019.

²⁶ Vgl. Fischhaber et al. 2016.

²⁷ Vgl. Fischhaber et al. 2016.

²⁸ Vgl. Hossain et al. 2019.

²⁹ Vgl. Erhorn et al. 2013.

Verwendung von SLB in Betracht. Die NSV findet hauptsächlich im gewerblichen und industriellen Sektor Anwendung, wo ein Stromausfall weitreichende Folgen haben kann. Eine NSV kann in diesem Bereich den Schutz und den kontinuierlichen Betrieb von sensiblen Anlagen und Geräten sicherstellen. USV-Anlagen dienen dabei der kurzzeitigen Überbrückung zwischen Störungen und dem Zuschalten von NEA. Einrichtungen wie Krankenhäuser, Verkehrsbetriebe, Industriebetriebe und Rechenzentren können sich im Notfall somit unabhängig vom öffentlichen Versorgungsnetz mit Energie behelfen. Demzufolge besteht eine zentrale Anforderung an NSV in einem hohen Verlässlichkeitsgrad und einer permanenten Einsatzbereitschaft der SLB im ESS. Das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe empfiehlt eine Auslegung der Notstromversorgung auf mindestens 72 h. Im Jahr 2019 betrug die durchschnittliche Stromunterbrechungsdauer in Deutschland lediglich zwölf Minuten. Aufgrund der hohen Versorgungszuverlässigkeit kommen NEA nur selten zum Einsatz, weswegen bei der Dimensionierung der Second-Life-ESS von einer geringen Zyklenzahl ausgegangen werden darf. Die Dimensionierung der Leistung und Speicherkapazität von USV-Anlagen ist stark von der vorgesehenen Anwendung und den hohen Sicherheitsanforderungen abhängig. Dabei wird eine Leistungsüberdimensionierung von 20 bis 30 % empfohlen, um mögliche Lastspitzen abdecken zu können.³⁰

Außerhalb des stationären Bereichs ist es auch möglich, Batterien bei ihrem „End of Life“ in mobilen Anwendungen einzusetzen. Die Wiederverwendung von Akkus in Automobilanwendungen mit geringeren Leistungsanforderungen ist besonders attraktiv, da die Batterien kaum oder gar nicht wiederaufbereitet werden müssen.³¹ Laut Saxena et al. (2018) sind ausrangierte EV-Batterien mit einem SoH von 80 % weiterhin ausreichend für die täglichen Strecken von mehr als 85 % der Fahrenden aus den USA. Die Verwendung von SLB in Gebrauchtwagen oder in Elektrofahrzeugen, die für kürzere Entfernungen – etwa innerstädtische Wege – ausgelegt sind, könnte die Verwendung kostengünstiger Elektrofahrzeuge ermöglichen, die den täglichen Bedarf einer erheblichen Anzahl von Fahrenden decken würde.³²

Die vorangegangenen Ausführungen zeigen auf, dass signifikante ökonomische und ökologische Potenziale für die Weiterverwendung von Batterien in Second-Life-Anwendungen bestehen. Voraussetzung dafür ist ein weiteres Wachstum des Markts für Elektromobilität und Batteriespeicher zur Steigerung der verfügbaren Energiespeicher am Ende des „First Life“ und zur Steigerung der Verwertungsalternativen in Second-Life-Anwendungen. Eine zusätzliche Erhöhung der ökologischen und ökonomischen Potenziale lässt sich durch die Standardisierungen der Batteriemodule, technische Fortschritte im Wiederaufbereitungsprozess und eindeutige rechtliche Rahmenbedingungen realisieren.³³ Profitierende sind dabei sowohl die Anbieter der First- und Second-Life-Anwendung als auch die Endnutzer der bereitgestellten Produkte und Dienstleistungen.

³⁰ Vgl. Fischhaber et al. 2016.

³¹ Vgl. Stefan Richter et al. 2016.

³² Vgl. Saxena et al. 2018.

³³ Vgl. Fischhaber et al. 2016.

39.3 Ausblick für Second-Life-Batterien

Die zuvor erwähnten Herausforderungen für eine wirtschaftliche und finanziell attraktive Weiterverwendung von Batterien sind zwar beträchtlich, können aber durch gezielte Maßnahmen der Zulieferer, Endverbraucher und Regulierungsbehörden in diesem Sektor überwunden werden, so dass eine nachhaltige Second-Life-Batterie-Industrie entstehen kann. Tatsächlich werden viele dieser gezielten Maßnahmen bereits von vorausschauenden Akteuren und Branchenverbänden ergriffen.³⁴

Um die wachsende Anzahl von EV-Modellen und -Batterien zu bewältigen, können Automobilhersteller ihre EVs mit Blick auf Second-Life-Anwendungen entwickeln. So existieren beispielsweise Partnerschaften, um die Batteriepacks des „Nissan Leaf“ für stationäre, verteilte und großtechnische Speichersysteme wiederzuverwenden. Im September 2018 kündigte ein europäischer Fahrzeughersteller sein „Advanced Battery Storage Program“ an. Diese Zusammenarbeit umfasst mehrere Partner aus dem europäischen Energiesektor und soll bis 2020 zu einer Installation von 70 Megawatt/60 Megawattstunden genutzter EV-Akkus führen – die bis dato größte Installation von Second-Use-Batterien in Europa.³⁵

Was das Fehlen von Standards betrifft, so arbeitet eine Reihe globaler Behörden und privatwirtschaftlicher Koalitionen, bestehend aus OEMs und Second-Life-Batterie-Unternehmen, bereits an branchenweiten Sicherheits- und Performance-Standards für Second-Life-Akkus. Diese Richtmaße würden Batterien vor allem auf der Grundlage ihres Leistungspotenzials sowie Speicheranwendungen auf der Basis ihrer Leistungsanforderungen klassifizieren, um Transparenz bei Produktangebot und Marktnachfrage zu schaffen. In Anbetracht der dynamischen Batterieentwicklung könnte die Einrichtung eines Gremiums, das Akku-Standards regelmäßig überprüft und anpasst sowie Kosten- und Betriebs-Benchmarks erstellt, das Wachstum des Batterieeinsatzes weiter katalysieren.³⁶

Gleichzeitig können die Akteure – insbesondere die Batteriehersteller, die Unternehmen im Markt der Second-Life-Batterien, die Automobilhersteller sowie die Energieversorger – ein Ökosystem zur Weiterverwendung in Eigeninitiative gestalten. Darin lassen sich Richtlinien schaffen, die durch sinnvolle Ansätze dabei helfen, die Entsorgung von Batterien zu vermeiden. Sie können nicht nur den wertmaximierenden Pfad zwischen Recycling und Wiederverwendung identifizieren, sondern auch neue Geschäftsmodelle entwickeln, mit deren Hilfe sich der Restwert von Energiespeichern vollständig nutzen lässt. Durch den Aufbau von Beziehungen zu neuen Endkunden – seien es Energieversorger, gewerbliche oder industrielle Akteure – und durch Einblicke in deren Kapazitätserweiterungspläne können Automobil- und sogar Batteriezellhersteller ihr End-of-Life-Geschäftsmodell intelligent auswählen. Dadurch können sie feststellen, ob es eine

³⁴Vgl. Engel et al. 2019.

³⁵Vgl. Becker et al. 2019.

³⁶Vgl. Rahimzei et al. 2016.

ausreichende Nachfrage von Anwendungen gibt, die für wiederaufbereitete Batterien geeignet sind, oder ob Recycling vorzuziehen ist.³⁷

Auch die Eigentümermodelle von Batterien müssen sich weiterentwickeln. Heute sind Automobilhersteller und Batterieproduzenten damit einverstanden, die Eigentumsrechte an den Akkus an die Fahrzeugbesitzer abzugeben. Mit der Stabilisierung der Second-Life-Märkte wird der Besitz der Batteriesysteme jedoch zunehmend attraktiver, da sie einen relevanten Restwert aufweisen. Dementsprechend ist ein Anstieg des Leasings von Elektroauto-Batterien ein realistisches Szenario, durch das der Automobil- oder der Akku-Hersteller die Batterie wieder zunehmend im eigenen Besitz halten kann.³⁸

Für Automobilhersteller ist die Frage, ob ein Direct-to-Consumer-Geschäft lohnenswert ist oder ob es attraktiver erscheint, keine Aktivitäten in diesem Feld aufzubauen, von entscheidender strategischer Bedeutung. (Ein Autobauer hatte dies einmal mit seinem Heimspeicherangebot versucht, war aus dem Geschäft aber wieder ausgestiegen.) Ein Einstieg in dieses Segment würde beispielweise bedeuten, gebrauchte Batterien an ESS-Ausrüster zu liefern, die die Akkus für zahlreiche Second-Life-Nutzungen wiederverwenden, vermarkten und verkaufen. Es gibt aber auch Automobilhersteller, die bereits angegeben haben, nicht an einer Partnerschaft für Second-Life-Aktivitäten teilzunehmen und sämtliche Batterien am Ende des „First Life“ recyceln zu wollen.³⁹

39.4 Zusammenfassung

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass Batterien nach der Anwendung im Fahrzeug noch nicht ihr Lebensende erreicht haben. Die durchschnittliche verbleibende Kapazität wird mit rund 80 % angegeben. In diesem Bereich gilt der Kapazitätsverlust als zu hoch für eine Weiterverwendung in automobilen Anwendungen. Es existieren jedoch zahlreiche weitere Möglichkeiten, Batterien in Szenarien zu nutzen, die nicht auf eine hohe Energiedichte angewiesen sind. Dazu zählen vor allem stationäre Anwendungen, aber auch mobile mit sehr geringen Anforderungen. Für derartige Anwendungsfälle sind die Akkus noch immer geeignet und über viele Zyklen sicher zu betreiben. Aktuelle Daten zeigen, dass eine Verdopplung der Zyklenzahl bis zu einer Restkapazität von rund 50 % ein realistisches Szenario darstellt. Mögliche Anwendungen sind dabei etwa Speicherlösungen für private Haushalte, Lastspitzenkappung, Notstromversorgung oder Pufferspeicher für Schnellladestationen.

Die Zahlen deuten zwar darauf hin, dass die für eine Weiterverwendung zur Verfügung stehende Menge von Batterien in den nächsten zehn Jahren stetig ansteigen wird, jedoch muss der „Re-Use“ auch für alle beteiligten Stakeholder vom Batterie-

³⁷ Vgl. Martinez-Laserna et al. 2018.

³⁸ Vgl. Dombrowski et al. 2020.

³⁹ Vgl. Nathan Niese et al. 2020.

hersteller über die Fahrzeugproduzenten und -nutzer bis hin zu den Verwertern und Anwendern dieser Akkus entsprechende Vorteile bieten. Nur so kann es zu einer breiten Nutzung von Second-Life-Batterien kommen. Dies kann zum einen durch staatliche Anreize und Regulierungen geschehen, zum anderen durch enge Kooperation, Standardisierung und Kostensenkung durch die seitens der Industrie am Lebenszyklus der Batterie beteiligten Stakeholder.

Literatur

Teil VII: Nachhaltigkeitspotenziale der Elektromobilität

- Becker, J; Beverungen, D; Winter, M; Menne, S.:** *Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019
- Casals, L. C; Amante García, B; Canal, C.:** *Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis*. In: Journal of environmental management, Jg. 232, 2019, S. 354–363
- Desarnaud, G.:** *Second life batteries. A sustainable business opportunity*. <https://www.capgemini.com/2019/04/second-life-batteries-a-sustainable-business-opportunity-not-a-conundrum/>
- Dombrowski, U; Fochler, S; Malorny, C. (Hrsg.):** *After Sales Service. Zukunftsfähig und prozessorientiert gestalten*. 1. Aufl. 2020 Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020
- Engel, H; Hertzke, P; Siccardo, G.:** *Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage*, 30.4.2019
- Erhorn, H; Bergmann, A; Beckert, M; Reiß, J; Hegner, H.-D.:** *Messtechnische und energetische Validierung des BMVBS-Effizienzhaus Plus in Berlin – Messperiode März 2012 bis Februar 2013*. In: Bauphysik, Jg. 35, 2013, Nr. 3, S. 162–171
- Fischhaber, S; Regett, A; Schuster, S; Hesse, H.:** *Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen. Analyse von Nachnutzungsanwendungen, ökonomischen und ökologischen Potenzialen*. Frankfurt a. M., 02/2016
- Gohla-Neudecker, B; Bowler, M; Mohr, S.:** *Battery 2ndlife: Leveraging the sustainability potential of EVs and renewable energy grid integration*: 2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). 2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 16.06.2015–18.06.2015: IEEE 2015 – 2015, S. 311–318
- Gohla-Neudecker, B; Maiyappan, V. S; Juraschek, S; Mohr, S.:** *Battery 2nd life: Presenting a benchmark stationary storage system as enabler for the global energy transition*: 2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). 2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 27.06.2017–29.06.2017: IEEE 2017 – 2017, S. 103–109
- Hollah, A.:** *Planung und Steuerung des Remanufacturing in der Elektromobilproduktion*. Dissertation, 2020
- Hossain, E; Murtaugh, D; Mody, J; Faruque, H. M. R; Haque Sunny, M. S; Mohammad, N. (A Comprehensive Review on Second-Life Batteries: Current State, Manufacturing Considerations, Applications, Impacts, Barriers & Potential Solutions, Business Strategies, and Policies):** *A Comprehensive Review on Second-Life Batteries: Current State, Manufacturing Considerations, Applications, Impacts, Barriers & Potential Solutions, Business Strategies, and Policies*. In: IEEE Access, Jg. 7, 2019, S. 73215–73252
- Kampker, A; Triebs, J; Hollah, A; Lienemann, C.:** *Remanufacturing of electric vehicles: Challenges in production planning and control*. In: Procedia Manufacturing, Jg. 33, 2019, S. 280–287

- Martinez-Laserna, E; Gandiaga, I; Sarasketa-Zabala, E; Badedo, J; Stroe, D.-I; Swierczynski, M; Goikoetxea, A.:** *Battery second life: Hype, hope or reality? A critical review of the state of the art.* In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Jg. 93, 2018, Nr. AprilNr., S. 701–718
- Nathan Niese; Cornelius Pieper; Aakash Arora; and Alex Xie:** *The Case for a Circular Economy in Electric Vehicle Batteries.* 2020
- Neubauer, J; Smith, K; Wood, E; Pesaran, A.:** *Identifying and Overcoming Critical Barriers to Widespread Second Use of PEV Batteries.* 2015
- Plenter, F; Menne, S; Hindersmann, C; Bräuer, S; Voscort, J; Mittmann, R.:** *Szenarien und Geschäftsmodelle für die Vermarktung umgewidmeter Traktionsbatterien.* In: Becker, J; Beverungen, D; Winter, M; Menne, S. (Hrsg.): *Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, S. 179–258
- Rahimzei, E; Regett, A; Fischhaber, S; Schuster, S.:** *Maßnahmenpapier zu Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen. Ergebnisrapport der Begleit- und Wirkungsforschung.* 2016
- Saxena, N; Hussain, I; Singh, B; Vyas, A. L.:** *Implementation of a Grid-Integrated PV-Battery System for Residential and Electrical Vehicle Applications.* In: IEEE Trans. Ind. Electron., Jg. 65, 2018, Nr. 8, S. 6592–6601
- Stefan Richter; Marco Rehme; Aniko Temmler; Uwe Götze:** *Second-Life Battery Applications – Market potentials and contribution to the cost effectiveness of electric vehicles.* Unpublished, 2016

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns,
Janis Vienenkötter und Merlin Frank

In der Literatur existieren unterschiedliche Begriffserklärungen zur Beschreibung der Wieder- und Weiterverwendungsstrategien für Traktionsbatterien. Die Definitionen des „Refurbishment“ und des „Remanufacturing“ werden teilweise synonym verwendet. Des Weiteren variieren die Prozessgrenzen in der Literatur, so dass die einzelnen Aufbereitungsstrategien mehrere oder wenige Prozessschritte umfassen können. Die Festlegung

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

C. Offermanns (✉)

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: c.offermanns@pem.rwth-aachen.de

J. Vienenkötter

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: j.vienenkoetter@pem.rwth-aachen.de

M. Frank

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: m.frank@pem.rwth-aachen.de

des Begriffs „Refurbishment“ wird zusätzlich durch das Problem fehlender weltweit akzeptierter rechtlicher Definitionen erschwert.¹

Um die Begriffe der Reparatur, des Refurbishments und des Remanufacturings einheitlich zu gestalten, wird an dieser Stelle anhand der Produktqualität am Ende des jeweiligen Prozesses differenziert. Während das Remanufacturing einen Prozess beschreibt, der die Qualität eines Neuprodukts erreicht, ist das Refurbishment weniger aufwendig. Zwar wird beim Refurbishment die Qualität der Traktionsbatterie aufge bessert, jedoch kann es die Qualitätsstandards einer neu produzierten Batterie nicht erfüllen. Daher ist der Prozessaufwand des Refurbishments zwischen demjenigen einer Reparatur und dem des Remanufacturings einzuordnen.² Eine Unterscheidung der einzelnen Begriffe ist in Tab. 40.1 zusammengefasst.

Je nach individuellem Defekt können Werkstätten unzureichend ausgerüstet sein, um Aufbereitungsmaßnahmen umzusetzen, die über gängige Dienstleistungen hinausgehen. In diesem Fall wird lediglich eine Reparatur vor Ort vorgenommen. Batterie systeme, deren Fehlerursachen nicht durch eine Reparatur behoben werden können, müssen in besser ausgestattete Batterie-Refurbishment-Center überführt werden. In diesen Arbeitsstätten betreiben Fachleute Ursachenforschung, um die defekte Batterie instand zu setzen. Dabei können eine aufwendige Zerlegung des Batteriesystems und der Austausch defekter Komponenten erfolgen. In Abhängigkeit von der Qualität des aufbereiteten Batterie zustands wird das Batteriesystem im Fahrzeug weiterverwendet oder in eine Second-Life-Anwendung überführt.³ Zur Unterscheidung der Aufbereitungsstrategien sind in Tab. 40.2 beispielhafte Batteriefehler erläutert.

Tab. 40.1 Vgl. Kwade et al. (Ressourcenschonende Batteriekreisläufe – mit Circular Economy die Elektromobilität antreiben) 2020, S. 71 ff.

Prozess	Beschreibung	Prozessergebnis	Aufwand
Repair (Reparatur)	Einfache Reparatur ohne komplexe Fehlersuche und aufwendige Zerlegung	Wiederherstellung eines Betriebszustands wie vor dem Defekt	Gering
Refurbishment (Aufbereitung/ Instandsetzung)	Komplexe Instandsetzung mit aufwendiger Fehlersuche und Zerlegung	Herstellung eines an neue Fahrzeuganwendungen angepassten Betriebszustands	Mittel
Remanufacturing (Refabrikation/ Wiederinstandsetzung)	Aufwendige Ertüchtigung in einen Zustand „wie neu“ inklusive der Aufbereitung von Systemkomponenten	Das Produkt erhält Neuproduktstatus mit Garantieverprechen	Hoch

¹ Vgl. Hartwell und Marco 2016.

² Vgl. Becker et al. 2019, S. 26.

³ Vgl. Andreas Liebschner 2021.

Tab. 40.2 Beispiele zum Prozess der Fehlerbehebung unterschiedlicher Aufbereitungsstrategien

	Repair	Refurbishment	Remanufacturing
Fehlermeldung	Temporärer Ausfall der Kommunikation zum Batteriesystem	Warnung vor geringem Isolationswiderstand durch Isowächter	Zu geringe Kapazität
Fehlersuche	Überprüfung der Steckverbindungen	Öffnen des Batteriesystems sowie optische und elektrische Inspektion	Öffnen des Batteriesystems und-moduls
Fehlerbehebung	Steckertausch	Finden und Entfernen eines Partikels	Austausch defekter Module

Aus der Sicht des Batterie-Lebenszyklus gehört das Refurbishment zu einer der wichtigsten Optionen der Restwertausnutzung von Altbatterien.⁴ Das Potenzial besteht in der Erweiterung der nutzbaren Batterie-Lebensdauer durch Wiederverwendung in EVs oder durch Weiterverwendung im „Second Life“, was erst durch den Refurbishment-Prozess ermöglicht wird. Deshalb wirkt sich das Batterie-Refurbishment gleichermaßen positiv auf den Elektrofahrzeugmarkt und auf den Energiesektor aus. EVs profitieren hierbei von einer verbesserten Gesamtökobilanz aufgrund eines reduzierten ökologischen Fußabdrucks des Batteriesystems.⁵ Darüber hinaus ist das Refurbishment im Vergleich zum Remanufacturing aufwandsärmer, weil das Produkt zu seiner ursprünglichen Funktion ertüchtigt und keine neuartige Produktqualität fokussiert wird. Die Verwendung aufwandsarmer Aufbereitungsprozesse ist entscheidend, da sie die Wirtschaftlichkeit potenzieller Weiterverwendungsszenarien über den Preis einer aufbereiteten Batterie weitgehend mitbestimmen. Die Kosten für das Refurbishment von Traktionsbatterien für den Zweitgebrauch lagen im Jahr 2020 zwischen 25 und 49 US\$/kWh.⁶ Abhängig vom Zustand der Batterie sowie vom prognostizierten Anwendungsgebiet, variiert der Umfang des Aufbereitungsprozesses, worin ein Grund für die breite Preisspanne liegt.⁷

Literatur

Teil VII: Nachhaltigkeitspotenziale der Elektromobilität

Andreas Liebschner: *Opel eröffnet Battery Refurbishment Center in Rüsselsheim.* <https://www.opelpost.com/05/2021/opel-service-fur-batterien/>. Abruf 26.01.2022

Becker, J; Beverungen, D; Winter, M; Menne, S.: *Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019

⁴Vgl. Cong et al. 2021.

⁵Vgl. Richa et al. 2017.

⁶Vgl. Fan et al. 2020.

⁷Vgl. Olsson et al. 2018; Vgl. Zhao et al. 2021.

- Cong, L; Liu, W; Kong, S; Li, H; Deng, Y; Ma, H.:***End-of-Use Management of Spent Lithium-Ion Batteries From Sustainability Perspective: A Review.* In: Journal of Manufacturing Science and Engineering, Jg. 143, 2021, Nr. 10
- Dolganova, I; Rödl, A; Bach, V; Kaltschmitt, M; Finkbeiner, M.:***A Review of Life Cycle Assessment Studies of Electric Vehicles with a Focus on Resource Use.* In: Resources, Jg. 9, 2020, Nr. 3, S. 32
- Fan, E; Li, L; Wang, Z; Lin, J; Huang, Y; Yao, Y; Chen, R; Wu, F.:***Sustainable Recycling Technology for Li-Ion Batteries and Beyond: Challenges and Future Prospects.* In: Chemical reviews, Jg. 120, 2020, Nr. 14, S. 7020–7063
- Hartwell, I; Marco, J.:***Management of intellectual property uncertainty in a remanufacturing strategy for automotive energy storage systems.* In: Jnl Remanufactur, Jg. 6, 2016, Nr. 1
- Kwade, A; Hagelüken, C; Kohl, H; Buchert, M; Herrmann, C; Vahle, T; Wittken, R. von; Carrara, M; Daelemans, S; Ehrenberg, H; Fluchs, S; Goldmann, D; Henneboel, G; Hobohm, J; Krausa, M; Lettgen, J; Meyer, K; Michel, M; Rakowski, M; Reuter, M; Sauer, D. U; Schnell, M; Schulz-Möninghoff, M; Spurk, P; Weber, W; Zefferer, H; Blömeke, S; Bussar, C; Cerdas, F; Gottschalk, L; Hahn, A; Reker-Gluhic, E; Kobus, J; Muschard, B; Schliephack, W.-C; Sigel, F; Stöcker, P; Teuber, M; Kadner, S.:***Ressourcenschonende Batteriekreisläufe – mit Circular Economy die Elektromobilität antreiben.* acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2020
- Olsson, L; Fallahi, S; Schnurr, M; Diener, D; van Loon, P.:***Circular Business Models for Extended EV Battery Life.* In: Batteries, Jg. 4, 2018, Nr. 4, S. 57
- Richa, K; Babbitt, C. W; Nenadic, N. G; Gaustad, G.:***Environmental trade-offs across cascading lithium-ion battery life cycles.* In: Int J Life Cycle Assess, Jg. 22, 2017, Nr. 1, S. 66–81
- van Loon, P; Olsson, L; Klintbom, P.:***LCA Guidelines for electric vehicles.* 2018
- Zhao, Y; Pohl, O; Bhatt, A. I; Collis, G. E; Mahon, P. J; Rütther, T; Hollenkamp, A. F.:***A Review on Battery Market Trends, Second-Life Reuse, and Recycling.* In: Sustainable Chemistry, Jg. 2, 2021, Nr. 1, S. 167–205

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Demontage von Lithium-Ionen-Batterien

41

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns,
Domenic Klohs und Kim Kreisköther

Die weltweiten Verkaufszahlen für elektrische Fahrzeuge in sämtlichen Segmenten steigen immer weiter an. Während sich die Corona-Pandemie im globalen Vergleich negativ auf die Fahrzeugmärkte ausgewirkt hat, stieg der Absatz von Elektrofahrzeugen vor allem in Europa stark.¹ Auch die für die laufende Dekade prognostizierten Verkaufszahlen von Elektrofahrzeugen spiegeln dieses Bild wider. So werden bereits 2025 jährlich Batterien für rund

¹ Vgl. Bernhart et al. 2021.

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

C. Offermanns (✉)

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: c.offermanns@pem.rwth-aachen.de

D. Klohs

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: d.klohs@pem.rwth-aachen.de

K. Kreisköther

Specialist Battery Cell/System –Adhesives Automotive Components, Henkel, Düsseldorf, Deutschland

E-Mail: kim.kreiskoether@henkel.com

elf Millionen E-Mobile benötigt. Dieser Wert wird sich bis zum Jahr 2030 auf etwa 30 Millionen jährliche Verkäufe fast verdreifachen.² Daraus ergeben sich für Batteriesysteme unweigerlich einige Fragestellungen mit Blick auf das „End of Life“ und eine damit verbundene nachhaltige Verwertung der verbauten Komponenten und Materialien. Um den ökonomischen Kreislauf zu schließen und Batteriesysteme abhängig von ihrem Zustand in die verschiedenen Re-X-Szenarien (Re-Use, Remanufacturing, Refurbishment und Recycling) überführen zu können, gewinnt die Demontage eine immer größere Bedeutung.³

Bei der Demontage handelt es sich um die systematische Auftrennung eines Produkts in seine untergeordneten Einzelkomponenten. Damit unterscheidet sich die Demontage von der mechanischen Zerkleinerung durch das Schreddern dahingehend, dass sie weniger destruktiv ist und einzelne Unterkomponenten in ihrer Form und Funktion erhalten bleiben.⁴ Aus diesem Grund erfolgt die Demontage für Batteriesysteme und -packs als vorgelegter Prozessschritt vor der mechanischen Zerkleinerung von Batteriemodulen oder Batteriezellen. Der grundlegende Prozessablauf ist in Abb. 41.1 dargestellt.

Das Ziel der Demontage besteht darin, die Recycling-Quoten der einzelnen Materialbestandteile eines Batteriesystems zu steigern und so die Nachhaltigkeit der Technologie zu fördern, aber auch die wirtschaftlich interessante Rückgewinnung wertvoller Rohstoffe voranzutreiben. Dabei wird zwischen den beiden Ebenen der Pack-zu-Modul-Demontage und der Modul-zu-Zelle-Demontage unterschieden.⁵

Die Demontage von Modulen gestaltet sich in der Realität als äußerst schwierig, da die aktuellen Aufbauformen und Designs in der Regel nicht für eine zerstörungsfreie Zerlegung geschaffen sind. Dieser Umstand gilt in Teilen bereits für die Demontage auf Packebene. Eine weitere Herausforderung der manuellen Demontage stellt das enorme Gefahrenpotenzial durch das Batteriepack als Hochvoltsystem dar. Kurzschlüsse während der Demontage können außerdem zu Bränden führen, und während der Zerlegung kann giftiger Elektrolyt austreten.⁶

Aktuelle Forschungs- und Entwicklungsansätze befassen sich zur Weiterentwicklung und Verbesserung der manuellen Demontage mit den zwei Kernbereichen der Produkt- und Prozessoptimierung. Im Bereich der Produktoptimierung sollen zukünftige Batteriepackdesigns für eine spätere Demontage ausgelegt und weiter standardisiert werden.⁷ Die besondere Herausforderung in der Optimierung des Produkts liegt darin, dass trotz einer Vielzahl ähnlicher Bauteile – unter anderem BMS, Kühlsystem und Modulverbinder –, die in nahezu jedem Batteriepack zu finden sind, eine deutliche Varianz in der strukturellen Auslegung dieser Bauteile vorliegt. Darüber hinaus stellen nicht oder nur schwierig lösbare Fügeverbindungen wie etwa die Klebeverbindungen der auf die Module aufgetragenen Wärmeleitpasten mit dem Trog des Batteriepackgehäuses eine Schwierigkeit dar.

²Vgl. Alfaro-Algaba und Ramirez 2020.

³Vgl. Gerlitz et al. 2021.

⁴Vgl. Gerlitz et al. 2021.

⁵Vgl. Zhou et al. 2021.

⁶Vgl. Gerlitz et al. 2021.

⁷Vgl. Choux et al. 2021.

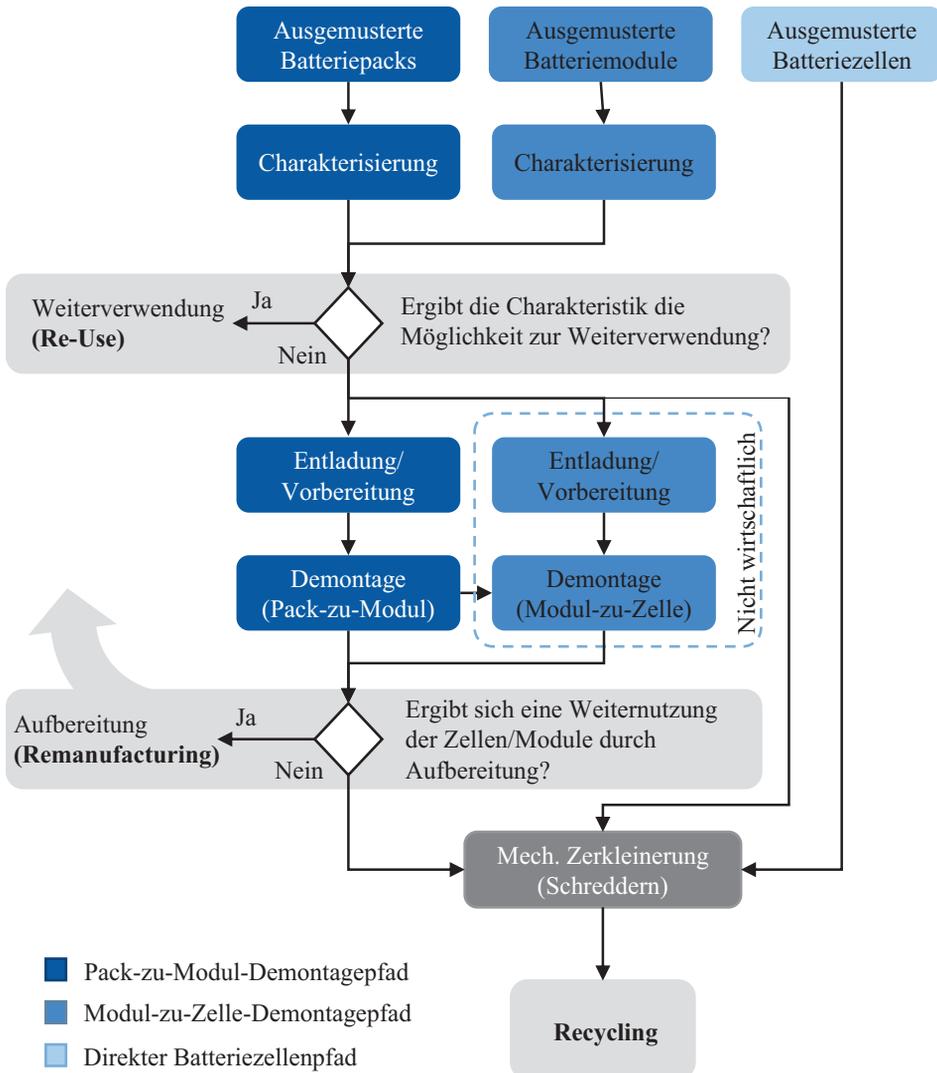


Abb. 41.1 Einordnung des Demontageprozesses in die Prozessführung beim „End of Life“

Prozessseitig liegt der Fokus vor allem auf der Automatisierung der Zerlegeschritte durch den Einsatz von industriellen Robotern, um die große Anzahl bevorstehender Batterierückläufer wirtschaftlich und effizient verarbeiten zu können.⁸ Eine intelligente Prozessführung soll in Zukunft durch den Einsatz von Bilderkennung und Datenverarbeitung gewährleistet werden. Spezielle „Machine-Learning“-Algorithmen können dann mit diesen Daten trainiert werden, die Identifizierung einzelner Komponenten vornehmen und die Positionen einzelner Komponenten an das automatisierte Robotersystem weitergeben.

⁸Vgl. Blankemeyer et al. 2021.

Forschungsprojekte wie das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Vorhaben „DemoSens“ platzieren sich genau an dieser Stelle, um die theoretischen Ansätze in einem ganzheitlichen Prototypen zu vereinen. Die übergeordnete Zielsetzung stellt dabei eine Steigerung der Recycling-Quote durch eine in das digitale und automatisierte Demontagekonzept integrierte Fraktionierung der Subkomponenten des Batteriepacks dar.

Ein Hauptaugenmerk liegt in diesem Zusammenhang außerdem auf der Optimierung der Demontageabfolge (Disassembly Sequence Planning – DSP) der einzelnen Teilkomponenten des Batteriepacks.⁹ Je nach abzubildendem Prozessschritt, individuellem Aufbau des Packs oder dem benötigten Werkzeug sollen in Zukunft somit dynamische Demontageabfolgen realisierbar sein.

Literatur

Teil VII: Nachhaltigkeitspotenziale der Elektromobilität

- Alfaro-Algaba, M; Ramirez, F. J.:** *Techno-economic and environmental disassembly planning of lithium-ion electric vehicle battery packs for remanufacturing.* In: Resources, Conservation and Recycling, Jg. 154, 2020, S. 104461
- Bernhart, W; Riederle, S; Hotz, T; Olschewski, I; Busse, A.:** *E-Mobility Index 2021.* München, 2021
- Blankemeyer, S; Wiens, D; Wiese, T; Raatz, A; Kara, S.:** *Investigation of the potential for an automated disassembly process of BEV batteries.* In: Procedia CIRP, Jg. 98, 2021, Nr. 7781, S. 559–564
- Choux, M; Marti Bigorra, E; Tyapin, I.:** *Task Planner for Robotic Disassembly of Electric Vehicle Battery Pack.* In: Metals, Jg. 11, 2021, Nr. 3, S. 387
- Gerlitz, E; Greifenstein, M; Hofmann, J; Fleischer, J.:** *Analysis of the Variety of Lithium-Ion Battery Modules and the Challenges for an Agile Automated Disassembly System.* In: Procedia CIRP, Jg. 96, 2021, S. 175–180
- Ke, Q; Zhang, P; Zhang, L; Song, S.:** *Electric Vehicle Battery Disassembly Sequence Planning Based on Frame-Subgroup Structure Combined with Genetic Algorithm.* In: Front. Mech. Eng., Jg. 6, 2020, S. 104461
- Zhou, L; Garg, A; Zheng, J; Gao, L; Oh, K.-Y.:** *Battery pack recycling challenges for the year 2030: Recommended solutions based on intelligent robotics for safe and efficient disassembly, residual energy detection, and secondary utilization.* In: Energy Storage, Jg. 3, 2021, Nr. 3, S. 245

⁹Vgl. Ke et al. 2020.

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Remanufacturing von Lithium-Ionen-Batterien

42

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns,
Domenic Klohs, Nikolaus Lackner und Kim Kreisköther

Das Remanufacturing von Batterien bezeichnet die aufwendige Zerlegung von Batterien und Bestandsaufnahme des Zustands der einzelnen Komponenten. Hauptsächlich wird darunter die Analyse des „State of Health“ (SoH) der Batteriezellen beziehungsweise der Batteriemodule verstanden, jedoch auch diejenige weiterer Batteriekomponenten. Der Demontage und Ana-

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de;

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

C. Offermanns (✉)

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: c.offermanns@pem.rwth-aachen.de

D. Klohs

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: d.klohs@pem.rwth-aachen.de

N. Lackner

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: n.lackner@pem.rwth-aachen.de

K. Kreisköther

Henkel, Adhesives Automotive Components, Düsseldorf, Deutschland

E-Mail: kim.kreiskoether@henkel.com

© Der/die Autor(en) 2024

A. Kampker, H. H. Heimes (Hrsg.), *Elektromobilität*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-65812-3_42

679

lyse schließen sich Austausch, Aufbereitung und Weiternutzung der jeweiligen Bestandteile in einem neu zusammengesetzten System an. Durch die weitgehende Zerlegung und Analyse bis auf die Modulebene sowie durch den konsequenten Austausch und/oder die Aufbereitung von Komponenten, die sich in schlechtem Zustand befinden, erreicht das Batteriesystem nach dem Manufacturing nahezu die Qualität eines neuen Systems. Der Lebenszyklus der weiterverwendeten Komponenten lässt sich auf diese Weise erheblich verlängern und es können bis zu 70 % der Rohstoffe gegenüber einem neuen Produkt eingespart werden.¹

Das Remanufacturing kann dadurch einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Nachhaltigkeit von Batterien leisten. Durch die längere Nutzung der gebundenen Rohstoffe trägt dies bereits zu zweien der in Abb. 42.1 dargestellten Potenziale des Remanufacturings bei: dem Entgegenwirken der *Ressourcenknappheit* und des *Klimawandels* durch geringe Emissionen.

Aus Sicht der Automobilhersteller können wiederinstandgesetzte Traktionsbatterien zudem die Verfügbarkeit von *Ersatzteilen* selbst bei älteren Fahrzeugen sicherstellen und im gleichen Zuge auch die gesetzlich vorgeschriebene Rücknahmepflicht wirtschaftlicher und attraktiver gestalten.² Dies trägt zum Potenzial der *Kosteneinsparung* bei. Auch Verbraucher profitieren davon, indem Ersatzbatterien günstiger verfügbar sind.

Die ausführliche Analyse bei der Demontage der Batterien bietet wiederum die Möglichkeit, Daten und somit detaillierte *Nutzungsinformationen* aus dem Betrieb der Akkus zu sammeln und die Batterien in Qualität und Anpassung weiter auf die Kundenbedürfnisse zu optimieren. Der daraus entstehende Vorteil bietet Autobauern das Potenzial, ihr *Geschäftsfeld* in diesem Bereich zu erweitern.

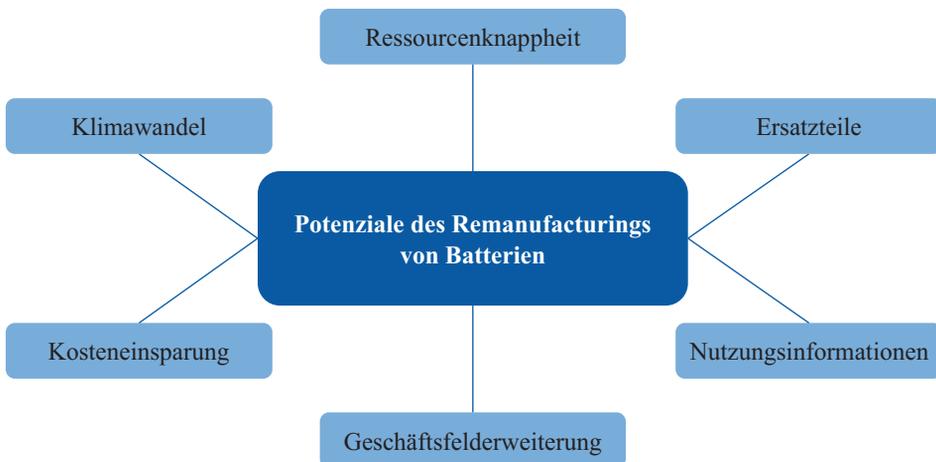


Abb. 42.1 Potenziale des Remanufacturings von Batterien

¹Vgl. Pehlken et al. 2019.

²Vgl. Becker et al. 2019.

42.1 Konzeptansätze zum Remanufacturing von Lithium-Ionen-Batterien

Das Remanufacturing stellt in zahlreichen Wirtschaftszweigen und für eine große Bandbreite von Industrie- und Konsumgütern ein rentables Geschäftsmodell dar. Neben der reinen Wertsteigerung durch die Aufbereitung bestimmter Kernelemente und die in der Regel damit einhergehende Rückführung des Produkts auf seinen ursprünglichen Leistungszustand stehen oftmals auch Kosten- und Nachhaltigkeitsaspekte im Fokus des Remanufacturings. Die steigende Bedeutung für produzierende Unternehmen wird dabei besonders durch den Umstand unterstrichen, dass das Remanufacturing bereits 2 % des gesamten europäischen Fertigungssektors umfasst, was Umsätzen von etwa 30 Mrd. € entspricht. Deutschland trägt daran einen Anteil von 8,73 Mrd. €.³

Auf die Traktionsbatterie bezogen, ergeben sich theoretische Restwerte von 70 bis 75 % des Neupreises für ein Batteriesystem mit einem „State of Health“ (SoH) von 80 %. Verantwortlich dafür sind außer Bauteilen wie dem Gehäuse, der Kühlung oder dem Batteriemanagementsystem vor allem die verbauten Zellen. Dementsprechend fokussieren sich die vorhandenen Remanufacturing-Konzepte besonders auf diese Bauteile.⁴

Mit der steigenden Anzahl elektrisch angetriebener Fahrzeuge birgt das Remanufacturing vor allem im Bereich des After-Sales-Marktes wachsende Potenziale. Unter Berücksichtigung der sich schnell weiterentwickelnden Batterietechnologien entsteht dort eine große Herausforderung in der Ersatzteilbeschaffung einzelner Fahrzeug- und damit auch Batteriegenerationen. Es ist durchaus üblich, dass Zellen und Batteriekonzepte sich bereits während eines Fahrzeugmodelljahres produktionsseitig verändern. Daraus ergeben sich Ersatzteilengpässe und eine größer werdende Lücke zwischen der Serienproduktion und der Nachserienversorgung. An dieser Stelle könnten Remanufacturing-Konzepte ansetzen und der engpassbedingten Kostensteigerung einzelner Batterieersatzteile entgegenwirken.⁵

Da der Prozess des Remanufacturings grundsätzlich die Schritte Eingangsprüfung, (Teil-)Demontage des Produkts, Komponentenprüfung, Aufbereitung des Bauteils beziehungsweise Ersatz durch ein neues Bauteil sowie eine abschließende Montage umfasst, spielt die Produktgestaltung eine entscheidende Rolle bei der Konzeptionierung neuer Remanufacturing-Ansätze.⁶ Eine Anpassung des Batteriepackdesigns hin zu einer Reduzierung von Klebe- und Schweißverbindungen sowie eine gute Zugänglichkeit relevanter Komponenten begünstigt die Demontage sowie die Montage und somit den gesamten Remanufacturing-Prozess. Zusammen mit einem modularen Zell- und Modulkonzept lassen sich von der Alterung stärker betroffene Zellen und Batteriemodule auf diese Weise

³Vgl. Dombrowski et al. 2020.

⁴Vgl. Kampker et al. 2019a.

⁵Vgl. Kampker et al. 2019b.

⁶Vgl. Dombrowski et al. 2020b.

einfacher austauschen. Auch nachträgliche Upgrades ganzer Batteriepacks für eine gesteigerte Kapazität und Leistungsfähigkeit durch neue Batteriezelltechnologien könnten so durch den Einbezug der Produktgestaltung zu neuen Remanufacturing-Konzepten beitragen.⁷

42.2 Herausforderungen des Remanufacturings in der Batterie

Für ein erfolgreiches Remanufacturing müssen verschiedene technische Fragestellungen gelöst werden. Diese lassen sich wiederum – wie in Abb. 42.2 dargestellt – in markt-, produkt- sowie prozesseitige Herausforderungen unterteilen.

Bestehende Forschungsarbeiten definieren *produktseitige* Voraussetzungen, die dieses Vorgehen ermöglichen. Dazu gehören die Fertigbarkeit eines Produkts in einer Serienumgebung, der Aufbau des Produkts aus austauschbaren Komponenten oder das Ausbleiben disruptiver Technologiewechsel. Daneben gilt es, *prozesseitig* Herausforderungen in der Produktionsplanung und -steuerung zu adressieren, die im Rahmen des Remanufacturings im Vergleich zu einer linearen Wertschöpfungskette auftreten.⁸

Der *Prozess* des Remanufacturings erfordert ähnlich hohe Sicherheitsmaßnahmen wie die Batterieproduktion selbst. Neben den Kosten für Sicherheit und teuren Anlagen sind auch die Kosten für qualifiziertes Personal zu berücksichtigen. Die Komplexität im Prozess ist stark vom Zerlegungsgrad und vom Zustand der Komponenten abhängig. Mit Hilfe geeigneter Technologien lassen sich Effizienz und Automatisierungsgrad steigern

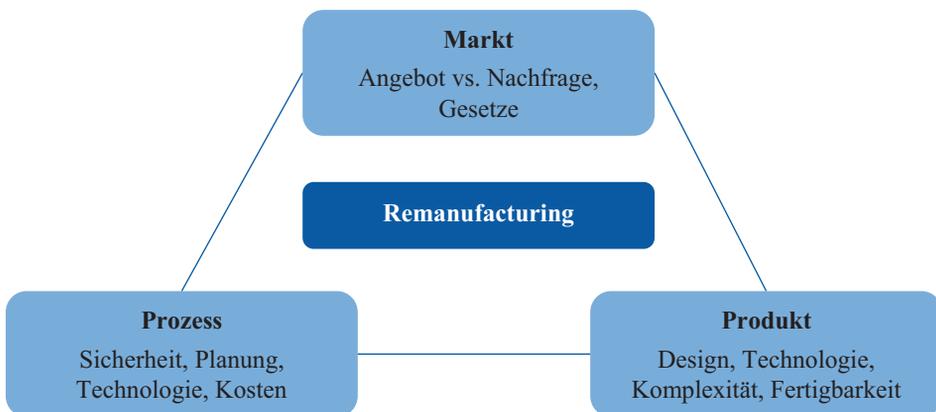


Abb. 42.2 Herausforderungen beim Remanufacturing im Spannungsfeld von Markt, Prozess und Produkt

⁷Vgl. Hollah 2020.

⁸Vgl. Kampker et al. 2019b.

und die Prozesskosten senken.⁹ Vor allem die Automatisierung der Demontage bedeutet prozessseitig eine hohe Hürde, da Batteriesysteme äußerst unterschiedliche Designs aufweisen, was eine einfache Automatisierung erschwert.

Aus diesem Grund muss vor allem das *Produkt* eine einfache Demontage ermöglichen. Dafür sollten die entsprechenden Teile und Komponenten durch lösbare Verbindungen mit dem Gesamtsystem verbunden sein. Diese Verbindungen müssen bereits im Konstruktionsprozess berücksichtigt und ohne Zerstörung der jeweiligen Komponenten gelöst werden können. Insbesondere bei Traktionsbatterien sind dafür noch einige weitere Herausforderungen zu bewältigen, da sie derzeit nicht speziell auf eine Demontage ausgelegt werden. Beispielsweise sind die Packgehäuse nicht für Demontageschritte geeignet oder die Zellkontaktierung im Modul erfolgt durch nicht lösbare Verbindungen. In Anbetracht des Preisverfalls von Lithium-Ionen-Batteriezellen ist eine wirtschaftliche Demontage der Komponenten entscheidend, um die wiederaufbereiteten Komponenten nicht teurer zu gestalten als neue. Dadurch ergibt sich die zusätzliche Herausforderung, den Demontevorgang der Batterien weitestgehend zu automatisieren. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Designs auf Pack-, Modul und Zellebene wird eine automatische Demontage ein hohes Hindernis darstellen.¹⁰

Voraussetzung für die *produktseitige* Ermöglichung des Remanufacturings ist folglich ein modularer Aufbau der Batteriepacks mit standardisierten Schnittstellen, die für die Integration technologischer Weiterentwicklungen ausgelegt sind. Auch die Anbindung ans Fahrzeug muss modular und mit einheitlichen Schnittstellen gestaltet werden, um einen nachträglichen Austausch bei neuen Batterietechnologien zu ermöglichen. Um darüber hinaus schon in der Produktion das Potenzial des Remanufacturings auszuschöpfen, kann bereits bei der Auslegung der Batterie die Nutzungsdauer berücksichtigt werden. So werden die jeweiligen Komponenten entsprechend auf eine definierte Lebensdauer ausgelegt, die über die normale Nutzungsdauer des Produkts erheblich hinausgeht, um dadurch zu gewährleisten, dass zum einen das benötigte Qualitätsniveau erhalten und zum anderen der Aufbereitungsaufwand gering bleibt. Dabei ist das Spannungsfeld zwischen den Anforderungen an eine remanufacturinggerechte Auslegung der Bauteile und den sonstigen Anforderungen im Entwicklungsprozess wie Kosten und Gewicht eine große Herausforderung.

Darüber hinaus muss im *Markt* eine eindeutige Rückverfolgbarkeit der Batteriebestandteile gewährleistet werden. Schließlich ergibt sich eine weitere Herausforderung in den variierenden Zuständen der rückfließenden Produkte, so dass angepasste Aufbereitungs- und Montageprozesse erforderlich werden.¹¹ Zur Problematik der Rückverfolgbarkeit und des Zustands kommt die zuverlässige Versorgung mit gebrauchten Batterien. Durch

⁹Vgl. Becker et al. 2019.

¹⁰Vgl. Kampker et al. 2019a.

¹¹Vgl. Junior und Filho 2012.

kundenindividuelles Rückgabeverhalten muss mit einer hohen Angebotsfluktuation alter Batterien gerechnet werden.¹² Das gilt in gleichem Maße für den Bedarf an aufbereiteten Batterien. Gelingt es nicht, diesen Rückfluss mit der Nachfrage abzugleichen, kann es zu hohen Lagerbeständen kommen. Dies führt zu der Notwendigkeit eines ausgereiften Reverse-Logistik-Netzwerks, um eine etwaige Kollektionslücke zu schließen und gleichzeitig die Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten.

42.3 Ökonomischer und ökologischer Nutzen des Remanufacturings

Die Anschaffungskosten für Elektrofahrzeuge sind im Vergleich zu denjenigen konventioneller Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor hoch, wobei die Batterie einer der größten Kostentreiber ist. Dabei werden die höheren Anschaffungskosten im Hinblick auf den Lebenszyklus eines Fahrzeugs auch nicht durch die geringeren Betriebskosten kompensiert. Eine längere Nutzungsdauer des Fahrzeugs von etwa 16 Jahren stellt einen möglichen Lösungsansatz für dieses Problem dar, dem unter anderem jedoch die begrenzte Lebensdauer der Lithium-Ionen-Batterie gegenübersteht.¹³ Um die Lebensdauer einer Traktionsbatterie weiter zu erhöhen, kann die Batterie wie bei einer Software einem kontinuierlichen Update unterzogen werden, statt sie während ihres gesamten Lebenszyklus unverändert zu lassen. Da eine Traktionsbatterie aber größtenteils aus „Hardware“ besteht, wird in diesem Zusammenhang von einem „Remanufacturing“ der Lithium-Ionen-Batterie gesprochen.

Neben der Verlängerung der Lebensdauer von Traktionsbatterien können auch wiederaufbereitete Komponenten am Ende der Nutzungsphase in neue Produkte überführt werden. Dadurch sind Kostensenkungspotenziale durch den Aufkauf der gebrauchten Batterie, aber auch durch die vergünstigten Zukaufteile in der Fertigung von Traktionsbatterien denkbar. Das Remanufacturing kann demzufolge aus ökonomischer Perspektive die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen und damit deren Verbreitung erhöhen. Aber auch aus ökologischer Sicht ist das Remanufacturing besonders erstrebenswert: Durch eine verlängerte Nutzungsphase lassen sich Abfälle reduzieren und durch die Wiederverwendung von Komponenten Ressourcen schonen. Außerdem bildet das Remanufacturing einen Baustein einer Kreislaufwirtschaft. Zur Realisierung einer solchen „Circular Economy“ muss am Ende eines Produktlebens ein möglichst hoher Grad energetischer und stofflicher Verwertung stattfinden – was exakt dem Zielbild des Remanufacturings entspricht.¹⁴

¹²Vgl. Becker et al. 2019.

¹³Vgl. Kampker et al. 2021.

¹⁴Vgl. Hollah 2020.

Ein weiterer ökonomischer Vorteil des Remanufacturings liegt beispielsweise in der Erschließung neuer Geschäftsfelder durch das Veräußern gebrauchter und wiederaufbereiteter Komponenten. Dabei lassen sich durch eine geeignete Rückverfolgbarkeit (Traceability) gezielt auch Marketingmaßnahmen aus dem Produktnutzungsverhalten ableiten und genauere Nachfrageprognosen für künftige Produkte generieren. Neben den aufgeführten Potenzialen bietet das Remanufacturing dem Hersteller auch die Möglichkeit, die gesetzlichen Anforderungen an Batterien zu erfüllen. Gemäß § 23 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) sind Entwickler, Hersteller und Vertrieber von Erzeugnissen dazu verpflichtet, Produkte möglichst so zu gestalten, dass bei ihrer Fertigung und ihrem Gebrauch Abfälle vermindert werden. Darüber hinaus muss sichergestellt werden, dass nach ihrer Nutzungsphase entstandene Abfälle umweltverträglich verwertet oder beseitigt werden. Dementsprechend müssen die Hersteller von Lithium-Ionen-Batterien dafür Sorge tragen, dass ihre Batterien eine möglichst hohe Lebenserwartung, eine mehrfache Verwendbarkeit und die Wiedergewinnung von Rohstoffen (Recycling) zulassen. Gemäß innerdeutschen Gesetzen müssen Hersteller verschiedene EU-Verordnungen zur stofflichen Verwertung und Recycling-Effizienz von Batterien einhalten – siehe unter anderem (EU) Nr. 493/2012, Richtlinie 2006/66/EG. Zusätzlich entstehen durch das Remanufacturing Vorteile für Kunden: Zum einen steigt die ökologische Wertigkeit des Produkts, zum anderen sind Kostensenkungspotenziale durch eine längere Nutzungsdauer oder durch die Wiederverwendung einzelner Komponenten realisierbar.

42.3.1 Zusammenfassung und Ausblick

Als Teil der „Circular Economy“ befasst sich das Remanufacturing von Traktionsbatterien mit der Aufbereitung und Nutzung einzelner Komponenten, die in einem definierten prozessualen Ablauf geprüft, demontiert, aufbereitet und letztlich zu einem neuen Gesamtsystem zusammengeführt werden. Dadurch ist dieser grundlegende Ansatz zur Verlängerung der Nutzungszeit von Batterien und Komponenten eine nachhaltige Option vor allem für den Bereich des automobilen After-Sales-Markts, gleichzeitig stellt er die Produktauslegung jedoch vor einige Widrigkeiten.

Der Aufbau und das Design einer Traktionsbatterie samt ihrer Teilkomponenten stellen auf System-, Modul- und Zellebene neben der Steigerung der Automatisierbarkeit des Gesamtprozesses die zentralen Herausforderungen für die Wirtschaftlichkeit eines Remanufacturing-Prozesses dar. Modularität und eine zerstörungsfreie Demontierbarkeit sind dabei wichtige Kriterien, die bei künftigen Produktentwicklungen im Bereich der Batterie als Bewertungsmaßstab eine größere Rolle einnehmen müssen. Übergeordnete Verbesserungspotenziale liegen vor allem in lösbaren Fügeverfahren und in einer Standardisierung der Schnittstellen.

Prozessseitig lässt sich eine Wertschöpfungssteigerung durch das Remanufacturing nur mit Hilfe einer funktionierenden und vor allem automatisierten Demontage realisieren. Die in der nächsten Dekade deutlich zunehmende Menge von Batterierückläufern sowie

die künftigen gesetzlichen Anforderungen an das Recycling machen eine Steigerung des Automatisierungsgrades insbesondere für alle sicherheitsrelevanten und sich wiederholenden Teilschritte des Demontageprozesses notwendig und stellen somit eine Kernherausforderung für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft dar.

Literatur

Teil VII: Nachhaltigkeitspotenziale der Elektromobilität

- Becker, J; Beverungen, D; Winter, M; Menne, S.:** *Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019
- Dombrowski, U; Fochler, S; Malorny, C. (Hrsg.):** *After Sales Service. Zukunftsfähig und prozessorientiert gestalten*. 1. Aufl. 2020 Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020
- Hollah, A.:** *Planung und Steuerung des Remanufacturing in der Elektromobilproduktion*. Dissertation, 2020
- Junior, M. L; Filho, M. G.:** *Production planning and control for remanufacturing: literature review and analysis*. In: *Production Planning & Control*, Jg. 23, 2012, Nr. 6, S. 419–435
- Kampker, A; Hollah, A; Triebs, J; Aidi, I.:** *Remanufacturing of electric vehicles: Evaluation of economic potential*: 2019a IEEE 10th International Conference, S. 122–127. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8712044/>
- Kampker et al.:** **Remanufacturing of electric vehicles:** Challenges in production planning and control. 2019b. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919305116>
- Kampker, A; Wessel, S; Fiedler, F; Maltoni, F.:** *Battery pack remanufacturing process up to cell level with sorting and repurposing of battery cells*. In: *Jnl Remanufacture*, Jg. 11, 2021, Nr. 1, S. 1–23. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13243-020-00088-6>
- Pehlken, A; Kalverkamp, M; Wittstock, R.:** *Cascade Use in Technologies 2018*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Recycling von Lithium-Ionen-Batterien

43

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns,
Janis Vienenkötter, Francesco Maltoni, Natalia Soldan Cattani,
Nils Christen und Kim Kreisköther

Die Nutzungsdauer von Batterien wird durch Konzepte zu „Second Life“, Repair, Refurbishment und Remanufacturing verlängert. Diese Ansätze befähigen dazu, die maximale Alterung aus den elektrochemischen Energiespeichern herauszuholen, bevor sie zyklisch oder kalendarisch ihr Lebensende erreichen. Zur Schließung des Batteriekreislaufs folgt die Zuführung der Akkus zum Recycling-Prozess. Die politische Forcierung des Batterie-Recyclings wird im nachstehenden Abschn. 43.1 erörtert. Es folgt ein Überblick zu den unterschiedlichen Batterie-Recycling-Verfahren, bevor der aktuelle Stand der Technik im Detail vorgestellt wird.

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

C. Offermanns

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: c.offermanns@pem.rwth-aachen.de

J. Vienenkötter (✉)

Gruppenleiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM), RWTH Aachen,
Aachen, Deutschland

E-Mail: j.vienenkoetter@pem.rwth-aachen.de

43.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Unabhängig von jeglichen Maßnahmen zur Lebenszyklusverlängerung von Lithium-Ionen-Batterien ist das Recycling unvermeidbar. Letztlich ist es für die Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit der Batterien von entscheidender Bedeutung. Ziele bilden dabei eine günstige Rückgewinnung der Wertstoffe, um das Recycling profitabel umsetzen zu können, und eine möglichst hohe Qualität der recycelten Rohstoffe zum erneuten Einsatz im selben Marktsegment. Diese beiden Absichten stehen nicht im Konflikt zueinander, sind aber nach dem heutigen Stand der Technik nur teilweise miteinander vereinbar.

Die ursprüngliche Rechtsvorschrift für das Batterie-Recycling in Europa ist mit der Richtlinie 91/157/EEC der Europäischen Gemeinschaft vom 18. März 1991 in Kraft getreten.¹ Diese setzt das in der 75/442/EWG vom 15. Juli 1975 festgelegte Prinzip um, dass die Bewirtschaftung besonderer Abfallkategorien wie Batterien unter besonderen oder ergänzenden Vorschriften erfolgen muss. Der Zweck dieser Richtlinie besteht darin, Umweltverunreinigungen einzuschränken oder sogar gänzlich zu beseitigen und gleichzeitig für eine Kreislaufwirtschaft der Rohstoffquellen zu sorgen. Die erste EU-Batteriedirektive wurde durch die Richtlinien 93/86/EEC vom 4. Oktober 1993 über die Kennzeichnung von Batterien und Batteriegeräten und anschließend durch die 98/101/EC vom 22. Dezember 1998 (Verbot von Quecksilber) ersetzt.^{2,3}

Die verabschiedete EU-Richtlinie 2000/53/EG vom 18. September 2000 bezieht sich auf die angestrebten Recycling-Quoten im Bereich der Rohstoffrückgewinnung aus Altfahrzeugen. Sie gibt vor, dass Automobilhersteller eine kostenlose Rücknahme ihrer Altfahrzeuge gewährleisten müssen. Darüber hinaus wurden Verwertungsquoten bestimmt, die zu einem festgelegten Zeitpunkt erreicht werden sollen. Maßnahmen für die Weiternutzung sowie zur Rückgewinnung von Komponenten wurden durch Marktanreize begünstigt und Mindeststandards eingeführt. Die Richtlinie betonte, wie die Erreichung

¹ Vgl. EG-Richtlinie 1991.

² Vgl. EG-Richtlinie 1993.

³ Vgl. EG-Richtlinie 1998.

F. Maltoni · N. S. Cattani

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: maltoni@fev.com; n.soldan@pem.rwth-aachen.de

N. Christen

Business Development E-Mobility, STAWAG, Stadtwerke Aachen AG, Aachen, Deutschland

E-Mail: Nils.christen@stawag.de

K. Kreisköther

Specialist Battery Cell/System – Adhesives Automotive Components, Henkel,
Düsseldorf, Deutschland

E-Mail: kim.kreiskoether@henkel.com

dieser Ziele bereits während der Konzeption neuer Fahrzeuge im Fokus stehen muss. Dazu sind nicht nur Gefahrstoffe zu recyceln, sondern auch Wertstoffe wie Metalle und Kunststoffe. Von zentraler Bedeutung ist die Einführung von Pflichten für Automobilhersteller, den Markt für recycelte Rohstoffe durch zielgerichtete Konstruktion und ausreichende Informationen für dritte Unternehmen sowie für Verbraucher zu ermöglichen. Ähnliche Prinzipien wurden für Elektrogeräte durch die 2002/96/EG über Elektro- und Elektronik-Altgeräte umgesetzt, wovon Fahrzeuge technisch ausgenommen sind. Allerdings folgen die elektrischen und elektronischen Komponenten von Fahrzeugen wie Kabel, Platinen und Bildschirme ähnlichen Recycling-Verfahren wie die von der Richtlinie umfassten Geräte.⁴ Die Richtlinie 2006/66/EC vom 6. September 2006 (EG-Richtlinie 2006) hat die ursprüngliche Richtlinie 91/157/EEC außer Kraft gesetzt und die 2000/53/EC sowie die 2002/96/EG ergänzt. Dabei werden für sämtliche in Fahrzeugen oder Geräten eingebaute Batterien – mit Ausnahme von Rüstung und Raumfahrt – unterschiedliche Sammelsysteme aufgebaut. Diese Sammelsysteme müssen so gestaltet werden, dass die Hersteller für die Sammlung verantwortlich sind, ohne Kosten oder Pflichten für die Verbraucher zu verursachen. Jede Verkaufsstelle muss auch Batteriegeräte annehmen und sie in die Entsorgungsrouten einleiten. Die EU-Batteriedirektive hat für die Mitgliedstaaten unter anderem Mindestsammelquoten für Altbatterien und -akkumulatoren von 25 % bis zum 26. September 2012 und von 45 % bis zum 26. September 2016 vorgeschrieben. Außerdem ist für Lithium-Ionen-Batterie-Recycling-Prozesse eine Mindest-Recycling-Effizienz von 50 % der durchschnittlichen Batteriemasse vorgesehen.⁵

Mit der im März 1998 in Kraft getretenen und im Juli 2001 neugefassten „Verordnung über die Rücknahme und Entsorgung gebrauchter Batterien und Akkumulatoren“ (BattV) erfolgte die Überführung der EU-Batteriedirektive in deutsches Recht. In der „BattV“ werden den Herstellern, Vertreibern und Endverbrauchern bestimmte Pflichten auferlegt. Dadurch soll eine Rücknahme ebenso sichergestellt werden wie eine entsprechend den Vorschriften des 1996 in Kraft getretenen „Gesetzes zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen“ (KrW-/AbfG) ordnungsgemäße und schadlose Verwertung beziehungsweise gemeinwohlverträgliche Beseitigung. Gemäß der „BattV“ dürfen Batterien nur dann in Verkehr gebracht werden, wenn von Herstellern und Vertreibern gewährleistet wird, dass sie vom Endverbraucher wieder zurückgegeben werden können. Gleichzeitig ist der Endverbraucher dazu verpflichtet, Altbatterien beim Vertreiber oder bei den von den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern eingerichteten Erfassungsstellen abzugeben. Eine Entsorgung im Hausmüll ist indes für alle Batterietypen gleichermaßen verboten. Die Hersteller und Vertreiber sind wiederum zu einer unentgeltlichen Batterierücknahme aus den Händen des Endverbrauchers verpflichtet.^{6,7}

⁴Vgl. EG-Richtlinie 2002.

⁵Vgl. EG-Richtlinie 2006.

⁶Vgl. BattV 1998.

⁷Vgl. KrW-/AbfG 1994.

Zu diesem Zweck wurde ein laut der „BattV“ vorgeschriebenes gemeinsames Rücknahme- und Entsorgungssystem entwickelt, dessen Organisation und Verwaltung der Stiftung „Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien“ (GRS) obliegt. An dem Verbund beteiligen sich seit 1998 die Hersteller von rund 80 % der im deutschen Markt abgesetzten Batterien. Gegründet wurde die GRS-Stiftung von den Batterieherstellern Duracell, Energizer, Panasonic, Philips, Saft, Sanyo, Sony und Varta sowie dem Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e. V. (ZVEI). Ende 2008 hatten insgesamt 991 Hersteller und Importeure von Gerätebatterien und -akkumulatoren die Dienstleistungen des GRS-Verbunds genutzt. Die Stiftung ist als gemeinnützige Organisation zu verstehen und hat mehr als 170.000 Sammelstellen zur Rücknahme gebrauchter Batterien eingerichtet. Die Altbatterien werden in regelmäßigen Abständen abgeholt, sortiert und schließlich entsorgt beziehungsweise verwertet. Darüber hinaus ist die GRS-Stiftung für eine Abfallberatung und die Unterrichtung der Öffentlichkeit verantwortlich. Zusätzlich wird den Bundesländern ein jährlicher Erfolgsbericht vorgelegt, der über die in Umlauf gebrachte Batteriemasse, die zurückgenommene Batteriemasse, die qualitativen und quantitativen Entsorgungsergebnisse sowie die gezahlten Preise für Entsorgungsleistungen informiert.^{8,9,10}

Eine einheitliche Methode zur Bestimmung beziehungsweise Berechnung der Effizienz von Batterie-Recycling-Prozessen wird von der EU-Batteriedirektive indes nicht vorgegeben. Das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien, das durch unterschiedliche Prozessketten ausgeführt werden kann, wird kontrovers diskutiert. Zu den entsprechenden Aspekten zählen vor allem die Einbeziehung respektive die Nichteinbeziehung bestimmter Batterieinhaltsstoffe wie Wasser, Sauerstoff und Kohlenstoff in die Recycling-Effizienzberechnung. Die generelle Ablehnung anfallender Schlacken als Recycling-Produkte wird kritisiert, da sie unter bestimmten Voraussetzungen beispielsweise im Straßenbau eingesetzt und somit als Recycling-Produkt bewertet werden können.^{11,12,13} Im Fall von Traktionsbatterien stellt sich die Frage, ob die Eingangsmasse lediglich aus Batterieeinzelzellen besteht oder auch komplette Batteriepacks enthalten darf, da Letztgenannte neben den eigentlichen Batteriezellen auch Verschaltungselektronik- und Gehäusekomponenten umfassen. Unterdessen stellt sich die Frage, was genau als „zurückgewonnen“ zählt, als noch problematischer dar. Mit welcher Recycling-Quote sämtliche Nebenaggregate zu bewerten sind, die anderen Recycling-Routen zugeführt werden, geht nicht aus der

⁸Vgl. BattV 1998.

⁹Vgl. Döhring-Nisar und Batterien 2001.

¹⁰Vgl. Fricke J L 2009.

¹¹Vgl. Buchert et al. 2011.

¹²Vgl. Elwert et al.

¹³Vgl. Thomé-Kozmiensky und Goldmann 2012.

EU-Batteriedirektive hervor. Kabel und Elektronik zum Beispiel, deren Materialien nicht zu 100 % zurückgewonnen werden, können bis dato dennoch als vollständig recycelt betrachtet werden.

Neben den vorgeschriebenen Mindestsammelquoten und Mindest-Recycling-Effizienzen sind die Definitionen der Begriffe „Behandlung“ und „Recycling“ sowie deren Abgrenzung voneinander von besonderem Interesse. Laut Artikel 3, Punkt 10 (EG-Richtlinie 2006) umfasst die Behandlung „alle Tätigkeiten, die an Altbatterien und -akkumulatoren nach Übergabe an eine Anlage zur Sortierung, zur Vorbereitung des Recyclings oder zur Vorbereitung der Beseitigung durchgeführt werden“.¹⁴ Außerdem muss laut Anhang III Teil A Punkt 1 „die Behandlung mindestens die Entfernung aller Flüssigkeiten und Säuren erfassen“. Demgegenüber wird das Recycling in Artikel 3 Punkt 8 als „die in einem Produktionsprozess erfolgende Wiederaufarbeitung von Abfallmaterialien für ihren ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke, jedoch unter Ausschluss der energetischen Verwertung“ definiert.¹⁵

Die europäischen Behörden diskutieren neue Vorschläge, die die Kernprobleme der EG-Richtlinie 2006 überwinden sollen, und berücksichtigen Szenarien, in denen die Verbreitung von Elektromobilität eine 19-fache Steigerung der Batterieproduktion vorsieht. Diese Vorschläge sind Bestandteil des „Green Deal“¹⁶ und in Synergie mit dem „Strategischen Aktionsplan für Batterien“,¹⁷ dem neuen „Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft“,¹⁸ der neuen „Industriestrategie für Europa“¹⁹ und der „Strategie für nachhaltige und intelligente Mobilität“.²⁰ Der neue Vorschlag ergänzt die geltenden Richtlinien 2000/53/EG über Altfahrzeuge, die Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle, die Richtlinie 2012/19/EU Elektro- und Elektronik-Altgeräte, die Richtlinie 2011/65/EU zur Beschränkung der Verwendung gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten, die Richtlinie 2010/75/EU über Industrieemissionen sowie die Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe. In dem Vorschlag steht die Nachhaltigkeit während des gesamten Lebenszyklus sämtlicher Batterietypen im Vordergrund. Dazu existieren verbindliche Vorgaben für den Material- und Rezyklateinsatz, die Haltbarkeit, die Sammlung und das Recycling von Batterien in der EU. Die Sammelquote für Gerätebatterien soll Mitte des laufenden Jahrzehnts 65 % und zu Beginn der 2030er-Jahre 70 % betragen.²¹ Alle gesammelten Batterien sollen wiederverwertet oder recycelt werden. Beim Recycling soll vor allem bei den wertvollen Nichteisenmetallen ein hoher Rückgewinnungsgrad erreicht werden.

¹⁴ Vgl. EG-Richtlinie 2006.

¹⁵ Vgl. EG-Richtlinie 2006.

¹⁶ Vgl. COM(2019) 640.

¹⁷ Vgl. COM(2018) 293.

¹⁸ Vgl. COM(2020) 98.

¹⁹ Vgl. COM(2020) 102.

²⁰ Vgl. COM(2020) 789.

²¹ Vgl. Europäische Kommission COM 798 2020.

43.2 Überblick zu Batterie-Recycling-Verfahren

Prinzipiell können Lithium-Ionen-Batterien auf hydrometallurgischem Weg (nasschemische Prozesse bei niedrigen Temperaturen) oder auf pyrometallurgischem Weg (Einsatz von Schmelzaggregaten bei hohen Temperaturen) recycelt werden; auch eine Kombination aus pyro- und hydrometallurgischen Prozessschritten ist möglich.

Generell lässt sich das Batterie-Recycling-Verfahren in vier Stufen unterteilen: die Vorbereitung, die Vorbehandlung, die Aufbereitung und die Metallurgie. In den ersten beiden Schritten werden die Lithium-Ionen-Batterien gesammelt und bis auf Modulebene demontiert. Für den Transport und den Recycling-Prozess selbst müssen spezielle Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden. Der Grund dafür liegt in der hohen Brand- bis hin zur Explosionsgefahr, hervorgerufen durch äußere oder innere Kurzschlüsse. Diese Gefahren sind bei Lithium-Primärbatterien wegen des enthaltenen metallischen Lithiums zwar größer, aber auch Lithium-Ionen-Batterien werden speziellen Behandlungsschritten zur „Deaktivierung“ vor dem eigentlichen Recycling-Prozess unterzogen.

Die Stufe der Aufbereitung lässt sich in die Auftrennung und die Separierung untergliedern. Ziel der Auftrennung ist die Vereinzelung der Komponenten, während die Separierung der Schaffung mehrerer Stoffströme mit erhöhter Reinheit dient. Auf diesem Wege wird gefahrloses Schüttgut erzeugt, das vereinfachte Folgeprozessschritte ermöglicht. Dies kann sowohl mechanisch als auch thermisch vonstattengehen. Die mechanische Zerkleinerung erfolgt im Allgemeinen durch das Schreddern. Diese Beanspruchung kann zu Kurzschlüssen führen, die eine unerwünschte Temperaturerhöhung nach sich zieht. In der Folge kommt es zur Verdampfung des Elektrolyten und zur Bildung schädlicher Gase. Um diese Risiken zu minimieren, kann die Zerkleinerung unter Intergasatmosphäre, Vakuum oder unter Stickstoffkühlung erfolgen. Alternativ kann der mechanischen Zerkleinerung auch eine thermische Auftrennung vorausgehen. Dabei werden Elektrolyt und Separator durch die hohe Temperatur im Ofen zersetzt. Im Anschluss an die Auftrennung wird das zerkleinerte Gut klassiert und separiert. Die Separation erfolgt durch verschiedene Verfahren nach physikalischen Materialeigenschaften wie Dichte, elektrische Leitfähigkeit oder Magnetisierbarkeit.

In der vierten Stufe, der Metallurgie, lassen sich die Metalle aus den zuvor separierten Stoffströmen zurückgewinnen. In diesem Zusammenhang wird zwischen der Pyrometallurgie und der Hydrometallurgie unterschieden. Bei der Pyrometallurgie handelt es sich um ein Hochtemperaturverfahren, bei dem die verschiedenen Metalle eingeschmolzen werden. Diese Vorgehensweise ist auch für nicht zerkleinerte Zellen geeignet. Die verflüssigten Metalle solidifizieren sich in zwei Schichten – der Legierung oder der Schlacke. In der Legierung sind Metalle wie Kupfer, Kobalt, Nickel und Eisen enthalten, die anschließend hydrometallurgisch aufbereitet werden. Die Schlacke beinhaltet unter anderem Lithium und Aluminium, wird jedoch meist ohne weitere Aufbereitung in die Bauindustrie abgegeben. Das hydrometallurgische Verfahren hingegen umfasst die Laugung, Anreicherung, Separation und Rückgewinnung der Metalle bei niedrigen Temperaturen. Die grund-

Tab. 43.1 Vorzüge und Nachteile hydrometallurgischer und pyrometallurgischer Prozesse

	Hydrometallurgischer Prozess	Pyrometallurgischer Prozess
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Wiedergewinnung der unedlen Metalle, der organischen Komponenten sowie des Kohlenstoffs möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung der unedlen Metalle, der organischen Komponenten und des Kohlenstoffs als Reduktions-mittel bzw. Energieträger
	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Abgasmengen 	<ul style="list-style-type: none"> • Absatzfähige Metalle als Recycling-Produkte
	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Selektivität 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Raum-Zeit-Ausbeute
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Umgang mit großen Mengen von Chemikalien (Laugen, Säuren, Fällungsmittel etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> • Große Mengen von Brennstoffen oder elektrischer Energie notwendig
	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Raum-Zeit-Ausbeute 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwendige Abgasreinigung notwendig
	<ul style="list-style-type: none"> • Große Mengen von Abwasser und Schlämmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Lithium ist in der Schlacke gebunden und erfordert hohen Rückgewinnungsaufwand

sätzlichen Vorzüge und Nachteile dieser beiden metallurgischen Verfahrensmöglichkeiten für das Recycling lithiumhaltiger Batterien werden in Tab. 43.1 aufgelistet.^{22,23}

Seit dem Inkrafttreten der EU-Batteriedirektive ist eine Reihe von Batterie-Recycling-Verfahren entwickelt worden, die oftmals speziell auf die einzelnen chemischen Batteriesysteme zugeschnitten sind. Daneben besteht aber auch die Möglichkeit, Lithium-Ionen-Batterieschrott als Sekundärrohstoff in die Primärgewinnungsrouten von Metallen wie Kobalt und Nickel oder in die Recycling-Route von Stahl einzubringen.

43.3 Stand der Technik in Forschung und Entwicklung

Der Stand der Technik in der Forschung und Entwicklung ist je nach Reifegrad der Recycling-Prozesse äußerst unterschiedlich. Einerseits werden aus anderen Marktbereichen etablierte pyrometallurgische Verfahrensschritte weiter verfeinert, andererseits wird die Pyrolyse als weiteres thermisches Verfahren für mechanische und chemische Recycling-Methoden untersucht.²⁴

Durch die Hydrometallurgie ist das Recycling der Aktivmaterialien möglich.²⁵ In der Forschung werden mechanische und thermische Vorbehandlungsmethoden untersucht, um die Verwertungsquote und die Qualität des Rezyklats zu steigern.²⁶ Ein Beispiel dafür ist die Pyrolyse als Deaktivierungsschritt zur Zersetzung des Elektrolyten und Binders, die

²² Vgl. Werner et al. 2020.

²³ Vgl. Martens und Goldmann 2016.

²⁴ Vgl. Melin 2019.

²⁵ Vgl. Kwade und Diekmann 2018.

²⁶ Vgl. Diekmann et al. 2017.

aufgrund der Temperaturen unter 500 °C im weiteren Prozess die Rückgewinnung von Lithium und Graphit erlaubt.²⁷ Die Qualität des Rezyklats kann durch Unreinheiten und veränderte Materialstrukturen beeinträchtigt werden, was die Re-Synthese der Aktivmaterialien vor eine Herausforderung stellt.²⁸

Ein für das Batterie-Recycling neuer Prozessschritt zur Vorbehandlung der Materialien für die hydrometallurgische Prozesskette ist die elektrohydraulische Zersetzung („Electro-Hydraulic Fracturing“). Die bereits beim Recycling von Elektrogeräten eingesetzte Methode trennt die Verbundmaterialien an den Schnittstellen durch Schockwellen in einem flüssigen Medium. Andere untersuchte Methoden zur Skalierung der hydrometallurgischen Prozesse unter Beibehaltung der Rezyklatqualität sind die Nutzung der Zentrifugalkraft zur Materialtrennung²⁹ und der Einsatz von Ultraschall zur Beschleunigung der Reaktionskinetik.³⁰ Indes nutzt ein weiterer innovativer Ansatz aus dem Recycling von Elektrogeräten Bakterien zur Verarbeitung von Schwermetallen,³¹ wobei die Übertragbarkeit auf Batterien derzeit untersucht wird.

Die im Rahmen des „Green Deal“ erneuerten Recycling-Vorgaben schreiben in den nächsten Jahren materialspezifische Recycling-Effizienzen vor. Daher wird demnächst auch das Recycling von Lithium eine relevante Rolle spielen. Mit der „Early Stage Lithium Recovery“ beschäftigt sich das Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling (IME) der RWTH Aachen. Im Zuge des Verfahrens werden in einem energiearmen Prozess geringe Mengen toxischer Lösemittel eingesetzt und rund 50 % des Lithiums in guter Qualität zurückgewonnen. Die in diesem Prozess vorgenommene Behandlung der schwarzen Masse durch Wasser und superkritisches CO₂ bietet einige Vorteile im Vergleich zur Lithiumrückgewinnung aus der Schlacke des pyrometallurgischen Prozesses³² – beispielsweise eine geringere Menge giftiger Chemikalien sowie einen niedrigeren Energieeinsatz.^{33,34,35}

Im Fokus der Forschung steht aktuell das direkte Recycling, das durch die Entfernung von Verunreinigungen, Bindern und Elektrolytresten aus dem Aktivmaterial ohne Reduktion und Resynthese der Materialien vonstattengeht. Dadurch bleibt die ursprüngliche Materialstruktur erhalten, so dass nach der Aufreinigung durch Zugabe von Lithium nur der Lithiumverlust regeneriert werden muss. Die Vorteile liegen in einem konkurrenzfähigen Prozess mit äußerst geringer Umweltbelastung, da sowohl der benötigte Energie-

²⁷ Vgl. Wang und Friedrich 2015.

²⁸ Vgl. Rothermel et al. 2016.

²⁹ Vgl. Sinn et al. 2020.

³⁰ Vgl. Ning et al. 2020.

³¹ Vgl. Baniyadi et al. 2021.

³² Vgl. Schwich et al. 2021.

³³ Vgl. Schwich et al. 2021.

³⁴ Vgl. Sommerfeld et al. 2020.

³⁵ Vgl. Klimko et al. 2020.

eintrag als auch der Einsatz von toxischen Chemikalien gering ist. Allerdings weist die Methode eine hohe Komplexität und Empfindlichkeit auf, so dass sie für eine optimale Materialaufbereitung von einem „Design-for-Recycling“-Ansatz stark profitieren würde. Derzeit werden die Entwicklungen hauptsächlich auf die Zellchemie von Lithiumeisenphosphat ausgerichtet.^{36,37}

Auch im Hinblick auf die nächsten Generationen der Lithium-Ionen-Batterien haben Studien das Recycling von Feststoffbatterien und Lithium-Schwefel-Batterien betrachtet. Die „All-Solid-State“-Batterie unterscheidet sich durch ihren Festkörperelektrolyten und dessen Anbindung zu den Aktivmaterialien vom aktuellen Zelldesign. Zur Wiedergewinnung ließen sich entweder die starke Anbindung ausnutzen und die gesamten Elektroden regenerieren oder es könnte der Binder durch eine thermische Behandlung aufgelöst werden, um anschließend den Keramikseparator mechanisch abzutrennen. Nach dieser Vorbehandlung wäre die übliche Recycling-Prozesskette für Lithium-Ionen-Batterien geeignet.³⁸ Auch wenn sich indes die Lithium-Schwefel-Batterie in ihrer Zusammensetzung stark von der Lithium-Ionen-Batterie unterscheidet, lassen sich beide durch ähnliche Prozessketten recyceln. Vor allem die hydrometallurgischen Schritte müssen der neuen Zellchemie angepasst werden. Die Zellen werden zunächst thermisch behandelt, wonach die Materialien mechanisch getrennt und dann chemisch auf zwei separaten Wegen zurückgewonnen werden. Obwohl mehr als 90 % des Lithiums in Recyclingprozessen zurückgewonnen werden könnten, bleibt die Frage nach der Wirtschaftlichkeit des Recycling-Prozesses aufgrund der Abwesenheit teurer Rohstoffe in der Lithium-Schwefel-Batterie offen.³⁹

43.3.1 Stand der Technik industrieller Recycling-Verfahren

43.3.1.1 Beispielfahren für das Einbringen von Rezyklaten in die Primärgewinnungsrouten

Lithium-Ionen-Batterien können unter anderem durch Einbringung von Kobalt und Nickel in die Primärgewinnungsrouten recycelt werden. Da diese beiden Metalle zumeist im Erz vergesellschaftet sind, ist deren Gewinnung sehr eng miteinander verknüpft. Beispielhaft wird nach ebenjenem Prinzip das Batterie-Recycling industriell betrieben: Dazu wird kobalt- und nickelhaltiger Batterieschrott in die einzelnen Prozessstufen der eigentlichen Primärgewinnungsrouten von Kobalt und Nickel eingebracht.⁴⁰ Die Kapazität dieses Pro-

³⁶ Vgl. Xu et al. 2020.

³⁷ Vgl. Larouche et al. 2020.

³⁸ Vgl. Schwich et al. 2020.

³⁹ Vgl. Schwich et al. 2020.

⁴⁰ Vgl. GLENCORE.

zesses zur Batterieverwertung wird 2019 mit 7000 t pro Jahr angegeben.⁴¹ Das Recycling-Verfahren beruht auf einer pyrometallurgischen mit anschließender hydrometallurgischer Behandlung der Altbatterien. Im ersten Verfahrensschritt erfolgt die Schadstoffentfrachtung der angelieferten Batterien durch Kalzinierung in einem Drehrohrofen. Da der leicht entzündliche Elektrolyt ein Gefahrenpotenzial für den eigentlichen Schmelzprozess birgt, werden die Batteriezellen durch die Verdampfung des Elektrolyten deaktiviert. Gleichzeitig werden enthaltenes Graphit und organische Bestandteile wie der Separator zersetzt und energetisch verwertet. Nach dem darauffolgenden Schmelzprozess in einem Lichtbogenofen bilden sich in der Solidifikation aufgrund unterschiedlicher gravimetrischer Dichten eine hauptsächlich mit Nickel, Kobalt und Kupfer angereicherte Legierungsschicht sowie eine Schlacke, die aus den restlichen metallischen Batteriebestandteilen wie Aluminium, Lithium, Mangan und Eisen besteht. Diese Fraktion wird anschließend entsorgt. Nachdem der Eisenanteil der Legierungsschicht in einem Konverter auf weniger als 2 % reduziert wurde, erfolgt die Granulation der Legierung und die Verschiffung zur Raffination. Dort beginnt die hydrometallurgische Aufbereitung. Nach der Laugung der granulierten Legierung erfolgen mehrere Ausfällungs- und Filtrationsstufen, in denen Kupfer, Eisen und Gips von der nickel- und kobalthaltigen Lösung separiert werden. Während der Entsorgung der verbliebenen Mengen von Eisen und Gips wird die Kupferfraktion in einem Wirbelschichtofen behandelt, bevor durch erneute Laugung sowie Anreicherung und Gewinnungselektrolyse reines Kupfermetall hergestellt wird. Aus der nickel- und kobaltreichen Lösung wird durch Solventextraktion Kobalt separiert. Sowohl die Kobaltlösung als auch die verbleibende nickelreiche Lösung werden anschließend von restlichen Verunreinigungen wie Zinn, Kupfer, Blei und Mangan getrennt und ebenfalls einer Gewinnungselektrolyse zugeführt.⁴² Dementsprechend zielt diese Recycling-Methode in erster Linie auf die Kupfer-, Kobalt- und Nickelinhalte der Batterien ab. Im Jahr 2020 wurden insgesamt rund 4600 t Nickel sowie 2000 t Kobalt produziert.⁴³

43.3.1.2 Beispielverfahren für das Einbringen von Rezyklaten in bestehende Recycling-Verfahren

In einem weiteren Prozessbeispiel werden neben recycelten Lithium-Ionen-Batterien weitere nicht eisenmetallhaltige Akkumulatoren sowie Sekundärrohstoffe aus diversen Industriebereichen behandelt. Dazu gehören unter anderem verbrauchte Katalysatoren aus der Petrochemie sowie Transformatoren und Galvanik-, Abwasser- und Schleifschlämme, so dass sich die potenziellen Inputmassenströme auf ein weites Spektrum verteilen.^{44,45,46}

⁴¹ Vgl. Liu et al. 2019.

⁴² Vgl. Brückner et al. 2020.

⁴³ Vgl. GLENCORE 2021.

⁴⁴ Vgl. Nickelhütte Aue 2021.

⁴⁵ Vgl. Sojka et al. 2020.

⁴⁶ Vgl. Schulz-Nötzold 2020.

Die Lithium-Ionen-Batterien werden nach der Anlieferung im ersten Schritt in einem Kurztrommelofen (KTO) pyrometallurgisch behandelt. Aufgrund der hohen Betriebstemperaturen des KTO ist von einer energetischen Verwertung der kunststoffhaltigen Komponenten, des Graphits und des Elektrolyten auszugehen. Im Anschluss an den Schmelzprozess bilden sich – analog zu dem in Abschn. 43.3.1.1 beschriebenen Prozess – aufgrund unterschiedlicher gravimetrischer Dichten eine Ni-Co-Cu-reiche Legierungsschicht sowie eine Schlacke, die aus den restlichen metallischen Batteriebestandteilen und dabei wiederum vor allem aus Lithium besteht.⁴⁷ Nach der Solidifikation der beiden Produktströme werden beide Produkte voneinander getrennt zerkleinert. Während die Schlacke als Baustoff im Straßen- und Wegebau Anwendung findet, wird die Legierungsschicht hydrometallurgisch aufbereitet. Nach der Zerkleinerung erfolgt eine Drucklaugung, bei der eine mit Nickel, Kobalt und Kupfer angereicherte Schwefellösung erzeugt wird.⁴⁸ Nach der Ausfällung ungewünschter Restbestandteile – etwa Eisen – erfolgt eine dreistufige Solventextraktion, bei der einzeln und nacheinander Kupfer, Kobalt und anschließend Nickel extrahiert und kristallisiert werden. Auf diesem Wege können in Abhängigkeit von der Auslegung des hydrometallurgischen Verfahrens Kobaltsulfat, Nickelsulfat, Nickelchlorid, Kupfersulfat und Kupferoxichlorid in einer Reinheit von mehr als 99,8 % hergestellt werden.⁴⁹ Zur expliziten Berechnung der Effizienz werden keine Angaben gemacht, es kann jedoch von einem Einbezug der energetisch verwerteten Komponenten und der Schlackephase ausgegangen werden.

43.3.1.3 Beispielverfahren für eine Kombination aus mechanischer, hydrometallurgischer und pyrometallurgischer Aufbereitung

Unterschiedliche Aufbereitungstechniken sowie die Vorteile hydrometallurgischer und pyrometallurgischer Prozessschritte können miteinander kombiniert werden. Das Verfahren zielt darauf ab, neben organischen Komponenten vor allem Metallgehalte in weitestgehend metallischer Form wiederzugewinnen. Dazu gehört unter anderem Lithium, das in rein pyrometallurgischen Verfahren häufig nur mit der Schlacke in batterie fremden Anwendungen recycelt wird. Nach der Demontage bis auf Zellniveau wird ein Pyrolyseschritt in einem bis zu 250 °C warmen Ofen unter Vakuum vorgenommen. Der Elektrolyt verdampft und die Zelle ist deaktiviert. Dadurch lässt sie sich anschließend sicher mechanisch zerkleinern. Mit Hilfe nachfolgender mechanischer Klassier- und Sortierschritte werden die Materialien in Fraktionen unterteilt. Auf diesem Wege werden drei Fraktionen – bestehend aus Eisen-Nickel, Aluminium und Elektrodenfolien – sowie eine Feinfraktion aus Elektrodenmaterialien gewonnen. Die Feinfraktion wird anschließend mit

⁴⁷Vgl. Sojka et al. 2020.

⁴⁸Vgl. Hoffmann 2015.

⁴⁹Vgl. Mark Nicholson 2020.

einem Binder versehen, um ein grobkörniges Agglomerat zu bilden. Vor der eigentlichen pyrometallurgischen Aufbereitung wird die Feinfraktion einer thermischen Vorbehandlung bei 800 °C unterzogen. Sie dient der Reduktion von Graphit, das die Aufbereitung negativ beeinflussen kann. Durch den Schmelzprozess entstehen eine Kobalt-Mangan-Legierung sowie ein Lithium-Konzentrat (lithiumangereicherter Flugstaub). Die Metalllegierung wird verkauft. Sie kann als Vorlegierung für Superlegierungen auf Kobaltbasis eingesetzt werden und ist somit direkt absetzbar. Aus dem Lithiumkonzentrat wird durch hydrometallurgische Verfahren wie Laugung mit anschließender Fällung und Filtration Lithiumkarbonat gewonnen, das zum Beispiel in der Batterieproduktion oder in der Glasherstellung Anwendung findet.⁵⁰

43.3.1.4 Beispielverfahren für kombiniertes hydrometallurgisches und pyrometallurgisches Batterie-Recycling

Ein weiterer in der Industrie angewandeter Prozess zeichnet sich durch eine pyrometallurgische Behandlung in einem anstelle von mehreren Öfen aus. Die entsprechende Anlage ist auf 7000 t/a ausgediente Traktionsbatterien ausgelegt – für Lithium-Ionen-, Lithium-Polymer- und NiMH-Batterien.⁵¹ Dieser „Ultra-High-Temperature“-Prozess verringert durch die reduzierte Anzahl der Schachtofen die notwendigen Investitionen und Betriebskosten, was den gesamten Recycling-Prozess kosteneffizienter gestaltet. Der Ofen besteht aus drei Temperaturzonen, die erst den Elektrolyten freisetzen und anschließend die enthaltenen Kunststoffe schmelzen. In der dritten und heißesten Zone werden die metallischen Bestandteile reduziert und eingeschmolzen. Während des Schmelzprozesses entstehen zwei Phasen, die als Legierung oder Metallschmelze und als Schlacke bezeichnet werden. Materialien wie Nickel, Kobalt und Kupfer gehen überwiegend in die Legierung ein. In der Schlacke befinden sich die restlichen Anteile der metallischen Batteriekomponenten – unter anderem Lithium, Eisen und Aluminium. Die Legierung wird anschließend als Granulat zum nächsten Standort gebracht. Dort steht eine weitere Anlage, in der die produzierte Legierung hydrometallurgisch aufbereitet wird. Um aus den gewonnenen Precursor-Produkten erneut Aktivmaterialien zu erzeugen, werden sie zu weiteren Standorten in China, Korea und Japan transportiert. Die Schlacke hingegen wird nicht weiter aufbereitet und kommt als Material im Straßenbau oder in der Betonproduktion zur Anwendung.⁵²

⁵⁰Vgl. Becker et al. 2019.

⁵¹Vgl. Barazi 2018.

⁵²Vgl. Hoyer 2015.

43.3.1.5 Beispielverfahren für ein rein mechanisches und hydrometallurgisches Verfahren mit hoher Zurückgewinnung

Ein besonderes Verfahren ist aus den Forschungsprojekten „LithoRec I“ und „LithoRec II“ entstanden. Zu den an beiden Vorhaben beteiligten Partnern zählten unter anderem industrielle Automobil-, Recycling- und Rohstoffunternehmen sowie universitäre Institute. Das Ziel der Projekte bestand in der Entwicklung eines Batterie-Recycling-Verfahrens mit einer hohen Rückgewinnungsrate und Produktreinheit, die eine erneute Anwendung in Batterien zulässt. Die Verwertung sollte nicht energetisch oder in Form von Downcycling wie etwa als Baustoff im Straßenbau erfolgen, sondern stofflich. Aus den „LithoRec“-Projekten ging hervor, dass es zum jetzigen Zeitpunkt nicht wirtschaftlich möglich ist, für sämtliche Materialien eine ausreichende Produktqualität für einen erneuten Einsatz in der Batterieproduktion zu gewährleisten. Die Ergebnisse der beiden Forschungsprojekte wurden daraufhin industriell umgesetzt. Die Besonderheit des zugrundeliegenden Verfahrens ist die Vermeidung der pyrometallurgischen Prozessierung durch den Einsatz eines mechanischen Vereinzelungsprozesses. Am Ende dieser mechanischen Recycling-Methode wird ein Zerkleinerungsgut aus Metallen wie Lithium, Kobalt und Mangan, Graphit sowie Teilen des Elektrolyten zurückerhalten und in einem nachgeschalteten hydrometallurgischen Prozess aufbereitet. Über eine erfolgreiche Skalierung der hydrometallurgischen Aufbereitungsrouten vom Labor- auf einen praktikablen Industriemaßstab liegen derzeit jedoch keine Informationen vor.^{53,54}

Der Prozess beginnt mit einer Tiefentladung der Traktionsbatterie nach der Öffnung des Batteriepacks. Die zurückgewonnene Energie wird für die weiterführenden Prozesse eingesetzt. Nach der anschließenden Demontage folgt eine mechanische Zerkleinerung in einem Schredder. Aus Sicherheitsgründen wird dabei ein Inertgas eingeströmt. Außerdem finden die meisten Prozesse dieses Verfahrens bei geringen Temperaturen statt, um die Bildung toxischer Gase durch die Freisetzung des Elektrolyten zu vermeiden. Der zweite Schritt besteht in der Trocknung des Zerkleinerungsguts bei gleichzeitiger Erwärmung, um den Elektrolyten zu verdampfen. Dieser lässt sich in einer anschließenden separaten Vakuumdestillation teilweise zurückgewinnen. Ebenso wird das Fluorid aus den Leitsalzen abgetrennt, um die Bildung von Fluorwasserstoff in weiteren Verarbeitungsschritten zu verhindern. Nach der Trocknung werden die Materialien nach physikalischen Eigenschaften klassiert und sortiert. Dabei kommen Verfahren wie die magnetische Sortierung oder die Separation nach Dichte zum Einsatz. Durch diese Methoden werden die Eisen-, Kupfer- und Aluminiumfraktionen und insbesondere die Elektrodenfolien herausgetrennt. Es verbleibt die Schwarzmasse, die aus den Aktivmaterialien und dem Leitsalz besteht. Diese Fraktion wird in hydrometallurgischen Prozessen weiterverarbeitet.⁵⁵ Die Rückgewinnung von Kobalt und Nickel ist bereits weithin erprobt, jedoch wird momentan an der Rückge-

⁵³ Vgl. Duesenfeld.

⁵⁴ Vgl. Hoyer 2015.

⁵⁵ Vgl. Becker et al. 2019.

winnung von Lithium, Mangan und Graphit aus der Schwarzsasse geforscht. Mit der Rückgewinnung von Graphit erreicht der Prozess eine Recycling-Effizienz von 91 %. Auch ohne das nachgeschaltete hydrometallurgische Verfahren lässt sich noch eine Effizienz von 72 % erzielen.^{56,57} Neben der hohen Recycling-Effizienz und Reinheit der recycelten Materialien birgt das mechanische Verfahren einen weiteren Vorteil: Es kann sowohl stationär als auch in speziell dafür gebauten Containern mobil vorgenommen werden. Dadurch wird der Elektrolyt vor Ort von dem geschredderten Material getrennt. Durch diese Schadstoffentfrachtung kann der Transport dieser Materialien nun in Standardbehältern erfolgen und muss nicht mehr, wie bei Batteriezellen bislang üblich, als Gefahrgut eingestuft werden. Somit lassen sich die Kosten für den Transport signifikant senken.⁵⁸

43.3.1.6 Beispielverfahren für hydrometallurgisches Batterie-Recycling

Durch seine Entstehung in den frühen 1990er-Jahren ist dieser Prozess eines der ersten kommerziell umgesetzten Verfahren für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. Er basiert auf Tieftemperaturzerlegung und wurde ursprünglich für Lithium-Primärbatterien entwickelt. Neben ihrer langen Anwendung weist die Methode eine weitere Besonderheit auf: das Recycling von sowohl Primär- als auch Sekundärbatterien in einem Prozess. Das Verfahren eignet sich für alle Typen lithiumhaltiger Sekundärbatterien und damit sowohl für alle unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen als auch für sämtliche Dimensionen von klassischen Gerätebatterieformaten bis hin zu Spezialbatterien für militärische Anwendungen.⁵⁹

Durch die hohe Reaktionsfreudigkeit des Lithiums – vor allem in Lithium-Primärbatterien – findet die Bearbeitung der Zellen aus Sicherheitsgründen fast ausschließlich ferngesteuert und in einer flüssigen Umgebung statt. Zur Deaktivierung der Zellen werden sie in ein Bad mit flüssigem Argon ($T_b = -186\text{ °C}$) oder Stickstoff ($T_b = -196\text{ °C}$) eingetaucht – je nach Größe bis zu 24 h. Die Zerkleinerung erfolgt in einem Schredder oder in einer Hammermühle und findet in einer Natriumhydroxid- oder Lithiumhydroxid-Lösung (NaOH beziehungsweise LiOH) statt, um saure Komponenten zu neutralisieren und die Wasserstoffbildung zu minimieren. Batteriesysteme werden meist in einem vorgelagerten Schritt demontiert, damit sie die gleichen Zerkleinerungszyklen wie kleine Zellen durchlaufen. Es werden drei Fraktionen zurückgewonnen: metallische Feststoffe, eine mit Metallen angereicherte Lösung und eine Leichtfraktion aus Stahl und Kunststoff („Li-Ion-Fluff“). Der Fluff wird bei der Zerkleinerung direkt abgeschieden; der Stahl lässt sich magnetisch abtrennen und weiterverwenden. Die verbleibende Lösung mit den metallischen Feststoffen wird nach der Hammermühle entweder in einen Rütteltisch gegeben oder mittels einer Filterpresse gefiltert. Dabei entsteht einerseits eine Mischung aus Kobalt, Kupfer und Aluminium und andererseits ein Schlamm aus Lithium, Kobalt und Gra-

⁵⁶ Vgl. Pistoia und Liaw 2018.

⁵⁷ Vgl. Hanisch et al. 2014.

⁵⁸ Vgl. Duesenfeld.

⁵⁹ Vgl. Retriev Technologies.

phit. Aus dem entstandenen Schlamm wird das Lithium in einer Lösung herausgetrennt. Daraus lässt sich später ein Lithiumkarbonat mit hoher Reinheit ausfällen. Das gewonnene Lithiumkarbonat kann direkt an die Batterieindustrie verkauft werden, was dem Ziel eines Closed-Loop-Recyclings sehr nahekommt. Der verbleibende Filterkuchen („Cobalt Filter Cake“) enthält das Kobalt und wird zur Gewinnung einer Kobaltverbindung mit einer Reinheit von 99 % getrennt weiterverarbeitet. Im Prozessverlauf anfallende Metallfraktionen werden an Metall-Recycling-Unternehmen abgegeben.^{60,61,62}

Literatur

Teil VII: Nachhaltigkeitspotenziale der Elektromobilität

- Baniasadi, M; Graves, J. E; Ray, D. A; Silva, A. L. de; Renshaw, D; Farnaud, S.:** *Closed-Loop Recycling of Copper from Waste Printed Circuit Boards Using Bioleaching and Electrowinning Processes*. In: Waste Biomass Valor, Jg. 12, 2021, Nr. 6, S. 3125–3136
- Barazi, S. a.:** *Rohstoffrisikobewertung – Kobalt* (DERA Rohstoffinformationen, 36). Datenstand: Februar 2018 Aufl. Berlin: DERA, 2018
- BattV 1998:** *Verordnung über die Rücknahme und Entsorgung gebrauchter Batterien und Akkumulatoren (Batterieverordnung – BattV) vom 27.03.1998 (BGBl. I Nr. 20 vom 02.04.1998 S 658)*
- Becker, J; Beverungen, D; Winter, M; Menne, S. (Hrsg.):** *Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien. Szenarien, Dienstleistungen und Entscheidungsunterstützung*, Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2019
- Brückner, L; Frank, J; Elwert, T.:** *Industrial Recycling of Lithium-Ion Batteries – A Critical Review of Metallurgical Process Routes*. In: Metals, Jg. 10, 2020, Nr. 8, S. 1107
- Buchert, M; Jenseit, W; Merz, C; Schüler, D.:** *Verbundprojekt: Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzepts für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – LiBRI. Teilprojekt: LCA der Recyclingverfahren*. Darmstadt, 31.10.2011. Endbericht
- COM(2018) 293:** *Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den europäischen Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Region. Nachhaltige Mobilität für Europa: sicher, vernetzt und umweltfreundlich*
- COM(2019) 640:** *Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den europäischen Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Region. Der europäische Grüne Deal*
- COM(2020) 102:** *Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den europäischen Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Region. Nachhaltige Mobilität für Europa: sicher, vernetzt und umweltfreundlich*
- COM(2020) 789:** *Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den europäischen Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Region. Strategie für nachhaltige und intelligente Mobilität: Den Verkehr in Europa auf Zukunftskurs bringen*
- COM(2020) 98:** *Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den europäischen Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Region. Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa*

⁶⁰ Vgl. Becker et al. 2019.

⁶¹ Vgl. Hoyer 2015.

⁶² Vgl. Hanisch et al. 2014.

- Diekmann, J; Hanisch, C; Fröböse, L.:** *Ecological Recycling of Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles with Focus on Mechanical Processes*. In: Journal of The Electrochemical Society, 2017.
- Döhring-Nisar, E; Batterien, S. G. R.:** *Die Welt der Batterien: Funktion, Systeme, Entsorgung*: na, 2001
- Duesenfeld:** *Umweltfreundliches Recycling von Lithium-Ionen-Batterien*. <https://www.duesenfeld.com/recycling.html>. Abruf 19.10.2021
- EG-Richtlinie 1991:** *COUNCIL DIRECTIVE of 18 March 1991 on batteries and accumulators containing certain dangerous substances (91/157/EEC)*
- EG-Richtlinie 1993:** *COMMISSION DIRECTIVE 93/86/EEC of 4 October 1993 adapting to technical progress Council Directive 91/157/EEC on batteries and accumulators containing certain dangerous substances*
- EG-Richtlinie 1998:** *COMMISSION DIRECTIVE 98/101/EC of 22 December 1998 adapting to technical progress Council Directive 91/157/EEC on batteries and accumulators containing certain dangerous substances*
- EG-Richtlinie 2002:** *Richtlinie 2002/96/EG des europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronik-Altgeräte*
- EG-Richtlinie 2006:** *DIRECTIVE 2006/66/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 6 September 2006 on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 1/157/EEC*
- Elwert, T; Goldmann, D; Schirmer, T; Strauss, K.:** *Recycling von Li-Ionen-Traktionsbatterien. Das Projekt LiBRi: Recycling und Rohstoffe*
- Europäische Kommission COM 798:** *Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Altbatterien, zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2020, 2020*
- Fricke J L:** *Jahresbericht/Dokumentation 2008 – Erfolgskontrolle nach Batterieverordnung gemäß § 10 BattV. GRS – Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (Hrsg), Hamburg, 2009*
- GLENCORE:** *Wer wir sind. Unsere Geschichte*. <https://www.glencore.ch/de/wer-wir-sind/unsere-geschichte#:~:text=Glencore%20wurde%201974%20im%20Kanton,%2C%20Kobalt%2C%20Zink%20und%20Kohle/>. Abruf 19.10.2021
- GLENCORE:** *Annual Report – Recycling. Giving metals and minerals a second life*. <https://www.glencore.com/investors/reports-results/2020-annual-report/recycling>. Abruf 19.10.2021
- Hanisch, C; Diekmann, J; Westphal, B; Schoenitz, M; Haselrieder, W; Kwade, A.:** *Recycling of Lithium-Ion Batteries (from Electric Vehicles)*, 06.2014
- Hoffmann, B.:** *Tradition und modernstes Metall-Recycling – Nickelhütte Aue GmbH*. In: *recovery – Recycling Technology Worldwide*, Jg. 5, 2015, Nr. 2
- Hoyer, C.:** *Strategische Planung des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen in Deutschland (Research)*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2015. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2015
- Klimko, J; Oráč, D; Miškufová, A; Vonderstein, C; Dertmann, C; Sommerfeld, M; Friedrich, B; Havlík, T.:** *A Combined Pyro- and Hydrometallurgical Approach to Recycle Pyrolyzed Lithium-Ion Battery Black Mass Part 2: Lithium Recovery from Li Enriched Slag – Thermodynamic Study, Kinetic Study, and Dry Digestion*. In: *Metals*, Jg. 10, 2020, Nr. 11, S. 1558
- KrW-/AbfG 1994:** *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen. (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG) vom 27.09.1994 (BGBl. I S. 2705), zuletzt geändert durch Artikel 5 des Gesetzes vom 22.12.2008 (BGBl. I S 2986)*
- Kwade, A; Diekmann, J. (Hrsg.):** *Recycling of Lithium-Ion Batteries. The LithoRec Way*, Cham: Springer International Publishing, 2018

- Larouche, F; Tedjar, F; Amouzegar, K; Houlachi, G; Bouchard, P; Demopoulos, G. P; Zaghbi, K.:** *Progress and Status of Hydrometallurgical and Direct Recycling of Li-Ion Batteries and Beyond*. In: Materials (Basel, Switzerland), Jg. 13, 2020, Nr. 3
- Liu, C; Lin, J; Cao, H; Zhang, Y; Sun, Z.:** *Recycling of spent lithium-ion batteries in view of lithium recovery: A critical review*. In: Journal of Cleaner Production, Jg. 228, 2019, S. 801–813
- Mark Nicholson:** *The Li-ion battery recycling challenge. What happens to used forklift batteries?* <https://eurekapub.eu/sustainability/2020/11/20/the-li-ion-recycling-challenge>. Abruf 19.10.2021
- Martens, H; Goldmann, D.:** *Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis*. 2. Auflage Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016
- Melin, H. E.:** *State-of-the-art in reuse and recycling of lithium-ion batteries. A research review*, 2019
- Nickelhütte Aue:** *Wir schließen den Kreislauf*. <https://www.nickelhueette-aue.de/index.asp?kaid=20&seite=20100000&bodystart=1>. Abruf 19.10.2021
- Ning, P; Meng, Q; Dong, P; Duan, J; Xu, M; Lin, Y; Zhang, Y.:** *Recycling of cathode material from spent lithium ion batteries using an ultrasound-assisted DL-malic acid leaching system*. In: Waste management (New York, N.Y.), Jg. 103, 2020, S. 52–60
- Pistoia, G; Liaw, B. (Hrsg.):** *Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles. Battery Health, Performance, Safety, and Cost*. Green Energy and Technology, Cham: Springer, 2018
- Retriev Technologies:** *Primary Lithium*. <https://www.retrievtech.com/primarylithium>. Abruf 19.10.2021
- Rothermel, S; Evertz, M; Kasnatscheew, J; Qi, X; Grütze, M; Winter, M; Nowak, S.:** *Graphite Recycling from Spent Lithium-Ion Batteries*. In: ChemSusChem, Jg. 9, 2016, Nr. 24, S. 3473–3484
- Schwich, L; Küpers, M; Finsterbusch, M; Schreiber, A; Fattakhova-Rohlfing, D; Guillon, O; Friedrich, B.:** *Recycling Strategies for Ceramic All-Solid-State Batteries – Part I: Study on Possible Treatments in Contrast to Li-Ion Battery Recycling*. In: Metals, Jg. 10, 2020, Nr. 11, S. 1523
- Schwich, L; Sabarny, P; Friedrich, B.:** *Recycling Potential of Lithium–Sulfur Batteries – A First Concept Using Thermal and Hydrometallurgical Methods*. In: Metals, Jg. 10, 2020, Nr. 11, S. 1513
- Schwich, L; Schubert, T; Friedrich, B.:** *Early-Stage Recovery of Lithium from Tailored Thermal Conditioned Black Mass Part I: Mobilizing Lithium via Supercritical CO₂-Carbonation*. In: Metals, Jg. 11, 2021, Nr. 2, S. 177
- Sinn, T; Flegler, A; Wolf, A; Stübinger, T; Witt, W; Nirschl, H; Gleiß, M.:** *Investigation of Centrifugal Fractionation with Time-Dependent Process Parameters as a New Approach Contributing to the Direct Recycling of Lithium-Ion Battery Components*. In: Metals, Jg. 10, 2020, Nr. 12, S. 1617
- Sojka, R; Pan, Q; Billmann, L.:** 2020: *Comparative study of Li-ion battery recycling processes*
- Sommerfeld, M; Vonderstein, C; Dertmann, C; Klimko, J; Oráč, D; Miškufová, A; Havlík, T; Friedrich, B.:** *A Combined Pyro- and Hydrometallurgical Approach to Recycle Pyrolyzed Lithium-Ion Battery Black Mass Part I: Production of Lithium Concentrates in an Electric Arc Furnace*. In: Metals, Jg. 10, 2020, Nr. 8, S. 1069
- Thomé-Kozmiensky, K; Goldmann, D.:** *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin: TK-Verl., 2012
- Wang, H; Friedrich, B.:** *Development of a Highly Efficient Hydrometallurgical Recycling Process for Automotive Li–Ion Batteries*. In: J. Sustain. Metall., Jg. 1, 2015, Nr. 2, S. 168–178
- Werner, D; Peuker, U. A; Mütze, T.:** *Recycling Chain for Spent Lithium-Ion Batteries*. In: Metals, Jg. 10, 2020, Nr. 3, S. 316
- Xu, P; Dai, Q; Gao, H; Liu, H; Zhang, M; Li, M; Chen, Y; An, K; Meng, Y. S; Liu, P; Li, Y; Spangenberg, J. S; Gaines, L; Lu, J; Chen, Z.:** *Efficient Direct Recycling of Lithium-Ion Battery Cathodes by Targeted Healing*. In: Joule, Jg. 4, 2020, Nr. 12, S. 2609–2626

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.



Abkürzungsverzeichnis

ABS	Antiblockiersystem
AC	Alternating Current
ACEA	European Automobile Manufacturers Association
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil Club
ADC	Analog-Digital-Umsetzer
AFC	Alkaline Fuel Cell
AFM	Axialflussmaschine
ALM	Application Lifecycle Management
AMI	Asynchronous Memory Interface
AP	Acidification Potential
ASM	Asynchronmotor
ASM	Artisanal Small-Scale Mining
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
BattG	Batteriegesetz
BBAC	Beijing Benz Automotive Co. Ltd.
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BEDS	Benteler Electric Drive System
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug
BLDC	Permanentmagneterregte bürstenlose Gleichstrommaschine
BMS	Batteriemanagementsystem
BoP	Balance of Plant
BPP	Bipolarplatten
BTPS	Binaurale Transferpfadsynthese
CAR	Center Automotive Research
CASE	Connected – Autonomous – Shared – Electric
CCC	China Compulsory Certification
CCM	Catalyst Coated Membrane
CCM	Katalysatorbeschichtete Membran
CCS	Combined Charging System

CEN	European Committee for Standardization
CHAdEMO	Charge de Move
CMS	Crash-Management-System
CNC	Computer Numerical Control
CPV	Content per Vehicle
CQC	China Quality Certification Center
CSI	Current Source Inverter
CVM	Control Voltage Module
DC	Direct Current
DCB	Direct Copper Bonded
DESTAT	Desaturierungserkennung
DFMA	Design for Manufacturing and Assembly
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
DMLS	Direktes Metall-Laserschmelzen
DMU	Digital Mock-up
DOD	Depth of Discharge
DRK	Demokratische Republik Kongo
DSP	Digital Signal Processor
EE	Erneuerbare Energie
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EME	Elektromagnetische Emission
EMF	Electro Magnetic Force
EMIF	External Memory Interface
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EMVG	Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EoL	End of Line
EPR	Extended Producer Responsibility
ESD	Elektrostatische Entladung
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
ESS	Energiespeichersystem
ESTG	Einkommensteuergesetz
EuBatIn	IPCEI on European Battery Innovation
EVA	Electric Vehicle Architecture
EVE	Explorative Vehicle Evaluation
FC	Fuel Cell
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
FEM	Finite-Elemente-Methode
FeSi	Eisen-Silizium

FFT	Fast Fourier Transformation
FOC	Feldorientierte Regelung
FPGA	Field Programmable Gate Array
FSM	Fremderregter Synchronmotor
FSW	Friction Stir Welding
FTS	Fahrerloses Transportsystem
GaN	Galliumnitrid
GDL	Gas Diffusion Layer
GEIG	Gesetz zum Aufbau einer gebäudeintegrierten Ladeinfrastruktur
GFK	Glasfaserverstärkte Kunststoffe
GII	Index der geschlechtsspezifischen Ungleichheit
GM	Gleichstrommaschine
GRM	Geschaltete Reluktanzmaschine
GRS	Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien
GTR	Global Technical Regulation
GWP	Global Warming Potential
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungssystem
HGÜ	Gleichstromübertragung
HPC	Hochleistungsladen
HPC	High Power Charging
HSS	Heimspeichersystem
HV	Hochvolt
IAA	Internationale Automobil-Ausstellung
IC	Internal Circuit
ICAO	Internationale Zivilluftfahrtorganisation
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
IME	Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling
IPCEI	Important Projects of Common European Interest
ISO	International Organization of Standardization
ISO	Isolation
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KEP	Kurier-Express-Paket-Segment
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KTO	Kurztrommelofen
LBO	Landesbauordnung
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Costing
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
LCSA	Life Cycle Sustainability Assessment
LEM	Leichtelektronik

LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
LIB	Lithium-Ionen-Batterie
LSV	Ladesäulenverordnung
LTO	Lithium-Titanat
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
MEA	Membran-Elektroden-Einheit
MEB	Modularer E-Antriebsbaukasten
MEET	Münster Electrochemical Energy Technology
MessEG	Mess- und Eichgesetz
MLCC	Multilayer Ceramic Capacitor
MMA	Mercedes-Benz Modular Architecture
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor
MPL	Mikroporöse Schicht
MQB	Modularer Querbaukasten
MsbG	Messstellenbetriebsgesetz
MTPA	Maximum Torque per Ampere
MTPF	Maximum Torque per Flux
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxide
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor
NEA	Netzersatzanlage
NFPA	National Fire Protection Association
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
NiMH	Nickel-Metallhydrid
Nkw	Nutzkraftwagen
NMC	Nickel-Mangan-Cobaltoxid
NMVOC	Non-methane volatile organic compound
NPC	Neutral Point Clamped
NPM	Nationale Plattform „Zukunft der Mobilität“
NSV	Notstromversorgungskonzept
NTC	Negativer Temperaturkoeffizient
NVH	Noise, Vibration, Harshness
OBC	On-Board-Charger
ODP	Ozone Depletion Potential
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OEM	Original Equipment Manufacturer
ÖV	Öffentlicher Verkehr
OWiG	Ordnungswidrigkeiten
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PAI	Polyamidimid
PAngV	Preisangabenverordnung
PCM	Phase Change Material
PEBB	Power-Electronic Building Block

PEEK	Polyetheretherketon
PEM	Production Engineering of E-Mobility Components
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
PFC	Leistungsfaktorkorrektur
PHEV	Plug-in-Hybridfahrzeug (für englisch plug-in hybrid electric vehicle)
PI	Polyimid
Pkw	Personenkraftwagen
PLM	Product Lifecycle Management
PM	Particulate Matter
PM	Permanentmagnet
PMSM	Permanentmagneterregte Synchronmaschine
PRL	Primärregelleistungsmarkt
PSM	Permanenter Synchronmotor
PTFE	Polytetrafluorethylen
PV	Photovoltaik
PVD	Physical Vapor Deposition
PWM	Pulsweitenmodulation
PWR	Pulswechselrichter
REEV	Range Extender
RT	Raumtemperatur
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SEI	Solid Electrolyte Interphase
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SiC	Siliziumkarbid
SLB	Second-Life-Batterie
S-LCA	Social Life Cycle Assessment
SLM	Selektives Laserschmelzen
SLS	Selektives Lasersintern
SM	Synchronmaschine
SMC	Sheet Molding Compound
SmCo	Samarium-Cobalt
SoC	State-of-Charge
SoF	State-of-Function
SOFC	Solide Oxide Fuel Cell
SoH	State-of-Health
SoP	State-of-Power
SoP	Start of Production
SPC	Source Path Contribution
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SRAM	Static Random Memory Access
StromStG	Stromsteuergesetz
SWM	Stadtwerke München

SynRM	Synchronreluktanzmaschine
TBL	Triple Bottom Line
TCO	Total Cost of Ownership
TFM	Transversalflussmaschine
THD	Total Harmonic Distortion
TIM	Thermal Interface Material
TTIP	Transatlantic Trade and Investment Partnership
UHPC	Ultra High Power Charging
UL	Underwriters Laboratories
UNECE	Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen
UNEP	United Nations Environment Programme
USA	United States of America
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
V2G	Vehicle-to-Grid
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VHDL	Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language
VIBN	Virtuelle Inbetriebnahme
VSI	Voltage Source Inverter
VTOL	Vertical Take-off and Landing
WEF	World Economic Forum
WEG	Mietrecht- und Wohneigentumsgesetz
WEMoG	Wohnungseigentumsmodernisierungsgesetz
WHO	World Health Organisation
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e. V.

Stichwortverzeichnis

A

Abiotic Depletion Potential 633
abiotischer Ressourcenabbau 633
Abo-Modell 592
Abrechnungsmodell 601
Abrechnungsmodus 588
Abrechnungssystem 461, 599, 622
AC/DC-Wechselrichter 115
Acidification Potential 632
ACTVATE 199
Additive Fertigung 239
Additive Manufacturing 239
Additive Zellfertigung 271
Adhäsion 242
Agile Fahrzeugentwicklung 348
Agile Methode 349
Aging 266
Akustik 380
Akustischer Komfort 384
Akzeptanz 367
All-Solid-State Batterie 100, 559
Altbatterie 660
Aluminiumkarosserie 243
Analog-Digital-Umsetzer 199
Änderungsmanagement 223
Android Auto 582
Angebot
 Angebotsrepositionierung 621
 Diversifizierung 588
Anlaufeinheiten 219
Anlaufmanagement 218
Anlauforganisation 219
 Gateway-Konzept 220
 Organisationselemente 220

Anlaufstrategie 218
Anode 131
Anreizstruktur 625
Anreizsystem 598
Anschaffungskosten 215
Antriebsstrang 107
 konventionell 108
 neue Komponenten 109
 Wertschöpfung 558
Application Lifecycle Management 350
Applikation 582
Applikations-Lebenszyklusverwaltung 350
Arbeitnehmer 638
Arbeitsaufwand 556
Arbeitsstunde 556
Arbitrage-Geschäft 516
Asynchronmaschine 117, 169
Aufbau- und Verbindungstechnik 314
Aufenthaltszeit 479
Aufschrumpfen 309
Automobilproduzent 607
Autonomisierung 546

B

Backend-Betreibende 517
Backend-System 462
Basisfahrzeugkonzept 335
Batterie 406
 Aktivmaterial 260
 batterieelektrischer Bus 443
 Batterieelektroden 260
 Batteriegelsetz 411
 Batterieindustrie 639

- Batterie (*cont.*)
- Batteriemanagementsystem 119, 150, 194, 269
 - BMS-Slave-Platine 268
 - Master-BMS 269
 - Batteriemodul
 - Herstellung 260
 - Montage 269
 - Batteriepack 269, 406
 - Batterieproduktion 575, 649
 - Batterie-Recycling 688
 - Batterie-Recycling-Verfahren 699
 - Batterieschrott 695
 - Batteriesystem
 - Geometrie 77, 78
 - Batterietest 368
 - Batteriezellproduktion 270, 572
 - Batteriezellproduktionsstätte 572
 - Betriebstemperatur 205
 - Dichtung 270
 - Dispergierprozesses 260
 - Eigentümermodell 665
 - Elektrodenfertigung 260
 - Heizen 204
 - Herstellung
 - Aging 266
 - End-of-Line (EoL)-Test 266
 - Flashen 269
 - Formierung 265
 - Grading 266
 - Slitten 261
 - Slurry 260
 - Stapeln 262
 - Trocknungsprozess 261
 - Vakuumtrocknen 262
 - Vereinzeln 262
 - Verspannung 268
 - Vormontage 268
 - Zellversiegelung 263
 - Hochvoltsysteme 122
 - Kostenfaktor 372
 - Montage 259
 - Preis 101
 - Recycling-Prozess 690
 - Sicherheitsmaßnahme 407
 - Sicherheitsstandard 407
 - Thermomanagement 204
 - Transportnorm 414
 - Zertifizierung 413
 - Baukastenkonzept 607
 - Baukastensystem 254, 372
 - Bauordnungsrecht 529
 - Bauplanungsrecht 529
 - B6C-Topologie 196
 - Berstscheibe 270
 - Beschaffungsmanagement 220
 - Beschleunigungswiderstand 94
 - Bidirektionalität 622
 - Bilanzrechnung 627
 - Binaurale Transferpfadsynthese 385
 - Blechlamelle 291
 - Blechpaket 296
 - Bonddraht 315
 - Bonden 315
 - Boxenstopffertigung 89
 - Branchenwertschöpfung 620
 - Break-even-Point 649
 - Break-even-Punkt 570
 - Breitenmarkt 566
 - Brennstoffzelle 153, 363
 - Absorptionsspeicher 160
 - Aktivierungsverluste 156
 - Alkaline Fuel Cell 155
 - Bipolar-Halbplatte 155
 - Bipolarplatten 158
 - Catalyst Coated Membrane 158
 - Control Voltage Module 283
 - Dichtheit 285
 - Direct Methanol Fuel Cell 155
 - Drain 162
 - Dreiphasengrenze 155
 - End-of-Line-Prüfung 284
 - Herstellung 275
 - Balance-of-Plant 283
 - Bipolarplatte 276
 - Finalisierungsprozess 282
 - Gasdiffusionslage 279
 - Graphitierungsprozess 280
 - Harzbad 279
 - Komprimieren 282
 - Membran-Elektroden-Einheit (MEA) 278
 - Mikroporöse Schicht 280
 - Prüfgas 277
 - Slurry 279
 - Stack 281
 - Stapeln 282
 - Trocknung 279
 - Verspannen 282

- Konzentrationsüberspannungsverluste 156
Kryogentechnik 160
Leistungselektronik 163
Molten Carbonate Fuel Cell 154
Phosphoric Acid Fuel Cell 154
Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell 154
Purge 162
Solide Oxide Fuel Cell 154
Brennstoffzellen-Stack 120, 157
Brennstoffzellensystem 275
 Rezirkulationsgebläse 283
Buchungssystem 595
Bus 434
Busbar 267, 268
Bypass-Montage 335
By-Wire-Technologie 100
- C**
C++ 199
Car as a Platform 580
CarPlay 582
Carsharing 19, 446, 594, 595, 601
Carsharing-Anbieter 595
Carsharing-Standort 596
CCS-Stecker 375
CEE-Steckdose 374
Cell balancing 270
Cell-to-Chassis 100, 220
Cell-to-Pack-Ansatz 119, 272
Cell-to-Pack-System 120
Cell-to-Vehicle-System 120
CHAdEMO 458, 516
CHAdEMO-Stecker 375
Charge Point Operator 463
China Compulsory Certification 409
China Quality Certification Center 414
City-Roller 445
Closed-Loop-Recycling 701
CNC-Fräsen 237
CO₂-Äquivalent 646
CO₂-Flottengrenzwert 45
CO₂-Fußabdruck 651
CO₂-Laser 241
Combined Charging System 458
Computer Numerical Control (CNC) 238
Connected Life 579
Content per Vehicle 556
Conversion Design 74, 85, 250, 254, 335
Corona-Pandemie 565, 620
Cradle-to-End-of-Life 631
C-Rate 131, 146
Current Source Inverter 196
- D**
Dargebotsabhängigkeit 500
Datenverfügbarkeit 645
DC/DC-Wandler 115, 192, 284, 460
DC-Schiene 460
DC-Zwischenkreis 318
Decal 279
Decal-Verfahren 278
Dekomposition 342
DEKRA 355
Demontage 627, 674
Demontageabfolge 676
DESAT-Erkennung 322
Desaturierungserkennung 322
Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) 224
Design for Recycling 695
Design Review 345
Destination Charging 477, 534
Deutsches Institut für Normung 407
Dienstleistung
 Refurbishment 670
 Wertschöpfung 579
Dienstleistungsangebot 599
Dienstleistungsorientierter Geschäftsmodelltyp 615
Dienstleistungsorientierung 619
Dienstwagen 428
Differenzialgetriebe 114
Digitalisierung 542, 561
Digital Mock-up 345
Digital Signal Processors 199
Diode 190
Diodengleichrichter 195
Diodenlaser 241
Direct-Copper-Bonded (DCB)-Substrat 314
Direct-to-Consumer-Geschäft 666
Disassembly Sequence Planning 676
Dispergierprozesses 260
Divergenz 342
Doppelzählungseffekt 635
Dosierlanze 263

- Downstream 586, 609
 Drahtbonden 315
 Drahtziehverfahren 299
 Druckgussverfahren 237
 Dual Active Bridge 195
 Dünnwandspritzguss 306
- E**
- Early Adopter 440
 Early Stage Lithium Recovery 694
 E-Bike 19, 434
 E-Carsharing 594
 ECE-Abkommen 412
 ECE-Homologation 408
 ECE-R100-Norm 409
 ECE-Regelung 408
 Effizienzbestrebung 621
 E-Flotten 593
 EG-Fahrzeugklasse 356, 357
 Eichgesetz 522
 Eichrecht 530
 Eigenstörfestigkeit 402
 Eigenverbrauch 461
 Einkommensteuergesetz 522
 Einleittersystem 302
 Einsparpotenzial 568
 Einsparungspotenzial 568, 570
 Einspeisemanagement 500
 Electrically Erasable Programmable Read-
 Only Memory (EEPROM) 199
 Electro-Hydraulic Fracturing 694
 Electro Magnetic Force 310
 Elektrifizierung 541
 Elektrifizierungsgrad 361
 Elektrische Maschine 165, 289
 Axialflussmaschine 167
 Blechpaket 173
 End-of-Line-Prüfung 308
 Feldschwäcbereich 169
 Hairpinleiter 177
 Hartmagnete 175
 Isoliersystem 306
 Isolierung 179
 Lagerung 182
 Permanentmagnet 181
 permanentmagneterregte bürstenlose
 Gleichstrommaschine 168
 Radialflussmaschine 166
 Reluktanzmaschine 171
 Reluktanzrotor 167
 Remanenzflussdichte 175
 Statorpole 176
 Statorspulen 176
 Synchronreluktanzmaschine 171
 Transversalflussmaschine 166
 Ummagnetisierungsfrequenz 173
 Verlustfaktor 181
 Wicklung 176, 177
 Wirbelstromverluste 174
 Wirkungsgrad 181
 Elektrische Sicherheit 370
 Elektrischer Antriebsstrang 113
 Elektrizitätsversorgungsunternehmen 530
 Elektrodenfertigung 260, 271
 Elektrofahrzeug 577
 Elektrolyt 263
 Elektromagnetische Emission 189
 Elektromagnetische Verträglichkeit 189, 192,
 354, 396
 EMV-Prüfung 398
 Schutzmaßnahme 397
 Elektromobilitätsgesetz 529
 Elektromobilitätssystem 587
 Elektromobilwirtschaft 606
 Elektromotor 290
 Bandagierung 296
 Geräusch 387
 Kugellager 309
 Luftspalt 292
 Paketieren 291
 Radialflussmaschine 116
 Statorgeometrie 292
 Wertschöpfung 561
 Elektronenstrahlschweißen 245
 Elektrostatische Entladung 323
 Emissionsreduktion 534
 E-Mobility-Allee 488
 E-Mobility-Carré 488
 End of Life 629, 644
 Endmontage 308
 End-of-Line (EoL)-Test 266
 End-of-Line-Prüfung 270
 Energiebedarf 498, 509
 Energiemakler 599
 Energiemanagementsystem 601
 Energiemix 18
 Energieträger 498, 499
 Energieverbrauch 469
 Energieversorger 621

- Energieversorgungsunternehmen 492, 575, 610
Energiewirtschaft 622
Energiewirtschaftsgesetz 513, 522, 530
Entkopplung 124
Entwicklungsmodell 346
Entwicklungsorientierte Kooperation 607
EoL-Test 267, 269
Epoxidharz 243
Erbringungszeitraum 495
Erderwärmungspotenzial 648
Erneuerbare Energie 498, 649
Erneuerbare-Energien-Gesetz 530
E-Roaming 622
E-Scooter 445
E-Scooter-System 444
ESD 323
Esson'sche Ziffer 181
EU-Batteriedirektive 688
EU-Fahrzeug-Einzelbetriebserlaubnis 365
European Battery Alliance 572
European Committee for Standardization 407
European Network of Transmission System Operators for Electricity 503
Eutrophication Potential 632
Eutrophierungspotenzial 632, 647
EU-Typgenehmigung 364
Explorative Vehicle Evaluation 392
Extended Producer Responsibility 660
- F**
Fahrerloses Transportsystem (FTS) 255
Fahrleistung 469
Fahrrad 432
Fahrradverleihsystem 444
Fahrzeug
 Mietoption 592
Fahrzeugaußengeräusch 392
Fahrzeuggeschäft 591
Fahrzeugklasse 356
Fahrzeugklasse L 358
Fahrzeugklasse L7e 360
Fahrzeugklasse M1 359
Fahrzeugnutzungsmuster 431
Fahrzeug-Ökosystem 603
Fahrzeugplattform 568
Fahrzeugunterklasse 357
Fahrzeugverkauf 588
Fast-Fourier-Transformation 386
FCKW-11 647
Federbeinaufnahme 237
Feinstaub 534
Feinstaubemission 534, 647
Festkörperbatterie 144
 Lithium-Schwefel-Batterie 145
 Metall-Luft-Batterie 145
 Natrium-Ionen-Batterie 146
Feststoffbatterie 271
Field Programmable Gate Array 199
Finite-Elemente-Methode 180
First-Mover-Strategieansatz 219
Fixkosten 568
Flächenkonkurrenz 535
FlexBody 90
Fließprinzip 252
Flottenmanagement 593
Flowfield 276
Flowfield-Dichtung 276
Fluorchlorkohlenwasserstoff 647
Flyereinzugwicklung 303
Flyerwickeln 303
Fördermittel
 internationale 54
 selbstfahrendes Chassis 256
Förderprogramme 33, 48
Formalisierungsgrad 605
Formierung 265
Fräsen 238
Free Floating 444
Free-Floating-Carsharing-System 447
Freibiegen 233
Fremderregte Synchronmaschine 116, 168
 Herstellung Rotor 295
Frequenzstabilität 661
Friction Stir Welding – FSW 242
Front-Loading 331
Fügetechnik 244
Füllfaktor 301
Full-Service-Modell 599
Functional Unit 631
Funktionale Sicherheit 371
Funktionsbindung 124
- G**
Gateshaping-Technik 323
Gate-Treiberschaltung 320
Geländefahrzeug 358
Generatives Fertigungsverfahren 239
Geräusch- und Schwingungsprüfung 310

Geräuschpegel 394
 Geräuschqualität 382
 Gesamtfahrzeugkonzept 343
 Gesamtfahrzeug-Typgenehmigung 365
 Gesamtpositionierung 586
 Geschäftsfeld 558
 Geschäftsmodell 539, 585, 595, 613, 617
 Fahrzeugverkauf 591
 Flottenkonzept 593
 kooperativ 604
 Multimodale 596
 serviceorientiert 591
 Geschäftsmodelloption 616
 Geschäftsmodelltyp 591, 618
 Gesenkbiegen 233
 Gesetz zum Aufbau einer gebäudeintegrierten
 Lade- und Leitungsinfrastruktur für
 die Elektromobilität 526
 Gießereitechnik 237
 Gießkammer 237
 Glasfaserverstärkte Kunststoffe – GFK 230
 Gleichrichter 459
 Gleichspannung 188
 Gleichzeitigkeitsfaktor g 509
 Global Technical Regulation 370, 413
 Global Warming Potential 632, 646
 Guobiao (GB)-Standards 414
 Gussform 237
 Gussteil 237

H

Hairpin 208, 290, 298, 300, 305
 Hairpinwicklung 306
 Halbbrücke 192
 Halbleiterchip 315
 Halbleitertechnologie 190
 Handlaminierten 228–230
 Harzbad 307
 Herausforderung 29
 Automobilhersteller 56
 Produktionsperspektive 35
 technisch 33
 Verbraucherperspektive 46
 Zulieferer 43
 Historie 10
 Antriebsquelle 4
 Hochspannungs-Gleichstrom-
 Übertragungssystem 188
 Homologation 408, 412

Hörbereich 382
 Horizontale Kooperation 604, 608
 HT-Soaking 264
 Humantoxizität 649
 Humantoxizitätspotenzial 647
 HV-Interlock 376
 Hybrid 361
 Hybridantrieb 361
 Hybridfahrzeug 71
 Plug-in-Hybridfahrzeuge 71
 Power Split-Hybrid 71
 Hydrometallurgisches Batterie-Recycling 700

I

IGBT 320
 Immersionskühlung 206
 Important Projects of Common European In-
 terest 572
 Imprägnierharz 307
 Imprägnierverfahren 307
 Index der geschlechtsspezifischen Un-
 gleichheit 639
 Infotainmentsystem 582
 Inline Design 86
 Insulated-Gate Bipolar Transistor 191
 Integrierte Schaltung 398
 Interkalation 212
 Interleaving 193
 Internal Circuit 398
 International Organization for Standardiz-
 ation 407
 Internationale Zivilluftfahrtorganisation 415
 Intersystem-Beeinflussung 401
 Isolationsüberwachungsgerät 369
 Isoliertesystem
 Typ I 180
 Typ II 180
 ISO-Wächter 369

J

Jahresfahrleistung 430, 435
 Justageprozess 338

K

Kabelverbindung 373
 Kältekreislauf 204, 210
 Kältemittel

Chiller 210
Kapazitäten 566
Kapitalisierung 604
Karosserie 80, 240
 Baukasten 88
 Eigenschaftsmanagement 81
 Fügetechnik 240
 Leichtbauwerkstoff 240
 selbsttragend 81
 Werkstoffe 84, 90
Kernenergieausstieg 499
Kernverlust 190
Kinderarbeit 638
Kleben 242
Klebstoff 242
Klimakompressor 204
Klimawandel 646
Kobalt 574, 638
Kobaltvorkommen 573
Kohäsion 242
Kohleausstieg 499
Komfortbereich 383
Kondensator 318
Konfigurationsmanagement 350
Konnektivität 542, 582, 626
Konvektionstrocknung 271
Konvergenz 342
Konzeptphase 342, 343
Kooperation 606, 610
Kooperation branchenferner Unternehmen 608
Kopplungsmechanismus 402
Kopplungsmodell 400
Kopplungspfad 400
Kostenbetrachtung Ressourcen 575
Kostendruck 30
Kosteneffizienz 306
Kosteneinsparung 581
Kostenführer 546
Kostenmanagement 223
Kosten-Nutzen-Rechnung 587
Kostenreduktion 567
Kostensenkung 567
Kraftfahrt-Bundesamt 355, 364, 411
Kraftrad 433
Kreislaufmanagement 627
Kreislaufwirtschaft 691
Kühlkreislauf 210
Kühlmittel 208
Kundennahe Dienstleistung 603
Kupferdraht 299

Kupferfüllfaktor 178
Kupferlackdraht 297
Kurier-Express-Paket-Segment 448
Kurzzeitzulassung 428

L

Ladebedarf 468, 469, 479
 öffentlicher Raum 478
 Prognose 481
 Typisierung 470
Lade-Hub 523, 533
Ladeinfrastruktur 441, 475, 487, 507, 523, 529,
 576, 577
 Authentifizierung 462
 batterieelektrischer Bus 443
 Batteriespeicher 461
 Betrieb 529
 Betriebskosten 578
 Einwohnerdichte 491
 Engpasssensitivität 515
 Genehmigungsfreiheit 524
 Investitionskosten 490
 Kartenterminal 462
 Nachfrage 538
 Priorisierung 515
 privat 473
 Spannungsregelung 515
 Sperrzeit 514
Ladeinfrastrukturbedarf 468
Ladeleistung 480, 482, 509, 513
Ladeleistungsprofil 483
Lademodus 373
Laden
 AC-Lademethode 374
 AC-Ladesäule 456
 AC-Ladestation 377, 453
 Ad-hoc-Laden 456
 DC-Ladestation 377
 DC-Schnelllader 453
 High Power Charging 457
 induktives Laden 378
 Ladeinfrastruktur 377
 Ladesäule 454
 Schnellladen 378
 Schnellladesäule 454
 Schnellladung 375
 Schuko-Notlader 454
 Ultra High Power Charging 457
Ladeort 470

- Ladeprofil 483
 - Ladesäulenstruktur 595
 - Ladesäulenverordnung 522
 - Ladesteckertyp 373
 - Ladezustand 494
 - Landesbauordnung 523, 529
 - Laser-Doppler-Vibrometer 310
 - Laserstrahlschweißen 241, 245
 - Last Mile 448
 - Lastenfahrrad 445
 - Lastspitze 512, 514
 - Laststeuerungsanwendung 661
 - Lean Production 250
 - Leasingangebot 592
 - Lebensdaueruntersuchung 367
 - Lebenszykluskostenrechnung 634
 - Leerlaufprüfung 310
 - Leichtbau 93
 - Gewichtsspiralen 96
 - Kosten 95
 - Leichtelektromobile 101
 - Leichtes Nutzfahrzeug 435
 - Leistungsbedarf 481
 - Leistungselektronik 187, 318
 - Elektrodenmaterial 318
 - Leitverlust 190
 - Luftkühlung 317
 - Schaltverlust 190
 - Topologie 189
 - Wertschöpfung 561, 562
 - Leistungsfaktorkorrektur 195
 - Leistungsspitze 461, 509
 - L7e-Kategorie 101
 - Lieferantenmanagement 220
 - Lieferkette 638
 - Life Cycle Costing 630
 - Life Cycle Inventory 632
 - Life Cycle Sustainability Assessment 627, 635
 - Li-Ion-Fluff 700
 - Linearwickeln 303
 - Lithium-Eisen-Phosphat 644
 - Lithium-Ionen-Batterie 559
 - Betriebstemperatur 205
 - Demontage 674
 - Depth of Discharge 136
 - 18650er-Zelle 139
 - Heizen
 - Heizmatten 206
 - Interkalationsreaktionen 205
 - Lithium-Luft-Batterie 145
 - Lithium-Plating 135
 - Materialbedarf 141
 - Materialkosten 573
 - Pouch-Bag-Zellen 140
 - Recycling 142
 - Remanufacturing 681
 - Rohstoffe 637
 - Second Use 656
 - Sicherheit 137
 - Sozialbilanz 637
 - State of Charge 150
 - State of Health 681
 - State of Power 150
 - UN-Nummer 415
 - UN T 38.3-Vorschrift 415
 - Verschaltung 149
 - Wertschöpfung 560
 - Zyklenbelastung 147
 - Zyklenlebensdauer 133
 - Lithium-Ionen-Batterien 114, 130
 - Kosten 140
 - Recyclingverfahren 692
 - Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid 644
 - Lithium-Nickel-Kobalt-Mangan-Oxid 644
 - Lithium-Plating 205
 - Lithiumrecycling 574
 - Lithiumvorkommen 573
 - Live and Move 618
 - Logistikleistung 222
 - Logistikmanagement 221
 - Lösungsorientierung 619
 - Lösungsraum 344
 - Lösungsraummanagement 330
 - Löten 244
 - Luftkühlung 207
 - Aktiv 206
 - Passiv 206
 - Luftschadstoff 647
 - Luftwiderstand 94
- M**
- Machine Learning 675
 - Magnetika 319
 - Magnetisierung 296
 - Mangan 639
 - Mangansulfat 639
 - Mannesmann-Verfahren 233

- Marktanteil 549
 - Marktdurchdringung 18, 439, 572, 577
 - Markthochlauf 429, 577
 - MarkthochlaufszENARIO 573
 - Marktvolumen 572
 - Master-Slave-Topologie 151
 - Materialwert 556
 - MATLAB/Simulink 199
 - Matrize 234
 - Maximale gesamte Ladeleistung 511
 - Maximum Torque per Ampere 199
 - Maximum Torque per Flux 199
 - Mechanisches Fügeverfahren 243
 - Mega-Zulieferer 546
 - Membran-Elektroden-Einheit 280
 - Messrecht 530
 - Messstellenbetriebsgesetz 522
 - Mess- und Eichgesetz 522
 - Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET) 191
 - Metallbedarf 639
 - Micro-Clinching 244, 245
 - Micro-Hub 448
 - Mikro-Hybrid 362
 - Mild-Hybrid 362
 - Miller-Clamp-Funktionalität 322
 - Mineralölkonzern 599
 - Mittelklasse 554
 - Mittelspannungsnetz 507
 - Mittelwertindikatoren 632
 - Mittlere Fahrtweite 430
 - Mittlere Jahresfahrleistung 440
 - Mobilitätsdienstleistung 579, 601
 - Mobilitätsverhalten 578
 - Mobilitätszeitbudget 426
 - Modal Split 445
 - Modularer E-Antriebs-Baukasten 552
 - Modulationsfrequenz 383
 - Modulbaukästen 332
 - Montage 251
 - Antriebseinheit 253
 - Automatisierung 252
 - Datenverarbeitung 252
 - Handhabung 251
 - Justage 251
 - Montageorganisation 252
 - Montageprozess 251
 - Verrichtungsprinzip 252
 - Montageskalierbarkeit 337
 - Montagesystem 338
 - MOSFET 316, 320
 - Motorrad 432
 - Multilayer Ceramic Capacitor 319
 - Multimodaler Transport 596
 - Multimodalität 427
 - Multiport-Topologien 189
- N**
- Nachhaltigkeit 627
 - Ökonomie 634
 - Systematik 630
 - Nachhaltigkeitsmethode 630
 - Nachnutzungsszenario 662
 - Nadelwickeln 303
 - Natrium-Ionen-Batterie 644
 - Nd:YAG-Laser 241
 - Neodym-Magnet 295
 - Netzanschlusspflicht 523
 - Netzausbau 513
 - Netzausbaukosten 512
 - Netzbetrieb 503
 - Netzdienstleistung 495
 - Netzentgelt 513, 515
 - Netzentwicklungsplan 500
 - Netzersatzanlage 663
 - Netzintegration 497, 512
 - Netzplanung 503
 - Netzstabilität 516
 - Netzüberlastung 512
 - Netzverstärkung 513
 - Netzwerksteuerung 614
 - Neutral Point Clamped 197
 - Neuzulassung 517
 - Neuzulassungen 17, 40
 - BEV Deutschland 20
 - nach Antriebsart 44
 - Nickelvorkommen 573
 - Niederspannungsanschlussverordnung 523
 - Niederspannungsnetz 507
 - Niedervoltsysteme 122
 - Noise, Vibration, Harshness 354, 379
 - Non-methane volatile organic compound 647
 - Normen 366
 - Normungsinstitution 407
 - Notstromversorgungskonzept 663
 - NTC 316
 - Nullserie 218

- Nutisolation 297, 306
Nutzenversprechen 585
Nutzfahrzeug 434
Nutzkraftwagen 368
Nutzungsinformationen 680
Nutzungsszenario 597
- O**
Oberklasse 554
OEM 327
Öffentliche Ladeinfrastruktur 489
Öffentlicher Ladebedarf 476
Öffentlicher Verkehr 426, 443
Offshore-Windenergieanlage 506
Ökobilanz 631, 644, 648, 650
 Quantifizierung 631
 Ressourcennutzung 647
Ökobilanz-Studien 644
Ökologie 648
Ökotoxizitätspotenzial 647
Omni-Channel-Vertriebskanal 592
On-Board Charger 115, 253, 377, 397
Onshore-Windenergieanlage 506
Open Charge Alliance 463
Open Charge Point Protocol 463
Ordnungswidrigkeiten 530
Original Equipment Manufacturers 327
Orthozyklische Wicklung 302
Ozon 646
Ozone Depletion Potential 646
- P**
Packaging 76, 109, 111
Parallele Montagelinie 335
Parallelisierung 460
Parkdauer 483
Parken 430
Parkraum 535
Passives Bauelement 318
Peak Shaving 661
Pedelec 432, 442
 Jahresfahrleistung 442
 Verleihsystem 444
Peer-to-Peer-Kontext 595
Permanentmagneterregte Synchronmaschine
 116, 168
Personenwirtschaftsverkehr 447
Phase Change Material 317
Phase Shedding 193
Phasenwechselmaterial 206
Photochemische Oxidantienbildung 647
Photovoltaikeinspeisung 499
Photovoltaik-Leistung 500
Physical Vapor Deposition – PVD 276
Pioniergewinne 219
Pkw-Bestand 429
Planarkern 320
Plattform 125, 589, 616
Plug&Charge 464
Plug-in-Hybrid 362
Polyamidimid 300
Polyetheretherketon 300
Polyimid 300
Polyurethan 267
Polyurethanklebstoff 243
Pouch-Zelle 262, 267
Power-Electronic Building Block 193
Powerline Communication 514
Powerline-Lösung 514
Power-to-Gas 502
Power-to-Heat 502
Power-to-X 502
Pre-Charging 264, 265
Preis 566
Preisangabenverordnung 522, 530
Press Rolling/Vibration 264
Primärregelleistungsmarkt 661
Prismatische Zelle 263, 267
Product Backlog 334
Product Increments 334
Product Lifecycle Management 350
Produktdefinition 342
Produktentstehungsprozess 219, 221, 327
Produktentwicklungsprozess 341
Produktherstellung 343
Produktionsmanagement 222
Produktionsmenge 238
Produktionsprozess 249
Produktionsstandort 553
Produktionsstätte 554
Produktionsverfahren 232
Produktionsvolumen 552
Produkt-Lebenszyklusverwaltung 350
Produktlinienanalyse 629
Produktvalidierung 343
Produktvariantenflexibilität 253

Produktverbreiterung 547
Profilwalzen 233
Profitabilität 569, 570
Prognose 566
Prognostizierter Absatz 566
Prototyp 332
Proximity-Effekt 190
Prozessplanung 342
Prozesssteuerung 252
Prüflabor 368
Prüfzeichen 412
Psychoakustik 382
Pufferspeicher 461
Pufferung 461
Pulswechselrichter 253
Pulsweitenmodulation 193, 199
Purpose Design 75, 87, 250, 254, 335
Pyrometallurgisches Batterie-Recycling 698

R

Radnabenantrieb 112
Radnabenmotor 71
Radnaher Motor 71, 112
Ragone-Diagramm 133
Range Extender 112, 363
Rapid Prototyping 333
Rapid Tooling 333
Rapid-Prototyping 239
Recoverability 645
Recycling 627, 646, 656
Recyclingfähigkeit 648
Recycling-Quote 674
Refurbishment 627, 670
Regionaler Energieversorger 599
Regulierung 541, 625
Rekuperation 82, 102, 111, 362
Reluktanzmaschine 197
Remanufacturing 627, 656, 669, 679, 682
Repair 627
Resequenzierung 338
Reserven 573
Resolver 309
Ressourcen 573, 645
Ressourcenknappheit 680
Re-Use 656
Rezyklateinsatz 691
Rezyklatqualität 694
Ridehailing 594

Ridepooling 594
Ridesharing 594
Rippelstrom 190
Road Vehicles Recyclability 645
Rohstoffabhängigkeit 575
Rohstoffvorkommen 573
Rollwiderstand 94
Rotor 114
Rotorfertigung 293
Rotorkäfig 297
Rotorwelle 293
 Eindehnen 294
 Wuchten 294
Rücknahmepflicht 680
Rückspeisung 376, 378
Rührreischweißen 242
Runddrahtwickelverfahren 304
Rundzelle 263, 267

S

Sachbilanz 632, 645
Sandguss 237
Sandgussverfahren 237
Sattelzugmaschine 434
Schadstoffemission 534
Schadstoffentfrachtung 696
Schalldruck 380
Schallfeldkenngröße 380
Schaltfrequenz 190
Schirmung 405
Schlackephase 697
Schnellladeinfrastruktur 489
Schnellladekapazität 576
Schnellladepunkt 577
Schuko-Steckdose 374
Schwarmmontage 89
Schweres Nutzfahrzeug 448
Schwerlastnutzfahrzeug 448
Scrum 327, 349
Scrum-Ansatz 333
Second Use 656
 Verkaufszahl 657
Second-Life-Akku 659
Second-Life-Anwendungen 657
Second-Life-Batterie 659, 660
 Performance-Standard 665
 Restwert 660
 Sicherheits-Standard 665

- Second-Use-Anwendung 627
 Sektorkopplung 501
 Sekundärisolation 297
 Sekundärrohstoff 575
 Sensitivitätsanalyse 633, 651
 Serienanlauf 218
 Serienentwicklung 344
 Servitization 539, 614
 Share-Bikes 444
 Shared Micromobility 444
 Sheet-Hydroforming 277
 Sheet Molding Compound 231
 Shunt-Widerstand 316
 Sicherheitstest 367
 SiC-Schottky-Diode 192
 Side-Loading 332
 Skaleneffekt 327, 570, 615
 Skalierbarkeit 330
 Skin-Effekt 190
 Skin-Effekt-Verlust 320
 Slave-Platine 267, 268
 Smart Charging 464
 Smart Grid 379, 600
 Smart Home System 600
 Smart Metering 600, 622
 Smartphoneintegration 582
 SMC-Pressen 228, 229
 Snubber-Schaltung 319
 Social Hotspot Database 637
 Social Life Cycle Assessment 629, 635
 Society of Environmental Toxicology and Chemistry 635
 Software Engineering 348
 Solid Electrolyte Interface 265
 Solid Electrolyte Interphase 135
 Solidifikation 692, 696
 Solventextraktion 696
 Sommersmog 647
 Sonotrode 244
 Sound Branding 391
 Sounddesign 391
 Sound-Engineering 388
 Source Path Contribution 386
 Sozialbilanz 635
 Space-Frame-Knoten 236
 Spannungsniveaus 121
 Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) 250, 252
 Sperrschichttemperatur 317
 Spezifikationsmanagement 330
 Spitzenglättung 512
 Spitzenlast 509
 Spotmarkt 516
 Sprint Planning 334
 Spritzgießen 228, 229, 231
 Spulenkörper 302
 Stadtwerk 599
 Stakeholder 619, 636
 Stakeholder-Kategorien 636
 Standardverbrauchsdaten 645
 Stanzhub 290
 Start of Production (SoP) 218
 State of Charge (SoC) 265, 494
 Static Random Memory Access (SRAM) 199
 Stator 114
 Statorblech 290
 Statornutkühlung 208
 Statorproduktion 297
 Steckspulentechnologie 304
 Steckverbindung 373
 Steckverbindungen 405
 Steer-by-Wire 100
 Stellplatz 441, 476
 Ladeinfrastruktur 578
 Stellplatzsatzung 527
 Steuerungssignal 322
 Stickstoffoxid 647
 Stirnwand 235
 Störabstand 400
 Störquelle 400
 Störsenke 400
 Strangpressen 233
 Strombörse 515
 Strommix 649
 Stromnetz 661
 Strompreis 515
 Stromsteuergesetz 522
 Stromversorger 610
 Stückzahl 228
 Subgasket 279
 Synchrongleichrichtung 191
 Systemgrenze 644
- T**
- Tagesfahrleistung 578
 Tagesfahrprofi 483
 Tankstelle 533
 Taylorismus 348
 Technische Prüfstelle 355

Telekommunikationsbranche 600
Temperatursensoren 316
Terzband 394
Thermal Interface Material 314, 317
Thermal Runaway 205
Thermischer Widerstand 317
Thermoformen 228–230
Thermomanagement 79, 109, 203, 270
 Brennstoffzelle 162
 3-D-Simulationen 212
 Entlade- und Ladevorgang 205
 Klimatisierung des Innenraums 209
 Schnellladevorgang 206
 Thermische Isolierung 206
 Vorkonditionierung 210
Thermomanagementsystem 205
Thyristor 188
 Gate 190
 Schaltverluste 191
Tiefziehen 235
Tiefziehverfahren 235
Tier-0,5-Zulieferer 546
Topologieoptimierung 99
Total Cost of Ownership 569
Total Harmonic Distortion 196
Traktionsbatterie 118, 372, 559, 570
Transatlantic Trade and Investment Partnership 413
Transferpfadmodell 389
Transformator 319
Transit Charging 477, 533
Transparenz 645
Transportvorschrift 414
Treibhauseffekt 646
Treibhauspotenzial 632, 645
TSEP 316
TÜV 355
Typgenehmigung 364, 408
Typgenehmigungsanforderung 364

U

Übertragungsnetz 503, 504
Ultraschallschweißen 244
Umrichter 111, 196, 387
 elektromagnetische Verträglichkeit 405
 feldorientierte Regelung 198
 Multilevel-Umrichter 197
 Regelung 198

Umsatzpotenzial 580
Umweltnutzen 649
Underwriters Laboratories 409
Unfallforschung 360
United Nations Environment Programme 635
Unsicherheitsanalyse 633
Unterbrechungsfreie Stromversorgung 663
Unternehmensstrategie 593
Upstream 586
Upstream-Wertschöpfungsschritte 545
Use and be supported 618

V

Validierung 344
Value Chain 539
Variantenmanagement 350
Vehicle-to-Grid 195, 464, 516, 622
Vehicle-to-Home 516
Verein Deutscher Ingenieure 347
Verkaufsstruktur 592
Verkaufszahl 549
Verkehrsleistung 426
Vermaschungsgrad 504
Versauerung 647
Versauerungspotenzial 632, 647, 649
Verschiebepotenzial 515
Versorgungsspannung 322
Verteilungsnetz 504, 505
Vertikale Kooperation 608
Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language 199
Virtuelle Inbetriebnahme 224
Virtuelle Validierung 345
V-Modell 327, 342, 346
Vollaluminiummotor 98
Voll-Hybrid 362
Voltage Source Inverter 196
Vorserie 218
Vorserienfahrzeug 346

W

Wachstum 565
Wallbox 454, 455, 523
 Gleichrichter 459
Wärmepumpe 497
Wärmeversorgung 502
Warmformen 230
Wartungskosten 101

- Wechselrichter 115, 196
 - feldorientierte Regelung 198
 - Regelung 198
 - Wechselspannung 188
 - Frequenz 188
 - Phase 188
 - Wegerate 426
 - Weichschaltende Topologie 194
 - Well-to-Wheel-Wirkungsgrad 113
 - Werkstatt 558
 - Wertschöpfung Produktion 555
 - Wertschöpfungsebene 546
 - Wertschöpfungskette 569
 - Wertschöpfungsmöglichkeit 568
 - Wertschöpfungspotenzial 539, 569, 625
 - Wertschöpfungsstruktur 556, 586, 616
 - Wertschöpfungssystem 539, 545
 - Wettbewerbspositionierung 586
 - Whine noise 386
 - Whitewashing 640
 - Wickelkörper 302
 - Wicklung Herstellung 301
 - Wicklungsverlust 190
 - Wide-Bandgap-Halbleiter 191, 322
 - Widerstandsmessung 310
 - Widerstandspunktschweißen 241
 - Widerstandsschweißen 244
 - Wilde Wicklung 301
 - Windeinspeisung 499
 - Wirbelstromverlust 290
 - Wirkungsabschätzung 632
 - Wirkungsabschätzungskategorie 632
 - Wirkungskategorien-Midpoint 632
 - Wirtschaftsverkehr 434
 - W-Modell 348
 - Wohnungseigentumsmodernisierungsgesetz 525
- X**
- X7R 319
 - X-to-Power 502
- Z**
- Zahnpol 302
 - Zellassemblierung 260, 262, 271
 - Zellfahne 263
 - Zellfinalisierung 260, 264, 265, 271
 - Zellkosten 573
 - Zell-Stack 265
 - Zelltab 263
 - Zertifizierungswesen 366
 - Zieheisen 299
 - Zielgruppenorientierung 586
 - Zugdruckumformen 235
 - Zulassung 363, 365, 408, 411, 468
 - gewerbliche Pkw 428
 - private Pkw 427
 - Zulieferer 568
 - Zuliefererpyramide 547, 621
 - Zwangsarbeit 638
 - Zweirad 432
 - Zwischenspeicher 662
 - Zwischenzellkühlung 207
 - Zyklenbelastung 661