



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-

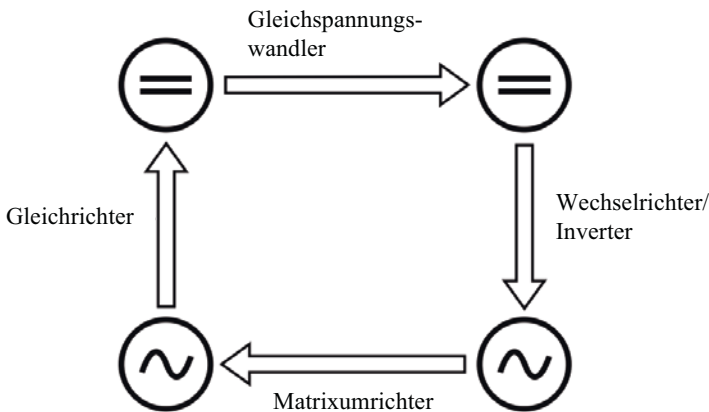


Abb. 10.1 Klassifikation leistungselektronischer Wandler

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-

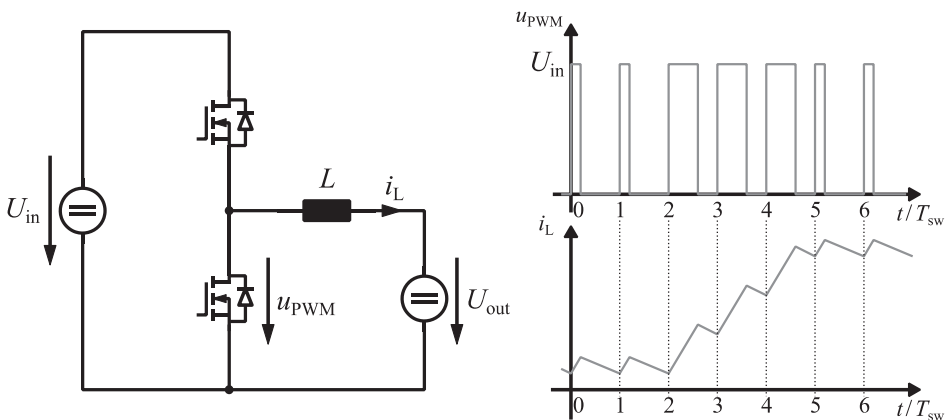


Abb. 10.2 Halbbrücke (links) und PWM-Schaltmuster (rechts)

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

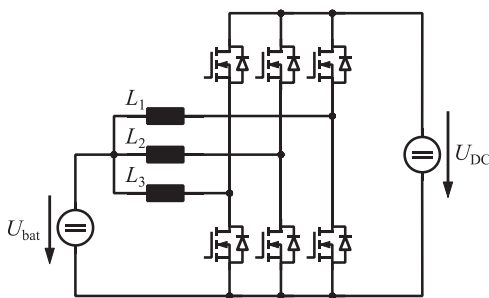


Abb. 10.3 Topologie und Foto eines DC/DC-Wandlers mit SiC-MOSFETs. (Vgl. Sewergin 2021)

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.

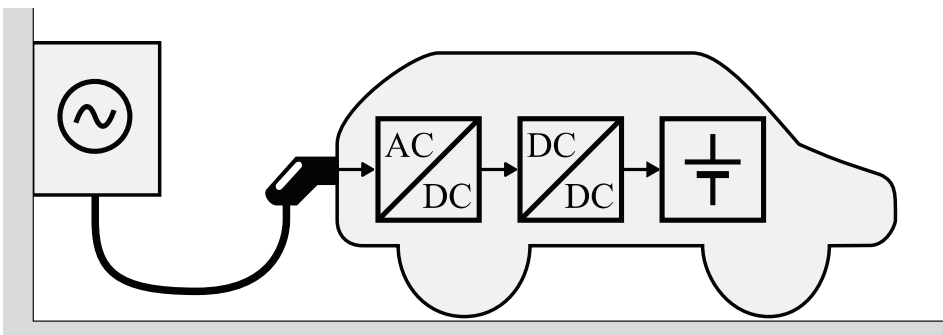


Abb. 10.4 Prinzipskizze des AC-Ladens mit bis zu 22 kW

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.

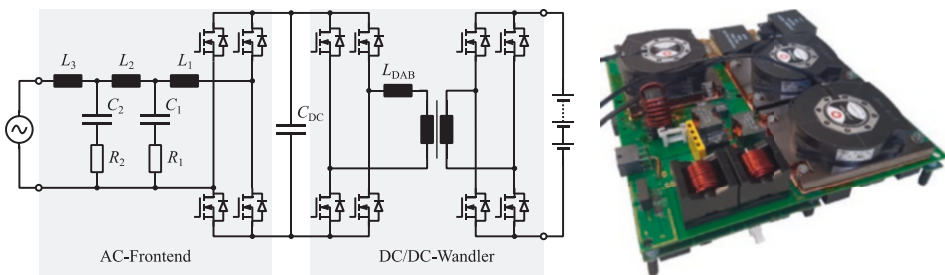


Abb. 10.5 Topologie und Foto eines bidirektionalen Ladegerätes mit GaN-Schaltern. (Vgl. Schülting 2020)

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

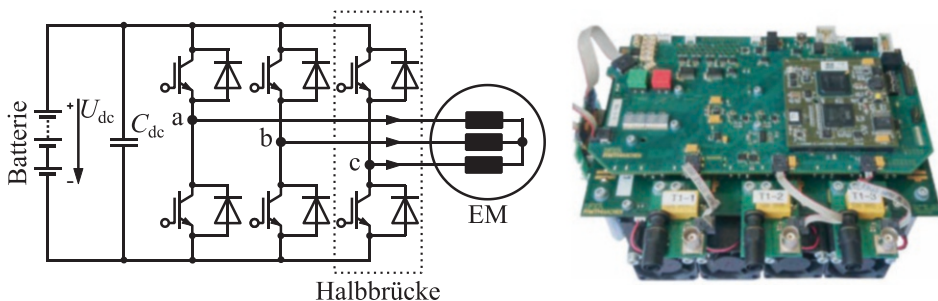


Abb. 10.6 B6C-Topologie und Foto eines dreiphasigen Umrichters. (Vgl. Schubert 2018)

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

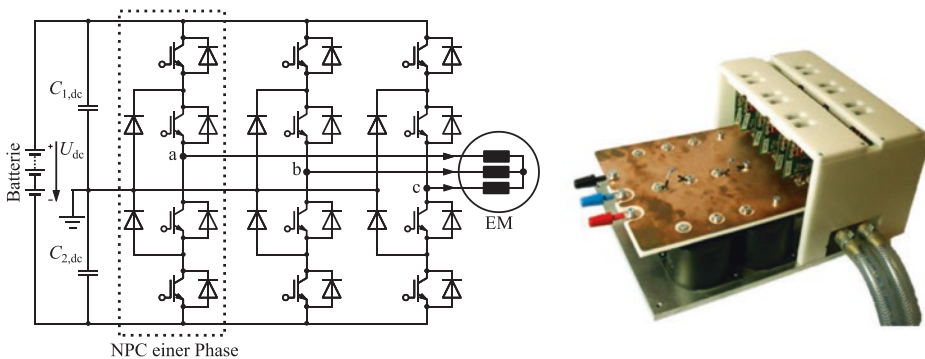


Abb. 10.7 Multilevel-Topologie und Foto eines Multilevel-Umrichters. (Vgl. Bubert 2020)

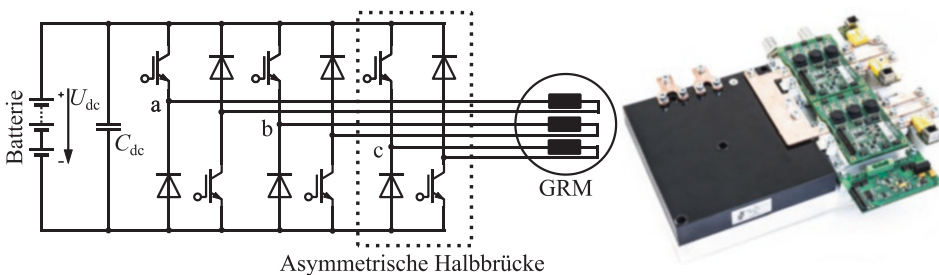


Abb. 10.8 Topologie mit asymmetrischen Halbbrücken und Foto eines dreiphasigen GRM-Umrichters. (Vgl. Klein-Heßling 2018)

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.

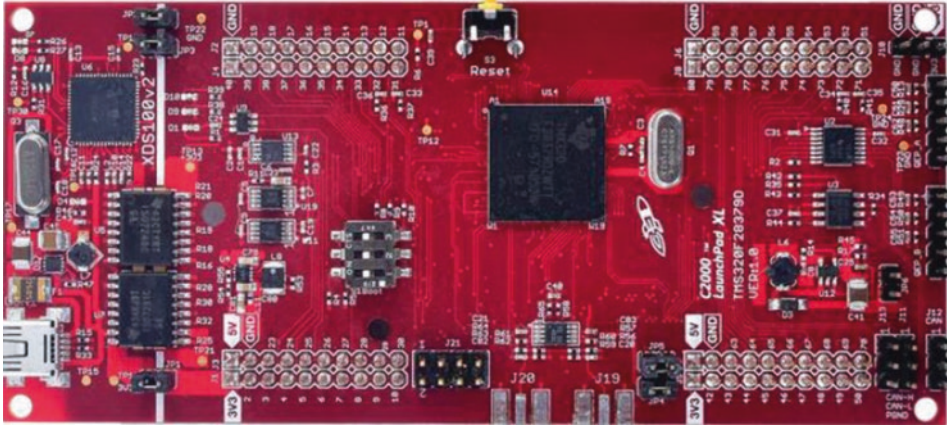


Abb. 10.9 „Texas Instruments“-LaunchPad™ der „C2000 DSP“-Reihe. (Vgl. [Texas Instruments](#) 2021)

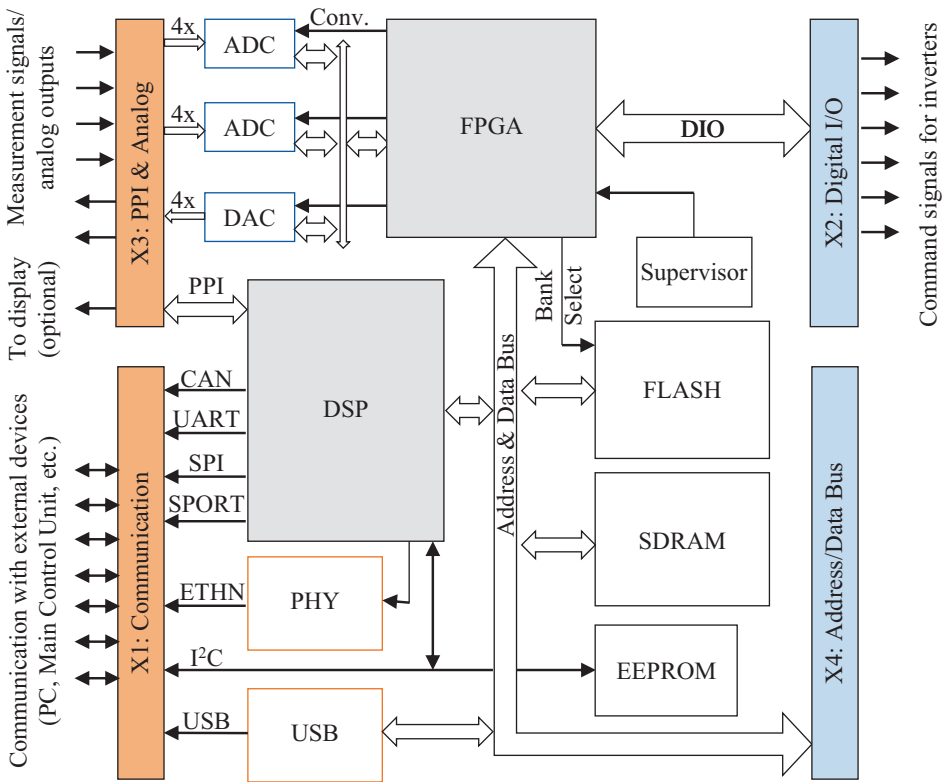


Abb. 10.10 Regelungsplattform für Wechselrichter. (Vgl. [De Doncker et al.](#) 2020)

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.

