

Forschungsbedarf für das Elektrofahrzeug der Zukunft

G. Brauner OVE, B. Geringer, M. Schrödl OVE

Die heute an das Elektrofahrzeug gestellten Anforderungen sind von den klassischen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor geprägt. Für Elektrofahrzeuge der ersten Generation besteht insbesondere Bedarf für den suburbanen Nahverkehr. Hierfür sind die verfügbaren Batterietechnologien in ihrer damit erzielbaren Reichweite bereits einsetzbar. Für die nächste Generation sind höhere Reichweiten durch verbesserte Effizienz mittels verminderter Masse, geringerem Rollwiderstand und niedrigerem Energiebedarf für Heizung und Kühlung die Forschungs- und Entwicklungsziele der Zukunft. Für das Fahrzeug und den Antrieb wird der Forschungsbedarf dargestellt.

Schlüsselwörter: Elektrofahrzeug; Forschungsbedarf; Fahrzeug; elektrischer Antrieb

Need for research for the electric vehicle of the future.

Today the requirements posted to the electric vehicle are influenced by the conventional car with combustion engine. For the electric vehicle of the first generation there is mainly a need for the suburban short-distance traffic. For this purpose the available battery technologies are at the moment usable with their attainable driving range. For the next generation of electric vehicles there is a need for higher ranges due to improved efficiency by means of reduced mass, lower rolling resistance and lower energy demands for heating and cooling. These are the goals of future research. For the vehicle itself and the electric power train the needs of research are depicted.

Keywords: electric vehicle; needs in research; vehicle; electric power drive

Eingegangen am 9. Jänner 2012, angenommen am 21. März 2012
© Springer-Verlag 2012

1. Mobilitätsanalyse

Der Energiebedarf für den Haushalt und für die Mobilität stellt einen bedeutenden Anteil am gesamten Energiebedarf dar. Insbesondere die Klimatisierung von Gebäuden mit Heizung und Kühlung und der Haushaltsenergiebedarf müssen sich in Richtung effizientere Energieanwendung verändern. Die Initiative der EU „smart cities“ möchte Anreize geben, so genannte energieaktive Städte zu entwickeln und umzusetzen. Der Sektor Verkehr stellt einen weiteren Bereich mit derzeit hohem fossilen Energiebedarf dar. Etwa 70 % der derzeitigen Ölimporte werden für den Verkehr benötigt, und der Sektor Verkehr ist der einzige mit weiter steigenden CO₂-Emissionen. Die Entwicklung einer emissionsarmen und weitgehend mit nachhaltiger Energie versorgten Mobilität stellt daher ein wesentliches Entwicklungsziel in den nationalen Energiestrategien der einzelnen Regierungen dar. In der ersten Modellregion für

Elektromobilität in Vorarlberg wurde mit dem Projekt „VLOTTE“ (Schuster, Leitinger, Brauner, 2010) bereits nachgewiesen, dass die Einführung von Elektromobilität technisch möglich ist und dass dabei bedeutende Effizienzsteigerungen in der Mobilität möglich sind. Beim VLOTTE-Projekt wurde mit den ZEBRA-Hochtemperaturbatterien bereits Verbrauchsminderungen auf 24 kWh/100 km erzielt, was etwa einem 2,5-Liter Fahrzeug entspricht (Schuster, Leitinger, Brauner, 2010). Neue Elektrofahrzeuge mit Li-Ionen-Batterie kommen bereits mit 10 bis 15 kWh/100 km aus.

Während der innerstädtische Verkehr mit Straßen- und U-Bahn bereits seit langem elektrisch und damit emissionsarm ist, ist der Individual- und Güterverkehr mit Personenkraftwagen, Bus und Lastkraftwagen heute fast ausschließlich mit Verbrennungsmotoren ausgerüstet und stellt daher große Potenziale in Richtung emissionsarmer und nachhaltiger Antriebe dar (Tabelle 1).

1.1 Personennahverkehr

Dieses Mobilitätssegment ist für die Einführung der Elektromobilität besonders geeignet, und die Automobilindustrie wird hierfür zuerst neue Fahrzeuge bereitstellen. Die täglich zurückgelegte Gesamtfahrstrecke liegt in diesem Verkehrsegment unter etwa 50 km. Es sind

Tabelle 1. Sektoren der Mobilität und Potenziale für neue Antriebstechnologien

	Nahverkehr	Fernverkehr
Personenverkehr	Batterieelektrischer Antrieb Hybridantrieb	Hybridantrieb (seriell, plug-in) H ₂ und Brennstoffzelle
Güterverkehr	Batterieelektrischer Antrieb Hybridantrieb (seriell, plug-in)	Dieselelektrischer Hybrid H ₂ und Brennstoffzelle

Brauner, Günther, Em. O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr., Technische Universität Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Gußhausstraße 25, 1040 Wien, Österreich; **Geringer, Bernhard, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.,** Technische Universität Wien, Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, Getreidemarkt 9, 1060 Wien, Österreich; **Schrödl, Manfred, O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.,** Technische Universität Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Gußhausstraße 25, 1040 Wien, Österreich (E-Mail: Brauner@ea.tuwien.ac.at)

kleine und leichte Fahrzeuge erforderlich, die in der Parkposition des Fahrzeugs am Arbeitsplatz oder bei längeren vorübergehenden Aufenthalten (Einkauf, Besuche) mit regenerativer Energie aus Photovoltaik, Windenergie oder Wasserkraft nachgeladen werden können. Eine Möglichkeit zur Schnellladung ist wegen der kurzen Wegstrecken und längeren Zwischenaufenthalten nicht erforderlich. In diesem Segment sind auch intermodale Verkehrskonzepte mit Elektrofahrzeugen als Zubringer zum öffentlichen Nahverkehr und zum Fernverkehr der Bahnen mit zu betrachten. Das Fahrzeug kann hier auch im Rahmen eines „Car-Sharing“ von weiteren Personen genutzt werden.

Als Antrieb ist in diesem Mobilitätssegment ein rein batterieelektrischer Antrieb besonders geeignet, da er kompatibel zur öffentlichen Stromversorgung gehalten werden kann und der Energiebedarf je Tag etwa 5 kWh nicht übersteigt, wodurch eine Schnellladung nicht erforderlich ist, sondern die überall vorhandenen Steckdosen ausreichend sind.

1.2 Personenfernverkehr

In diesem Mobilitätssegment sind Fahrstrecken von mehreren hundert Kilometern möglich. Batterieelektrische Fahrzeuge müssten hierbei die Möglichkeit zur Schnellladung aufweisen, um gegenüber den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor keine Nutzungs Nachteile aufzuweisen. Die Schnellladung von Batterien ist einerseits mit technologischen Problemen verbunden, wie z. B. hohe Netzanschlussleistung, Auslegung der Ladeelektronik für sehr hohe Ströme, Kühlungsprobleme und Lebensdauererminderung der Batterie. Alternativ ist die Auslegung der Batterien für hohe Reichweiten mit hohen Investitionskosten und Fahrzeuggewicht verbunden, was das Elektrofahrzeug unwirtschaftlich im Vergleich zum Verbrennungsantrieb macht.

Als kurzfristig realisierbare Lösung kann der serielle Hybridantrieb angesehen werden, bei dem die elektrische Energie mit einem (bio-)dielelektrischen Generatorantrieb und einem elektrischen Fahrzeugmotor betrieben wird und die Batterie die Aufgabe der Energiepufferung und der emissionsfreien rein elektrischen Fortbewegung im Siedlungsbereich hat. Nachteilig bei dieser seriellen Hybridlösung ist allerdings der etwas ungünstigere Gesamtwirkungsgrad wegen der mehrfachen Energiewandlung.

Auch ein rein elektrischer Antrieb mit Elektrizitätserzeugung über eine Brennstoffzelle ist möglich. Hierbei wird Wasserstoff, der z. B. aus Überschussenergie aus Photovoltaik oder Windenergie durch Elektrolyse gewonnen werden kann, verwendet. Damit wird einerseits eine kurze Zeit zum Tanken von Wasserstoff benötigt, die vergleichbar mit dem konventionellen Verbrennungsantrieb ist, und andererseits ist dieser Antrieb im Fahrzeugbetrieb vollständig emissionsfrei, da nur Wasser entsteht.

Nachteilig beim Brennstoffzellenkonzept ist, dass eine weitere Infrastruktur mit Wasserstofftankstellen geschaffen werden muss.

1.3 Güternahverkehr

Im Güternahverkehr sind kurze Fahrstrecken mit häufigen Aufenthalten zum Be- oder Entladen zu erwarten. Hier können auch batterieelektrische Antriebe eingesetzt werden, die für die Tagesfahrstrecke ausgelegt sind, bzw. bei längeren Pausen nachgeladen werden können.

Auch Hybridantriebe, insbesondere der serielle Hybridantrieb, sind geeignet. Hiermit kann im Bereich von Siedlungen rein elektrisch gefahren werden und außerhalb mit dem Verbrennungsmotor die Batterie nachgeladen werden.

1.4 Güterfernverkehr

Im Güterfernverkehr sind lange Tagesfahrstrecken mit kurzen Pausenzeiten zu bewältigen. Weiterhin sind Antriebsleistungen im Be-

reich bis etwa 500 kW erforderlich. Dies stellt hohe Anforderungen an den gesamten Antrieb in Bezug auf Motorleistung, Batteriekapazität und Schnellladefähigkeit. In diesem Segment ist nach derzeitigem Stand der Technologie ein batterieelektrischer Antrieb noch nicht verfügbar. Auch ein Antrieb mit Brennstoffzelle und Elektromotor ist möglich. Hier kann der Wasserstoff durch Elektrolyse mit Ökostrom erzeugt werden.

1.5 Forschungsbedarf

In allen soeben dargestellten Segmenten der Elektromobilität besteht ein erheblicher Forschungsbedarf. Die erste Generation der Elektrofahrzeuge ist im Wesentlichen durch Modifikation von klassischen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor entstanden. Die folgenden Generationen sind spezielle Neukonstruktionen, die im Wesentlichen die Integration des Antriebs, der Leistungselektronik und der Batterie in das Fahrzeugkonzept bewerkstelligen. Durch die wesentlich flexiblere Antriebsgestaltung sind gänzlich neue und unkonventionelle Fahrzeugkonzepte möglich (bis hin zu einachsigen Fahrzeugen oder solchen ohne Lenkung).

Wesentliche Unterschiede zwischen dem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor und dem mit Elektroantrieb sind in den sehr verschiedenartigen Effizienzen der Antriebskonzepte begründet. Der Antrieb mit Verbrennungsmotor hat Wirkungsgrade im üblichen niedrigen Lastbereich von lediglich etwa 15 bis 20 % beim Benzinmotor und 20 bis 30 % beim Dieselmotor. Hierdurch entsteht ein relativ hoher Anteil an Verlustwärme, und die Fahrzeugheizung kann relativ einfach ohne aufwändige thermische Isolierung der Fahrgastzelle bewerkstelligt werden.

Beim Elektroantrieb ist durch den hohen mittleren Wirkungsgrad von etwa 50 % ein wesentlich geringerer Anteil an Verlustwärme gegeben. Eine elektrische Direktheizung aus der Batterie oder eine etwas effizientere Heizung mittels Wärmepumpe verkürzen die heute noch geringe Reichweite der Fahrzeugbatterie und sind daher nicht willkommen.

Im Folgenden wird der Forschungsbedarf für das Elektrofahrzeug selbst und den Antrieb einschließlich Leistungselektronik und Batterie dargestellt.

2. Forschungsbedarf bei neuen Elektrofahrzeugen

Die Anforderungen hinsichtlich Reichweite und Komfort an Elektrofahrzeuge sind durch die üblichen Standards von heutigen Fahrzeugen der Kunden geprägt. Doch ist es für die Hersteller, aufgrund der aktuellen Batterietechnologien mit ihrer geringen Energiedichte, nicht möglich, diese Anforderungen voll zu erfüllen. Es muss deshalb alles versucht werden, die Verluste im Antriebsstrang des Gesamtfahrzeuges möglichst gering zu halten. Zukünftig wird es nicht ausreichen, ein herkömmliches Fahrzeug – betrieben mit einer Verbrennungskraftmaschine – durch einen Elektromotor und mit einer entsprechenden Batterie auszustatten. Das Gesamtfahrzeug muss an die neuen Gegebenheiten der Technologie und der Mobilitätsbedürfnisse adaptiert werden. Dazu muss die Zugkraft Z – die Gesamtheit der Fahrwiderstände, die überwunden werden müssen, – möglichst gering gehalten werden.

$$Z = F_R + F_L + F_{St} + F_B \quad (1)$$

In der oben angeführten Formel sind alle einzelnen Anteile, die den Gesamtfahrwiderstand ergeben, angegeben, dabei ist F_R der Rollwiderstand, F_L der Luftwiderstand, F_{St} der Steigungswiderstand und F_B der Beschleunigungswiderstand.

Z ist folglich nun jene Kraft, die der Elektromotor überwinden muss, um das Fahrzeug zu bewegen. Aufgrund der geringen Energiedichte der Traktionsbatterie, im Vergleich zu Kraftstoffen wie Benzin oder Diesel, muss Z zum Erreichen der Anforderungen durch

den Kunden minimiert werden. Elektrofahrzeuge müssen mit ihrem Batteriepaket eine enorme Zusatzlast transportieren – je mehr Masse der Elektromotor bewegen muss, desto kleiner ist folglich die Reichweite pro Akkuladung.

$$F_R = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

$$F_{St} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

Sowohl der Rollwiderstand (Gleichung 2) mit dem Rollwiderstand der Reifen f als auch der Steigungswiderstand (Gleichung 3) sind, neben der Fahrbahnsteigung α , abhängig von der Summe aller Radlasten, welche gleich der Gewichtskraft des Fahrzeuges ($m \cdot g$) ist. Um diese zu reduzieren, ist es wesentlich, die Gesamtmasse der Fahrzeuge zu verringern. Dieses kann durch den verstärkten Einsatz von Leichtbau erzielt werden. Durch den Einsatz von modernen Stahl- und Verbundwerkstoffen kann das Gewicht des Fahrzeuges reduziert werden. Technologien (Formgebungs- und Fügeverfahren) und Werkstoffe, die bislang als zu aufwändig und teuer geschmäht waren, rücken nun in den Fokus.

Das Abspecken wird aber auch schon bei Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschine noch dringlicher werden, weil auch hier Sicherheits- und Komfortausstattung noch reichlicher ausfallen werden. Forscher nehmen sich oftmals die Natur als Vorbild und schauen sich deren Raffinessen ab. Das Prinzip dabei ist es, immer nur so viel Material zu benutzen, wie unbedingt notwendig ist. Der Autohersteller Audi zeigte mit seinem „Audi Space Frame“ bereits in den 1990er Jahren, wie man dieses Prinzip in der Konstruktion umsetzen kann. Anwendungsbeispiele zeigt Audi zum Beispiel beim Schwellerbau, in welchem die Topologie des bionischen Prinzips des Knochens von Menschen übernommen wird, welche zwar hohl, aber im Inneren intensiv verrippt und somit hoch fest sind.

Karosserien in Leichtbauweise sparen im Vergleich zu traditionellen Fahrzeugkarosserien bis zu 40 % an Gewicht ein. Aber nicht nur

an der Außenhaut kann und muss gespart werden, so kann eine Verringerung des Gewichts der Heckklappe dazu führen, dass eine leichtere Gasdruckfeder verbaut werden kann. Zentraler Werkstoff im Leichtbau ist momentan Aluminium, aber an anderen neuen Materialien wird geforscht. Forscher versprechen sich von Magnesium sehr viel, und es steht zurzeit ganz oben auf der Favoritenliste. Magnesium ist sogar um ein Drittel leichter als Aluminium und zeichnet sich gleichzeitig durch eine hohe Steifigkeit und Festigkeit aus. Noch leichter sind kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK) mit einem spezifischen Gewicht von nur 1,5 kg pro Kubikdezimeter (Magnesium hat im Vergleich dazu 1,8 kg). Akkumuliert auf das gesamte Fahrzeug soll dieses bis zu 100 kg im Vergleich zu gewöhnlichen Karosserien sparen.

In Abb. 1 wird dargestellt, wie Leichtbau in seiner Gesamtheit vom Konzept bis zur Serienreife zu berücksichtigen ist. Magna zeigt, wie die neuen Technologien und Materialien berücksichtigt werden müssen und in welchen Phasen die klassischen Zielkonflikte wie Gewichtsreduktion versus Sicherheit analysiert und optimiert werden können (Abb. 2).

Der Rollwiderstand (siehe Gleichung 2) ist aber neben der Fahrzeugmasse natürlich auch von der Reifenbauart und deren Luftdruck, der Fahrbahnbeschaffenheit und der Geschwindigkeit abhängig. In der Formel wird dieses mit dem Faktor f berücksichtigt. Elektroautos benötigen im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen wegen der geringeren Dynamik deutlich schmalere Reifen, jedoch größere Durchmesser. Sieht man das Elektroauto als reines Stadttauto, so könnte man die Pneus gezielt darauf auslegen. Es ermöglicht die Optimierung, so dass sie beim Anfahren eine hohe Straßenhaftung aufweisen, was aufgrund des hohen Drehmomentes auch beim Anfahren notwendig ist. Ganz speziell müsste man die Reifen auslegen, sollte ein Radnabenmotor zum Antrieb benutzt werden.

Zur Überwindung von Z ist im Weiteren auch der Beschleunigungswiderstand zu überwinden. Hier muss nicht nur die

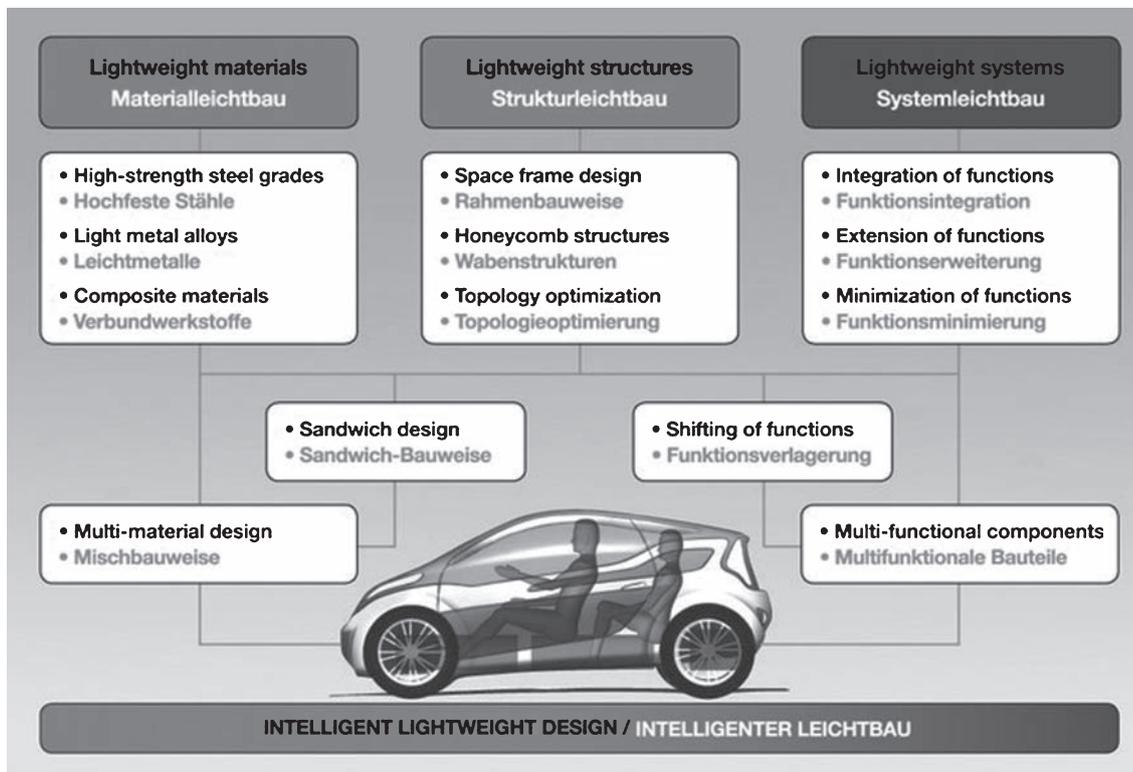


Abb. 1. Leichtbau unter Berücksichtigung des Gesamtfahrzeugs (<http://www.mila-family.com/>)

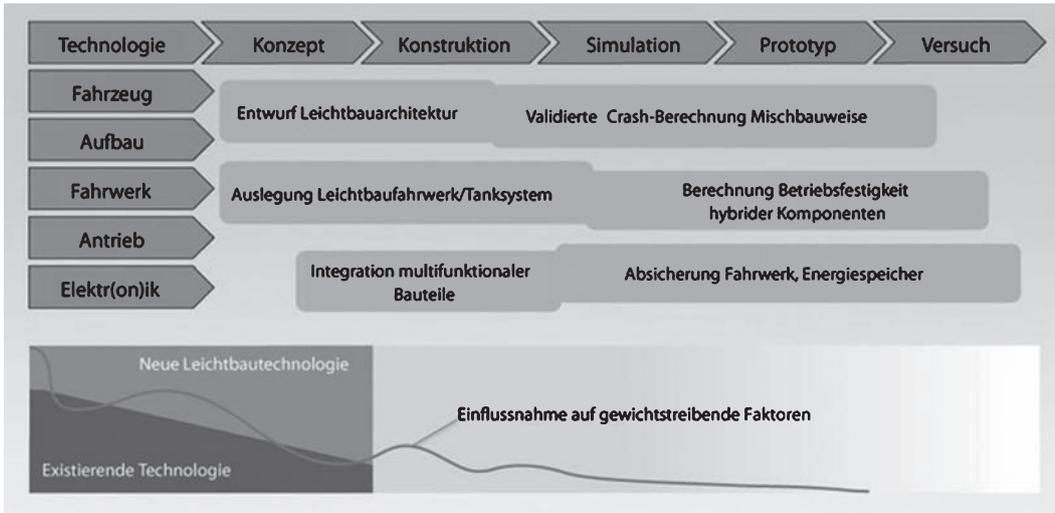


Abb. 2. Leichtbau bei Magna Steyr (<http://www.mila-family.com/>)

translatorische Masse des Fahrzeuges berücksichtigt werden, sondern auch die drehenden Teile des Antriebsstranges (rotatorische Masse).

$$F_B = \left(m + \sum_{j=1}^n \frac{J_{R,j}}{r_j^2} \right) \cdot \ddot{x} \quad (4)$$

Es ergibt sich hiermit für das gesamte rotatorische Beschleunigungsmoment folgende Formel:

$$J_{R,vorne} \cdot \ddot{\varphi}_{R,vorne} + J_{R,hinten} \cdot \ddot{\varphi}_{R,hinten} \quad (5)$$

Die Trägheitsmomente J ergeben sich auf der einen Seite durch Reifen, Räder und Bremsen, die sich mit den Winkelgeschwindigkeiten $\dot{\varphi}_R$ drehen und durch das Trägheitsmoment des Motors J_M und der Triebwerksteile J_A .

Fasst man nun alle Komponenten zusammen und fügt sie in Gleichung 1 ein, so ergibt sich folgende Formel:

$$Z = \sum_{j=1}^n \frac{M_{R,j}}{R_j} = f_R \cdot m \cdot g + c_x \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} v_r^2 + m \cdot (g \cdot \rho + \lambda \cdot \ddot{x}) \quad (6)$$

Genau jene Optimierung des Antriebs aber macht den Experten zu schaffen. Zwar löst Elektromobilität auf der einen Seite einige Probleme, lässt aber auf der anderen Seite neue Zielkonflikte entstehen, so steigert zunächst der Elektromotor die Effizienz, was sich vornehmlich durch eine geringere Abwärme des Motors äußert. Genau diese „kostenlose“ Energiequelle hat man sich aber beim Verbrennungsmotor zu nutzen gemacht und muss zukünftig bei den Elektrofahrzeugen zusätzlich aus elektrischer Energie umgewandelt werden.

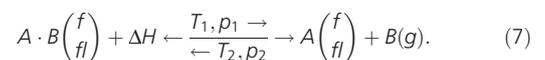
Elektroheizungen, sowohl für den Fahrgastraum, aber auch zur Temperierung der Traktionsbatterien, gelten als „Fahrweitenkiller“. Man versucht, das Problem auf zwei Arten und Weisen in den Griff zu bekommen. So versucht man, auf der einen Seite Fahrzeuge besser zu isolieren. Hier sind jedoch die Möglichkeiten begrenzt, da eine verbesserte Isolierung im Widerspruch zur vorangegangenen Diskussion der Gewichtsreduzierung steht. Die zweite Möglichkeit ist der Einsatz neuer, energieeffizienter Wärmespeichertechnologien. Prototypen dazu gab es schon einige, jedoch hat es bis jetzt noch keine breite Anwendung gefunden. Bisher ausgeführte Speicher haben sich darauf konzentriert, das Speichermedium – fallweise wurde auch der Phasenwechsel des

Speichermediums ausgenutzt – thermisch zu isolieren. Dieses jedoch machte die Unterbringung im Fahrzeug durch die geringe Speicherdichte, sowie die Verluste bei langen Abstell dauern, schwierig.

Neue innovative Wärmespeicher sollen die bisherigen Probleme kompensieren. Reversible chemische Reaktionen, die unter Zufuhr bzw. Freisetzung von thermischer Energie ablaufen, können grundsätzlich zur Wärmespeicherung eingesetzt werden. Sie besitzen neben einer hohen spezifischen Speicherkapazität auch den Vorteil, dass aufgrund der Trennung der Reaktionsprodukte die Energie ohne Verluste beliebig lang gespeichert werden kann. Eine weitere ganz wesentliche Eigenschaft dieser Technologie ist, dass sie auch zur Kälteerzeugung und damit zur Fahrzeugklimatisierung herangezogen werden kann. Damit könnte mit diesen innovativen Lösungen neben dem Heiz- auch im Sommer das Kühlproblem mit einem intelligenten System gelöst werden.

Diese chemischen Speicher beruhen darauf, dass eine Verbindung durch Einbringung von Energie (Wärme) aufgelöst wird. Unter der Voraussetzung, dass die endotherme Reaktion reversibel ist, kann durch die exotherme Reaktion wieder Wärme abgegeben werden. Folglich kann durch die räumliche Trennung der beiden Reaktionspartner die Energie gespeichert werden. Eine schematische Darstellung dieses Reaktionsablaufes ist in Abb. 3 dargestellt.

Die allgemeine Gleichung dieser Reaktion ist in Gleichung 7 angegeben. (f = fest; fl = flüssig; g = gasförmig)



Diese Speicher befinden sich zurzeit noch in der Prototypenphase, und man kann davon ausgehen, dass es noch dauern wird, bis sie Serienreife erreicht haben. Bei aktuellen E-Fahrzeugmodellen wird noch mit konventionellen Heizungen und Klimatisierungen gearbeitet, die einen sehr hohen Energiebedarf haben. Am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der TU Wien wurde daher im Auftrag des Österreichischen Automobil-, Motorrad- und Touring Clubs (ÖAMTC) der Großserienwagen Mitsubishi i-MiEV hinsichtlich Energieeinsatz und Reichweite gemessen, um die Verluste und Verbräuche abschätzen zu können. Abbildung 4 zeigt auf, wie die Klimatisierung des Fahrzeuges – Fahrgastzelle und Traktionsbatterie – auf die Fahrzeugreichweite Einfluss nehmen und diese stark reduzieren kann.

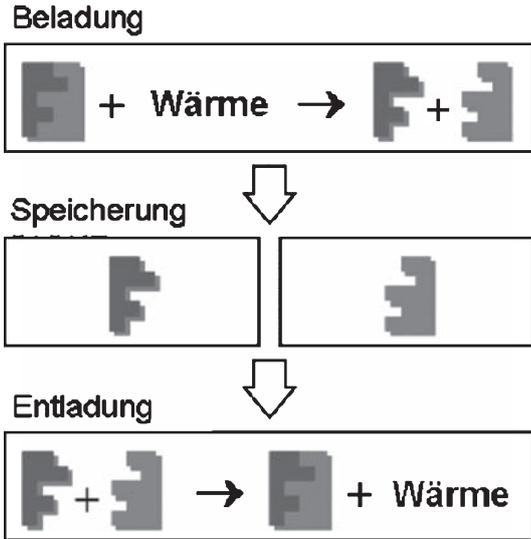


Abb. 3. Schematische Darstellung der Reaktion eines chemischen Speichers (Jakobi, Hofmann, Geringer, 2011)

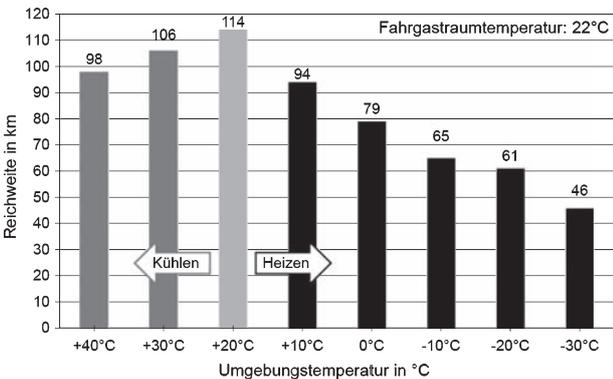


Abb. 4. Reichweite in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur im Eco-Test-Zyklus (Lang, 2011)

Die Reichweite wird bei -30°C auf lediglich 46 km reduziert, wobei die Reichweite dazu im Vergleich bei einer Umgebungstemperatur von $+20^{\circ}\text{C}$ bei 114 km liegt. Dies entspricht einer Reduktion um rund 60 %, jedoch ist nicht nur das Heizen ein „Reichweitenkiller“, sondern auch das Kühlen der Fahrgastzelle und der Batterie. So reduziert sich die Reichweite bei $+40^{\circ}\text{C}$ um 14 % auf 98 km im Vergleich zur maximalen Reichweite.

Fahrzeughersteller versuchen, durch das zur Verfügung Stellen von alternativen Antriebskonzepten „Übergangslösungen“ anzubieten und erhoffen sich so eine höhere Kundenakzeptanz. Ein vielversprechendes Konzept ist das Range-Extender-Fahrzeug. Es kann durch neuartige Getriebe und modernste Leistungselektronik die Vorteile von Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschine vereinen.

Der Antriebsstrang besteht im Wesentlichen aus einem Elektro- und einem Verbrennungsmotor, einem Generator und einer Traktionsbatterie. Die Vorteile liegen hier ganz klar auf der Hand: Grundsätzlich fährt das Fahrzeug rein elektrisch, wobei dies je nach Batteriegröße bis etwa 80 km erfolgen kann. Wird ausnahmsweise einmal länger gefahren, ohne die Batterie zwischenladen zu können, so tritt ein (kleiner) Verbrennungsmotor in Aktion und erhöht die Reichweite. Deshalb auch der Name („Reichweitenverlängerer“).

Beim Bauteil Verbrennungskraftmaschine eines Range-Extender sind die Entwickler teilweise noch beim Experimentieren: Die meisten Hersteller setzen auf verkleinerte Motoren mit zwei oder drei Zylindern und damit verringertem Hubraum. Die Firma FEV setzt auf einen Zweizylinder-Motor in V-Bauweise, was ein gutes Schwingungsverhalten ermöglicht, für den üblicherweise im temporären Betrieb betriebenen Motor. Audi setzt in seinem Audi A1 e-tron auf den AVL-Range-Extender, welcher einen Wankel-Motor einsetzt. Für die Firmen ist es auch eine wirtschaftliche Entscheidung, da der Kostenvorteil ein wichtiges Argument für die „Marktattraktivität“ ist. Ford setzt daher auf einen Dreizylinder-Motor, der im konventionellen Betrieb als Downsizing-Motor mit Turboauflader agiert und als Range-Extender ohne Aufladung.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Elektromobilität großes Potenzial, insbesondere im PKW-Bereich und beim Nahverkehr, bietet, andererseits aber noch großer Forschungsbedarf besteht, um die energieeffizientesten Lösungen für jeden Anwendungsfall zu schaffen und hierbei die Kundenerwartungen bei akzeptablen Kosten und Nutzerzufriedenheit zu erfüllen.

3. Intelligentes Antriebskonzept für Elektrofahrzeuge

3.1 Auswahl der Elektromaschine

Als Antriebsmaschinen stehen vor allem Asynchronmotoren und permanentmagneterregte Synchronmaschinen (PSM) zur Verfügung. Neuere Konzepte prüfen auch den Einsatz konventioneller elektrisch erregter Synchronmaschinen.

3.1.1 Vorteile der Asynchronmaschine

Die Asynchronmaschine stellt eine robuste und billige Lösung dar. Asynchronmotoren weisen eine sehr robuste, seit vielen Jahren in hohen Stückzahlen erprobte Konstruktion mit Kurzschlussläufer auf. Als Material des Kurzschlusskäfigs wird hauptsächlich Aluminium-Druckguss, seit einiger Zeit wird auch Kupfer („Rotguss“) eingesetzt. Kupfer hat geringere Verluste im Rotor zur Folge, ist aber schwieriger zu verarbeiten. Die Kosten der eingesetzten Materialien sind in Summe geringer als bei vergleichbaren PSMs.

Der Nachteil, dass Asynchronmotoren die Magnetisierung unter Verwendung einer entsprechenden Statorstromkomponente im Betrieb aufbauen und erhalten müssen, reduziert sich im Feldschwächbetrieb (Betrieb an der umrichterbedingten Spannungsgrenze oder Betrieb im Wirkungsgrad-Bestpunkt). Der Wirkungsgradnachteil gegenüber PSMs wird im Feldschwächbetrieb durch die abnehmende magnetisierende Stromkomponente geringer.

Bei Sperre des Umrichters geht die Asynchronmaschine automatisch in einen sicheren Zustand über. Im Gegensatz dazu tritt durch Umrichtersperre (alle Ventile hochohmig geschaltet) bei PSMs im Feldschwächzustand eine gefährlich hohe Klemmenspannung durch die von den Permanentmagneten hervorgerufene Flussverkettingsänderung im Statorwicklungssystem auf, deshalb ist bei PSMs die Schaltung „Umrichter-Kurzschluss“ die sichere Reaktion auf einen Befehl, die Leistungszufuhr zur elektrischen Maschine zu unterbinden.

3.1.2 Vorteile der Permanentmagnet-Synchronmaschine

Die PSM erlaubt eine kompakte Konstruktion. Sie hat das höchste Drehmoment/Volumen-Verhältnis aller bewährten elektrischen Maschinen durch die Verwendung von Magnetmaterialien auf Basis von Seltenen Erden (Neodym-Eisen-Bor oder Samarium-Kobalt). Diese erlauben Remanenzflussdichten von bis zu 1,5 T. Dadurch kann ein sehr kompakter magnetischer Kreis der Maschine erzielt werden. Zusätzlich erlauben PSMs die Verwendung von Zahnpulwicklungen. Diese sind hoch automatisiert zu fertigen und weisen sehr kurze

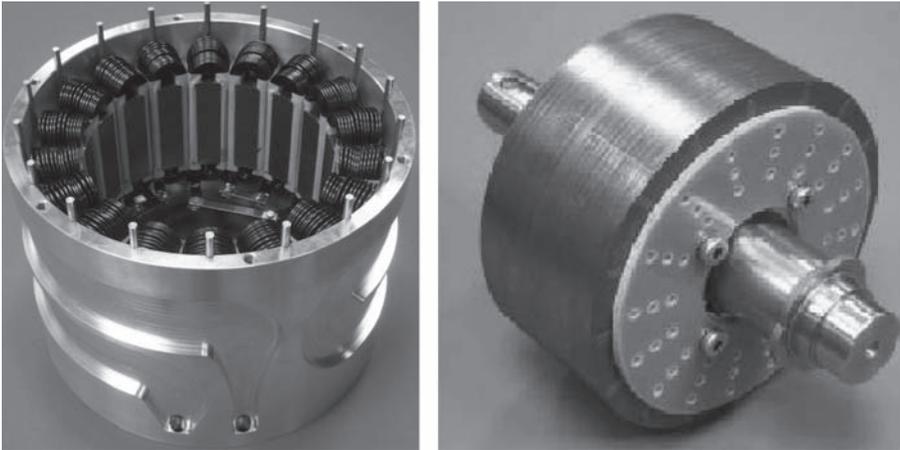


Abb. 5. Stator und Rotor einer an der TU Wien entwickelten 100 kW PSM (Demmelmayr, Troyer, Schrödl, 2011)

Wickelköpfe auf. Vergleichsweise können bei Asynchronmaschinen diese Wicklungstypen aufgrund des kleinen Luftspalts und der Ausbildung störender Harmonischer nicht eingesetzt werden.

Ein weiterer Vorteil ist der hohe Wirkungsgrad. Bei PSMs fallen die Rotorverluste im Vergleich zur ASM deutlich geringer aus, man kann von einer Verlustreduktion um ca. ein Drittel gegenüber ASMs ausgehen. Im Feldschwächbereich reduziert sich der Wirkungsgradvorteil in gewissem Maß, aber grundsätzlich kann mit einem geringeren Energieverbrauch des Elektroantriebs bei Verwendung von PSMs gerechnet werden.

Durch Wegfall der magnetisierenden Stromkomponente (Größenordnung 30 % des Nennstroms) kann auch der Umrichter strommäßig etwas kleiner dimensioniert werden. Durch Auslegung der Statorinduktivität auf relativ hohe (bezogene) Werte, was unter Verwendung einer guten Kühlung (bedeutet hoher Bezugsstrom) und einer Einzelzahnwicklung möglich ist, kann die PSM den Dauerkurzschlussstrom (zumindest über längere Zeit) führen. Damit kann sie den sicheren Zustand „Umrichterkurzschluss“, bei dem alle drei Halbbrücken auf gleiches Zwischenkreispotenzial geschaltet sind, auf Dauer führen und lässt sich damit auch gut feldschwächen.

Die elektrisch erregte Synchronmaschine liegt wirkungsgradmäßig etwa in der Mitte zwischen ASM und PSM. Sie kann ihren Fluss durch Sperre des Erregerstroms abbauen. Der Betriebszustand „Feldschwächung“ lässt sich ohne Gefahr einer Überspannung an den Klemmen durch Anpassen des Flussniveaus über die Erregerwicklung einstellen. Der Nachteil der Maschine ist die etwas größere Bauweise verglichen mit der PSM und der Stromübergang auf den Rotor mittels Schleifkontakten.

Unter Berücksichtigung der wichtigen Kenngrößen „Energieverbrauch“ und „Kompaktheit“ wird in der Folge ein Antrieb mit einer PSM betrachtet.

3.2 Energieumsatz eines Elektrofahrzeugs mit PSM

Erfahrungsgemäß werden bei einem konventionellen PKW durchschnittlicher Größe auf 100 km Fahrstrecke bei durchschnittlichem Fahren ca. 10–15 kWh an mechanischer Energie umgesetzt. Nimmt man für den Treibstoff einen Energiegehalt von ca. 10 kWh/l und einen Verbrauch von 5 l pro 100 km an, bedeutet das, dass vom Brutto-Energiegehalt des Treibstoffs von ca. 50 kWh nur ca. 25 % in mechanische Energie umgesetzt werden. Im Hinblick auf die Heizleistung für den Fahrgastraum steht damit Abwärme in hohem Ausmaß zur Verfügung. Man rechnet mit ca. 5–12 kW an Heizleistung, die aus der Abwärme eines Verbrennungsmotors leicht gedeckt werden kann.

Nun betrachten wir einen Antrieb auf Basis einer PM-Synchronmaschine (Abb. 5).

Untersucht wird ein einfaches Betriebsmodell, bestehend aus einem Konstantfahrzyklus sowie einem Start-Stop-Zyklus. Je länger der Konstantfahrzyklus im Vergleich zum Start-Stop-Zyklus dauert, desto eher weist der Betrieb den Charakter einer Überlandfahrt auf. Bei zeitlich kurzen Konstantfahrzyklen, gefolgt von jeweils einem Start-Stop-Zyklus, entspricht die Betriebsweise eher einer Stadtfahrt. Vorerst wird ein Start-Stop-Zyklus gemäß folgender Abbildung auf seinen Energieumsatz untersucht. Dabei beschleunigt der Fahrzeugantrieb am Anfang mit maximalem Drehmoment und geht anschließend in den Feldschwächbereich über. Nach der Beschleunigungsphase wird danach mit hohem Moment abgebremst und das Fahrzeug zum Stillstand gebracht. Im Prinzip ist vor dem Bremsvorgang der entsprechende Konstantfahrzyklus einzubauen.

3.3 Energieumsatz während eines Start-Stop-Zyklus

Während dieses Zyklus startet die Maschine im Motorbetrieb und geht anschließend in den Generatorbetrieb über, wo ein Großteil der kinetischen Energie des Fahrzeugs in die Batterie zurückgeliefert wird (Abb. 6). Die mechanische Bremse sollte im Idealfall nicht benötigt werden. Es hängt nun bei gegebener maximaler elektrischer zur Verfügung stehender Leistung von der Masse des Fahrzeugs ab, wie lange die Beschleunigungsphase dauert.

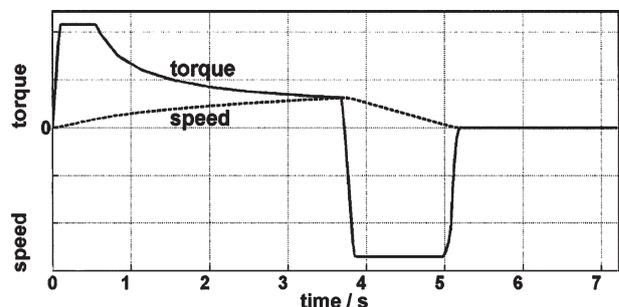


Abb. 6. Einfacher Start-Stop-Zyklus des Antriebs

Aus der Drehmoment- und Drehzahlvorgabe des Antriebs ergibt sich über den bekannten multiplikativen Zusammenhang die aktuell benötigte mechanische Leistung (negativ während der Bremsphase). Eine Integration führt zur mechanisch umgesetzten Energie während des Zyklus.

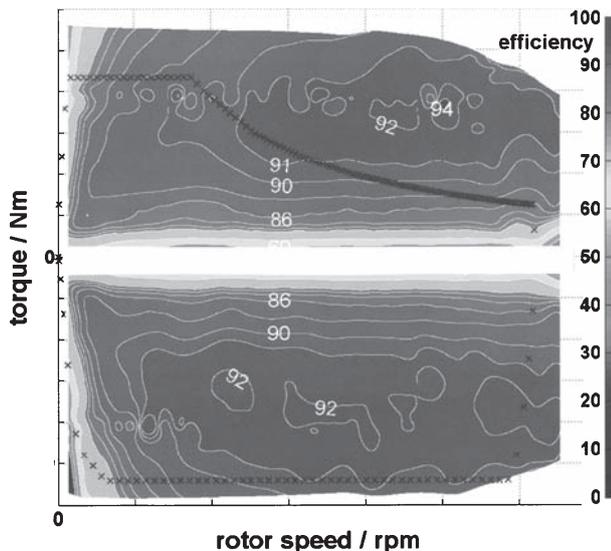


Abb. 7. Wirkungsgrad einer PSM für Elektrotraktion

Zur Berechnung der im Zyklus zu- bzw. abgeführten elektrischen Energie wird das Muscheldiagramm der elektrischen Maschine verwendet (Demmelmayr, Schrödl, Eilenberger, 2011). Es zeigt in der Drehmoment-/Drehzahl-Ebene die gemessenen Wirkungsgrade in allen motorischen und generatorischen Betriebspunkten (Abb. 7). Nun können die beiden Zeitverläufe von Drehmoment und Drehzahl des Antriebs in das Muscheldiagramm übertragen werden, wobei die Zeit zum Parameter in dieser geschlossenen Kurve wird.

Nun kann der Zyklus in Zeitinkremente (z. B. 0,25 s) zerlegt und aus dem Muscheldiagramm die elektrische Leistung aus der mechanischen Leistung und dem Wirkungsgrad im betreffenden Arbeitspunkt bestimmt werden. Eine Multiplikation mit dem Zeitinkrement liefert die entsprechende elektrische Energie.

Beim konkreten Zyklus wurde beispielsweise eine elektrische Energie von 150 kW bis zum Ende der Beschleunigungsphase zugeführt. Während der Bremsphase wurde eine elektrische Bremsenergie von etwas über 100 kW in die Energieversorgung zurückgeliefert. Die motorische Spitzenleistung beträgt beim Einsatz der Feldschwächung etwa 40 kW. Rechnet man die Zykluszeit mit 5,5 s, so beträgt die durchschnittliche thermisch anfallende Verlustleistung die Differenz zwischen elektrisch zugeführter und mechanisch abgegebener Energie, dividiert durch die Zykluszeit, also

$$P_v, \text{mittel} = (150 \text{ kW} - 100 \text{ kW}) / 5,5 \text{ s} = 9 \text{ kW}.$$

Der „durchschnittliche Wirkungsgrad“ während eines Start-Stop-Zyklus liegt also deutlich unter jenem während der Konstantfahrt. Der Grund liegt im schlechten Wirkungsgrad bei kleinen Drehzahlen, die natürlich bei jedem Startvorgang durchfahren werden müssen. Angemerkt sei, dass bei Asynchronmotoren der Wirkungsgrad bei kleinen Drehzahlen noch deutlich schlechter als bei PSMs ist.

3.4 Energieumsatz während einer Konstantfahrt

Erfahrungsgemäß beträgt der Energiebedarf zur (moderaten) Zurücklegung von 100 km mit einem PKW in der Größenordnung von 10–15 kWh. Unter Annahme einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 80 km/h ergibt das eine durchschnittliche mechanisch benötigte Leistung von etwa 10 kW. Aus obigem Wirkungsgradfeld ist ersichtlich, dass bei vernünftiger Auslegung der PSM der Wirkungsgrad für einen großen Betriebsbereich um 90 % liegt, es fällt

also bei Konstantfahrt eine thermische Leistung von etwa 1 kW an. Diese Leistung ist aus dem elektrischen Antrieb abzuführen. Aus den anderen Komponenten (Batterie, Nebenaggregate) fällt natürlich zusätzliche Wärme an, die entsprechend zu managen ist. Bei einem durchschnittlichen Fahrzyklus steht also eine thermische Leistung von einigen wenigen kW zur Verfügung, die bevorzugt in einem Flüssigkeitskühlkreislauf geführt wird, um die Komponenten kompakt zu halten.

Betrachtet man den Heizbedarf eines konventionell aufgebauten Fahrzeugs bei niedrigen Umgebungstemperaturen von 5–12 kW, so ist ersichtlich, dass der Elektroantrieb den Wärmebedarf aus seiner Verlustleistung nicht direkt decken kann, außer es werden innovative Konzepte betreffend Wärmedämmung und Bereitstellung von thermischer Energie angewendet.

3.5 Innovatives Management der anfallenden Verlustwärme

Zum Heizen eines Elektrofahrzeugs steht im Prinzip die direkte Elektroheizung, versorgt über die Batterie, zur Verfügung. Dies sollte aufgrund der schwierigen Energiespeicherung nur als letztes Mittel eingesetzt werden.

Als bevorzugte Wärmequelle sollte natürlich die Verlustwärme aus den genannten Komponenten verwendet werden. Wenn diese über einen Flüssigkeitskreislauf geführt wird, kann eine relativ einfache Führung der Wärme durchgeführt werden. Im einfachsten Fall wird diese Wärme sofort an der benötigten Stelle eingespeist. Ein innovativer Ansatz ist, eine Wärmepumpe zu verwenden, die aus dieser Abwärme, gegebenenfalls ergänzt durch Wärmeentzug aus der Umgebungsluft, deutlich mehr Wärmeangebot zur Verfügung stellt. Die dabei erreichbare Leistungszahl bei Wärmepumpenbetrieb liegt dabei deutlich über 2 (Steinberg, 2006).

Da eine Klimaanlage zur Standardausrüstung eines KFZ gehört, sei angemerkt, dass eine kombinierte Anlage für Kühl- und Heizbetrieb vorteilhaft darstellbar ist.

4. Zusammenfassung und Forschungsbedarf

Die Elektrofahrzeuge der ersten Generation haben bereits die Marktreife erlangt und werden derzeit im Markt eingeführt. Sie stellen im Wesentlichen fortschrittliche Modifikationen des klassischen Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor dar.

Zukünftig wird das Wärmemanagement im Fahrzeug, um Komfortfunktionen mit geringem Energieaufwand zu ermöglichen, eine bedeutende Rolle spielen. Insbesondere die thermische Isolierung des Fahrzeugs, um einerseits mit geringem Energieeinsatz eine Heizung und Kühlung zu ermöglichen, erfordert noch einen erheblichen Forschungsaufwand.

Weiterhin sind eine Reduzierung der Fahrzeugmasse, des Rollwiderstandes sowie eine Verbesserung der Rekuperationsfähigkeit für Bremsenergie weitere Forschungsziele. Da voraussichtlich ein breites Einsatzfeld der Elektromobilität in den suburbanen Regionen liegen wird und hier die mittlere Geschwindigkeit nicht sehr hoch ist, stellt eine Verringerung des Luftwiderstandes kein vordringliches Ziel dar.

Literatur

- Demmelmayr, F., Schrödl, M., Eilenberger, A. (2011a): Sensorloser Betrieb von PM-Außenläufermaschinen mit konzentrierten Wicklungen. *e&i* (128), H. 3 (2011), S. 68–74.
- Demmelmayr, F., Troyer, M., Schrödl, M. (2011b): Advantages of PM-machines Compared to Induction Machines in Terms of Efficiency and Sensorless Control in Traction Applications. Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Melbourne, Australia; 7.–10. 11. 2011. In: *IECON2011-ICELIE 2011*, ISBN: 978-1-61284-971-3; S. 1–7.

<http://www.mila-family.com/>.

Jakobi, M., Hofmann, P., Geringer, B. (2011): Neue Wärmespeichertechnologien für den Einsatz in zukünftigen Fahrzeugen. 32. Int. Motorensymposium, Wien, 2011.

Lang, M. (2011): Erneuerbare Energie im Individualverkehr der Zukunft. Tagung: Highlights der Bioenergieforschung, Wieselburg, 30.–31. 3. 2011.

Schuster, A., Leitinger, C., Brauner, G. (2010): Elektromobilitätsregion VLOTTE, Energetische Begleitforschung der TU Wien. Endbericht 19. April 2010. Von der FFG gefördertes Forschungsprojekt 2008–2010.

Steinberg, P. (2006): Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs V. Renningen: Expert, ISBN 978-3-8169-2651-7, S. 204.

Autoren



Günther Brauner

wurde 1942 in Salzburg geboren. Nach Studium der Nachrichtentechnik und Promotion auf dem Gebiet der Hochspannungstechnik an der Technischen Universität Darmstadt war er 14 Jahre Leiter einer technisch-wissenschaftlichen Abteilung für Systemanalyse und Software bei AEG Frankfurt im Bereich Netzanlagen. Von 1990 bis 2010 leitete er das Institut für

Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft an der Technischen Universität Wien. Im Herbst 2010 emeritierte Prof. Brauner. Seine aktuellen Forschungsgebiete sind nachhaltige Energiesysteme und flexible Kraftwerke, Versorgungssicherheit, autonome dezentrale regenerative Energiesysteme und „Smart Cities“, Elektromobilität und nachhaltige Versorgungsinfrastrukturen.



Bernhard Geringer

Nach seiner Industrietätigkeit bei Daimler AG Stuttgart (Motorenentwicklung) und Magna-Steyr (Leitungsfunktionen in der Gesamtfahrzeugentwicklung) ist er seit 2002 Leiter des Institutes für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik an der Technischen Universität Wien und Dekan der Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften. Seine aktuellen For-

schungsschwerpunkte sind alternative Antriebe (Hybrid- und Elektrofahrzeuge) sowie Programme für Verbrauchsthemen, Brennverfahren für konventionelle Otto- und Dieselmotoren, Abgasnachbehandlung, Biokraftstoffe und alternative Kraftstoffe. Prof. Geringer ist Mitglied in mehreren Auswahljürs für wissenschaftliche Auszeichnungen, Mitglied in Wissenschaftlichen Beiräten und Organisationsmitglied von Fachkonferenzen.



Manfred Schrödl

Studium der Elektrotechnik an der Technischen Universität Wien, Studienfach Industrielle Elektronik und Regelungstechnik, Abschluss 1982. Universitätsassistent am Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe der TU Wien, 1987 Promotion zum Dr. techn., 1992 Habilitation für Elektrische Antriebe und Leistungselektronik in der Antriebstechnik.

1993–1996 Leiter F&E bei Elin Verkehrstechnik Wien, 1996–1998 Bereichsleiter Zentrale Technik bei Flender ATB, Spielberg, Steiermark. Seit 1998 Ordentlicher Universitätsprofessor für Elektrische Antriebe und Maschinen sowie Vorstand des Instituts für Energiesysteme und Elektrische Antriebe an der TU Wien.