

## Elektrofahrzeuge

Bedeutung, Stand der Technik,  
Handlungsbedarf

## Autoren

### ETG Task Force Elektrofahrzeuge

Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker, Universität Paderborn  
 Dipl.-Ing. Matthias Bösing, RWTH Aachen University  
 Matthias Bredehorn, RWTH Aachen University  
 Prof. Dr.-Ing. Wolf-Rüdiger Canders, Technische Universität Braunschweig  
 Dipl.-Ing. Bernd, Cebulski IAV GmbH, Chemnitz  
 Prof. Dr.-Ing. Peter Doetsch, RWTH Aachen University  
 Prof. Dr. ir. Rik De Doncker, RWTH Aachen University (ISEA & E.ON ERC)  
 Dr.-Ing. Omid Forati Kashani, Continental Engineering Services GmbH, Nürnberg  
 Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich, Technische Universität Braunschweig  
 Dipl.-Ing. (FH) Dipl.-Wirt.Ing. (FH) Thomas Grube, Forschungszentrum Jülich GmbH  
 Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.h.c. Kay Hameyer, RWTH Aachen University  
 Dipl.-Ing. Martin Hennen, RWTH Aachen University  
 Prof. Dr.-Ing. Klaus Hoffmann, Universität der Bundeswehr Hamburg  
 Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann, Technische Universität Dresden  
 Dr.-Ing. Dorin Iles, Ingenieurbüro Dr.-Ing. Dorin Iles, St. Georgen  
 Dipl.-Ing. Alexander Kreim, Technische Universität Berlin  
 Dipl.-Ing. Benedikt Lutz, RWTH Aachen University  
 Prof. Dr.-Ing. Josef Lutz, Technische Universität Chemnitz  
 Dr.-Ing. Martin März, Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie, Erlangen  
 Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
 Dipl.-Ing. Christian Neef, WVI GmbH, Braunschweig  
 Dipl.-Ing. Wilhelm Peters, Universität Paderborn  
 Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz, Technische Universität Dortmund  
 Dipl.-Ing. Johannes Rolink, Technische Universität Dortmund  
 Prof. Dr. rer. nat. Dirk Uwe Sauer, RWTH Aachen University  
 Tim Schäfer, Li-Tec Battery GmbH, Kamenz  
 Prof. Dr.-Ing. Uwe Schäfer, Technische Universität Berlin  
 Dr.-Ing. Heinz Schäfer, hofer eds GmbH, Würzburg  
 Dr.-Ing. Benedikt Schmülling, RWTH Aachen University  
 Dr.-Ing. Marc Schöning, RWTH Aachen University  
 Prof. Dr.-Ing. Detlef Stolten, Forschungszentrum Jülich GmbH  
 Dipl.-Ing. Daniel van Treek, RWTH Aachen University  
 Prof. Dr. rer. nat. Manfred Wermuth, Technische Universität Braunschweig  
 Dr.-Ing. Michael Wittler, FEV Motorentechnik GmbH, Aachen  
 Dr.-Ing. Rainer Wirth, Technische Universität Braunschweig

## Impressum

**VDE** VERBAND DER ELEKTROTECHNIK  
 ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK e.V.

Stresemannallee 15 · 60596 Frankfurt am Main  
 Fon 069 6308-0 · Fax 069 6312925  
<http://www.vde.com> · E-Mail: [etg@vde.com](mailto:etg@vde.com)

Zusätzlich zu dieser Veröffentlichung wurde die Publikation  
 „VDE-Studie Elektrofahrzeuge – Gesamttext“ herausgegeben.  
 Titelbild: Konzept StreetScooter, RWTH Aachen University  
 Gestaltung: Michael Kellermann · Graphik-Design · Schwielowsee-Caputh

April 2010 (aktualisiert November 2010)

ISBN 978-3-925512-21-6

# Elektrofahrzeuge

**Bedeutung, Stand der Technik,  
Handlungsbedarf**

**Studie der  
Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG)**

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	5
<b>1 Einführung</b>	7
<b>2 Technische Aspekte von Elektrofahrzeugen</b>	11
2.1 Typen und Kategorien	11
2.2 Leistungselektronische Bauelemente	14
2.3 Antriebswechselrichter	21
2.4 Elektrische Maschinen	26
2.5 Bewertung und Auswahl von elektrischen Antriebssträngen	33
2.6 Hilfsaggregate	35
2.7 Batterietechnologien und Batteriesysteme	40
2.8 Ladegeräte	47
2.9 Range Extender	51
2.10 Steckverbindungen	55
<b>3 Sicherheit von Elektrofahrzeugen</b>	57
3.1 Elektrische Sicherheit	57
3.2 Brandschutz und chemische Sicherheit	58
3.3 Weitere Sicherheitsaspekte	59
3.4 Ausblick und Forschungsschwerpunkte	61
<b>4 Verkehrliche Kennwerte zum Einsatz von Kraftfahrzeugen</b>	62
4.1 Kennwerte des Kraftfahrzeugeinsatzes	63
4.2 Ausblick	69
<b>5 Integration von Elektrofahrzeugen in das Versorgungsnetz</b>	70
5.1 Lade- und Abrechnungskonzepte	70
5.2 Netzauswirkungen von Elektrofahrzeugen	73
5.3 Bewertung	79
<b>6 Kernaussagen und Handlungsbedarf</b>	80
Abkürzungen	86
Literaturverzeichnis	87

# Vorwort

Viele Gründe sprechen dafür, dass Elektrofahrzeuge in Zukunft eine bedeutende Rolle im Straßenverkehr einnehmen werden. Elektrofahrzeuge als Batterie- oder Brennstoffzellenfahrzeuge bieten bei zunehmend regenerativem Energiemix die Möglichkeit zu Einsparungen beim CO<sub>2</sub>-Ausstoß, zur Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern sowie eine Reduktion von lokalen und globalen Emissionen. Die Elektrifizierung des Verkehrs ermöglicht die flexible Verwendung verschiedener Energiequellen und schafft damit größere Unabhängigkeit von Erdöl und politisch instabilen Lieferländern. Bezogen auf Elektrofahrzeuge mit Batterien besteht ein weiterer Vorteil in der Verfügbarkeit eines bereits vorhandenen Energieverteilungsnetzes. Sofern Schnellladung nicht erforderlich ist, wird bis etwa 1 Mio. E-Fahrzeuge kein nennenswerter Netzausbau notwendig. Die Investitionen für die Netzinfrastruktur sind somit zu Beginn überschaubar. Mit steigender Marktdurchdringung kann das Netz sukzessive ausgebaut und an den Bedarf angepasst werden. Im Gegensatz zu Biokraftstoffen kann elektrische Energie mit einem geringen Flächenbedarf bereitgestellt werden.

Elektrofahrzeuge mit Batterien bieten auf Grund ihres einfachen Aufbaus Vorteile in Wartung und Haltbarkeit. Ölwechsel sind nicht mehr erforderlich und durch rekuperatives Bremsen halten die Bremsbeläge länger. Weiterhin ermöglichen Elektroantriebe völlig neue Fahrzeugkonzepte. Die geänderten Rahmenbedingungen wie z. B. Reichweite, Batteriekosten und Nutzerverhalten erfordern neue Geschäftsmodelle (z. B. Batterieleasing und Kombiangebote) und erlauben den Quereinstieg von Unternehmen, die bisher nicht maßgeblich im PKW-Sektor tätig waren wie z. B. Energieversorger, Elektroindustrie und Logistikunternehmen.

Heutige Batterietechnologien führen im PKW-Einsatz bei Reichweiten oberhalb von etwa 150 km zu deutlich erhöhten Kosten und Fahrzeugmassen. Elektrofahrzeuge mit Batterien lassen sich bei Beibehaltung heutiger Reichweiten daher nicht sinnvoll darstellen. Auf der anderen Seite zeigen aktuelle Verkehrsumfragen, dass sich auch bei reduzierter PKW-Reichweite eine beträchtliche Anzahl von Fahrten ohne Weiteres mit Elektrofahrzeugen bestreiten lassen. So legen fast 90% aller Fahrzeuge privater Halter pro Tag weniger als 100 km zurück.

Für lange Fahrten erscheinen alternative Mobilitätskonzepte sinnvoller. Im privaten Bereich kommen dafür eigene oder gemietete hybride und konventionelle Fahrzeuge, Range Extender und der öffentliche Fernverkehr sowie Schnelllade- oder Batteriewechselstationen prinzipiell in Frage. Wichtig ist, dass sie für den Fahrer von Elektrofahrzeugen das subjektive Empfinden erhalten, die Mobilität frei gestalten zu können. Die alternativen Mobilitätskonzepte sollten sowohl finanziell erschwinglich als auch komfortabel sein.

Gründe genug, warum die Bedeutung von Elektrofahrzeugen in Zukunft steigen und zu Veränderungen in der bisherigen Geschäftslandschaft führen wird. Unter diesen Rahmenbedingungen ist es die Aufgabe der vorliegenden Studie, die Potentiale von Elektrofahrzeugen mit Batterien aufzuzeigen, die technische Realisierbarkeit zu bewerten und den Forschungs- und Entwicklungsbedarf abzuleiten. Hiermit sollen der Öffentlichkeit und der Politik ausgewogene Informationen und Empfehlungen zur Verfügung gestellt werden, welche Forschungs- und Entwicklungsinitiativen die Einführung von Elektrofahrzeugen unterstützen können. Dazu werden in dieser Studie die wesentlichen Komponenten von Elektrofahrzeugen unter technischen Gesichtspunkten bewertet. Neben den Schlüsselkomponenten des Antriebsstrangs werden auch Hilfsaggregate, Ladegeräte, Steckverbinder und Range Extender betrachtet. Es hat sich gezeigt, dass die technische Realisierbarkeit von Elektrofahrzeugen gegeben ist und ein wesentliches Forschungsziel die Entwicklung von speziell auf eine Serienproduktion zugeschnittenen Komponenten ist. Dabei spielen Zuverlässigkeit, Kosten und Sicherheit eine entscheidende Rolle.

Neben dem Fahrzeug selber ist die Anbindung der Fahrzeuge an das Versorgungsnetz ein wichtiger Aspekt, der in dieser Studie betrachtet wird. Anhand von Szenarien für die Einführung von 1 Mio. Elektrofahrzeugen wird gezeigt, dass keine großen Investitionen in die Netze notwendig sind. Dennoch müssen für eine größere Verbreitung von Elektrofahrzeugen frühzeitig klare Rahmenbedingungen geschaffen werden, um einheitliche Schnittstellen zu gewährleisten.

# 1 Einführung

Da elektrische Energie sowohl aus verschiedenen fossilen Primärenergieträgern als auch aus regenerativen Energieträgern erzeugt werden kann, kann durch die Einführung von Elektrofahrzeugen die Abhängigkeit unserer Volkswirtschaft von Ölimporten reduziert und die Mobilität auf eine zukunftssichere Basis gestellt werden. Dieses kommt auch in den Meseberger Beschlüssen der Bundesregierung und den Zielsetzungen der nationalen Strategiekonferenz Elektromobilität zum Ausdruck [1].

Die Gesamtemissionen eines Elektrofahrzeugs hängen dabei stark vom aktuellen Energiemix ab. Stützt sich das Elektrofahrzeug ausschließlich auf fossil erzeugte elektrische Energie, wie z. B. aus Kohlekraftwerken, so kann hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen näherungsweise von einer Emissionsgleichheit zwischen Elektrofahrzeug und konventionell angetriebenem Fahrzeug ausgegangen werden [2]. Aber selbst dann wäre bereits die Abhängigkeit vom Erdöl als Energierohstoff für den Straßenverkehr reduzierbar. Eine deutliche Reduktion der Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs wird erreicht, wenn die elektrische Energie CO<sub>2</sub>-neutral erzeugt wird. Dafür werden europaweit Stromerzeugungstechnologien auf Basis von Wasserkraft, Windkraft und Solarenergie, von Kohle mit CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -Speicherung (Carbon capture and storage, CCS) und von Kernenergie eingesetzt oder diskutiert.

Ein weiterer Ansatz, PKW CO<sub>2</sub>-neutral und unabhängig vom Erdöl zu gestalten, besteht in der Verwendung nachwachsender Rohstoffe zur Produktion von Biokraftstoffen. Eine Überschlagsrechnung zeigt schnell, dass dieser Weg alleine jedoch nicht zum gewünschten Ziel führen kann. Mit künftigen Prozessen zur Herstellung von Biokraftstoffen der zweiten Generation können aus einem Hektar Ackerland pro Jahr etwa 4.000 – 5.000 Liter Kraftstoff produziert werden [3][4]. Bei einem effizienten Wagen mit Verbrennungsmotor, der im Mittel 5 l Kraftstoff auf 100 km verbraucht, wird mit Biokraftstoffen von einem Hektar eine jährliche Fahrleistung von etwa 80.000 km erreicht. Bei heute 43 Mio. zugelassenen PKW und einer Gesamtfahrleistung von 580 Mrd. km pro Jahr würden folglich 7,2 Mio. Hektar oder 42% der landwirtschaftlichen Fläche Deutschlands zur Produktion des Kraftstoffes benötigt. Eine vollständige Umstellung des PKW-Verkehrs auf Biokraftstoffe ist somit sehr unwahrscheinlich. Außerdem bestehen Zweifel an der Ökobilanz von Biokraftstoffen [5][6].

Doch die durch Verbrennungsmotoren entstehenden Umwelteinflüsse gehen über die Emission von CO<sub>2</sub> hinaus. So werden mit Elektrofahrzeugen auch regionale Umweltauswirkungen wie Versauerung (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CKW und NH<sub>3</sub>), Eutrophierung (NO<sub>x</sub>), erhöhte Ozonwerte und die Feinstaubbelastung reduziert, die bei regelmäßiger Exposition zu Atemwegserkrankungen, Lungenfunktionsstörungen und Lungenentzündungen führen können. Auch die durch den Antrieb und den Reibungswiderstand verursachten Lärmemissionen sind vor allem im städtischen Bereich von hoher gesundheitlicher Relevanz. Circa 50% der Bevölkerung sind tagsüber akut durch Verkehrslärm in ihrem physischen und sozialen Wohlbefinden beeinträchtigt (>55 dB(A)). Etwa 15% sind durch Verkehrslärm oberhalb 65 dB(A) betroffen, wodurch ein erhöhtes Risiko für Herz-Kreislaufkrankungen besteht [7]. In Hinsicht auf die Emissionen bieten Elektrofahrzeuge erhebliche Vorteile. So ist es durch Elektrofahrzeuge möglich, Emissionen, die bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor in den Städten anfallen, in Kraftwerke außerhalb der Städte zu verlegen und somit die Umwelt in besonders belasteten Regionen zu entlasten. Diese Option ist parallel zu den Aktivitäten zu sehen, den Anteil der regenerativen Energie am Strommix weiter zu steigern, so dass auch die gesamte globale Emissionsbilanz zu deutlich günstigeren Werten hin verschoben wird. Auch bietet die Filterung der Abgase in großen zentralen Kraftwerken nicht nur ökologische, sondern auch volkswirtschaftliche Vorteile gegenüber der dezentralen Abgasfilterung in den einzelnen PKW.

Bei den Betriebskosten ist ein Elektrofahrzeug im Vergleich zu einem herkömmlichen Fahrzeug bereits heute im Vorteil, da eine Kilowattstunde Fahrenergie am Rad mit dem Elektroantrieb für den Endkunden in etwa nur die halben Kosten verursacht. So werden beispielsweise bei einem typischen Fahrzeug der unteren Mittelklasse auf einer Strecke von 100 km ungefähr 15 kWh an Energie benötigt. Dies entspricht beim Elektrofahrzeug einem Preis von ca. 3 – 4 € pro 100 km. Ein vergleichbares sparsames Fahrzeug mit Ottomotor verbraucht bei moderater Fahrweise ungefähr 5 l pro 100 km, also etwa 6 – 7 €. Unklar ist allerdings, wie sich die Strompreise mit Blick auf die weitere Integration fluktuierender, erneuerbarer Energie entwickeln werden und wie elektrische Energie für Fahrzeugantriebe zukünftig steuerlich behandelt wird, vor allem hinsichtlich der Anwendung der Mineralölsteuer. Die Wartungskosten eines Elektrofahrzeugs werden als wesentlich geringer eingeschätzt, da Elektromotor und Wechselrichter praktisch wartungsfrei sind. Ebenso sind ein geringerer Verschleiß der Bremsen und somit eine geringere Bremsstaubbelastung zu erwarten. Damit sind Elektrofahrzeuge auch bei leicht erhöhten Anschaffungskosten am Markt konkurrenzfähig.



Die elektrische Antriebstechnik eröffnet wegen der guten Regelbarkeit und der hohen Flexibilität bezüglich Ausführung und Anordnung der Antriebe erhebliche Potentiale hinsichtlich Sicherheit, Fahrkomfort und Karosseriegestaltung. Hierzu gehört der höhere Fahrkomfort durch Geräuscharmheit und zugkraftunterbrechungsfreies Fahren, welches auch einen erhöhten Fahrzeugdurchfluss erwarten lässt. Weiterhin bieten die Elektroantriebe erhebliche Möglichkeiten für eine funktionellere Karosseriegestaltung hinsichtlich Anordnung der Aggregate und der Sicherheitsfunktionen (Crash, Fußgängerunfall). Durch die schnellen Reaktionszeiten der Elektromaschine stehen neue Freiheitsgrade für eine erhöhte Fahrsicherheit zur Verfügung.

Unter der Voraussetzung, dass unsere Mobilität auch in Zukunft erhalten bleiben soll, werden häufig Zweifel laut, ob dies mit Elektrofahrzeugen überhaupt möglich ist. In diesem Zusammenhang wird oft gefordert, die Reichweite von Elektrofahrzeugen auf über 500 km zu steigern. Ein kurzer Blick auf die verfügbaren Energiespeicher zeigt jedoch schnell, dass eine solche Reichweite sich heutzutage ökonomisch nicht sinnvoll realisieren lässt. Beim Einsatz von modernen Akkutechnologien mit einem spezifischen Energiegehalt von 100 Wh/kg und einem Verbrauch eines effizienten elektrischen Kleinwagens von etwa 15 kWh/100km ergibt sich bei einer geforderten Reichweite von 500 km ein Batteriegewicht von etwa 750 kg. Dies ist für einen Kleinwagen nicht akzeptabel und würde neben den hohen Kosten für die große Batterie auch zu einem erhöhten Energieverbrauch des Fahrzeugs führen. Dass wir in Zukunft nicht auf Mobilität verzichten müssen, zeigt ein Blick auf das heutige Fahrverhalten. Dazu werden in Kapitel 4 verschiedene Auswertungen des täglichen Fahrverhaltens präsentiert. Bei der Betrachtung des tatsächlichen Nutzerverhaltens zeigt sich, dass fast 90% aller Tagesfahrleistungen privater PKW kleiner als 100 km sind. Ein Elektroauto mit einer Reichweite von 100 km würde folglich bereits den Großteil aller heute getätigten Fahrten abdecken. Das Batteriepack für ein solches Fahrzeug würde lediglich 150 kg wiegen und ein Volumen von etwa 70 l haben und könnte in einem Kleinwagen untergebracht werden.

Wird ein Elektrofahrzeug als Zweitwagen eingesetzt, der in 2005 in 20% aller Haushalte vorhanden war [8], würden sich also nur sehr geringe Einschränkungen für den Nutzer ergeben, da längere Fahrten leicht mit dem anderen Fahrzeug zurückgelegt werden können. Aber auch wenn nur ein Fahrzeug zur Verfügung steht, kann die Mobilität für lange Strecken durch verschiedene Konzepte erhalten bleiben. Zum einen besteht die Möglichkeit, die Reichweite von Elektrofahrzeugen durch Range Extender auf Basis von kleinen Verbrennungsmotoren mit Generator oder Brennstoffzellen, den Wechsel der ganzen Batterie oder Schnell-

ladestationen erheblich zu steigern. Damit kann auch der Forderung nach Reichweiten von 500 km und darüber hinaus Rechnung getragen werden. Ein Verzicht auf Mobilität ist somit auch bei einem gesteigerten Einsatz von Elektrofahrzeugen nicht abzusehen.

Neben den objektiven Gesichtspunkten der Mobilität spielt auch das subjektive Empfinden eine Rolle. Fahrzeuge sind neben einem Gebrauchsgut oft auch ein mit Emotionen verbundenes Luxusgut. Genauso wichtig wie die Frage nach der Mobilität mit Elektrofahrzeugen ist somit das Image. Aus diesem Grund sollten Elektrofahrzeuge nicht nur unter dem Gesichtspunkt entwickelt werden, möglichst viele Funktionen konventioneller Fahrzeuge nachzubilden, sondern vor allem neue Funktionen und soziale Vorteile zu realisieren [9], [10].

## 2 Technische Aspekte von Elektrofahrzeugen

### 2.1 Typen und Kategorien

Der Begriff Elektrofahrzeug fasst verschiedene Fahrzeugkonzepte wie rein batteriebetriebene Elektrofahrzeuge, Fahrzeuge mit Brennstoffzellen oder Range Extender zusammen.

Elektrofahrzeuge sind Fahrzeuge, die das Antriebsmoment ausschließlich über einen Elektromotor mit einem Antriebsumrichter bereitstellen. Der Antriebsenergiebedarf wird einem Speicher mit elektrischem Ausgang entnommen.

Jedes Elektrofahrzeug besitzt einen primären Energiespeicher, der den überwiegenden Teil der Fahrenergie zur Verfügung stellt und der im einfachsten Fall so ausgelegt ist, dass er auch die maximale, kurzzeitig erforderliche Antriebsleistung zur Verfügung stellen kann. Als primäre Energiespeicher werden üblicherweise Batterien oder Brennstoffzellen mit Wasserstoffspeicher verwendet. Um den Primärspeicher von zu hohen Leistungsspitzen zu entlasten, kann dieser durch einen sekundären Energiespeicher ergänzt werden. Als sekundäre Energiespeicher können die typischen Kurzzeitspeicher wie Superkondensatoren oder Schwungmassenspeicher eingesetzt werden.

Hybridfahrzeuge wiederum stellen eine eigene Kategorie dar und werden in diesem Bericht nicht detailliert betrachtet. Der Übergang zwischen Hybridfahrzeug und Elektrofahrzeug ist dabei unscharf, wobei beispielsweise das Elektrofahrzeug mit Reichweitenerhöhung durch ein Ladeaggregat (Range Extender) den Übergang zur seriellen Hybridstruktur markiert. Der Unterschied zwischen einem Elektrofahrzeug mit Ladeaggregat und einem Serienhybrid liegt in der Dimensionierung des primären Energiespeichers.

#### 2.1.1 Fahrzeugkategorien

Aufgrund der schon angedeuteten Reichweitenproblematik der reinen Elektrofahrzeuge werden sich in der näheren Zukunft die meisten marktrelevanten Aktivitäten auf Straßenfahrzeuge in der unteren Mittelklasse und der Kleinwagenklasse bzw. bei Nutzfahrzeugen wie z. B. kleinen Lieferwagen für den städtischen Bereich konzentrieren. Bei Mittel- und Oberklassefahrzeugen erwartet der Verbraucher Langstreckentauglichkeit für Geschäfts- und Urlaubsreisen. Hier werden weiterhin sparsame, konventionelle Antriebskonzepte oder Hybridfahrzeuge mit aus dem Stromnetz nachladbarer Batterie und erhöhter Reichweite im rein elektrischen (emissionsfreien) Betrieb (Plug-In Hybrid) sowie klassische Hybridfahrzeuge vorherrschen.

Ebenso werden bei Nutzfahrzeugen mit hoher täglicher Kilometerleistung vorerst der konventionelle und der Hybridantrieb vorherrschen. Bei Linienbussen und auch bei Sonderfahrzeugen wie z. B. Fahrzeugen zur Müllentsorgung gibt es infolge ihres speziellen Fahrprofils ein hohes Rekuperationspotential von typischerweise 25 % der Fahrenergie, welches durch Elektro- und Hybridantriebe genutzt werden kann. Bei Linienbussen wäre zudem durch den kurzen Haltestellenabstand und die Vorherbestimmtheit der Fahrstrecke auch eine Kurzzeit-Nachladung an Haltestellen möglich.

Fahrten im privaten Bereich finden überwiegend im Stadt- und ländlichen Nahbereich statt. In etwa 90 % aller Fälle liegt die Tagesfahrstrecke unter 100 km (vgl. Kapitel 4) und die Dauer einer Fahrt unter 40 Minuten, so dass die meisten Fahrten mit modernen Batterien abgedeckt werden können.

Da 20m% der Haushalte in Deutschland mehr als ein Auto besitzen, könnten mit diesen Zweitwagen Fahrten in der Stadt und im Nahbereich elektrisch durchgeführt werden, während das andere Fahrzeug für größere Entfernungen zur Verfügung steht. Vergleichbares könnte für die anderen europäischen Länder gelten. Die Antriebsleistungen und Fahrzeugmassen dürften dann ebenfalls denen typischer Zweitwagen (untere Mittelklasse und Kleinwagen) entsprechen, wobei mit Rücksicht auf den Energiespeicher eine Reduzierung des Fahrzeuggewichtes bei vergleichbarer passiver und aktiver Sicherheit zu fordern wäre. Diese Betrachtungen zeigen bereits, dass Elektrofahrzeuge als Kurzstreckenverkehrsmittel in Deutschland durchaus attraktiv sein können.

Für die Märkte in den industrialisierten Ländern folgt jedoch ebenso aus dieser Betrachtung, dass die Anschaffungskosten eines solchen Fahrzeuges mit denen herkömmlicher Zweitfahrzeuge konkurrieren. Auch eine Verkürzung der Fahrzeuglebensdauer durch Ausfall einer teuren Komponente, wie z. B. der Batterie oder der Brennstoffzelle, wird vom Verbraucher nicht akzeptiert werden.

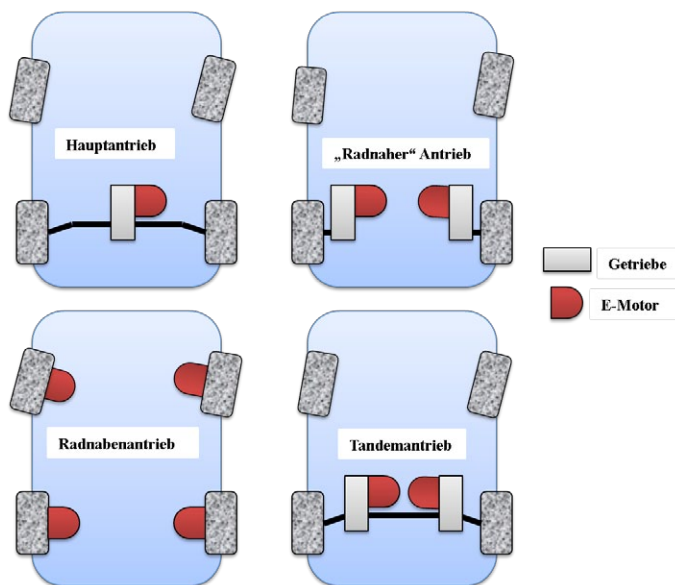
Es wäre jedoch falsch, Elektromobilität nur aus der deutschen bzw. europäischen Sicht zu betrachten. Auch die Märkte in den Schwellenländern bieten Absatzmöglichkeiten für Elektrofahrzeuge. Hervorzuheben sind insbesondere die stark wachsenden Ballungsräume in den BRIC-Ländern (Brasilien, Russland, Indien, China), die mit starken Luftverschmutzungsproblemen kämpfen.

## 2.1.2 Antriebsstrukturen für Elektrofahrzeuge

Der Stand der Technik ist durch die von verschiedenen Herstellern präsentierten Demonstratorfahrzeuge gekennzeichnet. Aus Kostengründen werden zurzeit zentrale Antriebe bevorzugt, die direkt von existierenden Serienfahrzeugen abgeleitet sind. Hier genügt es, den Verbrennungsmotor und das Schalt-/Automatikgetriebe gegen den Elektromotor mit Festübersetzung und Wechselrichter auszutauschen. Der restliche Antriebsstrang bleibt vollständig erhalten. In verschiedenen Demonstra-

tionsfahrzeugen wurden bereits Mehrmotorenantriebe mit Radnabenantrieben verwirklicht. Hierbei handelt es sich jedoch um Versuchsfahrzeuge oder Vorstudien und nicht um seriennahe Fahrzeuge. Abbildung 1 zeigt mögliche Antriebsstrangkfigurationen. Die Verwendung eines Getriebes ist optional, ermöglicht aber, durch die Erhöhung der Maschinendrehzahl das Bauvolumen der Motoren zu senken (vgl. Kapitel 2.4).

Abb. 1: Beispiele für die Anordnung von Elektroantrieben in Kraftfahrzeugen



Entwickelt man das Fahrzeug ausschließlich für einen Elektroantrieb, ermöglicht dieser beim Fahrzeugkonzept und beim Antriebsstrang mehr gestalterische Freiheitsgrade, die vorteilhaft genutzt werden können z.B. für die Karosserieoptimierung (Stichworte: cw-Wert, Crashesicherheit, Fußgängerunfall). Auch auf Seite des Antriebs können durch die Elektrifizierung weitere Funktionalitäten verwirklicht werden. So kann man vom Zentralantrieb abrücken und mehrere kleine Antriebe im Fahrzeug verteilen. Bei Mehrmotorenantrieben wird man im Allgemeinen auf ein Differentialgetriebe verzichten und die Funktion des Differentials in die Antriebssteuerung verlagern.

Die Freiheitsgrade zur Gestaltung der Antriebsstruktur sind bei Elektrofahrzeugen sehr hoch. Grundsätzlich sind vom Zentralantrieb bis zum Einzelradantrieb alle Varianten möglich. Die Antriebe können als Direktantriebe, mit einem Getriebe mit Festübersetzung oder mit einem Schaltgetriebe ausgeführt werden.

Die Unterbringung der Batterie ist beim Design solcher Fahrzeuge vermutlich das größte Problem. Das Batteriesystem ist verhältnismäßig schwer und voluminös (etwa 150 kg und 70 l pro 100 km Reichweite) und kann deshalb die Schwerpunktlage und die Querdynamik des Fahrzeugs erheblich beeinflussen. Jedoch ist eine Aufteilung der

Batterie auf verschiedene Einbauorte unter Beachtung von Schwerpunkt- und Querdynamik des Fahrzeugs prinzipiell möglich. Als weiterer Gesichtspunkt ist die Crash-Sicherheit sowohl des geänderten Fahrzeugaufbaus als auch der Batterie selbst zu berücksichtigen. In den bisher vorgestellten Elektrofahrzeugen ist die Batterie hinter den Vordersitzen (Smart) bzw. anstelle der Rücksitze (Mini E) untergebracht. Bei anderen Fahrzeugen wurde die Batterie unter der Karosserie aufgehängt (Ford). Es wird deshalb eine wesentliche Aufgabe für die Fahrzeughersteller sein, in Zusammenarbeit mit den Batterieherstellern fahrzeugspezifische Packagelösungen zu erarbeiten.

Gelingt es bei der Gestaltung der komplexen Batteriefach-Karosseriestruktur zu einer Standardisierung unter den europäischen Fahrzeugherstellern zu kommen, könnten erhebliche Potentiale zur Kostensenkung infolge der größeren Stückzahlen solcher Standardbatterien erschlossen werden. Es wären dann genormte Zellen und Batteriemodule möglich, die durch Variation von Anzahl und Verschaltung der Module hinsichtlich Spannung und Kapazität zu fahrzeugspezifischen Batteriesystemen zusammengestellt werden können (vgl. Kapitel 2.7). Damit wäre auch die Einführung neuer Geschäftsmodelle wie beispielsweise Batterieleasing durch die Energieversorger oder Batteriewechselverfahren erheblich erleichtert, da eine Standardbatterie die Lagerhaltung und die Ersatzteilbeschaffung deutlich vereinfacht. Jedoch kann zukünftig gerade die Batterie das maßgebliche Differenzierungskriterium zwischen den Automobilherstellern darstellen.

## 2.2 Leistungselektronische Bauelemente

Elektrofahrzeuge erfordern für den Betrieb der Elektromotoren für Fahrantrieb und Hilfsaggregate (Klimakompressor, Lenkunterstützung usw.) leistungsstarke Wechselrichter und darüber hinaus Spannungswandler für das elektrische Energiemanagement und die Netzankopplung. Abbildung 2 zeigt die Struktur des elektrischen Systems eines Elektroautos mit zwei Antriebsmotoren. Die Wechselrichter, Spannungswandler und Ladegeräte dienen zur Umformung elektrischer Energie zwischen Gleich- und Wechsel- oder Drehstrom. An all diese leistungselektronischen Systeme werden sehr hohe Anforderungen in Bezug auf Kosten, Effizienz, Zuverlässigkeit und Lebensdauer sowie, je nach Einbausituation, auch an Bauvolumen und Einsatztemperaturbereich gestellt. Kernstück dieser leistungselektronischen Systeme sind die leistungselektronischen Bauelemente.

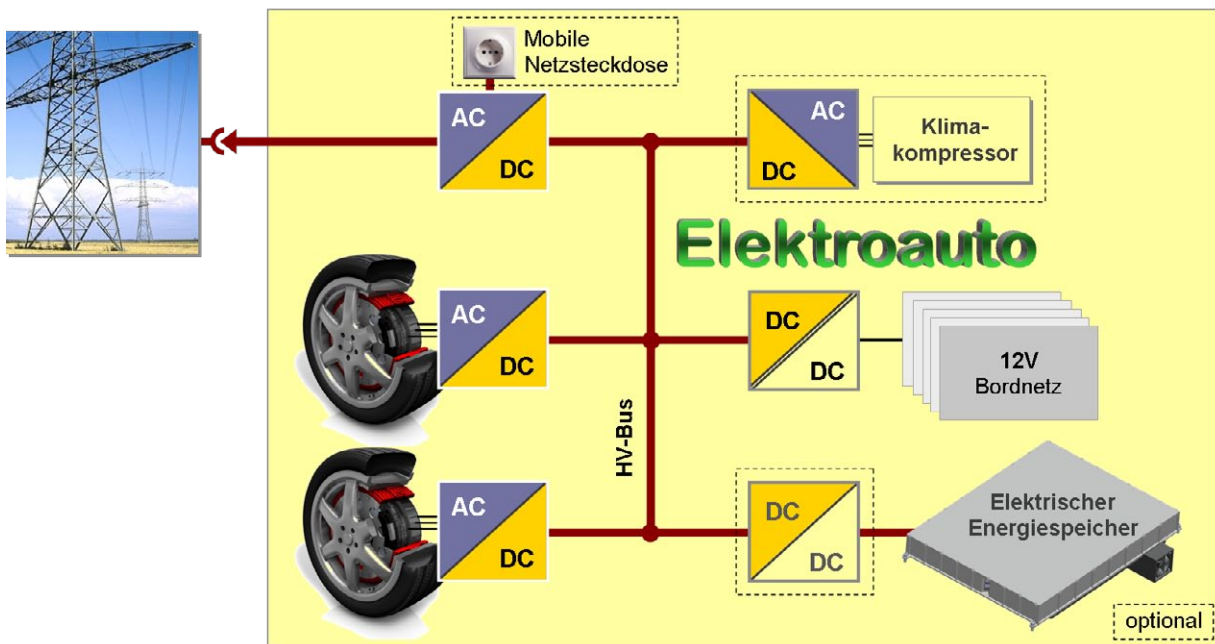


Abb. 2: Struktur der Stromversorgung eines Elektroautos. Die DC/DC-Wandler passen die Spannung der Energiespeicher an die Spannung des HV-Busses an. Die Wechselrichter erzeugen aus der Gleichspannung des HV-Busses sinusförmige Drehfelder für die Antriebsmotoren. Die Anbindung an das Netz geschieht über ein Ladegerät, welches die Netzspannung gleichrichtet.

Die bei vollwertigen Elektroautos benötigten Antriebsleistungen liegen jenseits von 20 kW. Um die dabei auftretenden Ströme – insbesondere mit Blick auf Kabel, Stecker, Kontaktierungen und Halbleiterkosten – in einem noch handhabbaren Rahmen von bis zu einigen hundert Ampere halten zu können, ist ein lokales Versorgungsnetz mit erhöhter Spannung (HV-Bus) erforderlich. Für Elektrofahrzeuge mit Antrieben bis etwa 100 kW werden Spannungen bis 400 (420) V bevorzugt, da dies den Einsatz der breit verfügbaren 600 V Leistungshalbleiter erlaubt. Im Fall höherer Antriebsleistungen (Sport- und Nutzfahrzeuge) finden sich auch darüber hinausgehende HV-Busspannungen (typ. 650 bis 800 V), die dann jedoch den Einsatz von Leistungshalbleitern mit einer höheren Sperrfähigkeit erfordern, z. B. 1200 V. In jedem Fall zieht mit einem elektrifizierten Antriebsstrang in breitem Umfang Hochvolt- und Hochleistungselektronik in die Fahrzeugtechnik ein. Das HV-Bordnetz muss dabei aus Sicherheitsgründen vollständig doppelt galvanisch isoliert, d. h. ohne leitende Verbindung zum Fahrzeugchassis, ausgeführt sein. Wesentliche Entwicklungsziele bei leistungselektronischen Fahrzeugkomponenten sind die Reduzierung von Kosten und benötigtem Bauvolumen. Dazu sind in verschiedenen Roadmaps Zielparame- ter definiert; in Tabelle 2 sind die Eckparameter u. a. aus [11] zusammengestellt.



	Antriebsumrichter		12V-Bordnetz DC/DC-Wandler	
	2015	2020	2015	2020
Kosten in \$/kW	5	3,3	50	25
Leistungsdichte in kW/l	12	13,4	2	3
Wirkungsgrad in %	97,5	98,5	95	96

Tabelle 2: Zieldaten für Leistungselektronik in Elektro- und Hybridfahrzeugen [11]

Betrachtet man die Parameter Bauvolumen, Gewicht, Wirkungsgrad und Kosten im Detail, so zeigt sich, dass in der Leistungselektronik neben den eigentlichen Leistungshalbleitern auch die Aufbautechnik, die notwendigen Kühlmaßnahmen und die passiven Bauelemente erhebliche Bedeutung besitzen (vgl. Abbildung 3). Auch mit Blick auf Parameter wie Einsatztemperaturbereich oder Lebensdauer sind heute vielfach die passiven Bauelemente (Kondensatoren, Spulen und Transformatoren) und die Aufbautechnik die eigentlich limitierenden Faktoren.

Generell gilt, dass jede Optimierung leistungselektronischer Fahrzeugkomponenten eine umfassende Gesamtsystembetrachtung erfordert.

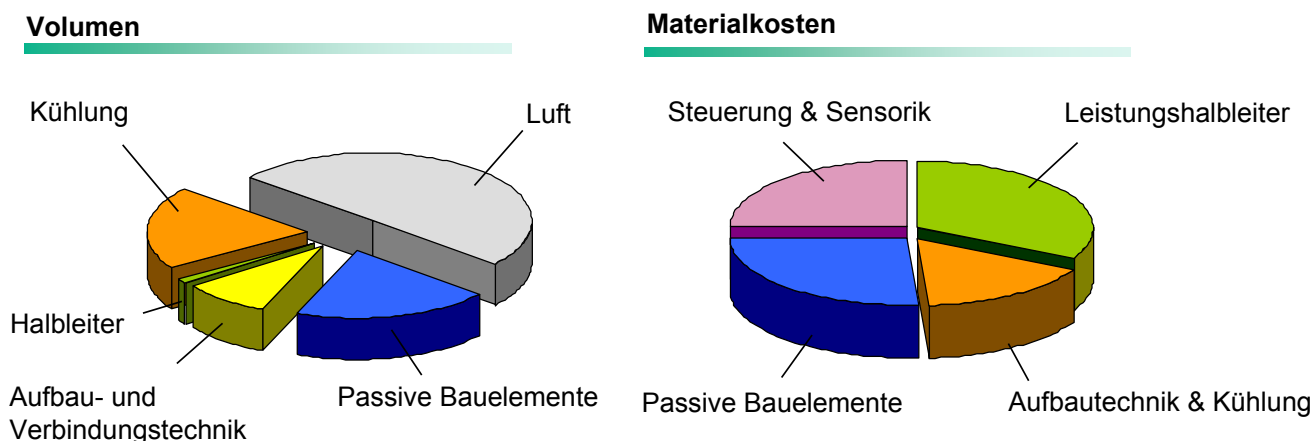


Abb. 3: Typische Verteilung von Bauvolumen und Materialkosten leistungselektronischer Wandler

### 2.2.1 Leistungshalbleiter

Die wichtigsten Leistungsbaulemente für PKW sind Transistoren wie der Leistungs-MOSFET und der IGBT und die zugehörigen Freilaufdioden.

Als Leistungs-MOSFET ist in der Spannungsklasse 600 V der 1999 eingeführte Superjunction MOSFET, der von Infineon unter dem Namen COOLMOS™ angeboten wird, das fortschrittlichste Bauelement. Dieser eignet sich besonders für Anwendungen mit hohen Taktfrequenzen oberhalb 50 kHz, wodurch sich kompakte Ladegeräte und DC/DC-Wandler realisieren lassen.



In der Motorsteuerung allerdings sind Taktfrequenzen um 8 kHz typisch; in Ausnahmefällen bis 20 kHz, um akustische Probleme zu vermeiden. Höhere Schaltfrequenzen sind wegen der zulässigen Isolationsbeanspruchung der Motorwicklung ( $dU/dt$ -Festigkeit) und weiterer nachteiliger Effekte (z.B. schädliche Lagerströme) kaum zu realisieren. Bei den genannten Taktfrequenzen und Spannungen hat der IGBT Vorteile gegenüber dem MOSFET, die vor allem aus seinen niedrigeren Verlusten im eingeschalteten (leitenden) Zustand resultieren. Liegt die HV-Bus-Spannung unterhalb von 420 V, so können 600-V-IGBTs eingesetzt werden, die wesentlich verlustärmer schalten als die weit verbreiteten 1200-V-IGBTs. Die Spannungsfestigkeit – und damit die Eigenschaften des IGBT – kann aber bei hohen Stückzahlen durchaus den Anforderungen angepasst werden, so dass Zwischenwerte möglich sein werden, womit z. B. ein höherer Wirkungsgrad des Umrichters erreicht werden kann.

Silizium-Freilaufdioden im Spannungsbereich 600 V und 1200 V sind heute mit befriedigenden Schalteigenschaften und hoher Robustheit verfügbar. Ebenfalls liegen Schottky-Dioden aus Siliziumkarbid (SiC) vor, welche durch den Entfall der Speicherladung die Einschaltverluste des schaltenden Transistors deutlich reduzieren. Dieser Vorteil fällt aber bei der Motorsteuerung, für die oft niedrige Taktfrequenzen ( $< 20$  kHz) angewandt werden, nicht so stark ins Gewicht, so dass die höheren Kosten oft nicht zu rechtfertigen sind. Bei höheren Taktfrequenzen allerdings überwiegt der Vorteil der überragenden Schalteigenschaften, was besonders für Ladegeräte und DC/DC-Wandler von Vorteil ist.

Im Sinne eines höchsten Wirkungsgrads und eines niedrigen Gewichts wären generell Bauelemente ohne Schleusenspannung wünschenswert. Beim MOSFET beispielsweise lassen sich durch Parallelschaltung die Leitungsverluste nahezu beliebig senken („Silizium statt Kühlkörper“). Diese Eigenschaft ist auch im Teillastbetrieb von Vorteil, da bessere Teillast-Wirkungsgrade erzielt werden.

Beim Beschleunigen eines E-Fahrzeugs werden im Umrichter vor allem die Transistoren belastet, bei der Rekuperation die Freilaufdioden. Diese Verschiebung der Verlustschwerpunkte ist ungünstig, da beide Bauelemente für den jeweils schlechtesten Fall zu dimensionieren sind, aber nie gleichzeitig voll ausgenutzt werden.

## 2.2.2 Aufbau- und Kühltechniken

Moderne Leistungshalbleiter erlauben die Wandlung elektrischer Leistung mit hohen Wirkungsgraden. Dennoch ist eine hocheffiziente Kühlung der Leistungshalbleiter unabdingbar, da bei einer umgesetzten Leistung von beispielsweise 100 kW auch bei 97% Wirkungsgrad noch 3 kW Verlustleistung entstehen. Diese Verluste konzentrieren sich auf immer kleiner werdende Chipflächen, was zu extrem hohen Wärmestromdichten in den Leistungshalbleitern, aber auch entlang des thermischen Pfads zum Kühlmedium führt. Eine sorgfältige Optimierung

des gesamten thermischen Pfads (Abbildung 4) ist daher, insbesondere mit Blick auf Systemkosten und Lebensdauer, unerlässlich. Da die Leistungshalbleiterchips untereinander und gegenüber dem Kühlmedium bzw. dem Fahrzeug elektrisch isoliert montiert werden müssen, sind in der Aufbautechnik Materialien von zentraler Bedeutung, die neben einer hohen thermischen Leitfähigkeit gute elektrische Isolationseigenschaften aufweisen. Für hohe Leistungen kommen hier bevorzugt keramische Materialien wie Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Aluminiumnitrid ( $\text{AlN}$ ) oder Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) zum Einsatz.

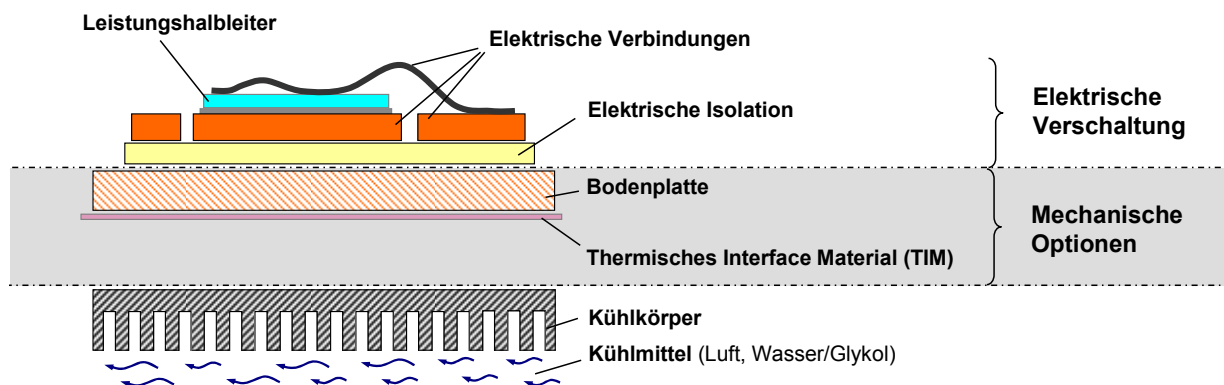


Abb. 4: Grundstruktur klassischer Leistungsmodule

Die Strukturgeometrie des Kühlkörpers ist individuell an die Eigenschaften des Kühlmediums (Wasser/Glykol, Öl oder Luft) und die Druckabfall-Volumensstrom-Spezifikation des Kühlkreislafs anzupassen. Weitergehende Ansätze für flüssigkeitsgekühlte Module verzichten gänzlich auf eine massive Bodenplatte [13] oder verbessern die lokalen Strömungsverhältnisse [14].

Unterstellt man für ein Elektroauto einen reinen Stadtfahrbetrieb mit, in erster grober Näherung, einem stärkeren Beschleunigungs- bzw. Rekuperationsvorgang alle 200 Meter, so ergeben sich über eine Fahrleistung von 200.000 km rund 1 Million aktive Lastzyklen. Vor dem Hintergrund einer entsprechenden Lebensdauieranforderung erlauben Aufbautechniken nach dem Stand der Technik nur aktive Temperaturzyklen in einer Höhe von 40 bis 50 Kelvin. Bei einer Flüssigkeitskühlung, die in einem reinen Elektrofahrzeug i. a. eine Vorlaufemperatur von unter  $70^\circ\text{C}$  aufweisen wird, ergeben sich maximale Chiptemperaturen im Bereich von  $120^\circ\text{C}$ . Diese Temperaturen liegen unterhalb der möglichen Chiptemperaturen moderner Si-Leistungshalbleiter, deren Einsatz daher heute eher durch die verfügbaren Aufbau- und Verbindungstechnologien limitiert wird.

Die Leistungshalbleiter, deren Aufbautechnik und Kühlung verursachen rund 50% der Materialkosten eines Wechselrichters (vgl. Abbildung 3). In einer Reduzierung der benötigten Chipflächen liegt daher ein entscheidender Hebel zur Kostensenkung.

Mit einer doppelseitigen Kühlung der Leistungshalbleiter lässt sich der Wärmewiderstand zwischen Chip und Kühlmedium nahezu halbieren, wodurch sich auch die für einen geforderten Strom benötigte Chipfläche entsprechend verringert ([15] – [21]). Die meisten heute bekannten Lösungen für beidseitige Kühlung weisen jedoch erhebliche Nachteile auf. Auf diesem Gebiet ist noch ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf dem Weg zu einem kostengünstigen, zuverlässigen, kompakten und beidseitig kühlbaren Leistungsmodul erforderlich.

### 2.2.3 Aspekte des Traktionsspannungsniveaus

Die Höhe der HV-Busspannung und deren Schwankungsbereich haben einen signifikanten Einfluss auf die Kosten und das Bauvolumen der in Elektrofahrzeugen benötigten leistungselektronischen Systemkomponenten und der Batterie.

Im Allgemeinen wird heute der HV-Bus direkt aus dem elektrischen Energiespeicher betrieben. In diesem Fall müssen alle Systemkomponenten für einen erweiterten Spannungsbereich ausgelegt werden; insbesondere die elektrischen Maschinen und Umrichter sind so auszulegen, dass auch an der unteren Batteriespannungsgrenze noch die vollen geforderten Werte für Leistung und Drehmoment zur Verfügung stehen. Dies hat aber im gesamten Arbeitsbereich entsprechend erhöhte Motor- und Umrichterströme sowie erhöhte Schaltverluste zur Folge. Optional ist vor dem elektrischen Energiespeicher der Einsatz eines Spannungswandlers möglich (vgl. Abbildung 2), der eine Anpassung und Stabilisierung der HV-Busspannung erlaubt, die auf diese Weise unabhängig vom Lade- und Belastungszustand des Energiespeichers und innerhalb gewisser Grenzen auch unabhängig vom generellen Spannungsniveau des Speichers ist.

### 2.2.4 Passive Bauelemente

Passive Bauelemente wie Kondensatoren, Spulen und Transformatoren tragen in hohem Umfang zu den Kosten und dem benötigten Bauvolumen leistungselektronischer Systeme bei (vgl. Abbildung 3).

Einen wesentlichen Anteil verursachen die für die Stützung von Spannungszwischenkreisen und die Einhaltung von Störemissionsgrenzwerten erforderlichen Kondensatoren. Durch stetige Verbesserung der Kondensatoreigenschaften, der Regelkreisdynamik und der EMV-Filterstrukturen konnte der Bedarf an Zwischenkreiskapazität auf heute typische 7...10  $\mu\text{F}$  je kVA Umrichterleistung reduziert werden. Für die Realisierung eines entsprechenden Kondensators stehen heute drei Technologiefamilien zur Verfügung: Multi-Layer-Keramiken, metallisierte Polymer-Folien und das Aluminium-Elektrolyt-System (Elko).

Die in leistungselektronischen Wandlern benötigten induktiven Bauelemente gehören zu den das Volumen, das Gewicht und die Materialkosten maßgeblich bestimmenden Komponenten. Diese magnetischen Bauelemente werden in Elektrofahrzeugen hauptsächlich für die Span-

nungswandler (DC/DC-Wandler und Ladegerät in Kapitel 2.8) und für EMV-Filter benötigt. Die Optimierung induktiver Bauelemente ist eine komplexe Aufgabe, die u. a. aufgrund der Vielzahl an möglichen Kernmaterialien und Wicklungsaufbauten, nur iterativ lösbar ist.

## 2.2.5 Aktuelle und künftige Forschungsschwerpunkte

Beim Superjunction-MOSFET ist eine Reduktion der Leitungsverluste auf unter 10% der Werte konventioneller MOSFETs zu erwarten. Beim 600-V-IGBT wird sich der Spannungsabfall in wenigen Jahren noch um weitere 200-300 mV reduzieren lassen (die typische Schleusenspannung sinkt von 1,5 V auf 1,2 V).

In Kürze ist mit kommerziellen Schaltern aus SiC zu rechnen, die keine Schleusenspannung aufweisen. Der SiC-JFET wird serienreif, in Kombination mit einem Niederspannungs-MOSFET aus Si wird er als normally-off-Bauelement verfügbar [22], mit einer Markteinführung wird in 2010 gerechnet. Ebenfalls wird an MOSFETs aus SiC gearbeitet, hier sind vor allem noch Probleme der Langzeitstabilität des Gate-Oxyds zu lösen. Ein Bipolartransistor aus SiC ist ebenfalls kurz vor der Markteinführung [23]. Mit einem Stromverstärkungsfaktor  $\beta > 50$  (1200-V-Bauelement) ist er, obwohl stromgesteuert, durchaus attraktiv. Trotz der zusätzlichen Ansteuerungsverluste sind niedrigere Gesamtverluste als beim SiC-MOSFET und SiC-JFET erreichbar [24]. Diese Bauelemente weisen keine Schleusenspannung auf. Allerdings ist die bei diesen Bauelementen mögliche sehr hohe Taktfrequenz bisher in der Motorsteuerung nicht notwendig. Weiterhin liegt der Preis auch noch auf längere Zeit sehr viel höher als bei Silizium-Bauelementen wegen der in der Motorsteuerung erforderlichen hohen Ströme (Der Preis ist bei jedem Halbleitermaterial proportional zum zu steuernden Strom).

Leistungsbaulemente aus GaN bzw. GaN/AlGaIn-Heterostrukturen sind in Entwicklung (Schottkydioden, Feldeffekttransistoren) [25]. Da diese Heterostrukturen auch auf Si-Substraten herstellbar sind, können konkurrenzfähige Kosten erwartet werden. Allerdings werden diese Bauelemente erst auf längere Sicht verfügbar sein.

Bei den Silizium-Bauelementen erfolgen Arbeiten an einem rückwärtsleitenden IGBT für 600V [26], allerdings sind die anvisierten Ströme mit 15A für E-Fahrzeuge zu niedrig. Im Spannungsbereich 3,3 kV erfolgen ebenfalls Entwicklungsarbeiten, hier wurde insbesondere aufgezeigt, dass sowohl der IGBT als auch die Diode von der Integration des jeweils anderen Bauelements profitieren können (Stoßstromfestigkeit, Kurzschlussfestigkeit, weiche Abschaltflanken) [27]. Für die Optimierung der Diodeneigenschaften lässt sich bei dieser Integration auch das Prinzip der MOS-gesteuerten Diode verwenden [12], es erfordert aber höheren Ansteueraufwand. Im Ergebnis ist bei gleicher Halbleiterfläche eine um 50% höhere Stromdichte möglich. Solche Bauelemente wären äußerst attraktiv für die Motorsteuerung [28]. Allerdings sind diese Bauelemente noch im Anfangsstadium der Entwicklung, und für den für

E-Fahrzeuge interessanten Strom- und Spannungsbereich sind keine Projekte bekannt.

Es wird angeregt, einen rückwärtsleitenden Hochstrom-IGBT-Chip für 600 V zu entwickeln und ein dazugehöriges Leistungsmodul (z. B. für Stromzwischenkreisumrichter). In diesem Zusammenhang sind ebenfalls Entwicklungsarbeiten zur Ansteuerung erforderlich, deren Umfang angesichts der großen Fortschritte in der analogen und digitalen Schaltungstechnik überschaubar ist.

Forschungsarbeiten in Richtung hoch temperaturwechselbeständiger Aufbau- und Verbindungstechnologien und beidseitiger Kühlung von Leistungshalbleitern sind dringend erforderlich, da die verfügbaren Technologien noch nicht einmal die Ausnutzung der Eigenschaften moderner Silizium-Bauelemente erlauben – von SiC- und GaN-Leistungsbaulementen ganz zu schweigen.

Im realen Fahrbetrieb treten sehr komplexe Belastungsprofile auf, deren Abbildung auf brauchbare Lebensdaueraussagen heute noch nicht ausreichend möglich ist. Auf diesem Gebiet ist noch umfangreiche Grundlagenarbeit zu leisten; der Weg dorthin muss über ein tieferes Verständnis der physikalischen Fehlermechanismen führen.

Passive Bauelemente werden zunehmend zum limitierenden Faktor bezüglich der Systemparameter Leistungsdichte, Einsatztemperaturbereich, Gewicht und Kosten. Hier sind dringend Forschungsarbeiten erforderlich, die mit neuen technologischen Ansätzen insbesondere auf Kondensatoren und Spulen mit Energiespeicherdichten von einigen Joule pro Kubikzentimeter bei zugleich hoher Wechselstrombelastbarkeit und weitem Einsatztemperaturbereich zielen.

## 2.3 Antriebswechselrichter

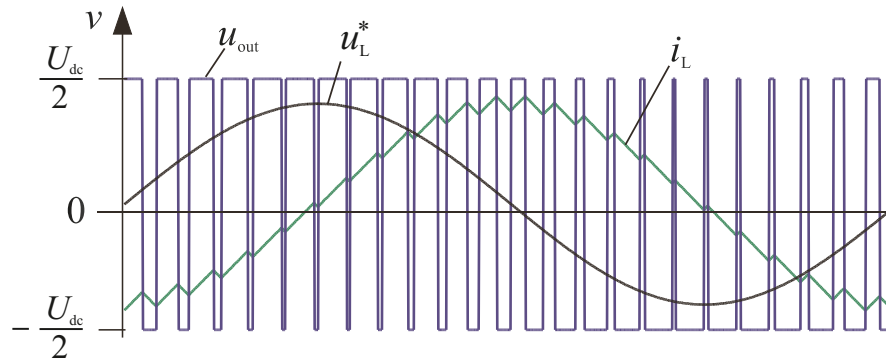
Der Antriebswechselrichter und die zum Betrieb erforderliche Regelung bilden das elektronische Interface zwischen dem Energiespeicher und dem Fahrmotor [43].

### 2.3.1 Schaltungstechnik

Im Bereich der Elektrostraßenfahrzeuge bestehen gegenüber Industriestromrichtern besondere Anforderungen bezüglich der Temperatur (Kühlmittel bis 70 °C) und Temperaturwechsel (-40 °C bis 85 °C im Motorraum), der mechanischen Beanspruchung durch Schock und Vibrationsbelastung bis 5 – 10g (50g für Radnabenmotoren) und der Kosten (Grobziel: 1 Euro pro kW) elektrischer Antriebssysteme. Während die Drehfeldmaschinen (d. h. Asynchron- und Synchronmaschinen) durch gleichartige Wechselrichtertopologien gespeist werden können, ist für die geschaltete Reluktanzmaschine eine andere Schaltungstopologie erforderlich, die sich in der Ausführung der Wechselrichterzweige wesentlich von diesen unterscheiden.

Heutzutage kommen überwiegend Schaltungen mit Spannungszwischenkreis zum Einsatz, bei denen die Referenzspannung durch Pulsweitenmodulation angenähert wird. Abbildung 5 zeigt exemplarisch den Verlauf von Referenzspannung  $u_L^*$ , Istspannung  $u_L$  und Strom  $i_L$  an einer Induktivität bei Einsatz eines solchen Umrichters.

Abb. 5: Verlauf von Strom, Soll- und Istspannung bei PWM-Umrichtern mit Spannungszwischenkreis und induktiver Last.

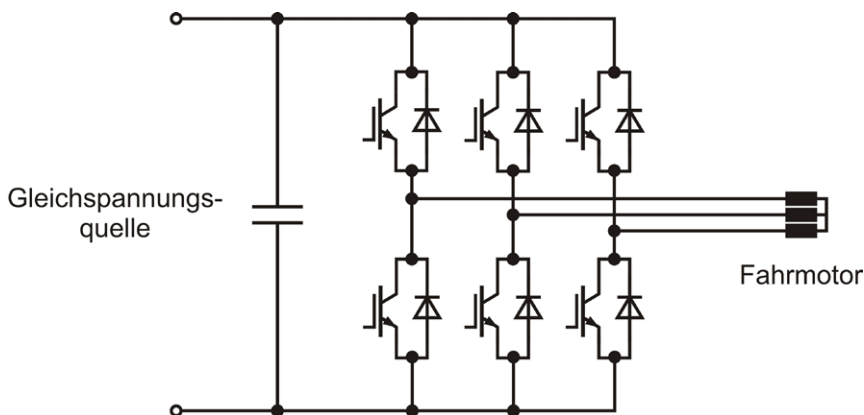


### Stromrichtertopologien für Drehfeldmaschinen

Die in Abbildung 6 gezeigte Grundvariante besteht aus einem dreiphasigen Wechselrichter in B6C-Schaltung (Drehstrombrückenschaltung) der eingangsseitig aus einem Gleichspannungszwischenkreis gespeist wird und ausgangsseitig mit dem Fahrmotor verbunden ist [43]. Die Schaltung gestattet es, eine von einem Kondensator gestützte Gleichspannung in drei Wechselspannungen variabler Frequenz und Amplitude zu wandeln. Sie ist außerdem in der Lage, die Leistung bidirektional zu führen, d. h. von der Gleichspannungsseite zur Wechselspannungsseite (Wechselrichterbetrieb) oder umgekehrt (Gleichrichterbetrieb). Mit der Schaltung kann prinzipbedingt aus der Zwischenkreisspannung  $U_{dc}$  eine sinusförmige Wechselspannung auf der Ausgangsseite erzeugt werden. Durch Pulsbetrieb mit Hilfe einer pulsweitenmodulierten Steuerung lässt sich der Spannungseffektivwert kontinuierlich bis auf Null steuern (siehe Abbildung 5 mit  $U_d = 0,5 U_{dc}$ ). Der Motor wird in einer der üblichen Drehstromschaltungen im Stern mit isoliertem Sternpunkt oder seltener im Dreieck betrieben.

Die B6C-Brückenschaltung eignet sich gleichermaßen für Asynchron-Käfigläufermaschinen wie für Synchronmaschinen. Für beide Maschinenarten gilt, dass die höchste thermische Beanspruchung der Leistungshalbleiter im Anfahrbereich entsteht (maximales Drehmoment, d. h. maximaler Strom), da sich bei sehr kleiner Grundswingungsfrequenz die Leitdauer der Halbleiterventile erheblich verlängert.

Abb. 6: Motorstromrichter in B6C-Schaltung (Drehstrombrückenschaltung)



Die B6C-Schaltung ist seit langer Zeit standardmäßig in Industrieantrieben im Einsatz. Im Automobilbereich findet sie bereits serienmäßige Anwendung in leistungsverzweigten Hybridantrieben mit einem elektrischen Bypass (Toyota-Prius) bestehend aus zwei Maschinen und zwei Stromrichtern [38], [39], die die Funktion eines elektronischen Getriebes erfüllen. Der Drehmoment- und Leistungsstellbereich lässt sich gegenüber der B6C-Schaltung noch für höhere Geschwindigkeiten steigern, indem eine Kaskadierung von Stromrichtern vorgenommen und der Fahrmotor in offener Schaltung betrieben wird, da sich der maximale Motorspannungsscheitelwert auf den 1,1-fachen Wert der Zwischenkreisspannung erhöhen lässt.

Eine Vielzahl verschiedener Topologien wie z. B. 3-Level-Wechselrichter, Wechselrichter mit integriertem DC/DC-Wandler und dem Impedanz-Zwischenkreiswechselrichter (Z-Source-Inverter) bieten interessante Optionen und werden im Gesamttext beschrieben.

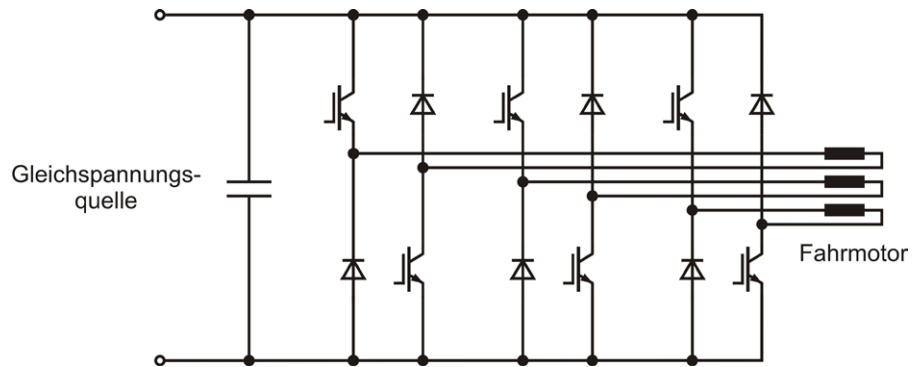
### Stromrichtertopologien für Geschaltete Reluktanzmaschinen

Die Geschaltete Reluktanzmaschine (GRM) benötigt aufgrund der quadratischen Abhängigkeit zwischen Drehmoment und Strom lediglich eine unipolare Ansteuerung. Die heutzutage am meisten eingesetzte Topologie ist die asymmetrische Halbbrücke. Ähnlich einem Stromrichter für Drehfeldmaschinen (Abbildung 6) benötigt sie zwei Schalter und zwei Dioden pro Phase. Diese ist in Abbildung 7 für eine 3-phasige GRM gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Anzahl der Bauelemente gleich der einer B6-Wechselrichterbrücke ist. Ein ersichtlicher Nachteil ist allerdings die Anzahl an Zuleitungen zu der Maschine. Im Vergleich zu einer 3-phasigen Drehfeldmaschine verdoppelt sich die Anzahl der Zuleitungen, so dass der Stromrichter möglichst direkt an der Maschine montiert werden sollte. Der daraus folgende Vorteil ist allerdings die elektrische Unabhängigkeit der einzelnen Phasen. Die drei Halbbrücken sind lediglich über den gemeinsamen Zwischenkreis miteinander verbunden. Dadurch können die einzelnen Phasen getrennt voneinander angesteuert werden, d.h. in jedem Betriebspunkt können optimale Stellparameter gewählt werden. Zusätzlich erhöhen sich die Redundanz und die Betriebssicherheit des Antriebs [41].



Für automobile Anwendungen ist eine Integration des Stromrichters sinnvoll. Einige Hersteller bieten bereits heute asymmetrische Halbbrücken als IGBT-Module an. Als Beispiel sind hier das einphasige Modul der Firma Fairchild [35] oder das dreiphasige Modul der Firma Semikron [36] zu nennen. Die für ein Elektrofahrzeug mit einem Zentralmotor benötigten Leistungsklassen sind aufgrund der fehlenden Anwendung derzeit auf dem Markt nicht leicht erhältlich.

Abb. 7: Schaltbild einer 3-phasigen asymmetrischen Halbbrücke



### 2.3.2 Stromrichtersteuerung und Fahrmotorregelung

Aus Kostengründen ist eine möglichst gute Ausnutzung der Grenzen von Motor und Leistungselektronik erforderlich. Die Steuerung und Regelung muss diesen erhöhten Anforderungen gerecht werden. Ansätze zur Kostensenkung im Bereich der Steuerungshardware ergeben sich hauptsächlich durch Verwendung preiswerter und automobilgerechter Drehzahl- bzw. Drehwinkelsensoren.

Für Drehfeldmaschinen hat sich zur Umsetzung der sinusförmigen Sollspannung in gepulste Ausgangsspannungen die Raumzeigermodulation als Industriestandard durchgesetzt [44][45]. Sie zeichnet sich durch einen hohen Modulationsgrad (vgl. Kap. 2.3.4) aus, so dass eine hohe Spannungsausnutzung des Stromrichters im Zusammenwirken mit dem Fahrmotor erreicht wird, und sie stellt sicher, dass der Wechselrichter bei konstanter Pulsfrequenz betrieben werden kann.

Zur Regelung des Fahrmotors kommen zwei auch in der Elektrotraktion konkurrierende Regelprinzipien in Betracht. Mit der feldorientierten Regelung lassen sich sowohl der Asynchron- als auch der Synchronfahrmotor optimal betreiben [46]. Dabei kommt es hier nicht unbedingt auf höchste Regeldynamik an, sondern es müssen die Fragen der elektromagnetisch optimalen Ausnutzung der Elektromaschine, das Verhalten in bestimmten Arbeitspunkten und ein energieoptimaler Betrieb im Vordergrund stehen [39][52].

Die klassische feldorientierte Regelung (FOR) sollte für Automotive-Anwendungen angepasst werden. Die vergleichsweise geringen Anforderungen an die Dynamik (Drehmoment-Anregelzeiten von 10 – 50 ms sind ausreichend) führen zu Lösungen, die mehr die Effizienz



des Antriebs als eine hohe Dynamik zum Ziel haben. Dazu gehören Antriebe mit wirkungsgradoptimalen Regelstrategien, die basierend auf Messungen oder Rechnungen offline Kennlinienfelder für den jeweils günstigsten Betrieb im Drehzahl-Drehmoment-Diagramm niederlegen oder bereits online mit Hilfe geeigneter Beobachter den Wirkungsgrad betriebspunktabhängig maximieren [51][52].

Alternativ zur feldorientierten Regelung lassen sich mit direkten Regelverfahren für Drehmoment und Flussverkettung, die auf der direkten Selbstregelung (DSR) [47] bzw. der direkten Drehmomentregelung (Direct Torque Control – DTC) [48] basieren, ähnlich gute Betriebseigenschaften für den Fahrmotor erzielen. Zwischen beiden Grundverfahren FOR und DTC bestehen gewisse Unterschiede bzgl. der Stromwelligkeit, der Strombegrenzungsfähigkeit, der Dynamik an den Stellbereichsgrenzen, der Drehmomentwelligkeit, des EMV-Verhaltens und der Geräuschbildung. Zur Regelung von geschalteten Reluktanzmaschinen eignet sich ebenfalls die direkte Drehmomentregelung [49], [50].

### 2.3.3 Aktuelle und künftige Forschungsschwerpunkte

Wirkungsgrade von Antriebsumrichtern liegen im Nennpunkt bei ca. 97% und sind somit heute schon sehr gut. Weitere Steigerungen auf 98 – 99% sind mit größeren technologischen Aufwendungen verbunden und lassen sich nur über eine neuartige Bauelementtechnologie (SiC, GaN) erreichen [37]. Für Fahrzeugantriebe sind Effizienzangaben zu ausgewählten Arbeitspunkten wenig aussagekräftig, da diese in der Regel nicht stationär betrieben werden. Daher ist die Einführung der Energieeffizienz als integrale Größe der Einzelwirkungsgrade unter Einbeziehung realitätsnaher Fahrzyklen sinnvoll. Vielfach wird der Wirkungsgrad von Motor und Wechselrichter gemeinsam angegeben. Aktuelle Werte liegen im 100%- Lastpunkt bei 90 – 91%. Steigerungen bis 95% erscheinen möglich.

Das Leistungsgewicht (besser: Leistung pro Masse) der Leistungselektronik in kW/kg bewegt sich bei der Standardschaltung (B6C) im Verhältnis zum Motor auf einem 10-fach höheren Niveau. Möglich erscheinen in naher Zukunft Leistungsgewichte im Bereich von 12 – 14 kW/kg. Die Leistungsdichte in kW/m<sup>3</sup> ist bei der Leistungselektronik in etwa doppelt so hoch wie die der Antriebsmotoren. Möglich erscheinen Steigerungen bis auf 13 kW/l. Die Kosten pro kW betragen für die Leistungselektronik derzeit etwa 5 \$/kW installierter Leistung und sind somit vergleichbar mit den Kosten für Motoren [40].

Weltweit gibt es vielfältige Entwicklungsaktivitäten, die zum Teil durch Forschungsprogramme von Einzelstaaten, Staatsverbänden und Organisationen unterstützt werden. Aus einer Roadmap des National Renewable Energy Laboratory Programms von 2004 [40] geht z. B. hervor, dass vorrangige Forschungsschwerpunkte auf dem Gebiet der Antriebsstromrichter für E-Fahrzeuge bei der Integration von Motor und

Umrichter sowie bei bestimmten neuen Umrichterschaltungen gesehen werden.

Zur Erreichung der angegebenen Zielstellungen bzgl. Leistungsdichte, Leistungsgewicht, Wirkungsgrad, Betriebstemperaturen und spezifischen Kosten besteht aus heutiger Sicht besonderer Forschungsbedarf in Bezug auf eine motorintegrierte Leistungselektronik. Die mit steigender Motorleistung notwendige Anhebung der Zwischenkreisspannung erfordert auf Grund der pulsförmigen Belastungen der Motorwicklung eine direkte und sehr kurze Verbindung zwischen Motor und Umrichter. Das wird umso dringender, je kürzer die Schaltzeiten der in Betracht kommenden wide-bandgap-Leistungshalbleiter (SiC und GaN) werden. Insbesondere bei den auch weiterhin favorisierten 2-Stufen-Umrichtern bewirken die steilen Schaltflanken eine transiente Spannungsspitze, die zu Schädigungen der Wicklungen führen kann. Neben der Reduzierung der herkömmlichen Verbindungstechnik bietet die Integration die Möglichkeit eines gemeinsamen Temperaturmanagements.

Ein weiteres wichtiges Arbeitsfeld und Verbesserungspotential eröffnet sich durch die energieoptimale Steuerung der Fahrtriebe über die Antriebsstromrichter. Das betrifft alle relevanten Maschinentypen (asynchron, synchron, reluktant) und ihre Leistungselektronik. Außerdem sind robuste, lagegeberlose Antriebe ohne Einschränkung der Effizienz zu entwickeln.

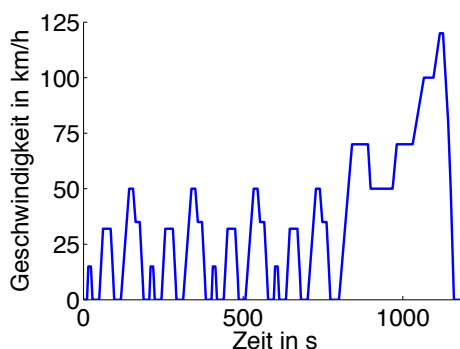
## 2.4 Elektrische Maschinen

Der Elektromotor verursacht ähnlich wie die Batterie ca. 40 – 50% der Gesamtverluste in einem Elektrofahrzeug. Seiner Optimierung in Hinsicht auf Energieeffizienz kommt somit eine große Bedeutung zu. Während bei Optimierung von Industrie- und Haushaltsantrieben Maßnahmen zur Verbesserung der Effizienz in der Regel einen vermehrten Materialeinsatz zur Folge haben (Bauvolumen und Masse der elektrischen Maschine spielen dort eine untergeordnete Rolle), stellt die Masse in einem Elektrofahrzeug ein wesentliches Kriterium zur Bewertung eines Elektromotors dar, da diese sowohl bei der Beschleunigung als auch bei der Rollreibung direkt in den Energieverbrauch des Fahrzeugs eingeht. Außerdem werden Motoren in Fahrzeugen normalerweise nicht stationär betrieben, d. h. sowohl Drehmoment als auch Geschwindigkeit unterliegen ständig wechselnden Bedingungen. Daher kann der üblicherweise angegebene leistungsbezogene Wirkungsgrad nicht zur Beurteilung eines Motors herangezogen werden. Vielmehr muss eine ganzheitliche Betrachtung des energetischen Wirkungsgrads unter Bezug auf eine spezifische Belastung erfolgen.

## 2.4.1 Fahrzeugspezifische Anforderungen

Im Folgenden werden fahrzeugtypische Anforderungen an den elektrischen Antriebsmotor erläutert. Um zwischen verschiedenen Fahrzeugen vergleichbare Werte zu erhalten, werden in Europa der Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emission von Straßenfahrzeugen auf der Basis des neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) bestimmt [53]. Der NEFZ stellt, wie in Abbildung 8 gezeigt, einen Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit dar.

Abb. 8: Neuer europäischer Fahrzyklus (NEFZ)



Für die Effizienzermittlung eines Elektromotors werden aus dem NEFZ die Betriebspunkte für die elektrische Maschine (d. h. Drehmoment und Drehzahl) in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt. Für jeden dieser Punkte werden anschließend die Verluste berechnet. Die mittleren Verluste im NEFZ ergeben sich durch Gewichtung der Betriebspunkte nach Auftreten. Der Energieverbrauch eines Fahrzeugs im NEFZ wird im Wesentlichen durch Luftwiderstand und Masse (Rollreibung, beschleunigte Masse) des Fahrzeugs bestimmt. Da der Energieverbrauch wesentlich von der Masse abhängt, existiert ein Optimum zwischen der energietechnischen Effizienzsteigerung des Motors und der mechanischen Verluststeigerung des Fahrzeugs durch die Erhöhung der Motor-masse.

Im Vergleich mit Industrieantrieben stellt die kraftfahrzeugtypische Umgebung erheblich höhere Anforderungen an die Antriebstechnik. Die Anforderungen bzgl. Umgebungs- und Kühlmitteltemperaturen sowie Schock- und Vibrationsbelastungen entsprechen denen der Antriebsumrichter (siehe Kapitel 2.3.1). Neben den im Vergleich mit industriellen Anwendungen hohen absoluten Temperaturen müssen auch die aktiven und passiven Temperaturwechsel beachtet werden. Diese treten im Elektrofahrzeug deutlich häufiger und ausgeprägter auf und führen zu gesteigertem Materialverschleiß.

## 2.4.2 Motorauslegung

Für die Motorauslegung sind u. a. die folgenden Randbedingungen einzuhalten:

- Alle Betriebspunkte eines Fahrzyklus (z. B. NEFZ) müssen erreicht werden.

- Da tatsächliche Fahrzyklen stark von dem NEFZ abweichen, müssen auch Alltagszyklen berücksichtigt werden.
- Steigungen von bis zu 30% müssen mit einer akzeptablen Geschwindigkeit überwunden werden.

In den meisten Fahrzyklen wird der Motor wesentlich länger im Teillastbereich (bis ca. 50% des maximalen Drehmoments) als im Volllastbereich betrieben. Betriebspunkte mit hohen Drehmomenten werden in der Regel nur kurzzeitig z. B. bei Beschleunigungsvorgängen erreicht. Eine Ausnahme bilden z. B. lange Bergfahrten. Da elektrische Maschinen mit fahrzeugtypischen Leistungen thermische Zeitkonstanten von knapp 10 min. aufweisen, kann die Kühlung der Maschinen auf die mittlere Fahrzeugleistung (äquivalente Teillast) ausgelegt werden und muss den Volllastbetrieb nicht abdecken. Eine Überhitzung der elektrischen Maschine muss dann durch entsprechende Betriebsstrategien verhindert werden. Die exakte Festlegung der äquivalenten Teillast wird z. Zt. noch diskutiert.

Das Bauvolumen der elektrischen Maschine wird durch das thermisch äquivalente Drehmoment und die Art des verwendeten Kühlsystems (Luft- oder Wasserkühlung) bestimmt.

### 2.4.3 Maschinentypen

Im Folgenden werden einige gängige Motorentypen beschrieben. Dabei wird zwischen Motoren mit im Vergleich zum Rotor synchronen und asynchronen Feldern unterschieden. Einige Vor- und Nachteile der gängigen Maschinentypen sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Vergleich relevanter Maschinentypen

	ASM	PMSM	GRM
Drehmomentdichte	0	++	0
Drehzahlfestigkeit	+	0	++
Verluste (Fahrzyklus)	+	+	+
Kosten	+	-	++
Zuverlässigkeit	++	+	++
Technische Reife	++	+	0

#### Asynchronmotor

Asynchronmotoren (mit Käfigläufer) werden in vielen Fahrzeugen eingesetzt (z. B. BMW Mini, REVA, Tata, Think). Sie weisen inhärente Rotor-Stromwärmeverluste auf und haben daher einen niedrigeren Volllastwirkungsgrad bzw. ein größeres Bauvolumen als Motoren ohne Rotorwicklung. Bei hohen Drehzahlen kann durch Reduzierung des Erregerflusses der Feldschwächebetrieb realisiert werden, so dass nur geringe Ummagnetisierungsverluste auftreten. Dies führt dazu, dass der Asynchronmotor bei geringer Last und mittlerer bis hoher Drehzahl geringere Verluste als permanenterregte Konzepte aufweist.

Asynchronmotoren benötigen zum drehzahlverstellbaren Betrieb mit FOR einen Winkelgeber, der allerdings als kostengünstiger Inkrementalgeber ausgeführt werden kann.

Im Einsatz befindliche Asynchronmotoren werden oft hochtourig ausgeführt (bis  $15.000 \text{ min}^{-1}$ ). Getriebefirmen untersuchen z. Zt. die Machbarkeit deutlich höherer Drehzahlen [63]. Zur Erzielung eines hohen Kippmomentes und somit des in Fahrzeugen notwendigen hohen Feldschwächbereichs muss die Maschine streuungsarm ausgeführt werden.

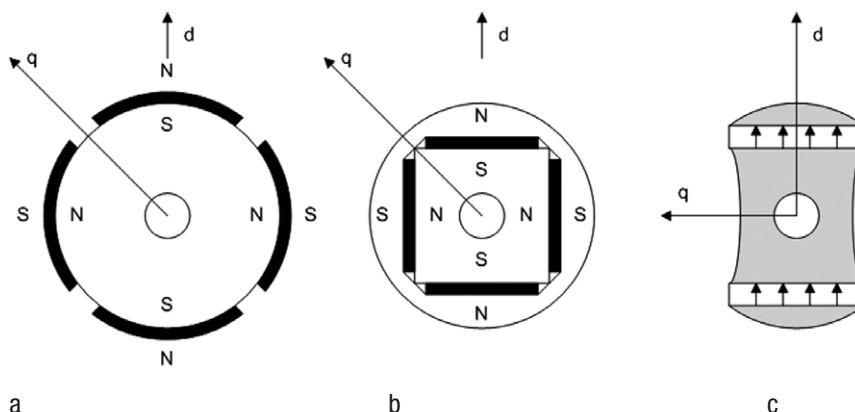
### Synchronmotoren

Synchronmotoren sind in mehreren Varianten denkbar und zumindest prototypisch eingesetzt worden. Synchronmotoren benötigen zum drehzahlvariablen Betrieb am Stromrichter einen absoluten Winkelgeber, der höhere Kosten verursacht als ein Inkrementalgeber.

#### – Permanentmagnet-Läufer

Der Motor mit Permanenterregung zeichnet sich durch eine geringe Baugröße aus und wird daher häufig in bauraumkritischen Anwendungen eingesetzt (z. B. Smart E und Hybridfahrzeuge von Toyota, Honda, Daimler u. a.). Gute Feldschwächbarkeit erfordert im Gegensatz zum Asynchronmotor eine hohe (Streu- und Haupt-) Induktivität.

Abb. 9: Rotortypen der permanenterrigten Synchronmaschine



Die Rotor-Bauformen sind aufgrund ihrer elektromagnetischen Wirkung nach dem Verhältnis von d- und q-Induktivität zu unterscheiden:

- Symmetrische Maschinen (Abbildung 9 a) mit  $L_d = L_q$  haben nur ein Vollpol-Drehmoment und weisen daher eine vergleichsweise geringe Ausnutzung auf (Beispiel: Honda Civic). In Innenläuferbauweise müssen die geklebten Magnete mit einer Bandage gesichert werden.
- Maschinen mit vergrabenen Magneten  $L_q > L_d$  (Abbildung 9 b) produzieren ein zusätzliches Reluktanzdrehmoment mit entsprechend günstigerer Ausnutzung (Beispiel: Toyota Prius). Nachteilig sind die hohen Verluste bei geringer Last und hoher Drehzahl aufgrund des Feldschwächstroms in d-Richtung.
- Derzeit werden Maschinen mit umgekehrter Unsymmetrie untersucht (Abbildung 9 c) [56].

Niedertourige permanenterregte Maschinen weisen die geringsten Verluste aller bekannten Maschinen auf. Sie können daher besonders kompakt ausgeführt werden. Bei hohen Drehzahlen und Frequenzen entstehen aufgrund des festen Rotorflusses erhebliche Ummagnetisierungsverluste. Der Bauraumvorteil permanenterregter Maschinen gegenüber Asynchronmaschinen relativiert sich mit steigender Drehzahl.

#### – Elektrische Erregung

Der elektrisch erregte Synchronmotor kommt, mit geeigneter Elektronik ausgestattet, im Mild Hybrid mit Start/Stop-Funktion (z. B. Citroën C2 und C3) vor. Aufgrund der herausragenden Feldschwächbarkeit werden solche Motoren auch als Hauptantriebe für Elektrofahrzeuge entwickelt.

#### Geschaltete Reluktanzmaschine

Die geschaltete Reluktanzmaschine (GRM) weist eine magnetische Unsymmetrie auf und benötigt im Rotor weder Magnete noch eine Wicklung. Sie zeichnet sich durch ihr einfaches und robustes Design sowie eine vorteilhafte Drehmoment-Drehzahl-Charakteristik aus. Aufgrund des günstigen Feldschwächbereichs kann die GRM im größten Drehzahlbereich aller betrachteten Maschinen betrieben werden. Diese Eigenschaft wird durch die geringen mechanischen Beanspruchungen im Rotor der Maschine unterstützt. Da die Phasen einer GRM unabhängig voneinander sind, kann die Maschine auch im Fehlerfall weiter betrieben werden, allerdings erfordert die Unabhängigkeit der Phasen einen höheren Verkabelungsaufwand (2 Kabel pro Phase). Eine räumliche Integration von Maschine und Umrichter ist für die GRM somit besonders vorteilhaft. Die im Betrieb entstehenden Geräusche behindern bisher den breiten Einsatz im Elektrofahrzeug. Momentan sind speziell auf die GRM zugeschnittene Halbleitermodule nur vereinzelt verfügbar, was jedoch lediglich an der im Vergleich geringen Marktdurchdringung liegt. Das oft beanstandete hohe Pendelmoment kann hingegen durch die Regelung (DTC) kompensiert werden. Der Luftspalt weist ähnliche Größen wie bei der Asynchronmaschine auf.

### 2.4.4 Wicklungsausführung

Der Stator trägt eine Drehstromwicklung aus Kupferleitern zur Führung des elektrischen Stroms. Grundsätzlich sind zwei verschiedene Wicklungsarten zu unterscheiden:

- Die verteilte Drehstromwicklung ist dadurch gekennzeichnet, dass jedem Statorpol mehrere Leiter zugeordnet sind, was zu einem näherungsweise sinusförmigen Feld führt. Dem verlustarmen Betrieb und der geringen Drehmomentpulsation steht der Nachteil eines axial ausladenden Wickelkopfs gegenüber. Aufgrund der niedrigen Oberwellenstreuung eignet sich diese Wicklung für streuarmer Motoren, d. h. für Asynchron- und Synchronmotoren.

- Die Einzelzahnwicklung ist eine spezielle Bruchlochwicklung, bei der die Spulenweite genau einer Zahnteilung entspricht und ein kürzestmöglicher Wickelkopf erreicht wird. Der im Vergleich zur verteilten Drehstromwicklung hohe Oberwellengehalt führt zu einer hohen Flusstreuung. Einzelzahnwicklungen werden überwiegend bei geschalteten Reluktanzmaschinen und permanenterregten Synchronmotoren eingesetzt.

## 2.4.5 Fehler und Überwachung

Fehler in elektrischen Maschinen haben mechanische, thermische oder elektrische Ursachen.

**Mechanische Fehler** entstehen meist durch Lagerschäden oder Unwuchten. Vibrationen können Dauerbrüche an verschiedenen Stellen verursachen. Eine online-Überwachung in Fahrzeugen ist aus Kostengründen unwahrscheinlich.

Im dynamischen Betrieb kann Überhitzung auftreten und zu thermischen Fehlern führen. Auch ein Ausfall der Kühlung ist möglich. Thermische Überlastung führt meist zu Windungsschlüssen oder Lagerschäden. Eine Überwachung mindestens der Wicklungstemperatur gilt als unabdingbar und wird meist an die Umrichtersteuerung gekoppelt.

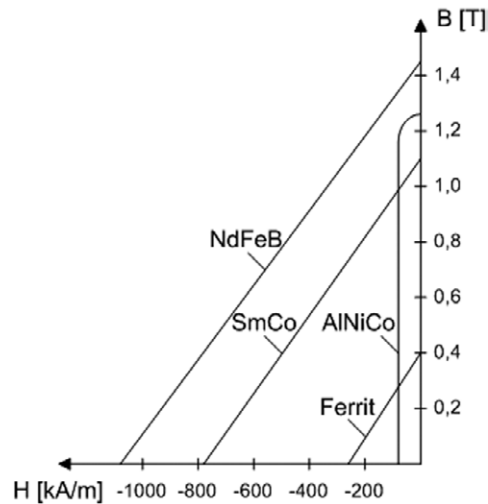
**Elektrische Fehler** (Windungs-, Wicklungs- und Erdschlüsse) entstehen durch Verschleiß oder externe Ursachen (Umrichter). Maschinen ohne rotorseitige Energieversorgung (Asynchronmotoren, Reluktanzmotoren) erzeugen im Falle von Windungs- oder Wicklungsschlüssen transiente Drehmomente, die keine weiteren Folgen haben. Vor allem bei permanenterregten Motoren führt eine Kurzschluss jedoch zu dauerhaften Brems- und Pendelmomenten, die erst bei Stillstand der Maschine aufhören. Der Kurzschlussstrom kann zu weiteren thermischen Schäden führen. Die Überwachung findet in der Umrichtersteuerung statt. Außerdem besteht die Möglichkeit eines Fehlers im meist der Maschine zugeordneten Drehzahl- oder Drehwinkelsensors. Die Fehlererkennung erfolgt über Plausibilität und Leitungsbruchüberwachung im Umrichter.

## 2.4.6 Magnetmaterialien

Für permanenterregte Maschinen kommen in Hauptantrieben ausschließlich Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB) zur Anwendung, die einen sinnvollen Kompromiss zwischen Energiedichte und Kosten darstellen.

Die Magnete weisen negative Temperaturkoeffizienten sowohl bzgl. Remanenz als auch Koerzitivfeldstärke auf. Daher müssen bei hohen Betriebstemperaturen Abstriche an die in Abbildung 10 dargestellten Kurven gemacht werden.

Abb. 10: Remanenzinduktion und Koerzitivfeldstärke von Magnetmaterialien [56][54]



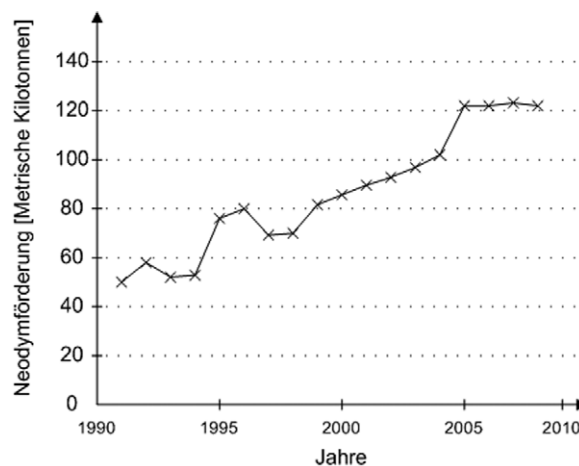
Die Rohstoffsituation bzgl. Eisen und Bor darf als unkritisch angesehen werden. Jedoch führt der steigende Einsatz von Permanentmagnetmaterialien zu einem großen Bedarf an seltenen Erden (vor allem Neodym sowie Dysprosium zur Steigerung der Koerzitivfeldstärke).

Neodym ist das dritthäufigste Metall der seltenen Erden, das vor allem aus zwei Mineralien (Bastnäsit und Monazit) gewonnen wird. Das heute auf dem Markt vorkommende Neodym kommt zum größten Teil aus Minen in Baotou/China. Die bekannten Lagerstätten in Australien und den USA werden nicht (mehr) abgebaut. Abbildung 11 zeigt die jährliche Neodym-Förderung.

Dysprosium kommt ebenfalls in den genannten Lagerstätten und Mineralien vor. Allerdings weisen die Mineralien deutlich geringere Anteile als die von Neodym auf.

Z. Zt. hat China praktisch ein Marktmonopol für die Herstellung des Rohmaterials für NdFeB-Magnete. Nur die Herstellung von Halbzeugen (gesinterte Magnete) findet auch außerhalb von China statt (Japan und Europa).

Abb. 11: Jährliche weltweite Neodymförderung [57]





### 2.4.7 Aktuelle und künftige Forschungsschwerpunkte

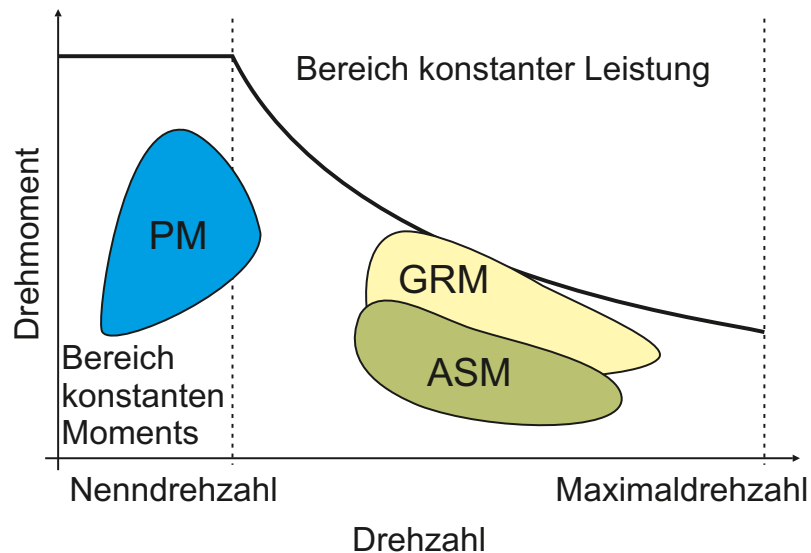
Die Forschung zu elektrischen Maschinen für Elektro- und Hybridautos setzt momentan folgende Schwerpunkte:

- Steigerung der Energieeffizienz durch
  - Optimierung eines bekannten Motordesigns auf Effizienz im Fahrzyklus mit Hilfe geeigneter numerischer Optimierungsmethoden [54]
  - Entwicklung von online-Steuerungsstrategien, die mit Hilfe von Gradientenverfahren auf der Basis bekannter Motordaten den Motorstrom so einstellen, dass in Motor und Wechselrichter minimale Verluste entstehen [56].
  - Entwicklung neuartiger Motordesigns mit Berücksichtigung der vorwiegenden Betriebsart im Fahrzyklus [55].
- Steigerung der Leistungsdichte durch
  - Steigerung des Drehzahlniveaus [63].
  - Untersuchung alternativer Motorkonzepte: Eine Alternative könnte die fremderregte Synchronmaschine sein, d. h. die Magnete werden durch eine Erregerwicklung auf dem Rotor ersetzt. Auch die geschaltete Reluktanzmaschine stellt eine vielversprechende Variante dar.
  - Verbesserte Kühlkonzepte und Hochtemperatur-Isolationsmaterialien.

## 2.5 Bewertung und Auswahl von elektrischen Antriebssträngen

In Abbildung 1 wurden verschiedene Antriebsstrangkonfigurationen gezeigt. Diese können mit oder ohne Getriebe ausgeführt werden. Durch Verwendung eines Getriebes lässt sich die Maschinendrehzahl erhöhen. Da das Bauvolumen einer elektrischen Maschine bei konstanter Leistung im Wesentlichen vom geforderten Drehmoment abhängt, kann dieses durch Einsatz eines Getriebes verringert werden. Ein wichtiges Kriterium zur Bewertung von Antrieben für Elektrofahrzeuge ist das Wirkungsgradkennfeld des Antriebs über seinen Betriebsbereich (Drehzahl und Drehmoment). Mit einem Wirkungsgradkennfeld lässt sich der Energieverbrauch des elektrischen Antriebs durch Simulationen für gegebene Fahrzyklen und Fahrzeugtypen berechnen. Durch Vermessung elektrischer Traktionsantriebe für Elektrofahrzeuge konnten Eigenheiten der unterschiedlichen Antriebstypen herausgestellt werden. Abbildung 12 zeigt die Gebiete des typischen maximalen Wirkungsgrads für Antriebe mit permanenterregter Synchronmaschine (PM), Asynchronmaschine (ASM) und geschalteter Reluktanzmaschine (GRM), die mit einem PWM-Umrichter gespeist und auf einem 100-kW-Prüfstand vermessen wurden.

Abb. 12: Gebiete maximalen Wirkungsgrads für unterschiedliche Antriebskonzepte [58]



Der Energieumwandlungsgrad der unterschiedlichen Antriebskonzepte variiert relativ zueinander in Abhängigkeit vom Fahrzyklus. Bei Zyklen, in denen im Mittel eine hohe Geschwindigkeit (Bereich konstanter Leistung) gefordert wird, weisen Asynchron- und Reluktanzmaschine die besseren Werte auf, während Permanentmagnetmaschinen bei reinen Stadtzyklen bessere Energieumwandlungsgrade besitzen. Die Untersuchungen, die an einer Vielzahl von Antrieben durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass nicht der Wert des maximalen Wirkungsgrads sondern die Lage und die Ausdehnung des Bereichs maximalen Wirkungsgrads im Wesentlichen den Energieverbrauch eines elektrischen Antriebssystems bestimmt [58]. Die Lage des Bereichs hängt im Wesentlichen vom Zusammenspiel von Maschine, Umrichter und Regelung ab.

**Fazit:** Für den in Abbildung 1 gezeigten Antriebsstrang mit Radnabenmotoren ohne Getriebe (Direktantrieb) eignet sich besonders die PM, während bei schnell drehenden Antrieben mit Getriebe Vorteile bei ASM und GRM liegen. Die Wirkungsgradunterschiede zwischen den verschiedenen Maschinentypen über einen Fahrzyklus sind gering und es müssen weitere Kriterien zur Auswahl geeigneter Antriebsmaschinen und Umrichterkomponenten hinzugezogen werden. Dazu gehören u. a. der Aufwand für Schutzfunktionen, Verfügbarkeit und Kosten der verwendeten Materialien, Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Akustik. Auch die Anforderungen an die digitale Steuerung und die Sensorik, insbesondere an den Lagegeber, sowie die Möglichkeit der Sensorfusion und der sensorlosen Regelung, d. h. der Eliminierung des Lagegebers [61] [62], müssen betrachtet werden.

## 2.6 Hilfsaggregate

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die in KFZ verbauten Hilfsaggregate und beschreibt im Speziellen die Anforderungen an Lenk- und Bremssysteme sowie Klimatisierungssysteme für den Fahrgastinnenraum und die dazugehörigen Fahrzeugkomponenten. Während viele dieser Hilfsaggregate in der Vergangenheit mechanisch oder hydraulisch angetrieben wurden, ist bereits seit einigen Jahren ein Trend zur Elektrifizierung zu beobachten. Dieser Trend wird durch die hohe Effizienz und den geringen Wartungsaufwand elektrischer Komponenten getrieben. Außerdem lassen sich durch die Elektrifizierung neue Betriebsstrategien und Funktionen im Fahrzeug realisieren. Für ein reines Elektrofahrzeug bedeutet dies, dass viele elektrische Komponenten bereits verfügbar sind. Allerdings wurden diese Komponenten für ein 12 V System ausgelegt.

In reinen Elektrofahrzeugen kommen jedoch oft Batterien mit einer Spannung von einigen 100 V (meist 200 V bis 600 V) zum Einsatz, um die hohen für die Traktion benötigten Leistungen bei vertretbaren Stromstärken bereitzustellen. Die Energie für den Betrieb konventioneller elektrisch gespeister Komponenten mit 12 V Anschluss kann somit nicht direkt aus den Batterien entnommen werden. Aus Gründen der Sicherheit und der bisherigen Standardisierung ist es allerdings zweckmäßig viele dieser Komponenten weiterhin im Bereich der Schutz-Kleinspannung ( $< 60$  V, z. B. 12 V) zu betreiben, so dass die Anbindung eines entsprechenden Bordnetzes an die Traktionsspannung mittels DC/DC-Wandler notwendig ist. Dieser Wandler wird am Ende des Kapitels beschrieben.

### 2.6.1 Elektrische Aktoren

Der Trend in der Automobilindustrie zu mehr dezentralisierten und elektrischen Antrieben in Fahrzeugen ist durch die folgenden Punkte motiviert [64]: verbesserte Leistung, verbesserter Fahrkomfort, verbesserte Sicherheit, weniger Kraftstoffverbrauch und niedrigere Emissionen.

Im Allgemeinen wird für viele Hilfsaggregate von den elektrischen Aktoren gefordert, dass sie ein großes Verhältnis von Drehmoment/Volumen und Drehmoment/Gewicht sowie eine niedrige Massenträgheit, eine hohe Dynamik und eine hohe Temperaturstabilität aufweisen. Die Anforderungen sind in den letzten Jahren ständig gestiegen und werden dies vermutlich auch in Zukunft tun. Die in der Vergangenheit zu beobachtenden Fortschritte bei den elektrischen Aktoren resultieren aus der Weiterentwicklung von Dauermagnetmaterialien, der verbesserten Leistungselektronik und Antriebsregelung.

Das Einsatzgebiet von elektrischen Hochleistungssystemen umfasst heute ein weites Feld [65][66]:

- aktive Lenkung, Lenkunterstützung, inklusive Steer-by-Wire
- Kupplungs- und Shift-by-Wire-Stellglieder
- elektromechanische Bremssysteme, inklusive Brake-by-Wire

- Heizung, Lüftung und Klima
- Federung, Dämpfungs- und Stabilisatoraktoren
- Starter-Generatoren (integriert oder über Riementrieb)
- E-Maschinen für Elektrofahrzeuge (EV), Hybride (HEV) und Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzellen (FCEV)

Eine grobe Klassifizierung einiger Hochleistungssysteme im Hinblick auf Anwendung, Moment- und Drehzahlenforderungen und verwendete Technologie für elektrische Maschinen ist in Tabelle 4 gegeben. Eine Beschreibung der einzelnen Aktoren wird im Gesamttext gegeben.

Tabelle 4: Anforderungen an die elektrischen Aktoren für verschiedene KFZ-Anwendungen

	$M_{peak}$ in Nm	$n_{base}$ in rpm	$n_{max}$ in rpm	Motor Technologie
Aktive Lenkung	< 1	3.000	6.000	DC, IM, PMSM
Lenkunterstützung	3...10	500	2.000	DC, IM, PMSM
Kupplung/Schaltung	< 2	3.000	6.000	DC, PMSM
Bremse	1...3	1.000	3.000	DC, PMSM
Heizung/Ventilation	< 2,5	15.000	17.000	DC, PMSM
Starter/Generator	< 300	250	6.000	IM, PMSM
Antrieb	40...180	3.000	9.000	IM, PMSM

### 2.6.1 DC/DC-Wandler zur Anbindung des Bordnetzes an die Traktionsspannung

#### Anforderungen und grundsätzliche Zusammenhänge

Die Durchschnittsleistung des Bordnetzes lag 1960 bei ca. 300 W, stieg nach 1990 auf ca. 1,5 kW an und übersteigt heute bei einigen Modellen bereits 3 kW [67]. In konventionellen Fahrzeugen geht diese Entwicklung mit der Zunahme von Sicherheits- und Komfortfunktionen sowie dem Umbau von ehemals hydraulisch betriebenen in sparsamere elektrische Komponenten einher [67].

Bei Elektrofahrzeugen muss der Leistungsbedarf der unterschiedlichen Komponenten aus der Traktionsbatterie gedeckt werden. Der maximale sowie der durchschnittliche Leistungsbedarf typischer Komponenten konventioneller Kraftfahrzeuge ist in Tabelle 5 [67][68] dargestellt. Dabei wurden diejenigen Komponenten ausgewählt, die im Hinblick auf Elektrofahrzeuge relevant sind. Zu beachten ist, dass einige Komponenten wie z. B. das elektrische Kühlergebläse und die elektrische Wasserpumpe bei einem Elektrofahrzeug ggf. kleiner dimensioniert werden können.

Eine Betrachtung der Zusammenstellung zeigt zum einen, dass der momentane Leistungsbedarf starken fahrbetriebsabhängigen Schwankungen unterworfen ist. Der DC/DC-Wandler muss dabei so ausgelegt werden, dass er den Momentanverbrauch stets abdecken kann. Um den DC/DC-Wandler nicht für die maximal mögliche Verbraucherleistung auslegen zu müssen, kann ein Speicher (Batterie oder Kondens-

sator) zur Pufferung der Leistungsspitzen verwendet werden. Zudem kann ein elektrisches Energiemanagement eingesetzt werden, um den maximalen Leistungsbedarf durch Abschalten zweitrangiger Funktionen im Bereich kurzer Leistungsspitzen zu verringern. Die Versorgung sicherheitsrelevanter Funktionen muss dabei stets sichergestellt sein und gegebenenfalls redundant ausgeführt werden.

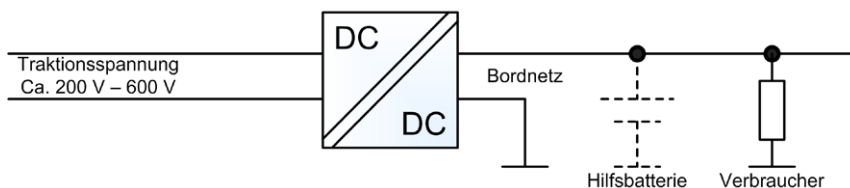
Komponenten mit hohem Leistungsbedarf können im Elektrofahrzeug ggf. auch direkt an die Traktionsspannung angeschlossen werden, um den Wirkungsgrad zu steigern und die Kosten zu senken.

Tabelle 5: Maximale und durchschnittliche Leistung typischer Fahrzeugkomponenten eines konventionell angetriebenen Fahrzeugs nach [67] und [68]

Verbraucher:	Maximale Leistung in W	Durchschnittliche Leistung in W
Elektrisches Kühlergebläse	1.800	700
Elektrische Wasserpumpe	600	100
Elektrische Servolenkung	900	200
Elektromechanische Bremse (EMB)	1.000	50
Wankstabilisator	2.000	150
Elektrischer Klimakompressor	4.000	1.000
Radio	20	20
Standlicht	8	7
Abblendlicht	110	90
Schlussleuchte	30	25
Instrumente	22	20
Beheizbare Heckscheibe	200	60
Scheibenwischer	50	10
Bremslicht	42	11
Blinklicht	42	5
Nebelscheinwerfer	110	20
Nebelschlussleuchte	21	2
Gesamte durchschnittliche Leistung in W:		2.470

Der prinzipielle Aufbau eines Bordnetzes mit einer Spannungsebene ist in Abbildung 13 dargestellt. Dabei können Hilfsbatterien eingesetzt werden, um die Leistungsspitzen angeschlossener Verbraucher zu kompensieren sowie die Funktion ausgewählter Komponenten (z. B. Zentralverriegelung) im Stillstand bei deaktiviertem DC/DC-Wandler sicherzustellen.

Abb. 13: Prinzipieller Aufbau des Bordnetzes mit einer Spannungsebene



### Anforderungen an den DC/DC-Wandler

Auf die wesentlichen Sicherheitsfunktionen sowie einige, wenn auch optionale Komfortfunktionen heutiger Fahrzeuge (z. B. Servolenkung) kann bei Elektrofahrzeugen nicht verzichtet werden, um eine erfolgreiche Markteinführung zu ermöglichen. Wie aus dem vorhergehenden Abschnitt hervorgeht, liegt der durchschnittliche Verbrauch dieser Komponenten auch im Falle eines Fahrzeugs mit geringer Ausstattung bei ca. 1 – 2 kW. Geht man überschlägig von einer urbanen PKW-Fahrt mit einer durchschnittlichen Antriebsleistung von ca. 10 – 20 kW aus, so wird deutlich, dass das Bordnetz erheblich zum Energiebedarf des gesamten Fahrzeuges beiträgt. Der Verbrauch der Hilfsaggregate kann die Reichweite eines Elektrofahrzeugs leicht um 25 % reduzieren. Daraus ergibt sich die Anforderung, den DC/DC-Wandler mit einem möglichst hohen Wirkungsgrad zu realisieren.

Weitere Anforderungen sind:

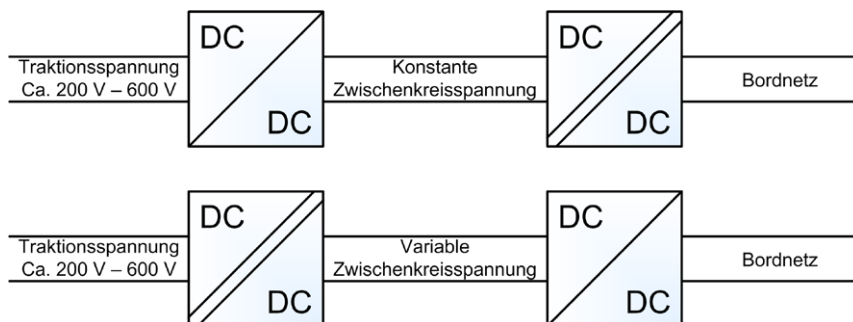
- Die Versorgung sicherheitsrelevanter Funktionen muss stets gewährleistet sein.
- Aus Sicherheitsgründen ist eine galvanische Trennung dringend erforderlich.
- Die Baugröße sowie das Gewicht sind beim Aufbau von Fahrzeugen stets kritische Größen und sollten minimal gehalten werden.
- Da sich die Spannung der Batterien in Abhängigkeit vom Ladegrad innerhalb gewisser Grenzen ändern kann, muss der DC/DC-Wandler für einen entsprechend weiten Eingangsspannungsbereich ausgelegt werden.
- Der DC/DC-Wandler muss eine hinreichend gute Dynamik bei fahrbetriebsabhängigen Lastwechseln aufweisen. Dabei ist die Dynamik entsprechender Komponenten, wie elektromechanische Bremse (EMB), elektrische Servolenkung, Wankstabilisator, etc. maßgebend.
- Dient der DC/DC-Wandler lediglich der Versorgung unterschiedlicher Bordnetzverbraucher, ist keine bidirektionale Topologie erforderlich. Dies ist bei Elektrofahrzeugen meist der Fall. Nur wenn eine Notversorgung des Traktionssystems aus der Hilfsbatterie des Kleinspannungs-Bordnetzes vorgesehen werden soll, ist ein bidirektionaler Wandler erforderlich.

### Stand der Technik und aktuelle Forschungsschwerpunkte

Für den Aufbau des DC/DC-Wandlers kann auf gängige Topologien zurückgegriffen werden. Da das Verhältnis von Eingangs- zu Ausgangsspannung sehr groß ist, sollte der zur galvanischen Trennung notwendige Transformator mit entsprechendem Übersetzungsverhältnis ausgeführt werden. Um den Wirkungsgrad zu erhöhen, kann zudem eine zweistufige Realisierung entsprechend Abbildung 14 zweckmäßig sein. Dabei kann die potentialtrennende Stufe mit festem Übersetzungsverhältnis und Tastgrad realisiert werden. Das ermöglicht eine wirkungsgradoptimale Auslegung dieser Stufe. Die jeweils andere Stufe

kann zur Regelung der Ausgangsspannung über den Tastgrad verwendet werden.

Abb. 14: Zweistufige Realisierung des DC/DC-Wandlers mit galvanischer Trennung („//“)



Einige Ansätze zum Aufbau des DC/DC-Stellers sind in [69]-[74] dargestellt. Diese gehen allerdings teils von bidirektionalen DC/DC-Wandlern zum Einsatz in Fahrzeugen mit Hybridantrieb oder Brennstoffzellen aus. Die prinzipiell für den Aufbau der DC/DC-Wandler in Frage kommenden Schaltungstopologien sind im Kapitel 2.8 beschrieben.

### 2.6.3 Bewertung

Das Elektrifizieren der Nebenaggregate ermöglicht einen vom Hauptantrieb unabhängigen Betrieb des Aggregats. Dies ermöglicht z. B. eine Vorkonditionierung des Fahrzeugs über das Stromnetz, eine Temperierung der Traktionsbatterie und eine Standklimatisierung.

Durch die Verbreitung der elektrischen Hilfsaggregate wird das KFZ-Bordnetz zunehmend stärker belastet. Vor allem bei den sogenannten Stadtfahrzeugen, welche häufig im Stillstand sind (Stop&Go-Verkehr), kommt dies zum Tragen. In Zukunft ist bei weiterer Verbreitung der Elektro- und Hybridfahrzeuge ein direkter Anschluss der Hilfsaggregate an die Traktionsspannung zu erwarten. Die folgenden Punkte sind zu beachten:

- Bei Auslegung des 12-V-Bordnetzes ohne oder mit sehr kleiner Hilfsbatterie muss die DC/DC-Kapazität ausreichend groß dimensioniert sein, um auch in kritischen Fällen sämtliche elektrische Energie zur Verfügung zu stellen. (Es kann beim Aktivieren des elektronischen Stabilitätsprogramms (ESP) mit über 100A zusätzlich belastet werden.)
- Großverbraucher, wie z. B. das ESP oder der Klimakompressor, erfordern bei Anschluss an das 12-V-Bordnetz dementsprechend dicke Kabel. Es ist daher zu überprüfen, ob diese Komponenten direkt an das Hochvoltssystem des Elektrofahrzeugs angeschlossen werden sollten.
- Bei Einsatz von X-by-Wire Systemen (Lenkung, Bremse ...) sind keine mechanischen Rückfallebenen mehr vorhanden. Die Systeme sind daher nur mit sehr hohem Aufwand zu realisieren und benötigen dementsprechend einen sehr hohen Grad bei der Selbstdiagnose, eine relativ teure Kommunikationstechnik wie zum Beispiel FlexRay



und viele Redundanzkomponenten (von Doppelprozessorsteuerungen bis hin zu doppelt ausgeführten Stromleitungen).

- Zum sicheren Betrieb des 12-V-Bordnetzes ist ein komplexes Betriebsmanagement notwendig, welches bestimmte Funktionen bei Bedarf abschaltet. Im ersten Schritt können hierbei die Komfortfunktionen abgeschaltet bzw. heruntergefahren werden (z. B. Innenraumheizung auf 30 %, Sitzheizung nur in Stufe 1, Lüftung auf max. 50 %, Heckscheiben- und Spiegelheizung aus usw.). Wenn der Spannungsfall dann weiterhin kritisch bleibt, können solche Systeme noch weiter heruntergefahren oder komplett abgeschaltet werden.

#### 2.6.4 Aktuelle und künftige Forschungsschwerpunkte

Aufgrund der zu erwartenden Einführung der Lithium-Ionen-Technik bei Bordnetz-Batterien und aufgrund des komplexen Betriebsprofils sind auch für Bordnetz-Batterien Managementsysteme zu entwickeln. Damit steigen auch die Anforderungen an die Kommunikationsfähigkeit der Bordnetz-Verbraucher.

## 2.7 Batterietechnologien und Batteriesysteme

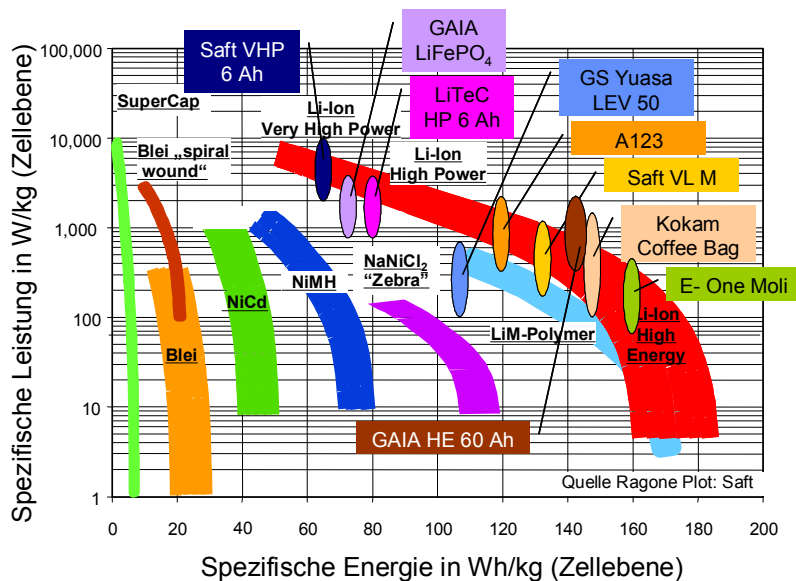
Zentrale und teuerste Komponente von Elektrofahrzeugen ist die Batterie. Die Batterie bestimmt maßgeblich Fahrzeuggewicht und -reichweite und somit den Aktionsradius, der mit Elektrofahrzeugen realisierbar ist. Durch die auch in absehbarer Zeit hohen Kosten bestimmt die Batterie auch ganz wesentlich die Investitionskosten. Darüber hinaus muss bei der Entwicklung der Batterie die Sicherheit des Gesamtsystems berücksichtigt werden. Um eine nachhaltige Entwicklung zu erreichen, sind auch Fragen des Recyclings und der Ressourcenverfügbarkeit zu betrachten.

### 2.7.1 Batterietechnologien

In der Fahrzeugtechnik werden verschiedene Speichertechnologien für elektrische Energie diskutiert und eingesetzt. Für viele Anwendungen wird große Hoffnung auf die Lithium-Ionen (Lilon)-Technologie gesetzt. Daneben werden Blei-Säure-Batterien, Nickel-Metallhydrid (NiMH)-Batterien, Nickel-Cadmium (NiCd)-Batterien und Natrium-Nickel-Chlorid (NaNiCl<sub>2</sub>, Zebra)-Batterien betrachtet. Ein Überblick über die Leistungs- und Energiedichten der verschiedenen Batterietechnologien wird in Abbildung 15 gezeigt. Als Ergänzung zu Batterien werden auch Doppelschichtkondensatoren und Schwungräder vorgestellt.



Abb. 15: Spezifische Leistung und spezifische Energie für verschiedene Speichertechnologien (Quelle des Ragone-Diagramms: Saft) und Angabe von verschiedenen kommerziellen Lithium-Ionen-Zellen (Leistungsdaten aus Datenblättern oder eigenen Messungen)



### Blei-Säure-Batterien

Blei-Säure-Batterien sind die mit Abstand kostengünstigste Speichertechnologie. Aufgrund Ihrer geringen Energiedichte werden sie heute dort eingesetzt, wo die Kosten im Vordergrund stehen und Reichweite sowie Gewicht eine untergeordnete Rolle spielen (z. B. in Mikro-Hybrid-Fahrzeugen oder in Elektrorollern und -fahrzeugen für den asiatischen Markt).

Probleme bestehen vor allem in Bezug auf Energiedichte (ein Problem, dass sich nicht grundlegend lösen lässt), Lebensdauer und Ladeakzeptanz z. B. beim regenerativen Bremsen. Durch verschiedene technologische Entwicklungen werden inzwischen Leistungsdaten erreicht, die die Batterien auch für den Einsatz in Mild-, Medium- und Voll-Hybridfahrzeugen geeignet erscheinen lassen. Aufgrund der geringen Basismaterialkosten, der inhärenten Sicherheit und der Rezyklierbarkeit der Bleibatterien stellt die Technologie trotz des hohen Gewichtes eine interessante Option dar.

### Nickel-Metallhydrid- und Nickel-Cadmium-Batterien

Nickel-Cadmium (NiCd)-Batterien weisen etwas höhere Energiedichten und wesentlich höhere Leistungsdichten als Blei-Säure-Batterien auf. Die spezifischen Batteriekosten liegen jedoch deutlich höher. Die sicherheitsrelevanten Kriterien werden von diesem Batterietyp erfüllt. Die Verwendung von Cadmium ist unter ökologischen Gesichtspunkten allerdings kritisch. Der Entwicklungsstand dieses Batteriesystems ist weitgehend ausgereift. Die Einsatzmöglichkeit in Elektrofahrzeugen entspricht dem der Blei-Säure-Batterie. Eine wichtige Rolle von NiCd-Batterien bei der Elektrifizierung von Fahrzeugen wird nicht erwartet, da die Parameter Energiedichte und Kosten deutlich dagegen sprechen.

Nickel-Metallhydrid (NiMH)-Batterien stellen eine Weiterentwicklung der NiCd-Batterie dar, die ohne das toxische Cadmium auskommt. Da Zellspannung, Entladekurven und Ladeverhalten nahezu identisch mit der NiCd-Batterie sind, lassen sich diese Batterietechnologien gegenseitig austauschen. NiMH-Batterien weisen jedoch eine in etwa doppelt so hohe Energiedichte wie Blei-Säure- bzw. NiCd-Batterien auf. Aufgrund der noch kurzen Entwicklungszeit ist mit geringen Steigerungen der Energiedichte zu rechnen. Ihre Leistungsdichte weist mit gut 1.000 W/kg einen sehr guten Wert auf, der nur von Lilon-Hochleistungsbatterien übertroffen wird. Hinsichtlich der sicherheitstechnischen Aspekte bestehen keinerlei Zweifel an der Einsetzbarkeit dieses Batteriesystems in Kraftfahrzeugen. NiMH-Systeme finden in den Hybridfahrzeugen der Hersteller Toyota, Honda und Lexus bereits Anwendung. Inwieweit dieser Batterietyp jedoch für rein elektrisch betriebene Fahrzeuge verwendet wird, liegt an der weiteren Entwicklung von Energiedichte und Kosten. Beide Größen haben aber nur ein relativ geringes Optimierungspotential, die NiMH-Batterie erscheint damit auf Dauer gegenüber Lilon-Batterien nicht konkurrenzfähig.

#### **Natrium-Nickelchlorid-Batterien**

Natrium-Nickelchlorid-Batterien ( $\text{NaNiCl}_2$ , ZEBRA) haben eine theoretische Energiedichte von 788 Wh/kg. Da praktisch keine Nebenreaktionen in der Batterie auftreten, ist der energetische Wirkungsgrad sehr gut. Darüber hinaus altern diese Batterien elektrochemisch praktisch nicht. Ein Nachteil ist die hohe Betriebstemperatur, die bei rund 300 °C liegt und eine gute thermische Isolation erfordert. Häufige Temperaturschwankungen führen zu einer hohen mechanischen Belastung der keramischen Elektrolyte. Brechen diese, wird die Zelle unbrauchbar. Weitere bekannte Probleme dieser Technologie sind die begrenzte Leistungsfähigkeit durch einen hohen Innenwiderstand und die thermische Selbstentladung. Außerdem ist eine direkte Ladezustandsmessung nicht möglich.

ZEBRA-Batterien stellen derzeit aber insbesondere für Betreiber von Fahrzeugflotten im Bereich des städtischen Lieferverkehrs ein sehr interessantes System dar. Der Einsatz in privaten PKW ist umstritten, da bei langen Standzeiten die thermischen Verluste einer Hochtemperatur-Batterie den Gesamtwirkungsgrad stark beeinträchtigen können. Die Kosten für die Batterie sind aktuell erheblich günstiger als für Lilon-Batterien. Allerdings sind die langfristigen Perspektiven für Lilon-Batterien in Bezug auf Preis, Energiedichte und Handhabbarkeit besser.

#### **Lithium-Ionen-Batterien**

##### **Technologie**

Lithium-Ionen-Batterie (Lilon) ist der Überbegriff zu einer Vielzahl von Materialkombinationen, aus denen Batterien aufgebaut werden. Die Eigenschaften in Bezug auf elektrische Leistungsfähigkeit, Lebensdauer

und Sicherheit hängen ganz erheblich von der gewählten Materialkombination ab. Verallgemeinerte Aussagen über die vorgenannten Eigenschaften lassen sich nur sehr bedingt machen. Ein spezifisches Design der Zellen in Bezug auf die jeweiligen Anforderungen in den Anwendungen ist sinnvoll. Daher sind genaue Spezifikationen von großer Bedeutung für die Entwicklung von Batterien.

Lilon-Batterien verfügen in den heute aktuellen Materialkombinationen über keinen definierten Überlademechanismus, der bei Überladung Strom aufnehmen kann, ohne dass die Batterie geschädigt wird. Während dies für den Betrieb Risiken bei Überladung birgt, hat es den großen Vorteil eines Coulomb'schen Wirkungsgrades von nahezu eins. Der energetische Wirkungsgrad liegt im Verhältnis zu anderen Batterietechnologien sehr hoch.

Ein Vorteil von Lilon-Batterien ist, dass auch bei hohen Stromraten ein sehr hoher Anteil der bei kleinen Strömen verfügbaren Kapazität genutzt werden kann. Damit eignen sich Lilon-Batterien besonders für Hochstromanwendungen, wie z. B. im Elektrofahrzeug.

Lilon-Batterien werden heute in zwei Hauptproduktlinien entwickelt und angeboten: Hochenergiebatterien und Hochleistungsbatterien. In Hochleistungsbatterien werden sehr dünne Aktivmassen eingesetzt, so dass der relative Anteil von Metallfolien zur Stromableitung und von Separatoren bzw. Elektrolyt pro Aktivmassenvolumen hoch ist. In Hochleistungszellen ist daher für die gleiche Kapazität ein deutlich höherer Materialeinsatz notwendig, was sich in höheren Kosten widerspiegelt. Die Leistungsdaten von Lilon-Batterien können quasi kontinuierlich von Hochenergie- zu Hochleistungsbatterien verschoben werden.

### **Zelldesign**

Heute werden drei verschiedene Zelldesigns entwickelt und hergestellt: Rundzellen, prismatische Zellen und Flachzellen („Coffee-bag“). Der Vorteil der Rundzellen liegt in der großen Erfahrung mit dem Produktionsprozess. Das Gehäuse ist dicht und hält auch einen gewissen Innendruck, der durch Nebenreaktion entstehen kann, ohne Verformung gut aus. Nachteil ist eine beschränkte Packungsdichte und bei Zellen mit größeren Kapazitäten eine schlechtere Wärmeabführung. Insbesondere bei größeren Kapazitäten kann es im Kern der Zellen zu erheblichen Temperaturerhöhungen kommen. Flachzellen haben ein deutlich besseres Oberflächen- zu Volumenverhältnis und erlauben effiziente Kühlkonzepte. Mögliche Probleme sind die langfristige Dichtigkeit und Aufblähungen bei Druckaufbau. Zukünftig können mit Flachzellen geringere Produktionskosten und etwas höhere Energiedichten erreicht werden, da die Gehäusefolien leichter als die Gehäuse der Rundzellen sind. Derzeit werden in der Automobilindustrie beide Technologien untersucht.

### **Kosten und Verfügbarkeit**

Die Kosten für Lilon-Zellen sind heute noch sehr hoch und liegen für Qualitäts-Hochenergiezellen, die für den Einsatz im Kraftfahrzeug in Frage kommen, in der Größenordnung von 1.000 €/kWh. Durch Massenfertigung sind erhebliche Kostenreduzierungen zu erwarten. Preise im Bereich von 300 €/kWh für Hochenergiebatterien und 500 €/kWh für Hochleistungsbatterien scheinen in den kommenden 5 Jahren bei Etablierung einer Massenfertigung realistisch. Dabei handelt es sich um die Abgabepreise der Zellhersteller. Das Packaging und die Managementsysteme kommen noch dazu. In einigen Jahren werden die angegebenen Preise vermutlich auch im System erreichbar sein. Zellen aus dem Konsumerbereich erfüllen die Automobilanforderungen in Bezug auf die Lebensdauer nicht.

Kontrovers diskutiert wird die Frage der Verfügbarkeit von Lithium bei einer stark steigenden Nachfrage durch Elektrofahrzeuge. Basierend auf Schätzungen zur verfügbaren Lithiummenge reicht diese in Elektrofahrzeugen – unter Vernachlässigung anderer Anwendungsbereiche – für eine Kapazität von 10 kWh (ausreichend für 30 bis 70 km elektrische Reichweite je nach Fahrzeug) in maximal 3 Milliarden Elektrofahrzeugen. Dies ist zunächst eine ausreichend große Menge, bedeutet aber auch, dass mittelfristig ein effizientes Recyclingsystem zur Rückgewinnung von Lithium etabliert werden muss. Es ist auch zu beachten, dass sich die Lithium-Vorkommen auf relativ wenige Länder mit einem Schwerpunkt in Südamerika verteilen. Eine frühzeitige Planungssicherheit für die Betreiber der Lithium-Minen muss hergestellt werden, um die Produktionskapazitäten rechtzeitig erweitern zu können und damit Preisspitzen beim Lithium zu vermeiden.

### **Doppelschichtkondensatoren und Schwungräder**

Doppelschichtkondensatoren (SuperCaps) und Schwungräder können Energie schnell speichern und abgeben und eignen sich daher als Speicher für Beschleunigungsanwendungen und das rekuperative Bremsen. Allerdings sind sie aufgrund ihrer sehr geringen Energiedichte nur als Puffer in einem aus mehreren Speichertypen aufgebauten System einsetzbar. Bei Verwendung von Lilon-Batterien in Elektrofahrzeugen ergibt sich aufgrund der Leistungsfähigkeit der Lilon-Batterien keine Notwendigkeit für einen zusätzlichen Leistungsspeicher. Auch bei günstigen Annahmen für die Auslegung des Gesamtsystems macht die Hybridisierung des Lithium-Ionen-Batteriespeichers mit SuperCaps oder Schwungrädern in reinen Elektrofahrzeugen aufgrund der hohen Leistungsfähigkeit der Lithium-Ionen-Technologie keinen technischen und wirtschaftlichen Sinn und kann als technische Option nicht empfohlen werden. Beim Einsatz von weniger leistungsfähigen Batterietechnologien muss im Einzelfall geprüft werden, ob die Hybridisierung sinnvoll ist.

## 2.7.2 Batteriesystemdesign und Batteriesystemtechnik

Die Batteriesystemtechnik umfasst alle Schritte und Elemente, die von der fertigen Batteriezelle bis zur Integration eines Batteriesystems in die Anwendung notwendig sind. Ein Batteriespeicher besteht aus einzelnen Batteriezellen, die typischerweise Spannungen im Bereich von wenigen Volt und einen weiten Bereich von Kapazitäten aufweisen. Aus diesen Zellen muss durch geeignete Verschaltung ein Batteriesystem gebaut werden, das den spezifischen Anforderungen der Anwendungen (Spannungslage, Energieinhalt, Bauform, Art des Kühlsystems, Diagnostik, Kommunikationsschnittstellen, Sicherheitskonzepte, Sicherheitsanforderungen sowie Wartungs- und Reparaturkonzepte) gerecht wird. Das Systemdesign ist maßgeblich für einen erfolgreichen Einsatz des Batteriespeichers verantwortlich und stellt die Schnittstelle zur Anwendung dar. Eine gute Zelle ist eine notwendige Bedingung für ein gutes System, aber sie ist nicht hinreichend.

In der Automobiltechnik wird heute abgeschätzt, dass langfristig die Wertschöpfung des Systembaus bei etwa 30 % bezogen auf den Wert der Batteriezellen liegen wird. Zur Optimierung der Systemkosten müssen effiziente Techniken sowohl auf Basis der einzelnen Komponenten als auch bei der Produktionstechnik der komplexen Systeme entwickelt werden.

## 2.7.3 Batteriemangement

Beim Batteriemangement müssen einige Aspekte berücksichtigt werden, die für eine lange Lebensdauer des Batteriesystems unerlässlich sind:

- Das thermische Management ist dafür verantwortlich, eine möglichst gleichmäßige Temperatur innerhalb des Batteriesystems von etwa 25 °C (bei ZEBRA-Batterien höhere Temperaturen) zu erreichen. Tiefe Temperaturen sind aufgrund der abnehmenden Leistungsfähigkeit, höhere aufgrund der beschleunigten Alterung zu vermeiden. Die Zelltemperatur bestimmt auch die maximale Laderate der Batterie. Für den Erfolg des thermischen Managements ist im Wesentlichen das Design des Gesamtsystems und des aktiven Kühlsystems verantwortlich. Für Elektrofahrzeuge sollte mittelfristig ein luftgekühltes System ausreichend sein.
- Das Zellmanagement ist beim Einsatz von Lilon-Batterien von besonderer Bedeutung. Da Lithium-Ionen-Batterien zum einen keinen inhärenten Überlademechanismus besitzen, zum anderen die Ladezustände der in Serie verschalteten Zellen durch Temperatur- und Fertigungsunterschiede unvermeidlich auseinander laufen, ist ein Ladungsausgleichssystem notwendig, welches eine Symmetrierung der Zellen vornimmt. Um ungleichmäßige Ladezustände zu vermeiden, ist die Produktion von Zellen sehr gleichmäßiger Qualität erforderlich.

- Das Batteriemangement beobachtet den Gesamtladezustand der Batterie, die aktuelle Leistungsfähigkeit und den Alterungszustand. Diese Daten werden vom Fahrzeugmanagement für die Gesamtsteuerung benötigt. Gleichzeitig bestimmt das Batteriemangement, wie die Batterie betrieben wird, um eine möglichst lange Lebensdauer bzw. eine optimale Ausnutzung der Zyklenfähigkeit der Batterie bis zum erwarteten Ende der Lebensdauer zu erreichen.

## 2.7.4 Ladetechnik

Wird die Batterie mit einer Leistung wie beim Fahrbetrieb aufgeladen, so gelten für den Ladevorgang vergleichbare Anforderungen an das thermische Management und es ist kein erhöhter Aufwand notwendig. Die Ladezeit würde in diesem Fall für ein Elektrofahrzeug etwa 1 bis 2 Stunden betragen. Soll die Batterie dagegen schneller geladen werden, müssen Batteriezellen und Batteriesystem für höhere Leistungen ausgelegt werden. Technisch ist das machbar, allerdings entstehen beim Einsatz von Hochleistungsbatteriezellen, Ladeinfrastruktur oder Flüssigkeitskühlung höhere Kosten. Dadurch erhöhen sich auch die Gesamtkosten des Batteriesystems, ohne dass für die Fahrzeugnutzung während des Fahrens ein Vorteil erzielt wird.

Es ist absehbar, dass bei normaler Nutzung von elektrischen PKW – bei Flotten- oder Nutzfahrzeugen können andere Bedingungen gelten – kein wirtschaftliches Modell und kein Nutzerprofil zu finden sind, welche eine Ladeleistung oberhalb des einphasigen Standardstromanschlusses in Deutschland mit 3,7 kW rechtfertigt. Alternativ wäre auch ein dreiphasiger 11kW-Anschluss denkbar, der sich heute in der Hausinstallation problemlos integrieren ließe.

## 2.7.5 Bewertung

Mindestens für die kommenden 10 Jahre werden Lilon-Batterien die wesentliche Batterietechnologie für Elektrofahrzeuge sein. Welche der verschiedenen Materialkombinationen dabei die dominierende Rolle spielen wird, ist ebenso offen wie die bevorzugte Bauform der Zellen. Es ist davon auszugehen, dass sich mehrere Materialkombinationen gleichzeitig mit verschiedenen Anbietern am Markt etablieren werden. Daraus ergeben sich ein stetiger Wettbewerb und ein anhaltender Technologie- und Kostendruck. Das Batteriesystem wird auch langfristig mit Abstand die teuerste Komponente im Elektrofahrzeug sein. Für eine effektive Reichweite von 100 km muss heutzutage eine Investition seitens des Fahrzeugkäufers von rund 10.000 Euro getätigt werden, wenn ein Verbrauch von 15 kWh/100km angenommen wird. Auf Grund der hohen Kosten ist eine höhere elektrische Reichweite für den Normalkunden wirtschaftlich kaum sinnvoll. Die hohen Batteriekosten erzeugen einen hohen Kostendruck für Batteriezellen und Batteriesystem. Geht man von einer mittleren PKW-Fahrleistung in Deutschland von 37 km/Tag aus, dann werden über eine Lebensdauer von 10 Jahren

1080 äquivalente Vollzyklen erreicht. Bei der typischen Teilzyklisierung ist die Belastung der Batterie noch deutlich geringer als bei Vollzyklen. Basierend auf den heute vorliegenden Lebensdauerdaten können mit Lilon-Batterien problemlos 3.000 und mehr äquivalente Vollzyklen in dem für Stadtfahrzeuge typischen teilzyklischen Betrieb erreicht werden. Daraus ergibt sich, dass die Batterie auch für nicht fahrzeuggebundene Anwendungen z. B. zur Stabilisierung des Stromnetzes eingesetzt werden kann, ohne dass sich dadurch die Betriebslebensdauer der Fahrzeuge verkürzt. Die Mehrkosten für die Nutzung des Speichers für nicht fahrzeuggebundene Anwendungen sind aus Batteriesicht also quasi Null, da die Lebensdauer der Batterie auch ohne zyklische Nutzung begrenzt ist (Alterung). Allerdings sind Zusatzinvestitionen für das bidirektionale Ladegerät und ggf. erforderliche Kommunikationseinrichtungen notwendig.

### 2.7.6 Forschungsschwerpunkte

Es gibt eine große Zahl von Lithium-Ionen-Materialkombinationen, die eingesetzt werden können. Über die Wahl der Materialien können die gewünschten Leistungseigenschaften flexibel eingestellt werden. Die zentrale Herausforderung ist die Reduzierung der Kosten, da diese über die erfolgreiche Markteinführung von Elektrofahrzeugen entscheiden. Als wesentliche Maßnahmen können die folgenden Punkte identifiziert werden:

- Maximierung der Sicherheit und Zuverlässigkeit
- Reduktion der Kosten durch Materialauswahl und Skaleneffekt
- Übertragung von Lebensdauerergebnissen aus dem Labor ins Feld
- Optimierung der Systemtechnik
- Langfristig Erhöhung der Energiedichte

Für den Einsatz in gewerblichen Fahrzeugen können unterschiedliche Voraussetzungen gelten. Für Anwendungen, in denen täglich mindestens einmal die Batteriekapazität genutzt und eine längere Strecke gefahren wird, können wegen der höheren notwendigen Lebensdauer und höheren Energiedichte auch die höheren Kosten wirtschaftlich vertretbar sein.

## 2.8 Ladegeräte

Ladegeräte werden hauptsächlich benötigt, um die Fahrzeugbatterien aus dem elektrischen Stromnetz aufzuladen. Darüber hinaus können Ladegeräte auch bidirektional aufgebaut werden, um Energie von der Batterie in das Netz zurückzuspeisen und Regelleistung zur Verfügung zu stellen. Es lassen sich die folgenden Funktionen unterscheiden:

- Anpassung der Spannungsart: Die Wechselspannung des Stromnetzes muss in eine Gleichspannung umgeformt werden (Gleichrichter).



- Leistungsregulierung: Die Ladeleistung bzw. der Ladestrom muss nach einer der Batterie und deren Ladezustands angepassten Charakteristik eingestellt werden. Außerdem ist die Leistungsbegrenzung des Netzanschlusspunktes zu berücksichtigen. Für die Anwendung dynamischer Stromtarife muss die Ladesteuerung außerdem die Vorgaben des Stromversorgers berücksichtigen.
- Potentialtrennung: Eine Potentialtrennung trennt die Potentiale von Stromnetz und Fahrzeugbatterie. Ob diese erforderlich ist, hängt vom Schutzkonzept des elektrischen Systems im Fahrzeug ab. In jedem Fall verbessert eine Potentialtrennung den Schutz bei elektrischen Störfällen.

Diese Funktionen werden in der Regel durch das Ladegerät bereit gestellt. Je nach Topologie des Hochvoltnetzes des Fahrzeugs wird die Leistungsregulierung durch DC/DC Wandler (z. B. bei Einsatz mehrerer Batteriepacks mit integriertem DC/DC-Wandler) übernommen.

### 2.8.1 Netzanschluss

Ladegeräte werden typischerweise an das Niederspannungs-Verteilnetz, also an das dem privaten Verbraucher geläufige einphasige 230-V-Wechselspannungs- oder das dreiphasige 400-V-Drehspannungsnetz angeschlossen. Das vollständige Nachladen einer Batterie für Reichweiten von rund 150-200 km kann über Nacht mittels eines einphasigen 3,7 kW-Anschlusses in 7 – 10 Stunden bewerkstelligt werden. Ein einphasiger 3,7 kW-Netzanschluss reicht für das Nachladen nach durchschnittlichen Fahrstrecken aus, wenn dies in den üblichen Stillstandszeiten im Stundenbereich erfolgt. Wenn die Batterie allerdings vor einer längeren Fahrt in einer kurzen Stillstandszeit nachgeladen werden muss, ist eine erheblich höhere Leistung erforderlich. Eine Nachladung für beispielsweise 100 km Wegstrecke innerhalb von 15 min würde eine Leistung von rund 75 kW erfordern. Dies ist bereits deutlich mehr als die gesamte Anschlussleistung eines Einfamilienhauses und bedeutend mehr als die durchschnittliche Antriebsleistung des Elektromotors. Eine derartige Anforderung würde auf Seiten der Batterie zu erheblichen Mehrkosten führen.

Soll die Fahrzeugbatterie dem Netzbetreiber als Energiespeicher zur Regelenergie dienen, sind die Installation einer speziellen Ladeinfrastruktur mit geeigneten Kommunikationsmöglichkeiten und ggf. bidirektionalen Ladegeräten erforderlich. Dies erfordert zusätzlichen Aufwand, der sich in Gewicht, Bauraum und Kosten niederschlägt. Wenn allerdings der ohnehin bidirektionale Antriebsumrichter als Ladegerät genutzt werden kann, lässt sich diese Funktionalität ohne erheblichen Mehraufwand realisieren.



## 2.8.2 Positionierung des Ladegeräts und Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestationen

Die Frage der Positionierung des Ladegeräts beeinflusst entscheidend die Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladepunkt und hat weitgehenden Einfluss auf Fragen der Standardisierung. Als mögliche Positionen kommen die folgenden Varianten in Frage:

Variante 1: Ladegerät im Fahrzeug

Variante 2: Ladegerät in der Ladestation

Variante 3: Mischform: Standard-Ladegerät im Fahrzeug, zusätzliche Ladestationen für Schnellladung

In Abhängigkeit von der Positionierung muss nicht nur eine Energie-, sondern auch eine Informationsübertragung bewerkstelligt werden. Bei öffentlich zugänglichen Ladestationen müssen Kommunikationsprotokolle zum Zwecke der Energieabrechnung etabliert werden.

Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Varianten sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

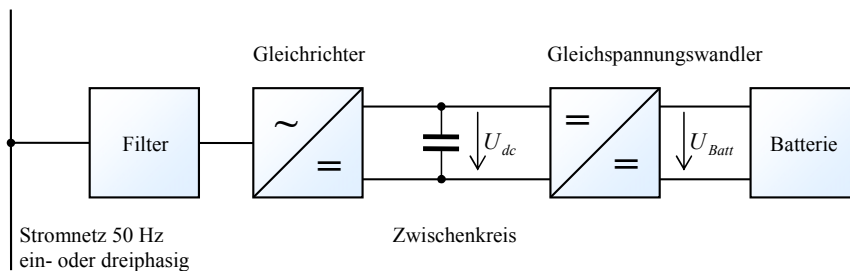
Tabelle 6: Vor- und Nachteile verschiedener Ladegeräteanordnungen

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Kommunikationsaufwand	gering	hoch	hoch
Gewicht und Bauraum	hoch	gering	mittel
Aufwand für Schutzfunktionen	gering	hoch	hoch
Infrastrukturkosten	gering	sehr hoch	mittel
Haftung	klar	unklar	unklar
Kosten Ladegerät	gering	Mittel	hoch

## 2.8.3 Topologieauswahl

Die Grundstruktur eines Ladegeräts ist in Abbildung 16 dargestellt. In der Regel ist eine zweistufige Umformung, zunächst Gleichrichtung und danach eine Gleichspannungswandlung, erforderlich, um einen gesteuerten Ladevorgang und die Anpassung der Spannungen zwischen Netz und Batterie zu bewerkstelligen. Die Spannungsanpassung über einen Netztransformator ist möglich, würde aber zu schwer und wahrscheinlich auch zu teuer, wenn der Einbau in das Fahrzeug vorgesehen ist. Zur Einhaltung der Oberschwingungsgrenzwerte muss ggf. ein Netzfilter vorgesehen werden.

Abb. 16: Struktur eines zweistufigen Ladegeräts



Bei der Auswahl geeigneter Topologien für Ladegeräte sind verschiedene Aspekte zu beachten:

- Eine Potentialtrennung zwischen dem speisenden Netz und dem Fahrzeug trägt in der Regel zur Erhöhung der Sicherheit bei. Dann besteht auch bei einem Kurzschluss z. B. eines Batteriepol mit dem Fahrzeugchassis keine Gefahr für Personen. Dieses Sicherheitsniveau lässt sich aber im Allgemeinen auch ohne Potentialtrennung durch doppelten Isolationsaufwand erreichen.
- Netzanschluss: Dreiphasige Drehstromanschlüsse können für höhere Leistungen verwendet werden, während einphasige Anschlüsse für langsames Laden ausreichen. Drei einphasige Ladegeräte können dann als dreiphasiges Ladegerät genutzt werden, wenn diese potenzialtrennend (s.o.) sind. Von vorneherein als dreiphasige Topologien konstruierte Ladegeräte können unter Umständen auch an einer Phase betrieben werden.
- Zur Ladung einer Batterie ist nur ein unidirektionaler Leistungsfluss vom Netz zur Batterie notwendig. Um das Netz kurzzeitig mit Hilfe der Fahrzeugbatterien stützen zu können, muss der Leistungsfluss auch umgekehrt werden können (bidirektional), was ein normales Ladegerät nicht kann. Um diese Funktionalität zu realisieren, steigen ebenfalls der Aufwand und die Kosten des Ladegeräts.
- Leistungsfaktor und Netzurückwirkungen: Wie in den europäischen Normen EN 61000-3-2, 3-3, 3-12, 2-2, 2-4 beschrieben, sind strenge Anforderungen bezüglich der Netzüberschwingungen und des Leistungsfaktors einzuhalten.

Für Ladegeräte kommen unterschiedliche Topologien zum Einsatz, welche im Gesamttext vorgestellt werden.

#### 2.8.4 Forschungsschwerpunkte

- Da die gesamte in einem Elektrofahrzeug umgesetzte elektrische Energie über das Ladegerät zugeführt wird, hängt die Effizienz des Gesamtfahrzeuges entscheidend vom Wirkungsgrad des Ladegerätes ab. Der Wirkungsgrad sowie die Leistungsdichte eines Wechselrichters können durch Optimierung gängiger Topologien innerhalb spezifischer Grenzen gesteigert werden. Durch Modifikation der Wechselrichtertopologie können gegebenenfalls auch deutlich höhere Wirkungsgrade sowie Leistungsdichten erreicht werden. Aus diesem Grund stellen Wechselrichtertopologien höchster Leistungsdichte und höchster Wirkungsgrade auch in der Zukunft einen Forschungsschwerpunkt dar.
- Um eine hohe Flexibilität bei der Aufladung von Elektrofahrzeugen zu ermöglichen, ist ein Ladegerät erforderlich, das an einphasigen ebenso wie an dreiphasigen Anschlusspunkten unterschiedlicher Leistung betrieben werden kann. Eine aufwandsoptimierte Gestaltung der Anpassung an diese unterschiedlichen Anschlusspunkte bei hohem Wirkungsgrad bedarf einer ausführlichen Betrachtung.

- Resonant schaltende Topologien erreichen höchste Wirkungsgrade und sind Gegenstand der Forschung auf dem Gebiet der elektronischen Stromversorgungen.
- Neben der kabelgebundenen Energieübertragung ist es möglich, ein Elektrofahrzeug mittels berührungsloser Energieübertragung zu laden. Dabei wird die Energie induktiv übertragen. Die Auslegung der dafür notwendigen Magnetik sowie der notwendigen Leistungselektronik hinsichtlich guter Wirkungsgrade stellt eine anspruchsvolle Aufgabe dar.
- Die Kommunikation zwischen externen Ladegeräten und den Fahrzeugen oder aber internen Ladegeräten und Netzanschlusspunkten ist zu untersuchen.

## 2.9 Range Extender

Heute verfügbare Batterietechnologien limitieren auf Grund hoher Kosten, Masse und Volumen die Reichweite von seriennahen Konzepten der Kompakt- und unteren Mittelklasse. Eine Möglichkeit der Reichweitenerhöhung besteht in der Nutzung von Range Extendern (Reichweitenverlängerer). Ein Range Extender ist ein Stromerzeuger an Bord von Elektrofahrzeugen, der z. B. mittels eines Verbrennungsmotors und eines Generators oder mithilfe einer Brennstoffzelle elektrische Energie bereitstellen kann. Die Batterie wird dann auf die täglich zu erwartende Fahrstrecke ausgelegt. In Betriebssituationen, in denen die Batteriekapazität nicht für die geforderte Fahrstrecke ausreicht, stellt der Range Extender die zusätzlich benötigte Energie zur Verfügung.

Elektrofahrzeuge mit Range Extender besitzen somit zwei voneinander unabhängige Energiewandler und -speicher und gehören in den Bereich der Hybridantriebe. Da der Antrieb des Elektrofahrzeugs mit Range Extender voll elektrisch ist, stellt dieses Konzept einen seriellen Hybridantrieb dar mit dem Unterschied eines im Bezug auf die Fahrleistungsanforderungen leistungsreduzierten Stromerzeugers. Solche Konzepte werden an anderer Stelle auch als serielle Plug-In-Hybridantriebe bezeichnet. [75]

### 2.9.1 Stand der Technik

Im Folgenden werden Range Extender auf Basis von Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen betrachtet.

#### **Verbrennungsmotor-Generator-Systeme**

Die Technologien der Hubkolbenmotoren für Fahrzeugantriebe haben einen sehr hohen Entwicklungsstand. Der Betrieb in Verbindung mit einem Generator als Range Extender ist – abgesehen von den voraussichtlich deutlich geringeren Betriebszeiten – grundsätzlich vergleichbar mit denen in seriellen Hybridantrieben. Es kann auf ein Schaltgetriebe

verzichtet werden und die Dynamikanforderungen der direkten mechanischen Kopplung an den Antrieb gelten hier nicht. Im Rahmen der Entwicklung geeigneter Betriebsstrategien bestehen die Optionen, den Verbrennungsmotor dynamisch, zum Beispiel einem mittleren Leistungsbedarf folgend, oder in diskreten, stationären Betriebspunkten zu betreiben. Letzteres bedeutet ein erhebliches Optimierungspotential bezüglich des spezifischen Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen. Maximale Wirkungsgrade heutiger Hubkolbenmotoren im stationären Betrieb liegen bei Ottomotoren zwischen 31 und 38 % [76]. Bei Dieselmotoren werden Werte über 40 % erreicht. Als Beispiel dient hier der auf niedrigen Verbrauch hin optimierte 1,2 l TDI des VW Lupo 3L mit 42 % [76]. Die spezifischen Kosten der Hubkolbenmotoren liegen bei 19 US\$/kW [77] bzw. 30 EUR/kW [78]. Letzterer Wert schließt allerdings auch das Getriebe mit ein. Für Elektromotoren, die auch als Generator betrieben werden können, ist mit 27 EUR/kW [78] zu rechnen. Außerdem werden hochtourige Wankelmotoren für den Einsatz in Range Extendern untersucht. In Nutzfahrzeugen wie z. B. Bussen ist auch der Einsatz von Mikroturbinen in Diskussion.

### Systeme mit Brennstoffzellen

Wasserstoff kann mit hohem Wirkungsgrad in Niedertemperaturbrennstoffzellen (polymer electrolyte fuel cell (PEFC)) oder in Hochtemperaturbrennstoffzellen (high-temperature PEFC (HT-PEFC)) in elektrische Energie umgesetzt werden. Neben Wasserstoff sind grundsätzlich auch Kraftstoffe geeignet, die sich mittels Reformierung in ein wasserstoffreiches Gas überführen lassen. Darüber hinaus kann Methanol in Direktmethanolbrennstoffzellen (DMFC) eingesetzt werden.

Die Anwendung von Brennstoffzellen als Range Extender erfordert kurz bis mittelfristig die Nutzung der im Markt verfügbaren Kraftstoffe (Benzin, Diesel, Erdgas, Flüssiggas). Dagegen verfügt Wasserstoff als Kraftstoff, abgesehen von erwarteten größeren regionalen Demonstrationsvorhaben, über eine langfristige Einsatzperspektive.

Bezogen auf die Brennstoffzellentechnologien weisen PEFC, die bei 80°C betrieben werden, den höchsten Entwicklungsstand auf und sind in Leistungsklassen von einigen Watt bis etwa 250 kW demonstriert worden. Für Gesamtsysteme bestehen besondere Herausforderungen bezüglich Wärme- und Wassermanagement, Kosten und Dynamik. Da Range Extender, wie oben beschrieben in einem oder mehreren, stationären Arbeitspunkten betrieben werden, spielt letztere hier eine untergeordnete Rolle.

HT-PEFC arbeiten bei Temperaturen zwischen 140 und 200 °C und nutzen Membranen, die keine Befeuchtung erfordern. Entsprechend lassen sich nach [79] folgende Vorteile ableiten:

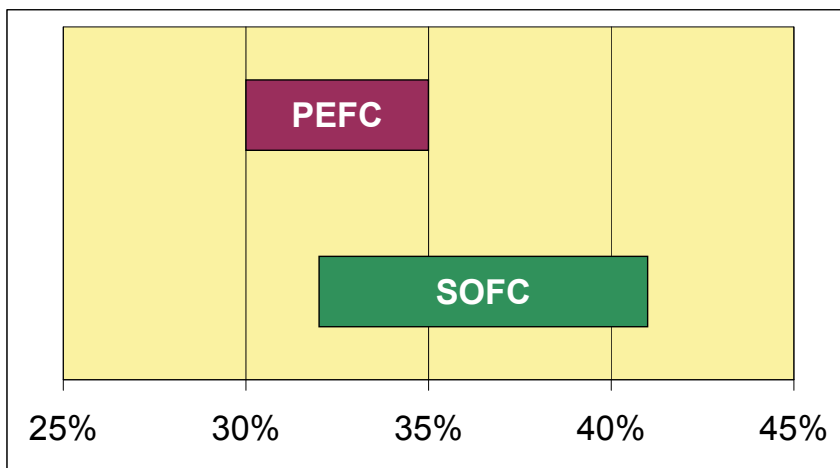
- Systemvereinfachung durch Wegfall der Befeuchtung
- Verbesserte Kinetik der Elektrodenreaktionen durch die höhere Betriebstemperatur

- Senkung der Kosten durch geringeren Edelmetallkatalysatoraufwand
- Betrieb mit Reformat anstelle von hochreinem Wasserstoff aufgrund der höheren CO-Toleranz
- Bessere Möglichkeit der Wärmeauskopplung durch die höhere Arbeitstemperatur

Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) sind Hochtemperaturbrennstoffzellen, die hauptsächlich für den Einsatz in der stationären Stromerzeugung entwickelt werden. SOFC-Systeme werden auch für den Einsatz als APU (Auxiliary Power Unit: Einrichtung zur Erzeugung elektrischer Energie für Nebenaggregate) untersucht, beispielsweise bei Enerday im Verbund mit Staxera. SOFC-Systeme weisen den einfachsten Systemaufbau im Vergleich der hier betrachteten Systeme auf, da eine Gasaufbereitung zur Reduzierung des Kohlenmonoxidanteils nach der Reformierung nicht notwendig ist. Vorteilhaft ist, dass neben Wasserstoff auch Kohlenmonoxid und Methan innerhalb der Brennstoffzelle umgesetzt werden können.

Die Wirkungsgrade der hier betrachteten Systeme auf Basis von Verfahrensanalysen sind in Abbildung 17 als Bandbreite von dort untersuchten Lastfällen wiedergegeben[79]. Dabei stellen die oberen Werte die Grenzfälle der aus heutiger Sicht erreichbaren Wirkungsgrade dar.

Abb. 17: Wirkungsgrade für dieselbetriebene APU mit SOFC- bzw. PEFC-Brennstoffzellen [79]



### 2.9.2 Bewertung

Range Extender für batteriebetriebene Fahrzeuge lassen sich mit heute verfügbaren Verbrennungsmotor-Generator-Systemen, die auch in seriellen Hybriden vielfach demonstriert wurden, realisieren. Maximal erzielbare Wirkungsgrade von über 40 % bei Dieselmotoren und ca. 35 % bei Ottomotoren müssen noch auf die bei Range Extendern geforderten niedrigeren Leistungen übertragen werden.

Im Gegensatz zum hochdynamischen Betrieb in Fahrzeugantrieben werden Verbrennungsmotoren in Range Extender-Konzepten in stationären Betriebspunkten betrieben, die Wirkungsgrade im oder nahe

dem Optimum ermöglichen. Mit angenommenem Verbrennungsmotorwirkungsgrad von 40 %, Generatorwirkungsgrad von 90 % und einem Wirkungsgrad der Leistungselektronik von 95 % beträgt der Strombereitstellungswirkungsgrad im optimalen Punkt ca. 34 %.

Brennstoffzellen können nach heutigem Stand der Technik im optimierten Fall Stromerzeugungswirkungsgrade bis etwa 40 % für SOFC und 35 % für PEFC auf Basis von Diesel erreichen. Falls eine Spannungsanpassung notwendig ist, die wiederum mit 95 % Wirkungsgrad angenommen wird, ergibt sich ein Strombereitstellungswirkungsgrad von 38 % beziehungsweise 33 %. Vorteile gegenüber Verbrennungsmotor-Generator-Systemen können Brennstoffzellen mit einer geringeren Geräuschentwicklung, einer hohen Abgasqualität und einem höheren Teillastwirkungsgrad aufweisen. Entwicklungsbedarf ist derzeit noch durch zu lange Startzeiten und zu hohe Kosten gegeben.

### 2.9.3 Forschungsschwerpunkte

F&E-Schwerpunkte bei Range Extendern im Verbrennungsmotorbereich liegen bei kompakteren Aggregaten kleiner Leistung, die in definierten Lastpunkten einen hohen Wirkungsgrad aufweisen. Auch die Geräuschentwicklung spielt eine Rolle, die neben den absoluten Werten auch mit Bezug auf die Akzeptanz des Nutzers von Bedeutung ist, da aktueller Betriebspunkt und aktuelle Fahrleistungsanforderung voneinander unabhängig sind. Der Optimierung des Gesamtsystems im Sinne der Entwicklung von Betriebsstrategien kommt weiterhin eine besondere Bedeutung zu. In Abstimmung mit der Batteriedimensionierung sind diese entscheidend für Einschaltdauern, gewählte Betriebspunkte und eventuelle weitere Funktionalitäten, die über die Funktion des reinen Range Extenders hinausgehen, beispielsweise das Batterieladen nach der Fahrt.

Brennstoffzellensysteme sind insbesondere in der PKW-Anwendung technologisch verifiziert. Internationale F&E-Programme weisen derzeit noch eine Reihe von F&E-Maßnahmen aus, die vor allem auf geringere Kosten und höhere Lebensdauer zielen. Obwohl bereits heute ein deutlicher Wirkungsgradvorteil gegenüber konventionellen Antrieben einschließlich der Hybride besteht, ist dessen weitere Steigerung Gegenstand der aktuellen Entwicklung. Bezogen auf Gesamtsysteme stehen eine verstärkte Systemintegration und Komponentenoptimierung im Vordergrund, u. a. zur Steigerung der Leistungsdichte und der spezifischen Leistung sowie zur Verringerung des Energiebedarfs der Nebenverbraucher. Generelle Aufgaben bei der Weiterentwicklung von Brennstoffzellen sind die Verbesserung der Lebensdauer und die Verringerung der Kosten. PEFC erreichen heute Betriebszeiten von einigen tausend Stunden, bei SOFC wurden am Forschungszentrum Jülich kürzlich auf Basis der dort verfolgten planaren Stack-Technologie 15.000 Betriebsstunden erreicht [80]. Bei SOFC sind darüber hinaus die Weiterentwicklung von Leichtbaukonzepten speziell für die automobile

Anwendung und die Verbesserung der thermischen Zyklierfähigkeit von Bedeutung.

Bei PEFC – und hier besonders bei der HT-PEFC mit einem heute noch niedrigeren Entwicklungsstand, aber den oben beschriebenen Vorteilen in der Anwendung – stehen die Weiterentwicklung vorhandener und die Erforschung neuer Elektrolytmaterialien und Katalysatoren einschließlich der Trägerschichten im Vordergrund. Zielrichtungen sind auch hier die Verbesserung der Lebensdauer und Reduzierung der Kosten, die bei PEFC vor allem durch Edelmetallkatalysatoren und Membranmaterialien verursacht werden.

## 2.10 Steckverbindungen

Kurze Montagezeiten für Fahrzeugkomponenten in modernen und automatisierten Fahrzeugproduktionslinien sind eine Voraussetzung für die Produktionszahlen von mehreren Millionen Fahrzeugen pro Jahr. In kurzer Zeit sollen Komponenten eines Fahrzeuges an jeder Montagestation sicher und fehlerfrei montiert werden. Unter Anbetracht der vielen elektrischen Verbindungen zwischen den elektrischen und elektronischen Komponenten in einem Fahrzeug haben sich Steckverbindungen als schnelle Anschlussmöglichkeiten für Signal- und Leistungskabel durchgesetzt. Mittlerweile haben Stecker und Kabel für Signale eine gewisse Reife erreicht, so dass ihr Einsatz in diversen Formationen in jedem Fahrzeug eine Selbstverständlichkeit geworden ist. Kritischer ist der Einsatz von Leistungssteckern. Wegen der zunehmenden elektrischen Leistung in Elektrofahrzeugen müssen neuartige Hochvoltsteckverbindungen entwickelt werden.

### 2.10.1 Stand der Technik

Da in einem Elektrofahrzeug das gesamte Antriebsmoment durch den Elektroantrieb aufgebracht werden muss, sind die zwischen Hochvoltbatterie, Wechselrichter und Elektromotor zu übertragenden elektrischen Leistungen groß. Daher werden größere Batterie-Kapazitäten mit höheren Spannungen nötig sein, um die Stromamplituden in Grenzen zu halten. Heutzutage sind Batteriespannungen um 400 V keine Seltenheit, trotzdem sind aufgrund großer Leistungen Dauerströme von einigen hundert Ampere zu erwarten. Diese großen Spannungen und Ströme sind zwei Anforderungsmerkmale, die an einen Stecker gestellt werden. Ein weiterer Aspekt, der bei Einsatz von Steckverbindungen zu beachten ist, ist die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Da die Spannungen, die vom Wechselrichter an die elektrische Maschine angelegt werden, gepulst sind, beinhalten diese Spannungen hochfrequente Harmonische, die die anderen elektronischen Komponenten im Fahrzeug stören können. Eine Möglichkeit, den Einfluss der Harmonischen auf die anderen Komponenten zu reduzieren, ist die Schirmung



der Kabel durch eine geerdete Umhüllung der Kabel. Natürlich soll ein Steckverbinder die Verbindung der Kabelschirmung zur „Erde“ im Fahrzeug gewährleisten.

Wie jedes Fahrzeug soll ein Elektrofahrzeug unter wechselnden und extremen Umgebungsbedingungen funktionieren. Ein Elektrofahrzeug soll zum Beispiel auch im Regen, wenn sein Antrieb dem Spritzwasser ausgesetzt ist, oder sogar bis zu einer gewissen Tauchtiefe im Wasser funktionsfähig sein. Daher müssen Steckverbindungen eine gewisse Wasserdichtigkeit aufweisen.

Ein weiterer Aspekt beim Einsatz von Steckverbindungen ist die Sicherheit. Da im elektrischen Antrieb eines Elektrofahrzeugs mit hohen Spannungen gearbeitet wird, müssen die metallenen Teile, die im Fehlerfall unter Spannung stehen können, gegen Berührung geschützt werden. Eine mögliche Lösung ist eine Verriegelungsschaltung. Der Abzug eines Steckers wird in der Verriegelungsschaltung registriert, so dass Schutzmaßnahmen eingeleitet werden können.

Weitere Herausforderungen sind die thermischen Beanspruchungen, u. a. verursacht durch hohe Ströme oder hohe Umgebungstemperaturen, sowie die mechanischen Beanspruchungen z. B. durch Erschütterungen. Die Kunststoffisolierung eines Steckers muss diesen Anforderungen gerecht werden und darf bis zu einer gewissen Temperaturhöhe nicht verformt werden. Mit einer verbesserten Kontakttechnik können erschütterungssichere Steckverbinder aufgebaut werden.

## 2.10.2 Forschungsschwerpunkte

Steckverbindungen müssen eine hohe Festigkeit gegen thermische und mechanische Beanspruchungen besitzen. Die Forschung konzentriert sich daher heute auf die Entwicklung besserer Kontaktierungen und Isolationsmaterialien, die den Durchfluss hoher Dauerströme unter den Umgebungsbedingungen im Elektrofahrzeug ermöglichen. Außerdem ist zu klären, wie die Anzahl der eingesetzten Steckverbinder reduziert werden kann (z. B. durch Integration des Umrichters in die Maschine). In vielen Fällen werden Steckverbindungen als Sonderbauformen für bestimmte Autohersteller gefertigt. Da jedes neue Design zusätzliche Kosten verursacht, wäre eine genormte Bauform der Stecker unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten von Vorteil und somit eine sinnvolle Perspektive für die Zukunft.



## 3 Sicherheit von Elektrofahrzeugen

Elektrofahrzeuge führen in geladenen Batterien erhebliche Mengen von Energie mit. Die Antriebe arbeiten mit Spannungen größer als 60 V, welche einen elektrischen Schlag verursachen können. Ein elektrischer Antrieb arbeitet nahezu geräuschlos. Diese Eigenschaften sind im Vergleich mit herkömmlichen KFZ neu und erfordern angepasste Sicherheitskonzepte.

Für Teilaspekte existieren Sicherheitsnormen und Verordnungen z. B. ECE R100 Batteriebetriebene Fahrzeuge, IEC 61508 und zukünftig ISO 26262 Funktionale Sicherheit elektronischer Systeme, sowie technische Anforderungen an Batterien, gesetzliche Anforderungen an Insassenschutz, usw. Dennoch gibt es bisher keinen systemübergreifenden Ansatz, der alle sicherheitsbezogenen Aspekte von elektrisch angetriebenen Straßenfahrzeugen abdeckt. Lücken in den heutigen technischen Normen, z. B. bei der Bewertung chemischer Risiken von Batterien, müssen geschlossen werden, um unzulässig hohe Risiken zu vermeiden.

Für die Einschätzung von Risiken sind neben dem normalen Betrieb des Fahrzeugs auch besondere Einsatzfälle wie Wartung und Reparatur im Servicefall, Rettungseinsätze nach einem Crash und die Entsorgung des Fahrzeuges zu betrachten.

### 3.1 Elektrische Sicherheit

Grundanforderung der Hochvolt-Sicherheit ist die Forderung nach Schutz vor direktem und indirektem Berühren spannungsführender Bauteile. Diese Anforderung gilt bereits, wenn der Maximalwert der Spannung 60 V erreichen kann. Elektrofahrzeuge verwenden Spannungen von etwa 200 V bis zu 1.000 V (Spannungsklasse B der ISO 6469-3). Das Hochvolt-Bordnetz wird isoliert ausgeführt, d. h. weder Plus- noch Minuspol haben eine leitfähige Verbindung zur Fahrzeugmasse oder Erde. Im normalen Betrieb handelt es sich um ein erdfreies System. Daher bedeutet ein einfacher Isolationsfehler noch keine Gefährdung, denn bei gleichzeitiger Berührung der Erde und eines durch einen Isolationsfehler spannungsführenden Metallteils am Fahrzeug (z. B. beim Einsteigen) kann kein Strom fließen. Eine Ausnahme stellt der Ladevorgang am Netz dar, weil hier (außer bei galvanisch getrennten Ladesystemen) ein Erdbezug hergestellt wird und in der oben beschriebenen Situation ein elektrischer Schlag erfolgen könnte. Zur Erkennung eines Isolationsfehlers wird eine Isolationsüberwachung eingebaut. Zusätzlich dient das Pilotlinienkonzept zur Erkennung von Steckerfehlern und vollständigen Kabelbrüchen (z. B. Abscheren im Crash-Fall). Dazu wird in allen Hochvoltleitungen eine Zusatzader inte-

griert, die sequentiell durch alle Komponenten geführt wird. Eine Unterbrechung dieser Leitung zeigt einen Fehler im Hochvolt-Bordnetz an. Im Fehlerfall dient das Batterieschutz zur automatischen Trennung der Batterie vom Bordnetz. Der Wartungsstecker dient hingegen zur sicheren manuellen Unterbrechung des HV-Stromkreises und verhindert eine Gefährdung durch versehentliche Aktivierung bei Service und Wartung. Besondere Betrachtung erfordert der Vorgang des Ladens der Batterie am Netz. Dabei ist das Ladekabel und die zugehörige Steckverbindung eine Schlüsselkomponente. Neben der eigentlichen Funktion sind hier Verriegelungen erforderlich, die sicherstellen, dass eine ausreichende Kontaktierung zwischen Stecker und Steckdose vorhanden ist, bevor Strom fließt. Die Diskussion um einen passenden genormten Ladestecker für Elektrofahrzeuge hat bei der Hannover Messe Industrie im April 2009 für Aufsehen gesorgt, als ein Industriekonsortium einen Vorschlag für einen solchen Stecker und eine Initiative zur Normung dieses Steckers bekanntgegeben hat. Der Vorschlag wurde inzwischen bei der IEC eingereicht. Zur Überbrückung der Zeit bis zur Verabschiedung eines IEC-Standards hat die DKE die VDE-Anwendungsregel VDE-AR-E 2623-2-2: 2009-10 „Stecker, Steckdosen, Fahrzeugsteckvorrichtungen und Fahrzeugstecker – Ladung von Elektrofahrzeugen – Teil 2-2: Anforderungen und Hauptmaße für die Austauschbarkeit von Stift- und Buchsensteckvorrichtungen“ herausgegeben.

## 3.2 Brandschutz und chemische Sicherheit

Die Brandgefahr in einem Elektrofahrzeug ist zunächst geringer als in einem herkömmlichen Fahrzeug, weil der leicht entzündliche Kraftstoff fehlt und der Antrieb wesentlich geringere Betriebstemperaturen aufweist. Dennoch sind spezifische neue Risiken anzusprechen. Als neue Brandursache in Elektrofahrzeugen kommt eine thermische Überlastung von Komponenten und Kabeln des Hochvolt-Bordnetzes in Betracht, die als Ursache entweder einen schlechten elektrischen Kontakt (Kontaktermüdung in Steckkontakten, mechanische Überbeanspruchung von Kabeln und Steckern z. B. durch Vibration) oder einen Überstrom (Kurzschlüsse in der Elektromaschine oder im Umrichter, Überströme als Folge von Software- oder Hardwarefehlern) haben können. Aufgrund der höheren Spannungen gibt es auch die Gefährdung durch einen Lichtbogen im Fehlerfall (z. B. bei einem Kabelbruch). Im Crashfall kann es bei gleichzeitigem Vorhandensein von brennbaren Flüssigkeiten zu Bränden kommen. Durch die extrem hohen Temperaturen von Lichtbögen können selbst schwer entflammbare Werkstoffe entzündet werden. Die Risikominderung beschränkt sich weitestgehend auf die Verminderung der Fehlerwahrscheinlichkeit z. B. durch mechanischen Schutz, da eine Reaktion auf den Fehler entweder überhaupt nicht oder nicht schnell genug möglich ist.

Als zusätzliche Gefährdungsquelle für Brände ist die Hochvoltbatterie selbst zu nennen. Vor allem bei auf Lithium-Ionen basierender Batterietechnik kann es durch mechanische Beschädigungen, aber auch durch elektrische Überlastungen, zu einer Entzündung des organischen Elektrolyten kommen. Wenn auch moderne Batterietechnologien hier entscheidende Fortschritte erzielt haben, ist das Gefährdungspotential insbesondere im Crashfall immer noch hoch. Während ein Abschalten des Batterieschützes in Verbindung mit einer Crashesensorik zumindest bei höheren Fahrzeuggeschwindigkeiten (Auslöseschwelle) eine Lösung ermöglicht, muss das Batteriegehäuse ebenfalls den erhöhten mechanischen Beanspruchungen standhalten. Die Ertüchtigung von Batterien für den Crash-Fall, insbesondere solcher auf Lithium-Ionen-Basis, ist Gegenstand intensiver Forschung und Entwicklung.

Ein Austreten des Elektrolyts kann bei allen Batterietypen ebenfalls zu einer erhöhten Brandgefahr führen. Auf Grund der exothermen chemischen Reaktion der verwendeten Stoffe mit umgebenden Materialien entsteht Wärme, die den darüber hinaus entstehenden Wasserstoff (z. B. bei Kontakt mit unedlen Metallen wie Aluminium oder Zink) unter ungünstigsten Bedingungen entzünden kann.

Bei Nickel-Metallhydrid-Zellen kann es durch Überladung oder versehentliches Umpolen sowie thermische Überlastung ebenfalls zu einer Wasserstoffentwicklung kommen. Die organischen Elektrolyte von Lithium-Ionen-Zellen sind meist leicht entzündlich.

Zu einer chemischen Gefährdung durch Verätzung oder Vergiftung kann es durch direkten Kontakt mit den internen Batteriekomponenten sowie dem Elektrolyten kommen. Hier muss ebenfalls durch eine ausreichende mechanische Stabilität des Batteriegehäuses das Risiko minimiert werden. Die Problematik ist weitestgehend von Bleiakkumulatoren bekannt.

### 3.3 Weitere Sicherheitsaspekte

Elektrisch angetriebene Fahrzeuge werden elektronisch gesteuert. Um mögliche Risiken aufgrund von Fehlfunktionen der Elektronik bereits im Entwicklungsprozess zu minimieren, sind eine Reihe von Methoden und Vorgehensweisen eingeführt worden, die auch bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen anzuwenden sind. Eine zentrale Norm zur Bewertung der funktionalen Sicherheit wird ISO CD 26262 „Road vehicles – Functional safety“ sein, die derzeit im Status des Entwurfs ist. Sie wird ein Prozess-Rahmenwerk und Vorgehensmodell zusammen mit geforderten Aktivitäten und Arbeitsprodukten sowie anzuwendenden Methoden definieren. Besonderheiten ergeben sich bei Elektrofahrzeugen durch eine Erzeugung des Drehmomentes mittels elektrischer Stellglieder (Wechselrichter, Elektromotor, elektrisch modulierbare Bremse) verbunden mit einer schnellen Systemreaktion im Fehlerfall. Im

Gegensatz zum Verbrennungsmotor kann ein Elektroantrieb auch aktive Bremsmomente erzeugen. Bei Antriebskonzepten mit radnahen Motoren können im Fehlerfall Giermomente entstehen, die ohne geeignete Gegenmaßnahmen zur Destabilisierung des Fahrzeuges führen können. Andererseits können damit auch effektivere Fahrsicherheitskonzepte entwickelt werden, die die aktive Verkehrssicherheit erhöhen können. Die relativ hohen Ausfallraten von spezifischen Komponenten wie der Leistungselektronik erhöhen die Bedeutung entsprechender Diagnosefunktionen und Fehlerreaktionen.

Die Berücksichtigung dieser Besonderheiten von elektrischen Antrieben im Entwicklungsprozess, verbunden mit zunehmender Betriebserfahrung, wird die funktionale Sicherheit von Elektrofahrzeugen in Zukunft auf das gleiche hohe Niveau bringen wie die heutigen, bereits weitgehend elektronisch gesteuerten konventionellen Fahrzeuge.

Eine weitere Besonderheit von Elektrofahrzeugen ist die völlig veränderte Geräuschemission. Insbesondere im Stadtbereich bzw. bei geringen Fahrgeschwindigkeiten ergeben sich zusätzliche Risiken [83] sowohl durch die unzureichende Wahrnehmung des Fahrzeuges an sich als auch durch eine Fehleinschätzung des Fahrzustands durch den Fahrzeugführer. Insbesondere für schwerhörige Fußgänger ist das Risiko hoch. Abhilfe kann hier durch spezielle Geräuscherzeugung getroffen werden [82].

Weitere Besonderheiten ergeben sich für den Einsatz der Rettungskräfte an einem Elektrofahrzeug. Durch die fehlenden Geräusche eines Verbrennungsmotors kann von außen nicht ohne weiteres auf die Fahrbereitschaft geschlossen werden. Der Elektroantrieb kann jederzeit das Fahrzeug bewegen und damit die Rettungskräfte bei ihrem Einsatz gefährden. Jeder Hersteller von Elektro- und Hybridfahrzeugen stellt daher spezielle Notfall-Anleitungen für das Rettungspersonal bereit [81], in denen Antworten auf Fragen gegeben werden wie:

- Woran erkennt man ein Elektrofahrzeug und welche besonderen Gefährdungen ergeben sich?
- Woran erkennt man den aktivierten Betriebszustand und wie deaktiviert man das Hochvoltsystem sicher (Entladungszeit des Zwischenkreises beachten)?
- Welche Schutzkleidung muss benutzt werden und wie neutralisiert man ausgelaufene Batterieelektrolyte?
- Welche Stellen eignen sich zum Ansetzen von Rettungswerkzeugen (Schere und Spreizer)?

### 3.4 Ausblick und Forschungsschwerpunkte

Die Entwicklung von Elektrofahrzeugen stellt Hersteller und Zulieferer vor neue Sicherheitsanforderungen. Im Bereich der Hochvoltsicherheit gibt es bereits durch am Markt befindliche Hybridfahrzeuge einige Erfahrungen. Eine der zentralen Aufgaben bei der Markteinführung von Elektrofahrzeugen ist die Qualifizierung des entsprechenden Servicepersonals sowie die sicherheitsgerechte Gestaltung des Werkstattumfeldes (z. B. spezielle Elektrowerkzeuge, Diagnosesysteme, Brandsicherung usw.). Eine weitere wichtige Aufgabe ist die Ausbildung von Rettungskräften in Bezug auf die speziellen Gefährdungen, die von einem verunfallten Elektrofahrzeug ausgehen können.

Die Risiken im Bereich der funktionalen Sicherheit weiter zu verringern wird auf absehbare Zeit ein Thema für die Entwicklungsabteilungen sein. Verbesserungen sind durch die konsequente Umsetzung der Normen und Methoden sowie einen höheren Fokus auf die Sicherheit des komplexen Gesamtsystems möglich. Neben dem Traktionsantrieb geht derzeit die größte Gefährdung vom Energiespeicher aus. Insbesondere die Beherrschung des Crashfalles erfordert neben dem mechanischen Schutz der Batterie auch die Entwicklungen geeigneter Sicherheitstechnik.

## 4 Verkehrliche Kennwerte zum Einsatz von Kraftfahrzeugen

Die Tagesorganisation der Menschen, sowohl im Privaten als auch in der Wirtschaft und in Folge ihr verkehrsrelevantes Verhalten, ist in starkem Maße durch die gegenwärtigen Einsatz- und Nutzungsmöglichkeiten von Kraftfahrzeugen geprägt. Diese Möglichkeiten definieren heute die Anforderungen an ein adäquates Verkehrsmittel und setzen somit die Maßstäbe für die Entwicklung von Elektrofahrzeugen. Mit Hilfe verkehrlicher Kenngrößen der Nutzung von Kraftfahrzeugen können diese Maßstäbe quantifiziert werden. Die nachstehenden Ausführungen beschreiben den gegenwärtigen Einsatz deutscher Kraftfahrzeuge mit Schwerpunkt auf Personenkraftwagen.

Der Kraftfahrzeugbestand in Deutschland umfasst ca. 49,6 Mio. im Einsatz befindliche Kraftfahrzeuge (KFZ). Die mit Abstand zahlenmäßig größte Gruppe sind die Personenkraftwagen (PKW) mit über 41,3 Mio. KFZ (83,3 % des Gesamtfahrzeugbestands). Gefolgt wird die Gruppe der PKW von den Nutzfahrzeugen mit insgesamt 4,6 Mio. KFZ. In dieser Fahrzeuggruppe entfällt ca. die Hälfte auf die Lastkraftwagen (LKW) mit über 2,3 Mio. Fahrzeugen. Die Krafträder mit insgesamt über 3,6 Mio. Fahrzeugen sind die zahlenmäßig drittgrößte Gruppe in Deutschland. Zirka 1,7 Mio. Kraftfahrzeuge besitzen ein Saisonkennzeichen und sind somit nicht ganzjährig angemeldet [84].

Zur Beschreibung des Kraftfahrzeugeinsatzes mit Schwergewicht auf kleinen Kraftfahrzeugen – insbesondere Kräder, PKW und LKW bis einschließlich 3,5 t Nutzlast – stellt die Bundeserhebung „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2002“ (KiD 2002) die beste Grundlage dar. Sie beschreibt den straßenbezogenen Privatverkehr und Wirtschaftsverkehr (Güter- und Personenwirtschaftsverkehr) umfassend. Das Datenmaterial KiD 2002 beinhaltet die Tagesprotokolle von insgesamt 76.797 Kraftfahrzeugen aller Fahrzeugarten und Haltergruppen. Für die PKW gewerblicher Halter liegen davon insgesamt 25.438 Fahrzeugdatensätze und für die PKW privater Halter insgesamt 3.641 Fahrzeugdatensätze für Auswertungen vor. Für die am Berichtstag mobilen Kraftfahrzeuge stehen für fahrtspezifische Analysen insgesamt 118.962 Fahrten- datensätze über alle Fahrzeugarten und Haltergruppen zur Verfügung – davon entfallen auf die PKW gewerblicher Halter insgesamt 44.563 Fahrtendatensätze und auf die PKW privater Halter insgesamt 7.244 Fahrtendatensätze.

## 4.1 Kennwerte des Kraftfahrzeugeinsatzes

Zur Beschreibung von Umfang und Struktur des Fahrzeugeinsatzes von in Deutschland zugelassenen Personenkraftwagen mit dem Ziel der Abschätzung von Potentialen für Elektrofahrzeuge eignen sich besonders folgende Kennwerte:

- Verkehrsteilnahme
- Verkehrsaufkommen
- Fahrzeugfahrleistung
- Fahrtweiten
- Fahrtdauer
- Zeitliche Verteilung der Fahrten
- Fahrtziele
- Standzeiten
- Anteil der Fahrzeuge, die an einem Tag mobil waren
- Anzahl der Fahrten an einem Tag
- Gefahrene km an einem Tag
- Gefahrene km je Fahrt
- Dauer einer einzelnen Fahrt
- Einsatzzeit (erste und letzte Tagesfahrt)
- Standort während längerer Pausen

Innerhalb der Fahrzeugart PKW ist der Fahrzeugeinsatz sehr heterogen. Dies ist durch unterschiedliche Einsatzgebiete, Einsatzzeiten, Haltermerkmale und technische Fahrzeugmerkmale begründet. Um Ursachenstrukturen des Fahrzeugeinsatzes ausreichend fein darstellen zu können, werden die Kennwerte nachfolgend – soweit die Anzahlen auswertbarer Datensätze das zulassen – in die beiden Haltergruppen „gewerblicher Halter“ und „privater Halter“ sowie nach Wochentagstypen bzw. Wochentagstypgruppen differenziert. Die ausgewiesenen Kennwerte beruhen ausschließlich auf Auswertungen der Daten der KiD 2002.

### 4.1.1 Verkehrsteilnahme und Verkehrsaufkommen

Die Verkehrsteilnahme drückt aus, ob ein Fahrzeug an einem definierten Tag eingesetzt wurde – also mobil war oder nicht. Der Anteil der mobilen Kraftfahrzeuge variiert je nach Fahrzeugart und Haltergruppe an den einzelnen Wochentagen innerhalb des Wochenverlaufes; ebenso sind jahreszeitliche Schwankungen festzustellen. Auch Feiertage und Schulferien beeinflussen stark den Anteil der mobilen Fahrzeuge. Die Anteile mobiler Kraftfahrzeuge pro Tag, differenziert nach Wochentagstyp und Fahrzeuggruppe, zeigt Tabelle 7.

Tabelle 7: Anteil der mobilen Kraftfahrzeuge pro Tag

Anteil mobiler Kraftfahrzeuge pro Tag [%]							
Fahrzeuggruppe	Wochentagstyp						
	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So / F
PKW gewerblicher Halter	69,3	73,4	70,0	72,1	70,2	36,6	24,8
	71,0					30,3	
	58,2						
PKW privater Halter	69,6	63,2	75,6	66,0	74,4	53,7	40,4
	70,1					46,5	
	62,5						
PKW gesamt	69,6	64,3	75,0	66,7	73,9	51,9	38,8
	70,2					44,8	
	62,0						

Das Verkehrsaufkommen – häufig auch als Fahrtenanzahl oder Fahrtenhäufigkeit bezeichnet – ist ein elementarer Kennwert des Fahrzeugeinsatzes. Er gibt Auskunft über die Nutzungshäufigkeit eines einzelnen Kraftfahrzeuges bzw. einer Fahrzeuggruppe bezogen auf einen definierten Zeitbereich. Die mittlere tägliche Fahrtenanzahl eines mobilen PKW beträgt im Wochenmittel (Mo – So) 3,44 Fahrten. Dabei absolvieren die PKW gewerblicher Halter 4,12 Fahrten pro mobiles KFZ und Tag und die PKW privater Halter 3,36 Fahrten pro mobiles KFZ und Tag im Wochendurchschnitt.

Die Spannweite der Fahrtenanzahl reicht für einen mobilen PKW gewerblicher Halter von einer Fahrt pro Tag bis zu über 70 Fahrten am Tag, bei PKW privater Halter bis zu über 20 Fahrten pro Tag. Überwiegend werden PKW bis zu maximal sechs Fahrten am Tag eingesetzt. Bei den PKW gewerblicher Halter sind dies 85,6 % und bei den PKW privater Halter sogar 93,2 % aller mobilen Fahrzeuge der jeweiligen Fahrzeuggruppe.

#### 4.1.2 Fahrzeugfahrleistung

Bezüglich des Fahrzeugeinsatzes ist die Fahrzeugfahrleistung die wichtigste Leistungskennzahl. Sie gibt an, welche Streckenlänge die Fahrzeuge in einem definierten Zeitraum zurücklegen. Insgesamt werden im Jahr von allen in Deutschland zugelassenen Kraftfahrzeugen zusammen 715,912 Mrd. Fahrzeugkilometer im Jahr zurückgelegt. Auf die Fahrzeuggruppe der PKW gewerblicher Halter entfallen dabei 100,997 Mrd. Fahrzeugkilometer und auf die PKW privater Halter 519,484 Mrd. Fahrzeugkilometer.

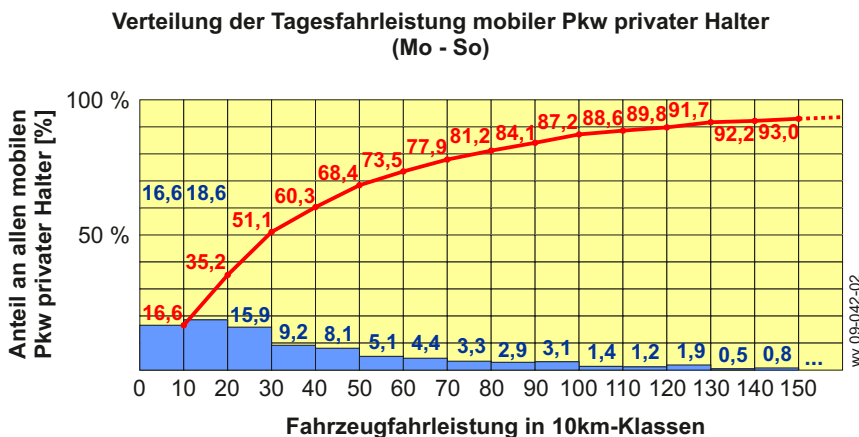
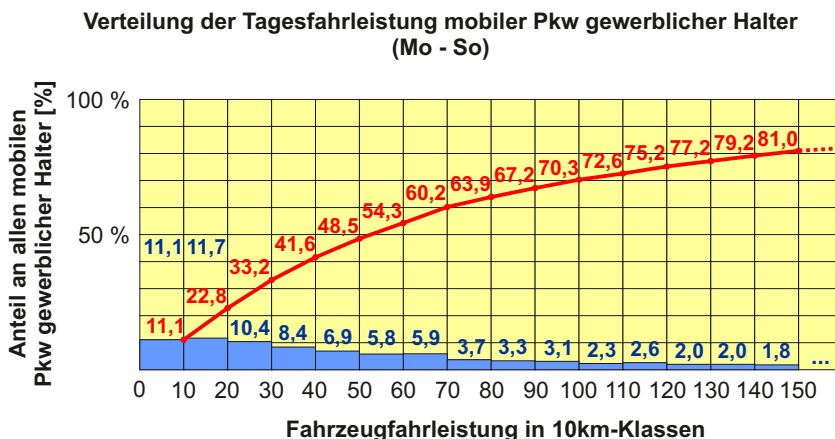
Ein mobiler PKW gewerblicher Halter legt im Mittel 106,29 km pro Tag zurück. Die mittlere tägliche Fahrzeugfahrleistung eines PKW privater Halter ist mit 58,35 km pro mobiles KFZ und Tag deutlich geringer. Über den Wochenverlauf unterscheiden sich die täglichen Fahrzeugfahrleistungen. Während die PKW gewerblicher Halter sowohl an den Werktagen Montag bis Freitag (im Mittel 108,19 km pro mobiles KFZ und Tag) als auch an Sonn- und Feiertagen (113,35 km pro mobiles KFZ und Tag) in etwa im Wochendurchschnitt liegen, ist die Fahrzeugfahrleistung an Samstagen mit 83,41 km pro mobiles KFZ und Tag deutlich niedriger. Die PKW privater Halter weisen über den Wochenverlauf ein etwas anderes Bild auf. Hier liegen die Fahrzeugfahrleistungen am Freitag mit 73,36 km pro mobiles KFZ und Tag und am Sonntag/Feiertag mit 68,50 km pro mobiles KFZ und Tag deutlich über dem Wochendurchschnitt.

Die Spannweite der Tagesfahrleistung mobiler Fahrzeuge reicht von wenigen hundert Metern bis über 1.400 km am Tag. Dies trifft sowohl auf die PKW gewerblicher Halter als auch auf die PKW privater Halter zu. Bei den PKW gewerblicher Halter legen 81,0 % der am Tag mobilen Fahrzeuge nicht mehr als 150 km am Tag zurück; bei den PKW privater Halter sind das sogar 93,0 % der mobilen Fahrzeuge. Die Hälfte (50 %)



der PKW gewerblicher Halter weist eine Fahrzeugfahrleistung von nicht mehr als 52,0 km pro Tag auf. Bei den PKW privater Halter liegen die jeweiligen Vergleichskennwerte zum Teil deutlich darunter. Die Hälfte (50 %) der mobilen PKW privater Halter fahren nicht mehr als 29,7 km am Tag. Abbildung 18 vermittelt einen Überblick über die Verteilung der Tagesfahrleistung der mobilen PKW bis maximal 150 km.

Abb. 18: Verteilung der täglichen Fahrzeugfahrleistung mobiler PKW



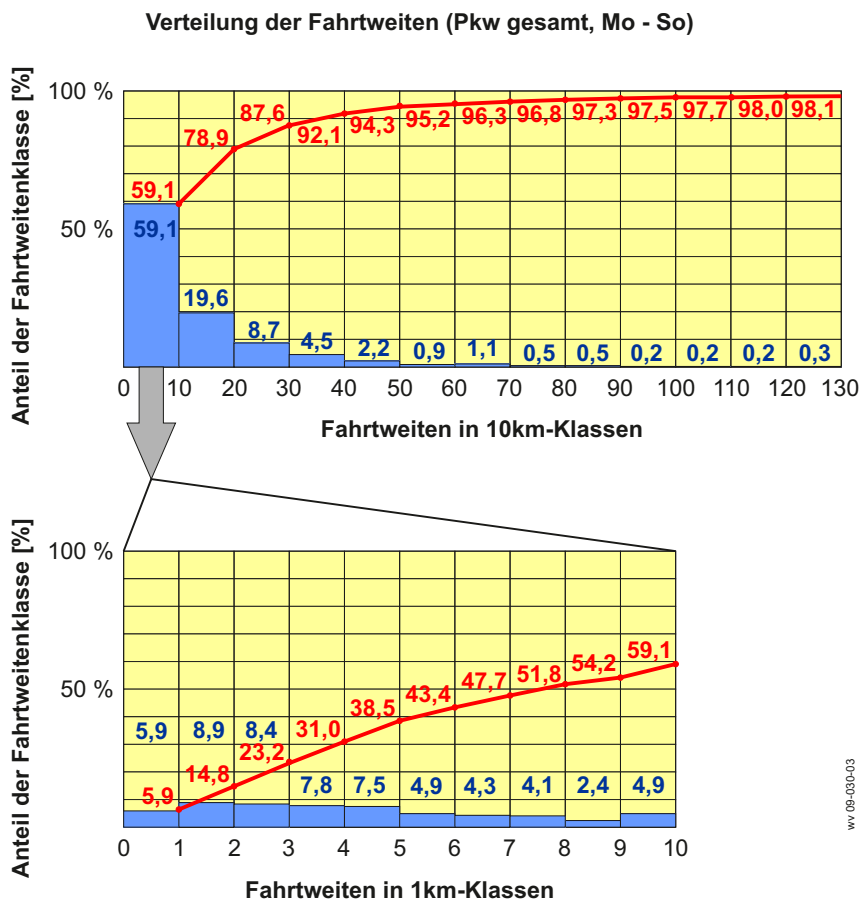
### 4.1.3 Fahrtweiten und Fahrtdauer

Die mittlere Fahrtweite einer einzelnen PKW-Fahrt beträgt 25,8 km. Während die Fahrtweite privater Halter bei durchschnittlich 24,3 km pro Fahrt liegt, beträgt der entsprechende Wert bei den PKW gewerblicher Halter 39,4 km pro Fahrt. Die mittlere Fahrtweite pro Fahrt wird stark von den sehr weiten Fahrten beeinflusst. Die Verteilung der Fahrtweiten (s. Abbildung 19) zeigt ein differenziertes Bild dieser Kenngröße. 59,1 % aller PKW-Fahrten sind maximal zehn Kilometer lang, jede dritte Fahrt sogar kürzer als fünf Kilometer. Die weiten Fahrten über 50 km haben lediglich einen Anteil von 4,8 %, Fahrtweiten über 100 km machen nur 2,3 % aus. Dabei können durchaus Einzelfahrten mit mehr als 1.000 km

aufzutreten. Deren Anteil ist bezogen auf das Gesamtfahrtenaufkommen aber sehr gering.

Die zeitliche Dimension einer Fahrt wird über die Fahrtdauer abgebildet. Sie korrespondiert mit der Fahrtweite. Die mittlere Fahrtdauer einer PKW-Fahrt beträgt 28,8 min. Dieser Wert wird durch die PKW privater Halter – bedingt durch deren große Fahrzeuganzahl – geprägt. Bei den PKW gewerblicher Halter dauert eine Fahrt im Durchschnitt mit 39,4 min zeitlich länger als bei den PKW privater Halter mit 27,7 min.

Abb. 19: Verteilung der PKW-Fahrtweiten



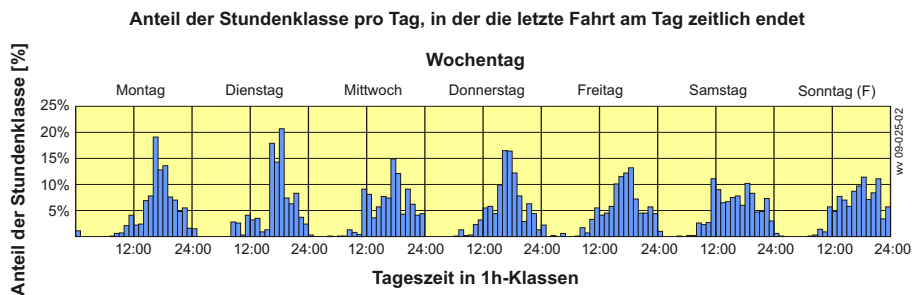
Die Analyse der Fahrtdauerverteilung zeigt – ebenso wie bei der Fahrtweite pro Fahrt – eine Dominanz der kurzen Fahrten. 16,2 % aller PKW-Fahrten dauern maximal fünf Minuten. Bei über der Hälfte aller Fahrten (55,8 %) wird das Ziel nach 15 min Fahrtzeit erreicht. 75 % der Fahrten dauern unter 25 min und 90 % weniger als 40 min. Lediglich 4,4 % aller PKW-Fahrten dauern länger als eine Stunde. Fernfahrten – zum Teil auch mehrtägig – haben bezogen auf alle PKW-Fahrten einen sehr geringen Anteil.

### 4.1.4 Zeitliche Verteilung der Fahrten

Für die Bereitstellung der Betriebsbereitschaft von Elektrofahrzeugen sind auch Park- und Abstellzeiten betreffende Kennwerte von Fahrzeugen von Bedeutung. In diesem Zusammenhang stellt sich zugleich die Frage, wann die Tagesprogramme der Fahrzeuge zeitlich enden. Es ist davon auszugehen, dass der Fahrer der letzten Fahrt am Tag ein Elektrofahrzeug unmittelbar nach der Ankunft am Ziel an eine Ladestation anschließen wird.

Im Wochendurchschnitt enden die Tagesprogramme der PKW zum größten Teil (88,2 %) in der zweiten Tageshälfte. Einen Eindruck über die Ankunftszeit der letzten Fahrt am Tag im Wochenverlauf zeigt Abbildung 20. An den Wochentagen ist eine deutliche Spitze in den Nachmittags- und Abendstunden ab 16 Uhr zu erkennen. Am Wochenende ist diese Spitze nicht so deutlich ausgeprägt.

Abb. 20: Ankunftszeiten der letzten Fahrt im Wochenverlauf (PKW insgesamt)



### 4.1.5 Fahrtziele

Die Planung von Ladestationen für Elektrofahrzeuge erfordert Kenntnisse über die Ziele der Fahrten. Bei Fahrten zu einem wirtschaftlichen Zweck wurde bei KiD 2002 die Art des Fahrtzieles direkt erfragt. Die relativen Häufigkeiten der einzelnen Zielarten variieren zwischen PKW gewerblicher Halter und PKW privater Halter sowohl zwischen den Fahrzeuggruppen als auch zwischen den Wochentagstypen. Die Zielart „Eigener Betrieb“ ist besonders interessant, weil hier für eigene Firmenfahrzeuge aber auch für Privatfahrzeuge der eigenen Arbeitnehmer durchaus eine entsprechende Infrastruktur für das Laden von Elektrofahrzeugen errichtet werden kann. Die Möglichkeiten im Detail sind zwar von den konkreten Örtlichkeiten abhängig, mit einem Anteil von ca. einem Drittel bei dienstlich/geschäftlichen Fahrten bietet diese Zielart aber durchaus ein erhebliches Entwicklungspotential. Die Zielarten der privaten Fahrten wurden bei KiD 2002 nicht explizit erhoben. Diese lassen sich aber indirekt aus den Fahrtzwecken ableiten. Fast die Hälfte der privaten Fahrten (48,1 %) der PKW gewerblicher Halter und 43,4 % der privaten Fahrten der PKW privater Halter führen an den Werktagen Montag bis Freitag nach Hause. Zusammen mit den Fahrten zum Arbeitsplatz entfallen 76,3 % der Fahrten der PKW

gewerblicher Halter und 60,4 % der Fahrten der PKW privater Halter auf diese beiden Zielarten. Auch hier spielen die konkreten örtlichen Gegebenheiten – beispielsweise Stellplatz auf einem Privatgrundstück oder im öffentlichen Straßenraum – hinsichtlich der Realisierbarkeit von Ladestationen wie bei den dienstlich/geschäftlichen Fahrten die entscheidende Rolle. Unter Berücksichtigung des Gesamtfahrtenaufkommens bieten Ladestationen an diesen beiden privaten Zielen ein großes Entwicklungspotential.

#### 4.1.6 Standzeiten

Für das Aufladen der Energiespeicher sind insbesondere die Standzeiten der Fahrzeuge wichtig. Hierbei sind einerseits die Standzeiten nach der letzten Fahrt am Tag (Standzeiten außerhalb der Einsatzzeit) und andererseits die Standzeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrten innerhalb des Tageseinsatzes zu unterscheiden.

Die Standzeiten außerhalb der Einsatzzeit bilden für Elektrofahrzeuge durch lange zusammenhängende Ruhezeiten die Möglichkeit, die im Tagesverlauf umgesetzte Energie nachzuladen. Hier ist insbesondere die Verteilung interessant: 97,9 % aller am Tag mobilen PKW stehen nach der letzten Fahrt mehr als 8 Stunden und 92,7 % länger als 10 Stunden.

Im Verlauf der Tagesprogramme führen die Fahrten häufig zurück zum eigenen Betrieb oder nach Hause zur Durchführung verschiedener dienstlich/geschäftlicher bzw. privater Erledigungen. Anschließend werden von dort erneut Fahrten begonnen. Die Standzeiten an diesen Zielarten sind für das Aufladen von Elektrofahrzeugen durchaus nutzbar – vorausgesetzt entsprechende Ladestationen sind vorhanden. Innerhalb der Tagesprogramme der einzelnen Tage können mitunter lange Standzeiten an diesen Zwischenstopps zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrten auftreten.

Nach 69,1 % der Fahrten zum Ziel „Eigener Betrieb“ betragen die Standzeiten innerhalb der regulären Tageseinsatzzeit mehr als eine Stunde, nach 30,8 % der Fahrten mehr als drei Stunden und nach 14,0 % der Fahrten sogar mehr als sechs Stunden. Fahrten zum Ziel „zu Hause“ haben innerhalb der Einsatzzeit zu 65,3 % eine anschließende Aufenthaltszeit von länger als einer Stunde, 31,2 % länger als drei Stunden und noch 8,7 % länger als sechs Stunden. Aber auch kürzere Zeiten sind bei entsprechender Lade- und Speichertechnologie durchaus zum Teilaufladen nutzbar.

## 4.2 Ausblick

Die aufgezeigten Kenngrößen und deren Ausprägungen vermitteln einen ersten Überblick über den Einsatz von PKW. In Verbindung mit dem PKW-Bestand von mehr als 41 Millionen Fahrzeugen (2009) kann ein hohes Potential für die Einsetzbarkeit von Elektrofahrzeugen mit einer Reichweite von 100 km in diesem Fahrzeugsegment prognostiziert werden.

Das Datenmaterial der bundesweiten Verkehrserhebung „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2002“ (KiD 2002) lässt auch Auswertungen mit inhaltlich tieferer Differenzierung beispielsweise nach Arten von Siedlungsräumen, nach Wirtschaftszweigen sowie nach weiteren Kriterien zu. So lassen sich auch für fahrzeugtechnische oder nutzungsbezogene Teilmengen der PKW die entsprechenden verkehrlichen Kennwerte ermitteln.

Gegenwärtig wird die Wiederholung der bundesweiten Verkehrserhebung „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland“ durchgeführt. Die Befragungen zum Einsatz von Fahrzeugen werden sich von November 2009 bis Oktober 2010 erstrecken. Mit den Daten und den Ergebnissen von KiD 2010 ist im Frühsommer 2011 zu rechnen. Die Aktualisierung des Datenmaterials über den Fahrzeugeinsatz bietet die Möglichkeit, die Entwicklung von Elektrofahrzeugen auf Daten höchster Aktualität über den Fahrzeugeinsatz zu stützen. Darüber hinaus werden qualitative und quantitative Änderungen des Fahrzeugeinsatzes vor dem Hintergrund sich verändernder gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Strukturen, Rahmenbedingungen des Umweltschutzes und Ressourcenknappheit abgeschätzt.

# 5 Integration von Elektrofahrzeugen in das Versorgungsnetz

Die Anzahl der Elektrofahrzeuge und Plug-In Hybride in Deutschland ist derzeit gering. Sie bedeuten noch keine nennenswerte Belastung des elektrischen Versorgungsnetzes. Es ist aber davon auszugehen, dass diese Fahrzeuge mittelfristig einen nennenswerten Anteil auf den Straßen ausmachen [85][86]. Es stellt sich die Frage, wie sich eine große Zahl von Elektrofahrzeugen auf das Versorgungsnetz auswirken wird. Dieser Frage wird im zweiten Teil dieses Kapitels nachgegangen. Um eine flächendeckende Einführung der Fahrzeuge zu ermöglichen, bedarf es zudem geeigneter Lade- und Abrechnungskonzepte, die zunächst diskutiert werden.

## 5.1 Lade- und Abrechnungskonzepte

Eine Netzinfrastruktur zum Laden der Fahrzeuge ist zwar bereits vorhanden, im öffentlichen Bereich fehlen jedoch Ladeanschlüsse und im privaten Bereich ist eine separate Abrechnung des Ladestroms bislang nicht vorgesehen. Letztere ist Voraussetzung für eine Aufteilung der Kosten auf mehrere Nutzer (Betriebsparkplätze, Mehrfamilienhäuser). Auch um eine hohe Anzahl potenzieller Ladeanschlüsse im öffentlichen Raum zu ermöglichen, wird zur Verrechnung der Ladestrommengen ein Abrechnungssystem benötigt, welches eine einfache und möglichst fahrzeugbezogene Abrechnung erlaubt. Für eine bargeldlose, automatisierte Abrechnung des bezogenen Ladestromes ist eine Kommunikationsverbindung zwischen Fahrzeug bzw. Ladestation und einem Abrechnungssystem notwendig. Die Umsetzung dieser Kommunikation sollte mit Blick auf zukünftige Anwendungen nicht nur heutigen, sondern auch künftigen Anforderungen gerecht werden. Dies erfordert frühzeitige Vereinheitlichung und Standardisierung, nicht zuletzt um der Zulieferindustrie auf Netz- und Fahrzeugseite ein zeitnahes Reagieren auf die Entwicklung des Fahrzeugmarktes zu ermöglichen und somit die Einführung der Elektrofahrzeuge zu beschleunigen.

Bereits heute existieren verschiedene Lade- und Abrechnungskonzepte für Elektrofahrzeuge [87][88][89]. Ein Nachteil der bekannten Konzepte ist, dass an öffentlichen Ladestationen in den meisten Fällen nur eine pauschale und keine fahrzeugspezifische Abrechnung der Ladestrommengen erfolgt. Dies erscheint möglicherweise in einer Einführungsphase sinnvoll, nicht jedoch in einem Massenmarkt. In einem Massenmarkt ist mit weit mehr Tankvorgängen als heute zu rechnen, jedoch zu geringeren Kosten pro Tankvorgang. Dies setzt eine automatisierte

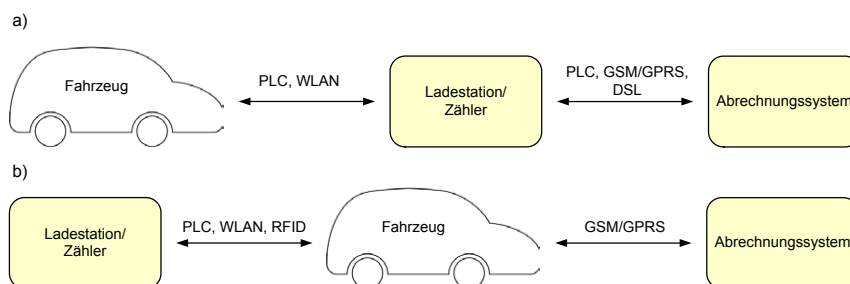
Abrechnung mit entsprechender Kommunikation zwischen Fahrzeug bzw. Ladestation und Abrechnungssystem voraus.

Im Folgenden werden zwei Kommunikationskonzepte vorgestellt, mit denen eine fahrzeugbezogene Abrechnung der Ladestrommengen möglich ist. Die Konzepte unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Anbindung der Fahrzeuge an das Abrechnungssystem. Es wird zwischen einer direkten und einer indirekten Abrechnungsvariante unterschieden.

Bei der indirekten Variante in Abbildung 21 a) kommuniziert das Fahrzeug z. B. via Power-Line-Communication (PLC) oder WLAN mit der Kommunikationseinheit der stationären Messeinrichtung. Die Verbindung zum Abrechnungssystem könnte über PLC, GSM/GPRS oder bei Haushalten auch über eine übliche DSL-Internetverbindung hergestellt werden. Bei der direkten Variante in Abbildung 21 b) bietet sich für die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Abrechnungssystem der Mobilfunk an. Die Kommunikationsverbindung zwischen Fahrzeug und Messeinrichtung kann wiederum über PLC oder WLAN realisiert werden. Alternativ könnte auch ein RFID-System eingesetzt werden, bei dem das Fahrzeug über einen Chip am Ladeanschluss die Identifikationsnummer des Anschlusszählers sowie laderelevante Parameter, wie z. B. den maximal zulässigen Ladestrom, auslesen kann. Hier muss der stationäre Zähler keine Kommunikationsverbindung mit dem Fahrzeug-abrechnungssystem haben. Jedoch muss in diesem Fall ein abrechnungsrelevanter Zähler im Fahrzeug installiert werden.

Dieses letzte Konzept bietet die flexibelste Möglichkeit, den Fahrzeugstrom individuell, fahrzeugbezogen abzurechnen, unabhängig davon, ob das Fahrzeug im privaten, halböffentlichen oder öffentlichen Raum geladen wird. Aus pragmatischen Gründen der klaren Trennung zwischen Fahrzeug und Lade- bzw. Abrechnungsinfrastruktur wird heute jedoch meist das Konzept a) realisiert.

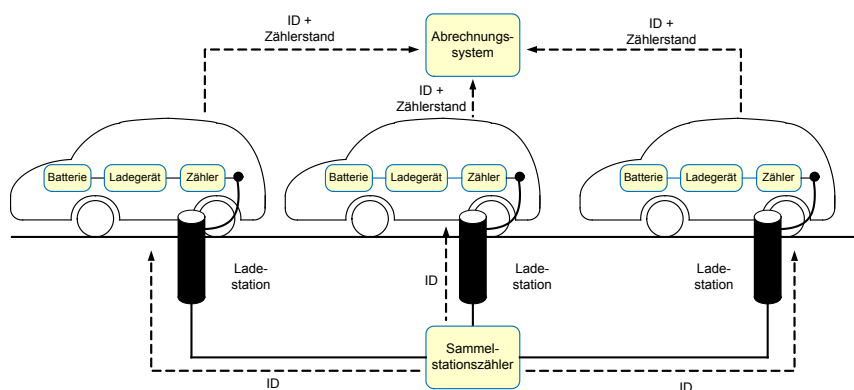
Abb. 21: a) indirekte und b) direkte Kommunikationsanbindung des Fahrzeuges an das Abrechnungssystem



Die Abrechnungsmodelle sind insbesondere abhängig vom jeweiligen Ladebereich (öffentlich oder privat). Die Anforderungen nähern sich aber bei zunehmender Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen einander an. Beim Laden im öffentlichen Bereich sind verschiedene Zahlungsarten denkbar wie z. B. Barzahlung oder bargeldlose Varianten per

Chip-Karte, Mobiltelefon oder mit handyähnlichen Verträgen. Hier kann auf eine Kommunikationsverbindung zum Fahrzeug verzichtet werden. Öffentliche und private Ladestationen könnten auch wie in Abbildung 22 an einem gemeinsamen Anschluss mit Sammelstationszähler angeschlossen werden. Voraussetzung für dieses Konzept ist ein Zähler im Fahrzeug. Dieser fahrzeugseitige Zähler liest die Nummer des Sammelstationszählers über eine Kommunikationsverbindung aus und übermittelt diese zusammen mit dem aktuellen Stand an das Abrechnungssystem. Der Strombezug wird automatisch vom Abrechnungssystem zwischen Fahrzeug und dem Anschluss des Sammelzählers verrechnet (indirekte Verrechnung). Diese Ladestationen könnten voraussichtlich einfacher und kostengünstiger installiert und problemlos in Straßenlaternen, Parkuhren, Zigarettensautomaten etc. integriert werden. Mit diesem Konzept können Lademöglichkeiten auch für die Fahrzeuge bereitgestellt werden, die überwiegend am Straßenrand parken.

Abb. 22: Öffentliche Ladestationen mit Sammelstationszähler



Sind das Fahrzeug oder die Ladestation über eine Kommunikationsverbindung mit einem Abrechnungssystem verbunden, kann auch ein flexibles Preissystem angeboten werden. Tarifgestaltungen vom Nacht/Tag-Tarif bis hin zu dynamischen Tarifen sind denkbar. Da zu erwarten ist, dass unterschiedliche Stromtarife das Ladeverhalten der Nutzer beeinflussen, könnten Tarife auch zur Beeinflussung der Ladelast genutzt werden.

Häufig wird diskutiert, dass die Speicher von Elektrofahrzeugen in Zukunft zum Ausgleich des schwankenden Dargebots von Wind- und Solarenergie genutzt werden könnten. Dies muss nicht mit einer Abgabe von Energie aus dem Speicher ans Netz einhergehen. Bereits mit der Möglichkeit, die Ladung der Batterie in Abhängigkeit des Netzzustandes zeitlich zu steuern – unter Einhaltung des Ziels, zu einer bestimmten Zeit eine voll geladene Batterie zu haben – können wesentliche Effekte erzielt werden. Tarifliche Anreize für solche oder andere Netzdienstleistungen können bei den diskutierten flexiblen Abrechnungskonzepten ebenfalls realisiert werden.

Aufgrund der Klimaschutzziele wird es im Interesse der Bundesregierung liegen, Fahrzeuge mit reduziertem CO<sub>2</sub>-Ausstoß und lokal CO<sub>2</sub>-



emissionsfreie Fahrzeuge zu fördern. In anderen Ländern existieren bereits spezielle Anreize. So entfällt für Elektrofahrzeuge in Städten wie Mailand, London und Stockholm die City-Maut, und in Oslo dürfen Elektrofahrzeuge die Busspuren mitbenutzen. Weitere Anreize sind z. B. kostenloses Parken auf speziellen Parkplätzen sowie Steuerermäßigungen. In der Anfangszeit der Elektromobilität in Deutschland könnte der Strom für die Fahrzeuge subventioniert oder sogar kostenlos abgegeben werden.

Bei signifikanter Durchdringung des Marktes ist jedoch zu erwarten, dass der Gesetzgeber auf den Fahrzeugstrom eine spezielle Stromsteuer erheben wird. Um den Bezug von un versteuertem Ladestrom zu unterbinden, erfordert dies wiederum eine geeichte Messeinrichtung auf Fahrzeugseite oder spezielle, getrennt gemessene Anschlusspunkte für Elektrofahrzeuge. Eine verfrüht eingeführte Stromsteuer könnte jedoch die erfolgreiche Markteinführung von Elektrofahrzeugen behindern [90].

## 5.2 Netzauswirkungen von Elektrofahrzeugen

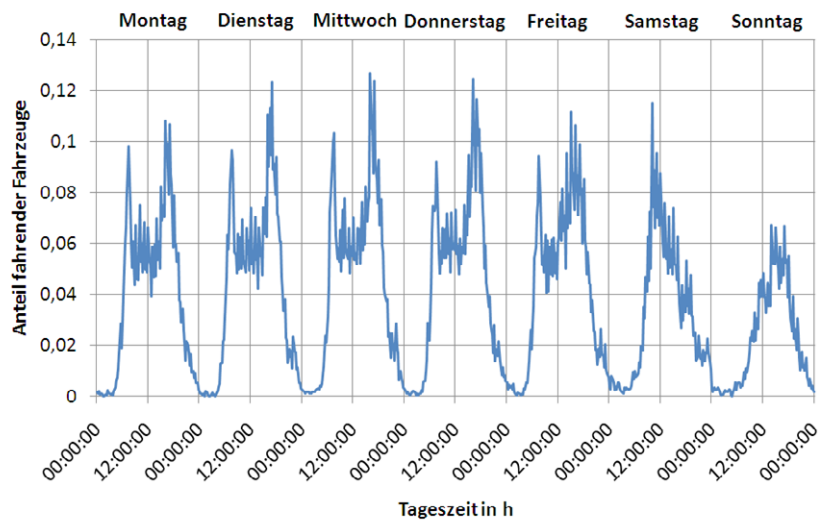
Die zu erwartenden Auswirkungen von Elektrofahrzeugen auf das Versorgungsnetz sind von Eigenschaften und Anzahl der Fahrzeuge abhängig. Aber auch Mobilitätsverhalten, Ladeinfrastruktur und Ladeverhalten der Nutzer haben eine entscheidende Bedeutung. Konkrete Aussagen über zukünftige Netzauswirkungen sind derzeit nicht möglich, da zu wenig Informationen zu diesen Einflussfaktoren vorliegen. Dennoch soll im Folgenden eine Vorstellung der Auswirkungen anhand einfacher Annahmen entwickelt werden. Auf Basis des Mobilitätsverhaltens heutiger PKW werden Ladelastgänge für Elektrofahrzeuge anhand dreier Szenarien abgeschätzt, die unterschiedliche Ladeinfrastrukturen voraussetzen. Die Abschätzungen beziehen sich ausschließlich auf reine Elektrofahrzeuge, da für Plug-In-Hybride eine öffentliche Infrastruktur zum Laden der Fahrzeuge nicht zwingend erforderlich ist.

### 5.2.1 Mobilitätsverhalten von PKW

Als Datenbasis für das Mobilitätsverhalten dient die vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) in Auftrag gegebene Studie „Mobilität in Deutschland“ aus dem Jahre 2002 (MiD2002), in der ca. 25.000 Haushalte in Deutschland an bestimmten Stichtagen des Jahres zu ihrem Mobilitätsverhalten befragt wurden. Die verwendeten Daten sind vergleichbar, wenn auch nicht identisch mit den in Kapitel 4 beschriebenen. Die Kennwerte des Kraftfahrzeugeinsatzes ergeben sich daher ähnlich wie in Kapitel 4. Beispielsweise liegen bezüglich der Verkehrsteilnahme (= Anteil der an einem Tag mobilen Fahrzeuge) ähnliche Daten wie in Tabelle 7 zugrunde.

Aufgrund ihrer begrenzten Reichweite werden rein elektrisch betriebene Fahrzeuge zukünftig konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor nur bedingt substituieren können. 90 % aller Tagesfahrstrecken privater PKW sind kürzer als 100 km [91]. Diese Reichweite wird laut Herstellerangaben von nahezu allen angekündigten Elektrofahrzeugen erreicht und soll daher im Folgenden als Substitutionsgrenze verwendet werden. Bei Berücksichtigung dieses Schwellenwertes verringert sich die durchschnittliche Tagesfahrleistung pro PKW auf 29,6 km. Das entspricht einer Jahresfahrleistung von ungefähr 11.000 km. Der Verlauf des Fahraufkommens ist für die gesamte Woche in Abbildung 23 gegeben. Anhand der Abbildung ist ersichtlich, wie groß der relative Anteil der am Tag mobilen Fahrzeuge ist, die zu einer bestimmten Tageszeit innerhalb der Woche unterwegs sind. Der über die Wochentage Montag bis Donnerstag gemittelte Verlauf wird nachfolgend als typischer Verlauf eines Werktages verwendet. Zum Wochenende ändert sich das Fahrverhalten, das Verkehrsaufkommen der PKW geht zurück. Im Schnitt über die ganze Woche sind tagsüber nur ca. 5 % der mobilen Fahrzeuge gleichzeitig auf der Straße, während durchschnittlich 95 % der Fahrzeuge ruhen.

Abb. 23: Wochenverlauf des Fahrverhaltens von PKW mit einer Tagesfahrleistung < 100 km



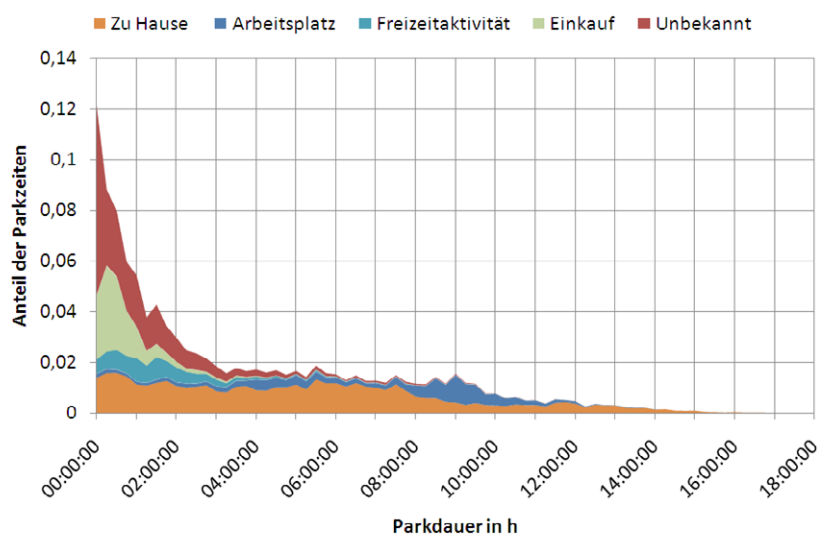
## 5.2.2 Ladeinfrastruktur

Der zu erwartende Ladelastrgang von Elektrofahrzeugen ist abhängig vom verwendeten Ladekonzept bzw. der Ladeinfrastruktur. Plausibel erscheint die Annahme, dass die Fahrzeuge vorwiegend – im privaten Bereich und während längerer Standzeiten z. B. im Betrieb – an normalen einphasigen Steckdosen geladen werden. Gerade für die Einführungsphase erscheint dieser Ansatz als sinnvoll, da einphasige Anschlüsse im privaten Bereich zahlreich zur Verfügung stehen und auch an weiteren Plätzen einfach nachrüstbar sind. Die Leistung von solchen Anschlüssen wird durch die üblicherweise verwendeten

16 A-Sicherungen auf 3,7 kW begrenzt. Das Ladegerät ist dabei im Fahrzeug untergebracht.

Das Parkverhalten zukünftiger Elektro-PKW wird die Ladeinfrastruktur entscheidend mitbeeinflussen. Der überwiegende Teil heutiger PKW parkt nachts auf privatem Grund. Abbildung 24 gibt Auskunft darüber, wie das Parkverhalten tagsüber in der Zeit zwischen 06:00 und 22:00 Uhr für einen Werktag aussieht. Längere Parkzeiten finden fast ausschließlich am Arbeitsplatz oder zu Hause statt. An diesen Plätzen ist am ehesten mit einer geeigneten Ladeinfrastruktur zu rechnen. Die Parkzeiten an diesen Orten eignen sich auch zur Verschiebung von Ladezeiten.

Abb. 24: Anteil der Parkzeiten nach Dauer und Ort innerhalb eines Werkta- ges



Für den weiteren Verlauf werden drei Szenarien betrachtet:

- Szenario 1 „Heim“: Das Laden der Fahrzeuge ist ausschließlich am heimischen Hausanschluss möglich (schwach ausgebaute Infrastruktur)
- Szenario 2 „Heim + Arbeit“: Das Laden der Fahrzeuge ist am Arbeitsplatz und am heimischen Hausanschluss möglich (mäßig ausgebaute Ladeinfrastruktur)
- Szenario 3 „Flächendeckend“: Das Laden der Fahrzeuge ist nahezu flächendeckend möglich (stark ausgebaute Ladeinfrastruktur)

### 5.2.3 Ermittlung des Ladelastganges

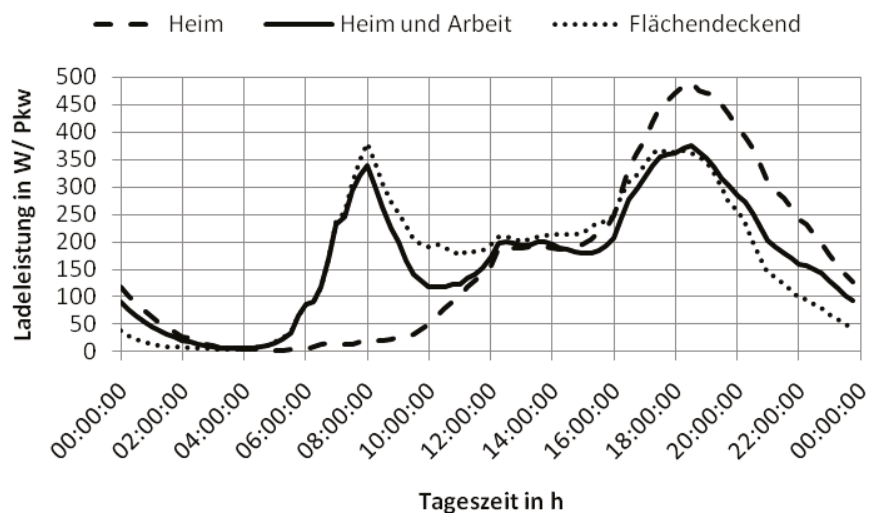
Nachfolgend wird auf die Ladelast und den Energiebedarf der Elektrofahrzeuge eingegangen. Alle Angaben werden fahrzeugbezogen vorgenommen. Zur Veranschaulichung werden die Ergebnisse auf einen Fahrzeugbestand von 1 Mio. Elektrofahrzeuge hochskaliert.

Für die Ermittlung der Ladelastgänge werden weitere Grundannahmen getroffen. Die Ladung der Fahrzeuge wird vom fahrzeugeigenen Batteriemangement gesteuert und ist damit aus Netzsicht ungesteuert. Der spezifische Verbrauch der Fahrzeuge wird einheitlich mit 20 kWh/100 km angesetzt. Dieser Wert berücksichtigt einen zusätzli-

chen Lastanteil für weitere elektrische Verbraucher im Fahrzeug. Zur Ladung der Fahrzeuge wird eine konstante Leistung von 3,7 kW (einphasig, 16 A) angenommen. Nicht jede Parkzeit eignet sich zur Nachladung der Fahrzeuge. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wird daher angenommen, dass die Fahrzeuge nur geladen werden, wenn die Parkdauer mindestens eine Stunde beträgt. Die Fahrzeuge sind zu Beginn der ersten Fahrt am Tag vollgeladen und werden nach dem Ende der letzten Fahrt wieder vollgeladen.

Für einen Werktag ergeben sich die in Abbildung 25 wiedergegebenen Ladelastgänge in den drei Szenarien. Alle drei Fälle weisen ein ausgeprägtes Leistungsmaximum in den Abendstunden zwischen 18:00 und 19:00 Uhr auf. Die durchschnittliche Ladeleistung pro PKW beträgt zu diesem Zeitpunkt zwischen 350 W und 500 W. Bei einer Anzahl von 1 Mio. Elektroautos ergibt sich eine abendliche Ladeleistungsspitze von ca. 500 MW (Szenario 1) bzw. 350 MW (Szenario 2, 3). Szenario 2 und 3 weisen außerdem eine deutliche Ladespitze in der Zeit um 08:00 Uhr morgens auf. Hier liegt der Wert der Ladeleistung ähnlich hoch wie zum Zeitpunkt der Abendspitze. Auffällig ist im Szenario 2, dass durch das Laden der Fahrzeuge am Arbeitsplatz der Verlauf der Ladekurve sich dem im Szenario 3 sehr gut annähert. Gegen 04:00 Uhr morgens sind die Fahrzeuge in allen drei Szenarien wieder vollgeladen.

Abb. 25: Ladeleistung im Tagesverlauf in den Szenarien 1 – 3

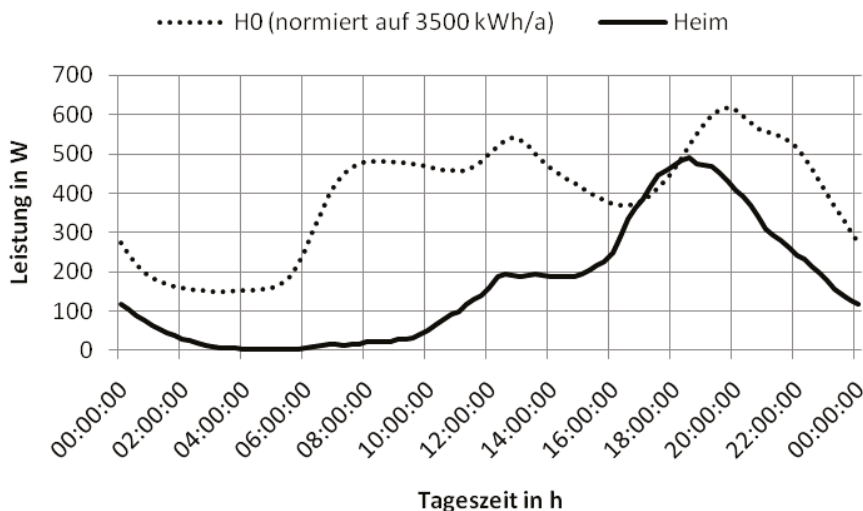


Unter Berücksichtigung einer durchschnittlichen Tagesfahrstrecke von 30 km pro Tag und dem angesetzten Verbrauch von 20 kWh auf 100 km, ergibt sich ein durchschnittlicher elektrischer Energiebedarf von 6 kWh pro Tag und fahrendem Fahrzeug. Für eine Gesamtanzahl von 1 Mio. Fahrzeuge resultiert ein Jahresenergieverbrauch von ca. 1,4 TWh. Dies entspricht in etwa 0,25 % der in Deutschland pro Jahr genutzten elektrischen Energie.

### 5.2.4 Auswirkungen auf das Netz

Um die Ladelastverläufe netzseitig bewerten zu können, werden die ermittelten Daten des Szenarios 1 exemplarisch in Abbildung 26 mit dem Haushaltslastprofil H0 (Werktag, Übergangszeit) des VDEW verglichen. Die Lastangaben in der Abbildung beziehen sich auf die jeweilige Bezugseinheit (1 Elektrofahrzeug oder 1 Haushalt). Ferner ist das Haushaltslastprofil H0 auf den Jahresverbrauch eines Durchschnittshaushaltes von 3500 kWh normiert.

Abb. 26: Vergleich eines normalen Haushaltsprofils (H0-Lastprofil) mit einem Elektrofahrzeug-Heim-Szenario



Wie in Abbildung 26 zu erkennen ist, befindet sich die Ladelastspitze des Heim-Szenarios erwartungsgemäß im Bereich der Abendspitze des H0-Profiles. Durch die zusätzliche Ladeleistung würde sich der durchschnittliche Bedarf von Haushalten mit Elektrofahrzeugen zum Zeitpunkt der Maximallast bei diesem Szenario um ca. 450 W erhöhen. Dieser Wert kann sich beim Übergang zu höheren Ladeleistungen sowie bei Mehrfachmotorisierung mit Elektrofahrzeugen weiter vergrößern. Bei einer entsprechend hohen Durchdringung und lokalen Konzentrationen wäre eine Überlastung der Ortsnetzstation möglich, jedoch erscheint dies zumindest in der Einführungsphase von Elektrofahrzeugen als unkritisch [92]. Anders könnte jedoch die Situation aussehen, wenn von relativ hohen Ladeleistungen ausgegangen wird, da dann auch mit einem höheren Gesamtleistungsbedarf gerechnet werden muss.

Sollte es bei hohen Fahrzeugzahlen und hohen Ladeleistungen zu lokalen Netzüberlastungen kommen, könnte ein netzseitiges Ladelastmanagement Abhilfe schaffen. Da ein Großteil der Fahrzeuge in den betrachteten Szenarien bereits um Mitternacht vollgeladen ist, könnte ein Lastmanagement auch dazu genutzt werden, abendliche Lastspitzen durch die Ausdehnung der Ladezeiten auf die eher lastschwachen Nachtstunden zu verringern sowie die Fahrzeuge gezielt zur Speicherung von Windenergie zu verwenden. Dadurch ließe sich auch der Effekt verringern, dass konventionelle Grundlastkraftwerke durch den

starken Zubau von Windenergie in den Nachtstunden weiter in den Teillastbereich gedrängt werden.

Bei der Laststeuerung der Elektrofahrzeuge, ggf. auch zusammen mit den Haushaltslasten, ist generell darauf zu achten, dass die Gleichzeitigkeit der Lasten im Verteilnetz nicht nennenswert erhöht wird. Andernfalls könnten die Hoch-Mittelspannungstransformatoren sowie die Mittelspannungskabel als erstes überlastet werden, danach die Ortsnetztransformatoren und die Niederspannungskabel. In einem netzseitigen Lastmanagement ist eine geeignete Koordination zwischen Netz und dezentralen Anlagen und Fahrzeugen zu implementieren. Ansätze hierzu wurden bereits erforscht [93].

### 5.2.5 Netzdienstleistungen durch Elektrofahrzeuge

Da die Fahrzeuge zu einem Großteil des Tages parken, besteht theoretisch das Potential, die gespeicherte Energie und die Anschlussleistung für Netzdienstleistungen zu nutzen. In ersten Untersuchungen zeigt sich jedoch [94], dass der wirtschaftliche Nutzen zur gesicherten Erbringung von Sekundär- oder Minutenreserve sehr gering ist und hierzu extrem große Zahlen von Fahrzeugen zu Pools zusammengeschlossen werden müssten. Durchgängige Kommunikationsverbindungen wären zur Erbringung der Netzdienstleistungen ebenfalls erforderlich. Es würde hierbei ein Abruf der Leistung mit einer hohen Gleichzeitigkeit notwendig sein, die sich aus Netzgründen nicht oder nur stark eingeschränkt realisieren lässt.

Dasselbe gilt prinzipiell auch für die Erbringung von Primärregelleistung. In diesem Bereich wäre allerdings denkbar, dass während des Ladevorgangs bei netzseitiger Unterfrequenz die Ladeleistung gemäß einer Statikkennlinie reduziert wird [92].

Netzdienstleistungen, die die Rückspeisung von Energie in das Niederspannungsnetz nutzen, bedürfen spezieller Sicherheitseinrichtungen zur Inselnetzerkennung. Dieses ist für Eigenerzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz vorgeschrieben, damit die Anlage bei einem Netzausfall nicht durch Rückspeisung im Niederspannungsnetz arbeitende Personen gefährdet. Dasselbe würde für Elektrofahrzeuge gelten, wodurch neben dem aufwändigeren Ladegerät weitere Kosten entstehen würden.

## 5.3 Bewertung

Um eine möglichst flächendeckende Versorgung mit Ladeanschlüssen und damit ein hohes Maß an Mobilität für die Fahrzeugnutzer sicherzustellen, sind zwei Punkte relevant: zum einen das Lade- und zum anderen das Abrechnungskonzept. Eine Kommunikationsverbindung ist Bestandteil mehrerer der hier vorgestellten Ladekonzepte und bietet sich gerade in einem Massenmarkt für eine automatisierte und fahrzeugbezogene Abrechnung der Ladestrommengen sowie zur Realisierung eines Lademanagements und spezieller Fahrzeugstromtarife an. Dabei könnte der fernauslesbare elektronische Haushaltszähler in Zukunft eine wichtige Rolle einnehmen, z. B. auch als Kommunikationsschnittstelle. Gerade mit dem Ziel, eine möglichst flächendeckende und kostengünstige öffentliche Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge zu schaffen, erscheint die Installation eines Zählers auf Fahrzeugseite als eine interessante Option.

Die zu erwartenden Auswirkungen von Elektrofahrzeugen auf das Netz können anhand der Mobilitätsstatistiken abgeschätzt werden. Da überwiegend zuhause und ggf. am Arbeitsplatz geladen wird, hat die öffentliche Ladeinfrastruktur einen verhältnismäßig geringen Einfluss. Öffentliche Ladestationen sind jedoch für die Akzeptanz der Elektromobilität von essenzieller Bedeutung für das subjektive Gefühl, mit Sicherheit laden zu können. Im Rahmen dieses Kapitels wurde das Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen anhand dreier Szenarien abgeschätzt. Anhand dessen ergab sich, dass die benötigte Energie zur Versorgung von Elektrofahrzeugen aus Erzeugungssicht als unproblematisch einzustufen ist. Auf Basis der Szenarien ergab sich für 1 Mio. Fahrzeuge ein Bedarf von 1,4 TWh pro Jahr. Das entspricht weniger als 0,5 % der in Deutschland pro Jahr genutzten elektrischen Energie. Anhand der Szenarien ist ferner ersichtlich, dass auch eine einphasige Ladung prinzipiell ausreichen kann, um den Großteil der Elektrofahrzeuge bis zum nächsten Morgen wieder vollzuladen. Voraussetzung dazu ist eine ausreichend ausgebaute Ladeinfrastruktur. Die „heimische Tankstelle“ kann in diesem Zusammenhang zukünftig eine wichtige Rolle einnehmen. Die Ladeleistung bei einphasigem Anschluss der Fahrzeuge erscheint aus Netzsicht zumindest in der Einführungsphase als ebenfalls unkritisch. Bei großen Ladeleistungen und hohen lokalen Fahrzeugdichten kann es zu Problemen im bestehenden Mittel- und Niederspannungsnetz kommen. Abhilfe könnte in diesem Zusammenhang ein Lademanagementsystem schaffen. Dies könnte preisbasiert über spezielle Tarife oder auch durch gezielte Steuerung der Ladelast realisiert werden. Die Erbringung von Netzdienstleistungen durch Elektrofahrzeuge ist aufgrund des hohen technischen Aufwandes und der verhältnismäßig geringen Wirtschaftlichkeit bis auf Weiteres nicht zu erwarten.



## 6 Kernaussagen und Handlungsbedarf

Elektrofahrzeuge sind aus Sicht des VDE ein wichtiger Beitrag für die Zukunftsfähigkeit unserer Gesellschaft. Für ihre schrittweise Einführung gibt es bereits heute bestimmte Anwendungsfelder:

- Elektrofahrzeuge machen die Mobilität zukunftssicher durch
  - Reduzierung von lokalen wie globalen Emissionen im Verkehrssektor (CO<sub>2</sub>, lokale Abgase, Feinstaub, auch Feinstaub von Bremsbelägen, Lärmemission)
  - die mögliche Verwendung verschiedener Energiequellen. Dies vereinfacht die Umstellung auf erneuerbare Energien und vermindert die Abhängigkeit von einem Energieträger. Die Abhängigkeit von politisch instabilen Regionen sinkt.
  - einen geringeren Verbrauch durch höhere Effizienz des Antriebsstrangs (Elektrofahrzeug 15 – 20 kWh/100 km, konventioneller PKW 5 l/100 km \* 10 kWh/l = 50 kWh/100 km, Verluste im Kraftwerk, Netz und Batterie nicht berücksichtigt) und rekuperatives Bremsen (Einsparpotential im Stadtzyklus bis zu 25 %).
- In bestimmten Anwendungsgebieten erhöht sich der Nutzwert durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen. So ermöglichen Elektrofahrzeuge eine hohe und konstante Beschleunigung vom Stillstand an bis zum Punkt maximaler Leistung und können somit erheblichen Fahrspaß bieten. Außerdem reduziert sich die akustische Belastung der Umwelt.
- Reine Elektrofahrzeuge sollten zunächst für kurze Strecken (< 100 km) konzipiert und eingesetzt werden, da
  - große Reichweiten auf Grund der hohen Kosten für die Batterien in der Regel wirtschaftlich nicht sinnvoll sind.
  - Verkehrsstudien zeigen, dass die meisten Fahrzeuge und Fahrer am Tag nur kurze Strecken zurücklegen. Die Tagesfahrleistung von PKW privater Halter liegt bei fast 70 % der Fahrzeuge unter 50 km und bei fast 90 % unter 100 km.
- Mit Range Extendern (z. B. kleinen effizienten Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen) kann der Einsatzbereich von Elektrofahrzeugen deutlich erweitert werden. Da die Kunden bei Einsatz von Range Extendern keine Einschränkung der Reichweite in Kauf nehmen müssen, kann die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen erhöht werden.
- Elektrofahrzeuge sollten nicht nur als reiner Ersatz von konventionellen PKW gesehen werden. Sie bieten neue Möglichkeiten und Vorteile in Hinsicht auf Fahrzeugkonzepte (Karosserie, Raumangebot, Größe, Zusatzfunktionen, aktive Sicherheit), Nutzungsvarianten

(Urban Delivery, Kurzstreckenfahrzeuge) und Mobilitätskonzepte (Mobilität als Dienstleistung unabhängig vom Beförderungsmittel -> Kombination verschiedener Fahrzeuge). Durch die Einführung von Elektrofahrzeugen können neue Nutzungskonzepte geschaffen werden, die sich nicht unbedingt mit denen klassischer Automobile decken (z. B. Fahren in Gebäuden, Naherholungsgebieten und Naturschutzparks).

### Infrastrukturbedarf

- Die Batterien können einphasig mit moderater Leistung geladen werden, da die Parkzeiten der Fahrzeuge ausreichend lang sind. Dadurch kann die bestehende Infrastruktur der Elektrizitätsnetze genutzt werden und es sind zunächst keine teuren Investitionen in die Infrastruktur notwendig. In den Szenarien mit einphasigem Ladeanschluss beträgt die maximale Ladeleistung von 1 Mio. Fahrzeugen 400 MW (< 1 % der normalen Netzlast)
- Ladepunkte sollten primär im privaten und Firmenbereich sowie in Einrichtungen des öffentlichen Dienstes bereitgestellt werden. Im öffentlichen Bereich ist ein kostendeckender Betrieb öffentlicher Ladestationen auf Grund der geringen Energiemenge in naher Zukunft nicht zu erwarten. Der Energiebedarf von 1 Mio. Elektrofahrzeugen beträgt weniger als 0,5 % der in Deutschland pro Jahr genutzten elektrischen Energie. Eine Vollladung kostet in der Regel weniger als 2 €.
- Ein netzseitiges Lademanagement ist erst bei moderater Ladeleistung (bis ca. 3,7 kW) ab ca. 1 Mio. Fahrzeugen notwendig. Das Lademanagement kann jedoch zur Anpassung von Stromerzeugung und Verbrauch von Anfang an sinnvoll sein, wenn Elektrofahrzeuge nahtlos in die Infrastruktur fernauslesbarer Zähler (Smart Meter) integriert werden.
- Ein Netzausbau ist bei bis zu ca. 1 Mio. Fahrzeugen nicht erforderlich. Die Anforderungen an die Stromnetze durch die Elektromobilität sind gering im Vergleich zu denen durch den Ausbau regenerativer Energien. Die Erbringung von Netzdienstleistungen sollte jedoch bis auf Weiteres von Elektrofahrzeugen nicht erwartet werden, da der Aufwand gegenüber dem Nutzen sehr hoch ist. Bei richtiger Batterieauslegung kann diese prinzipiell auch für die Netzstabilisierung verwendet werden, ohne dass die Lebensdauer unzulässig weit reduziert wird. (Der Fahrbetrieb eines Elektroautos verursacht in 10 Betriebsjahren etwa 1080 äquivalente Vollzyklen - komplettes Laden und Entladen der Batterie - und verwendet somit nur etwa 1/3 der möglichen Zyklen von speziell für Elektrofahrzeuge entwickelten Batterien.)

### Weiterer Untersuchungsbedarf bezüglich Mobilität und Wirtschaftlichkeit

- Neue Verkehrsstudien mit Langzeitbeobachtung von Fahrzeugen sollten durchgeführt werden. Heutige Erhebungen basieren auf einem Stichtag und bieten keine Langzeitbeobachtung, so dass der Einfluss seltener, aber langer Fahrten nicht richtig erfasst wird.
- Untersuchung und Bewertung der Netzinfrastruktur bzgl.
  - Netzdienstleistungen durch Elektrofahrzeuge und Laststeuerungsmechanismen unter Berücksichtigung von Netzrestriktionen
  - Energiemarktintegration, Tarifgestaltung und Geschäftsmodellen für Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur
- Untersuchungen, ob der Fahrzeugdurchsatz in Ballungsräumen durch die hohe Beschleunigung von Elektrofahrzeugen gesteigert werden kann.
- Analyse des Marktpotentials von Elektrofahrzeugen. Welche Anreize führen dazu, dass Elektrofahrzeuge trotz bestimmter Nachteile (Kosten, Reichweite, etc.) gekauft werden?

### Standardisierungsbedarf

- Energiespeicher sollten modular und nachrüstbar sein, um flexibel auf (neue) Bedürfnisse der Fahrer reagieren zu können.
- Interne Schnittstellen sollten standardisiert werden (z. B. Spannungsniveaus, Steckverbinder)
- Standardisierung der Ladestationen
  - Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestationen sowie zwischen Fahrzeug oder Ladestation und Abrechnungszentrum, langfristig auch zwischen Infrastruktur- und Netzbetreiber. Hierbei ist eine nahtlose Integration zu fernauslesbaren Zählern (Smart Metern) anzustreben.
  - Aufbau, Schnittstellen und Schutzkonzepte
- Die Entwicklung von Elektrofahrzeugen stellt Hersteller und Zulieferer vor neue Sicherheitsanforderungen:
  - Besondere Bedeutung hat die Qualifizierung der Service-Mitarbeiter bzw. die entsprechende Ausrüstung des Werkstattumfeldes. Einheitliche Standards, die auch bei herstellerfremden Werkstätten eine Reparatur der Hochvoltkomponenten ermöglichen, sind erforderlich.
  - Das Risiko im Bereich „Funktionale Sicherheit“ kann bei Elektrofahrzeugen durch die konsequente Umsetzung vorhandener Normen und Methoden sowie einen höheren Fokus auf die Sicherheit des komplexen Gesamtsystems auf das Niveau von konventionellen Fahrzeugen gebracht werden. Die Einhaltung der derzeit gültigen Normen allein ist aber kein Garant für einen niedrigen Gefährdungsgrad, daher sollten die vorhandenen Normen erweitert und ergänzt werden.

- Ein weiterer Schwerpunkt der sicherheitstechnischen Aufgaben für Forschung und Entwicklung liegt im Bereich der Batterie. Insbesondere die Beherrschung des Crash-Falles erfordert neben dem mechanischen Schutz der Batterie auch entsprechende Entwicklungen der Sicherheitstechnik. Hierzu sind weiterhin intensive Forschungsanstrengungen erforderlich.

### **Forschungs- und Entwicklungsbedarf**

- In den nächsten 10 Jahren werden Lithium-Ionen Batterien eine wesentliche Rolle im Elektrofahrzeug spielen. Die Preise auf Zellebene können durch Massenproduktion von heute 1000 €/kWh auf etwa 300 €/kWh in 5 Jahren sinken. Dies entspricht einem Preis in der Größenordnung von etwa 5000 € pro 100 km Reichweite. Für den Endkunden bedeutet dies, dass er für den Batteriepack (inkl. Gehäuse und Sicherheitstechnik) etwa 10.000 € für 100 km Reichweite bezahlen muss. Neben der Kostenreduktion sind Sicherheit und Zuverlässigkeit wichtige Faktoren für die erfolgreiche Markteinführung von Lithium-Ionen Systemen in Elektrofahrzeugen.
- Viele Hilfsaggregate wurden bereits in den vergangenen Jahren auch im konventionellen PKW elektrifiziert, um die Effizienz zu steigern. Diese können in Elektrofahrzeugen leicht eingesetzt werden. Zur Steigerung der Effizienz und zur Senkung von Bauvolumen und Kosten können Hilfsaggregate im Elektrofahrzeug anstelle am 12 V Bordnetz auch direkt an der Traktionsspannung angeschlossen werden.
- Da Wärme im Elektrofahrzeug auf Grund des hohen Wirkungsgrads für Heizzwecke kaum noch zur Verfügung steht, müssen effiziente Heiz- und Dämmsysteme eingeführt werden. Denkbar sind Wärmepumpen, die auch zur Kühlung des Innenraums verwendet werden können. Auch eine Vorkonditionierung des Fahrzeugs während des Ladevorgangs ist möglich (vgl. Ford Ecostar).
- Wesentliche Entwicklungsziele bei leistungselektronischen Fahrzeugkomponenten sind die Reduzierung von Kosten (Life-Cycle) und benötigtem Bauvolumen (Erhöhung der Leistungsdichte) sowie die Erhöhung der Zuverlässigkeit. Schlüssel hierfür ist die Aufbau- und Verbindungstechnik in neuen, auf den Automobilbereich zugeschnittenen Produktionsverfahren. Die grundlegende Schaltungstechnik ist weitgehend entwickelt.  
Außerdem sollten die elektromagnetische Verträglichkeit (Normung des Traktionsnetzes) und die Integration des Umrichters in die Maschine weiter untersucht werden.
- Mit vielen verfügbaren Maschinentypen, wie z. B. Asynchron-, Synchron- und geschalteten Reluktanzmaschinen, lassen sich Wirkungsgrade von über 90 % erreichen. Die mittleren Wirkungsgrade über einen Fahrzyklus liegen im Bereich von 80 – 90 %. Die optimale

Auswahl des Maschinentyps lässt sich nicht allgemein beantworten und hängt vom jeweiligen Fahrzeugkonzept und Fahrzyklus ab. Wichtige Entwicklungsschritte liegen im Leichtbau, der Entwicklung automobilgerechter Produktionsverfahren, der Eliminierung von teuren Sensoren und der Integration von Diagnosesystemen sowie der Entwicklung verbesserter Werkstoffe. Für den massenhaften Einsatz von Permanentmagneten wird der Zugang zu den erforderlichen Rohstoffen mitentscheidend sein. Bei Engpässen sollten diese Materialien für Kleinantriebe eingesetzt werden, da Alternativen dort deutlich schlechtere Wirkungsgrade aufweisen. Weitere Forschungsziele sollten in der Optimierung der integralen Effizienz im Fahrzyklus (teillast-effiziente Motorauslegung), der Verbesserung des Kühlsystems und der Entwicklung ressourcenschonender Maschinenkonzepte (z. B. elektrisch erregte Synchronmaschine, geschaltete Reluktanzmaschine) liegen.

### **Politischer Handlungsbedarf für die Einführung von 1 Mio. Elektrofahrzeugen bis 2020**

Da die Investitionskosten von Elektrofahrzeugen auch mittelfristig höher als bei konventionellen Fahrzeugen sein werden, bedarf es einer Förderung. Wichtig ist es, einen langfristigen und verlässlichen Rahmen zu schaffen. Mögliche Maßnahmen umfassen:

- Steuerliche Vergünstigungen oder Zuschuss beim Kauf (evtl. Abwrackprämie)
- Schaffung von Nutzungsvorteilen für Elektrofahrzeuge (z. B. kostenloses Parken, Freigabe von Sperrzonen in Innenstädten)
- Förderung von Firmen zur Schaffung von Lademöglichkeiten für Elektrofahrzeuge von Mitarbeitern
- Die Schaffung von dediziertem öffentlichem Parkraum mit einfacher Lademöglichkeit für Elektrofahrzeuge. Die Ladestationen sollten preiswert sein, einphasiges Laden ist ausreichend. In der Startphase sollte auf eine Abrechnung der Energie verzichtet werden, da eine Vollladung in der Regel weniger als 2 € kostet. Mittelfristig sollten der Zugang zu Ladepunkten und die Abrechnung der Energie standardisiert sein. Denkbar ist auch die Ausstattung von 2 % aller Stellplätze in Parkhäusern mit Steckdosen.
- Förderung neuer Mobilitätskonzepte: Denkbar ist z. B. ein integriertes Mobilitätskonzept, bei dem nicht mehr der Besitz eines Verkehrsmittels, sondern der Erwerb von Mobilität im Vordergrund steht. Der Nutzer kann dabei exklusiven Zugang zu einem Elektrofahrzeug für die täglichen Fahrten haben. Kosten fallen für die Bereitstellung und die Fahrleistung an. Für längere Fahrten wird das Elektrofahrzeug durch weitere Verkehrsmittel ergänzt. Wichtig ist, dass die Verwendung einfach und die Abrechnung transparent sind. Denkbar wäre auch, dem Nutzer eines Elektrofahrzeugs an einem Wochenende im Monat ein konventionelles Fahrzeug zu Verfügung zu stellen.

- Förderung der Forschung auf den oben genannten Gebieten insbesondere zur Optimierung der Speichertechnologien

### **Handlungsbedarf für die Einführung von mehr als 1 Mio. Elektrofahrzeugen ab 2020**

- Für eine hohe Durchdringung von Elektrofahrzeugen müssen frühzeitig geeignete Abrechnungssysteme entwickelt werden.
- Untersuchungen zum Lademanagement sollten durchgeführt werden. Die Anpassung der Ladung an das Dargebot erneuerbarer Energien unter Berücksichtigung von Netzrestriktionen ist zu untersuchen. Möglichkeiten zur Netzflexibilisierung (Smart Grids) sind zu erforschen. Dabei ist langfristig zu klären, wie Elektrofahrzeuge zur Erbringung von Netzdienstleistungen eingesetzt werden können. Dies ist gerade bei gesteigerter regenerativer Stromerzeugung von besonderem Interesse.
- Der Aufbau eines Recyclingsystems für Fahrzeuge und Komponenten sollte untersucht werden. Dabei ist auch zu klären, ob bestimmte Komponenten nach der Fahrzeuglebensdauer in ähnlichen oder anderen Anwendungen weiter eingesetzt werden können (z. B. Batterie in stationären Anwendungen, generalüberholte Motoren und Umrichter für Neufahrzeuge oder als Ersatzteile).
- Geeignete Forschungsprojekte müssen angestoßen und finanziell unterstützt werden.

**Abkürzungen**

APU	Auxiliary Power Unit: Einrichtung zur Erzeugung elektrischer Energie für Nebenaggregate
ASM	Asynchronmaschine
B6C	Drehstrombrückenschaltung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BRIC	Ländergruppe: Brasilien, Russland, Indien, China
BTL	biomass to liquid, deutsch: Biomasseverflüssigung
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE
DMFC	direct methanol fuel cell
DSR	Direkte Selbstregelung
DTC	direct torque control, deutsch: direkte Drehmomentregelung
ECE	Katalog von international vereinbarten, einheitlichen technischen Vorschriften für Fahrzeuge, Teile und Ausrüstungsgegenstände von Kraftfahrzeugen
Elko	Elektrolytkondensator
EMB	elektromechanische Bremse
EMI	elektromagnetische Interferenz
EMV	elektromagnetische Verträglichkeit
ESP	elektronisches Stabilitätsprogramm
EV	electric vehicle, deutsch: Elektrofahrzeug
FCEV	fuel cell electric vehicle, deutsch: Brennstoffzellenfahrzeug
FOR	Feldorientierte Regelung
GRM	geschaltete Reluktanzmaschine
HEV	hybrid electric vehicle, deutsch: Hybridfahrzeug
HT-PEFC	high temperature polymer electrolyte fuel cell
HV	high voltage, deutsch: Hochvolt
IEC	International Electrotechnical Commission
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
ISO	International Organization for Standardization
KFZ	Kraftfahrzeug
KiD	Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland (Studie)
Li-Ion	Lithium-Ionen
LKW	Lastkraftwagen
LLC	resonant schaltender Wechselrichter
MiD	Mobilität in Deutschland (Studie)
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor
NaS	Natrium-Schwefel
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NiCd	Nickel-Cadmium
NiMh	Nickel-Metallhydrid
PEFC	polymer electrolyte fuel cell
PKW	Personenkraftwagen
PMSM	Permanent Erregte Synchronmaschine, kurz: PM
SiC	Siliciumcarbid
SOFC	solid oxide fuel cell
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

**Literaturverzeichnis**

- [1] U.Lahl. Zukünftige Antriebe für Automobile aus der Sicht der Bundesregierung, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 31.3.2009.
- [2] M.Altmann, V.Bladow, P.Niebauer, J.Schindler, V.Schurig, W.Weindorf, R.Wurster, W. Zittel. Vergleich verschiedener Antriebskonzepte im Individualverkehr im Hinblick auf Energie und Kraftstoffeinsparung. Studie im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen, L-B Systemtechnik GmbH, Ottobrunn, April 2002.
- [3] Biokraftstoffe - eine vergleichende Analyse. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 2006.
- [4] Biokraftstoffe Basisdaten Deutschland. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), ([http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf\\_174-basisdaten\\_biokraftstoff-freigabe.pdf](http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_174-basisdaten_biokraftstoff-freigabe.pdf)), 2008.
- [5] P. J. Crutzen, A. R. Mosier, K. A. Smith W. Winiwarter. N2O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008.
- [6] Joseph Fargione, Jason Hill, David Tilman, Stephen Polasky, Peter Hawthorne. Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt. Science Magazine (<http://www.sciencemag.org/cgi/reprint/319/5867/1235.pdf>), 2008.
- [7] F. Dünnebeil, U. Höpfner, U. Lambrecht, C. Reuter. Motorrad-Umwelt-Liste: Analyse der umweltrelevanten Eigenschaften von Motorrädern. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH, ([http://www.ifeu.de/verkehrundumwelt/pdf/IFEU\(2004\)\\_Motorrad-Umwelt-Liste\\_Endbericht.pdf](http://www.ifeu.de/verkehrundumwelt/pdf/IFEU(2004)_Motorrad-Umwelt-Liste_Endbericht.pdf)), 2004.
- [8] Pressemitteilung des Statistischen Bundesamtes. Rund ein Fünftel der Haushalte hat einen Zweitwagen. ([http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Presse/pm/zdw/2006/PD06\\_\\_013\\_\\_p002.psm](http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Presse/pm/zdw/2006/PD06__013__p002.psm)), 28.3.2006.
- [9] [www.teslamotors.com](http://www.teslamotors.com)
- [10] Electric supercars – Highly charged motoring. The Economist, 20. März 2010.
- [11] FreedomCAR and Fuel Partnership: Electrical and Electronics Technical Team Roadmap, 17.10.2007.
- [12] J. Lutz. Halbleiter-Leistungsbaulemente: Physik, Eigenschaften, Zuverlässigkeit., Springer 2006
- [13] Patentschrift DE102006006175A1. Leistungselektronikanordnung.
- [14] R. Eisele, K.K. Olesen, F. Osterwald. Innovative Kühltechnologie für Leistungsmodule. ETG-Fachbericht 105 Bauelemente der Leistungselektronik und ihre Anwendungen. VDE-Verlag Berlin-Offenbach, 2006.
- [15] Hidehiko Yasui et al. Power Control Unit for High Power Hybrid System.
- [16] J.N. Calata, J.G. Bai, G.-Q. Lu, C. Luechinger. Evaluation of the Reliability of Interconnect Technologies for Power Semiconductor Devices. CPES Annual Meeting, 2003.
- [17] M. Mermet-Guyenet. High Temperature Electronics and Thermal Management. ECPE Seminar on Double-sided cooling, 2006.
- [18] M. Schneider-Ramelow. Design and assembly of power semiconductors with double-sided water cooling. CIPS, 2008.



- [19] C. M. Johnson. Compact Double-Side Liquid-Impingement-Cooled Integrated Power Electronic Module. ISPSD, 2007.
- [20] JP200673663A. Package for containing electric element, electric element unit and electric element cooling module.
- [21] M. März. Technology Choices for Automotive Applications. APE, 2007.
- [22] Xi Zhang. Efficiency improvement with silicon carbide based power modules. Pro-ceed-ings PCIM, Nürnberg, 2009.
- [23] HS. Lee, M. Domeij, CM. Zetterling, M. Östling, F. Allerstam, EO Sveinbjörnsson. 1200 V 5.2 m $\Omega$ cm<sup>2</sup> 4H-SiC BJTs. IEEE Electron Device Letters, Vol. 28, No. 11, 2007.
- [24] B. Wittig, W.-T. Franke, F.W. Fuchs. Design and Analysis of a DC/DC/AC Three Phase Solar Converter with Minimized DC Link Capacitance. Christian-Albrechts-University of Kiel, EPE, 2009.
- [25] N. Ikeda, S. Kaya, L. Jiang, Y. Sato, S. Kato, S. Yoshida. High power AlGaN /GaN HFET with a high breakdown voltage of over 1.8 kV on 4 inch Si substrates and the suppression of current collapse. Proceedings of the ISPSD, 2008.
- [26] H. Rüthing, F. Hille, F.-J. Niedernostheide, H.-J. Schulze, B. Brunner. 600 V Reverse Conducting IGBT for Drives Applications in Ultra-Thin Wafer Technology. 19th Int. Symp. on Power Semiconductor Devices and IC's, ISPSD ,07, 2007.
- [27] M. Rahimo, U. Schlapbach, A. Kopta, J. Vobecky, D. Schneider, and A. Baschnagel. A High Current 3300V Module Employing Reverse Conducting IGBTs Setting a New Benchmark in Output Power Capability. Proc. ISPSD, Orlando, Florida, 2008.
- [28] H.-G. Eckel. Potential of Reverse-Conducting IGBTs in Voltage Source Inverters. Proceedings PCIM, Nürnberg, 2009.
- [29] P. Brockenhoff, M. Ebert. Ein neuartiger Mehrpunkt-Wechselrichter für PM-Synchronmaschinen. EMA Elektromobilausstellung, Aschaffenburg, 2008.
- [30] W. Dong, J.Y. Choi, H. Yu, J. Lai, D. Boryevich, F.C. Lee. Efficiency Considerations of Load Side Soft-Switching Inverters for Electric Vehicle Applications.
- [31] T. J. E. Miller. Switched Reluctance Motors and Their Control. Magna Physics Publications, Oxford University Press, USA, 1993.
- [32] M. Barnes, C. Pollock. Power Electronics for Switched Reluctance Drives. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 13, 1998.
- [33] A. Ayob, V. Pickert, H. Slater. Overview of low cost converters for single-phase switched reluctance motors. Conference on Power Electronics and Applications, 2005.
- [34] A. M. Staley, R. Krishnan. Single controllable switch power converter for SRM drive systems. Industrial Electronics Society, IECON, 2005.
- [35] Fairchild, Smart Power Module for SRM, Typ FCAS50SN60 ([www.fairchildsemi.com](http://www.fairchildsemi.com)).
- [36] Semikron, SEMITOP - IGBT Modul, Typ SK25GAD063T ([www.semikron.de](http://www.semikron.de)).

- [37] D. Domes. Untersuchungen zum Einsatz von unipolaren SiC Leistungshalbleiter-bauelementen in Antriebswechselrichtern. Dissertation, TU Chemnitz, 2008.
- [38] W. Hofmann, M. Paul, P. Tenberge. Automatic Gearbox Continuously Controlled by Electromagnetic and Electronic Power Converter. PESC, 2000.
- [39] B. Frei. Regelung eines elektromechanischen Getriebes für Hybridfahrzeuge. Dissertation, TU Chemnitz, 2006.
- [40] Advanced Power Electronics and Electric Machines, EETECH TEAM ROADMAP 2004.
- [41] C. M. Stephens. Fault detection and management system for fault-tolerant switched reluctance motor drives. IEEE Transactions on Industry Applications, Nov/Dec 1991.
- [42] J.W. Kolar. Use of SiC Components in Power Electronic Systems. Vortrag auf SiC User Forum Nürnberg, 2006.
- [43] A. Emadi, Y.L. Lee, K. Rajashekara. Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles. IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol.55 No.6, 2008.
- [44] G. Pfaff, A. Weschta, and A. Wick. Design and experimental results of a brushless ac servo-drive. IAS Annual Meeting, 1982.
- [45] H.W. van der Broeck, H.C. Skudelny, G.V. Stanke. Analysis and realization of a Pulsewidth Modulator Based on Voltage Space Vectors. IEEE Transactions on Industry Applications Vol.24, No. 1, 1988.
- [46] F. Blaschke. Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung von Drehfeldmaschinen. Dissertation, TU Braunschweig, 1973.
- [47] M. Depenbrock. Direkte Selbstregelung (DSR) für dynamisch hochwertige Drehfeldantriebe mit Stromrichterspeisung. ETZ-Archiv H.7, 1985.
- [48] I. Takahashi, T. Nouguchi. A new quick response and high efficiency control strategy of an induction machine. IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. IA-22, No. 5, 1986.
- [49] R.B. Inderka, R.W. De Doncker. DITC – Direct Instantaneous Torque Control of Switched Reluctance Drives. IEEE Industrial Application Society (IEEE-IAS), Pittsburgh, USA, 2002.
- [50] C. Neuhaus, N. Fuengwarodsakul, R. W. De Doncker. Predictive PWM-based Direct Instantaneous Torque Control of Switched Reluctance Drives. IEEE Power Electronics Specialists Conference, Jeju, Korea, 2006.
- [51] W. Schröppel, u. a. Effizienz- und Einsparpotentiale elektrischer Energie in Deutschland. VDE-Studie, Dezember 2007.
- [52] W.-R. Candors, H. Mey. Elektroantriebe für Elektro- und Hybridfahrzeuge. E-MOTIVE Expertenforum Elektrische Fahrzeugantriebe, Hannover, 2009.
- [53] Richtlinie des Rates vom 20. März 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen (70/220/EWG)
- [54] A. Kreim, U. Schäfer. Parameter Optimization of a Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle with Respect to Weighted Load, ICEM 2008.

- [55] U. Vollmer, U. Schäfer. An at all Operating Points Highly Efficient PMSM for HEV. EVS-23, 2007.
- [56] U. Vollmer, U. Schäfer. L. Taus-Beti. Minimization of losses of PMSM for HEV. EVS, Stavanger, Norway, 2009.
- [57] VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG. Broschüre Dauermagneten ([www.vacuumschmelze.de/dynamic/docroot/medialib/documents/broschueren/dmbrosch/DM\\_PD002\\_de.pdf](http://www.vacuumschmelze.de/dynamic/docroot/medialib/documents/broschueren/dmbrosch/DM_PD002_de.pdf)) Hanau, Ausgabe 2007.
- [58] R. W. De Doncker, R. B. Inderka. Elektrische Antriebe und deren Steuerungen zur Traktion von Elektro- und Hybridfahrzeugen. DGES Fachtagung: Elektrofahrzeuge - Hybrid-Technologien im Aufschwung, Aachen, 2003.
- [59] K. Hameyer, Moderne Servomotoren für Werkzeugmaschinen und Handhabungsgeräte, Vorlesungsskript, RWTH Aachen, 2007.
- [60] U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2009. 2009.
- [61] M. Zeraouia<sup>1</sup>, M.E.H. Benbouzid<sup>1</sup>, D. Diallo. Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study. University of Western Brittany, Frankreich, 2005.
- [62] H. Neudorfer. Vergleich unterschiedlicher elektrischer Antriebssysteme für Elektro- und Hybridstraßenfahrzeuge. Haus der Technik Fachbuch Band 80, 2007
- [63] A. Kreim, S. Klostermann, B. Blankenbach: Optimierung der elektrischen Traktionsmaschine des GETRAG E-Smart mit einem zweistufigen Getriebe, DGES-Fachtagung, Dudenhofen, 2009.
- [64] J. Botti, C. Miller. Powertrains of the future: reducing the impact of transportation on the environment. SAE World Congress, 1999.
- [65] D. Kettner. Ganzheitliche Betrachtung einer Fahrzeugklimaanlage mit einem 42 Volt Klimakompressor. In PKW-Klimatisierung II, expert-Verlag, 2002.
- [66] Robert Bosch GmbH. Bosch Automotive Handbook. 2000.
- [67] H. Wallentowitz, K. Reif (Hrsg.). Handbuch Kraftfahrzeugelektronik, Vieweg, 2006.
- [68] Robert Bosch GmbH. Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, Vieweg, 2007.
- [69] D. M. Bellur, M. K. Kazimierczuk. DC-DC Converters for Electric Vehicle Applications. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2007.
- [70] H. Plesko, J. Biela, J. W. Kolar. Design and Analysis of a New Drive-Integrated Auxiliary Dc-Dc Converter for Hybrid Vehicles. Industry Applications Society Annual Meeting, 2008.
- [71] S. Gui-Jia, J. P. Cunningham, T. Lixin. A Reduced-Part, Triple-Voltage DC-DC Converter for Electric Vehicle Power Management. Power Electronics Specialists Conference, 2007.
- [72] L. Hui, Z. P. Fang, J. S. Lawler. A natural ZVS medium-power bidirectional DC-DC converter with minimum number of devices. IEEE Transactions on Industry Applications, vol.39, no.2, 2003.
- [73] R. De Doncker, M. H. Kherluwala, D. M. Divan. Power conversion apparatus for DC/DC conversion using dual active bridges. Patent US000005027264A, 1991.

- [74] J. Jacobs. Multi-Phase Series Resonant DC-to-DC Converters. Dissertation. ISEA, RWTH Aachen University 2005.
- [75] S.A. Schmid, D. Hülsebusch, J. Stiftl, J. Ungethüm, S.-E. Pohl. Bewertung von Fahrzeugkonzepten mit seriellem Plug-In Hybrid Antrieb. Innovative Fahrzeugantriebe, VDI-Berichte 2030, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2008.
- [76] H. Eichlleder, J. Blassnegger. Der zukünftige Ottomotor – überlegener Wettbewerber zum Dieselmotor? 8. Symposium Entwicklungstendenzen bei Ottomotoren, TAE, Leipzig, 2006.
- [77] J. M. Ogden, R.H. Williams, E.D. Larson. Societal lifecycle costs of cars with alternative fuels/engines. Energy Policy 32, 2007.
- [78] Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context TANK-TO-WHEELS Report. Version 3 (<http://ies.jrc.ec.europa.eu>), October, 2008.
- [79] Th. Grube, R. Menzer, R.C. Samsun, J. Pasel, R. Peters. Optionen und Herausforderungen des Einsatzes von Auxiliary Power Units in mobilen Anwendungen. Innovative Fahrzeugantriebe 2006, VDI-Berichte 1975, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 2008
- [80] Forschungszentrum Jülich erzielt erneut Weltrekord mit Brennstoffzellen. Pressemitteilung des Forschungszentrums Jülich GmbH ([www.fz-juelich.de](http://www.fz-juelich.de)), Jülich, 15. Mai 2009.
- [81] Toyota Prius Emergency Response Guide. ([www.toyota.com](http://www.toyota.com)) 2004.
- [82] JASIC. A study on approach warning systems for hybrid vehicle in motor mode; Informal Document No. GRB-49-10 ([www.unece.org](http://www.unece.org)), 2009.
- [83] M. S. Wogalter, R. N. Oman, R. W. Lira, M. R. Chipley. On the Risk of Quiet Vehicles to Pedestrians and Drivers. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 45th Annual Meeting, 2001.
- [84] Kraftfahrt-Bundesamt. Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2009. ([http://www.kba.de/ckn\\_007/nn\\_124384/DE/Presse/PressemitteilungenStatistiken/Fahrzeugbestand/fz\\_\\_bestand\\_\\_pm\\_\\_text.html](http://www.kba.de/ckn_007/nn_124384/DE/Presse/PressemitteilungenStatistiken/Fahrzeugbestand/fz__bestand__pm__text.html)), 17:43 Uhr, 29.06.2009.
- [85] Roland Berger. Powertrain 2020. Automotive Insights, Nr. 2, 2008.
- [86] Deutsche Bank. Electric Cars Plugged In. 2008.
- [87] <http://www.elektromotive.com>
- [88] <http://www.coulombtech.com>
- [89] <http://www.betterplace.com/>
- [90] BDEW. Positionspapier zur Elektromobilität. 2008.
- [91] C. Rehtanz; J. Rolink.: Rahmenbedingungen zum Lastmanagement von Plug-In Hybrid- und Elektro-fahr-zeugen. ETG-Fachbericht 118 Internationaler ETG-Kongress. VDE-Verlag Berlin-Offenbach, 2009.
- [92] C. Rehtanz; J. Rolink. Netzintegration und Lastmanagement von Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen. ETG Mitgliederinformation. Nr. 2/2010, 2010.
- [93] O. Krause. Bestimmung des Nutzungspotenzials von Verteilnetzen. Dissertation, TU Dortmund, 2009
- [94] C. Rehtanz: Netzdienstleistungen durch Elektrofahrzeuge – Technische und wirtschaftliche Herausforderungen. ETG-Fachbericht 117 Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger. VDE-Verlag Berlin-Offenbach, 2009.

# VDE

**VERBAND DER ELEKTROTECHNIK  
ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK e.V.**

Stresemannallee 15  
60596 Frankfurt am Main

Telefon 069 6308-0  
Telefax 069 6312925  
<http://www.vde.com>  
E-Mail [service@vde.com](mailto:service@vde.com)

