

The top half of the cover features a wireframe rendering of a car's front end, including the headlights and wheels, set against a background of overlapping, semi-transparent rectangular shapes in shades of green, orange, and red. The text is overlaid on the left side of this section.

Achim Kampker  
Dirk Vallée  
Armin Schnettler *Hrsg.*

# Elektromobilität

Grundlagen einer Zukunftstechnologie

 Springer Vieweg



# Elektromobilität

---

Achim Kampker · Dirk Vallée · Armin Schnettler  
Herausgeber

# Elektromobilität

Grundlagen einer Zukunftstechnologie

*Herausgeber*

Achim Kampker  
Werkzeugmaschinenlabor (WZL)  
RWTH Aachen University  
Aachen, Deutschland

Armin Schnettler  
Institut für Hochspannungstechnik  
RWTH Aachen University  
Aachen, Deutschland

Dirk Vallée  
Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr  
RWTH Aachen University  
Aachen, Deutschland

ISBN 978-3-642-31985-3      ISBN 978-3-642-31986-0 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-642-31986-0

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media  
[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	1
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	5
2.1	Elektromobilität – Zukunftstechnologie oder Nischenprodukt?.....	6
2.1.1	Elektromobilität – eine historisch basierte Analyse.....	6
2.1.2	Aktuelle Herausforderungen der Elektromobilität.....	15
2.2	Infrastruktur für die Elektromobilität.....	23
2.2.1	Netzinfrastruktur.....	25
2.2.2	Fahrzeuge, Einsatzmuster und Infrastrukturbedarf.....	28
2.2.3	Implikationen für die Infrastruktur.....	34
2.3	Die neue Wertschöpfungskette.....	35
2.3.1	Wertschöpfungskette als System von Aktivitäten.....	35
2.3.2	Aufbau und Veränderungen upstream.....	37
2.3.3	Aufbau und Veränderungen downstream.....	39
2.3.4	Verschiebung der Wettbewerbslandschaft.....	40
2.3.5	Verteilung der neuen Wertschöpfungskette nach Ländern.....	42
2.3.6	Zusammenspiel von Akteuren.....	44
2.4	Produktion von Elektrofahrzeugen.....	46
2.4.1	Kostenstruktur von Elektrofahrzeugen.....	46
2.4.2	Integrierte Produkt- und Prozessentwicklung.....	48
2.4.3	Veränderung der Produktionstechnik für die Elektromobilität ...	53
	Literatur.....	54
<b>3</b>	<b>Infrastruktur</b> .....	59
3.1	Mobilitätskonzepte.....	59
3.1.1	Einführung.....	59
3.1.2	Einsatzfelder von Elektromobilität.....	60
3.1.3	Nutzergruppen und Nutzungsmuster.....	65
3.1.4	Mobilitätskonzepte.....	71
3.1.5	Externe Anschläge und weitere Wirkungen.....	77
3.1.6	Fazit.....	79

3.2	Stromnetze .....	79
3.2.1	Struktur der Stromversorgung in Deutschland .....	79
3.2.2	„Intelligente Netze“ .....	88
3.3	Servicenetze .....	89
3.3.1	Service und Mobilität .....	89
3.3.2	Komponenten eines Mobilitäts-Servicenetzes .....	89
3.3.3	Servicestruktur im freien Automarkt und OES .....	91
3.3.4	Werkstattkonzepte .....	93
3.3.5	Elektro-Servicekonzepte .....	97
3.3.6	Fazit .....	100
	Literatur .....	100
<b>4</b>	<b>Geschäftsmodelle entlang der elektromobilen Wertschöpfungskette .....</b>	<b>103</b>
4.1	Gezeitenwende in der Automobilindustrie .....	103
4.1.1	Einflussfaktoren auf die Marktentwicklung .....	105
4.1.2	Absatzprognosen für Elektrofahrzeuge .....	109
4.2	Herausforderungen für Akteure entlang der Wertschöpfungskette .....	110
4.2.1	Herausforderungen für Automobilhersteller und -zulieferer .....	110
4.2.2	Herausforderungen für Energieversorgungsunternehmen .....	115
4.2.3	Herausforderungen für Dienstleistungsunternehmen .....	116
4.2.4	Das elektromobile Wertschöpfungssystem .....	118
4.3	Geschäftsmodelle der Elektromobilität .....	119
4.3.1	Bestandteile von Modellen der Wertschöpfungsgestaltung .....	120
4.3.2	Kompetenzgetriebene Kooperationen .....	123
4.3.3	Neue Geschäftsmodelle der Elektromobilität .....	128
4.3.4	Konkrete Geschäftsmodelloptionen .....	139
4.4	Zusammenfassung .....	146
	Literatur .....	147
<b>5</b>	<b>Fahrzeugkonzeption für die Elektromobilität .....</b>	<b>149</b>
5.1	Fahrzeugklassen .....	149
5.1.1	Zulassungspflicht und Typgenehmigung .....	149
5.1.2	Fahrzeugklassen .....	152
5.1.3	Fahrzeugklassen für Elektrofahrzeuge .....	155
5.2	Entwicklungsprozess .....	156
5.3	Package für Elektrofahrzeuge .....	159
5.4	Funktionale Auslegung .....	163
5.4.1	Noise, Vibration, Harshness (NVH) .....	163
5.4.2	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) .....	174
5.5	Leichtbau .....	186
5.6	Industrialisierung .....	196

5.6.1	Normen und Standards .....	196
5.6.2	Produkt- und Prozessentwicklungsprozess .....	200
5.6.3	Vom Prototyp zur Serienfertigung – Anlaufmanagement in der Elektromobilproduktion .....	205
5.7	Recycling als Teil der Wertschöpfungskette .....	211
5.7.1	Gesetzliche Rahmenbedingungen .....	211
5.7.2	Generelles zu Batterierecyclingverfahren .....	213
5.7.3	Stand der Technik von Forschung und Entwicklung .....	215
5.7.4	Stand der Technik industrieller Recyclingverfahren .....	217
	Literatur .....	225
<b>6</b>	<b>Entwicklung von elektrofahrzeugspezifischen Systemen .....</b>	<b>235</b>
6.1	Fahrzeugstruktur .....	236
6.1.1	Body für Elektrofahrzeuge .....	236
6.1.2	Produktionsprozesse der Fahrzeugstruktur .....	249
6.2	Elektrischer Antriebsstrang .....	263
6.2.1	Antriebsstrangkongzepte .....	266
6.2.2	Elektrische Maschinen .....	269
6.2.3	Leistungselektronik .....	277
6.2.4	Prozesskette und Kosten elektrischer Maschinen .....	283
6.2.5	Aktuelle Produktionsprozesse für Leistungshalbleitermodule .....	289
6.3	Batteriesysteme und deren Steuerung .....	295
6.3.1	Entwicklung eines Batteriesystems .....	295
6.3.2	Produktionsverfahren Batteriezellen und -systeme .....	305
6.4	Thermomanagement .....	314
6.4.1	Herausforderung Thermomanagement im Fahrzeug .....	315
6.4.2	Systembetrachtung zum Thermomanagement .....	317
6.4.3	Entwicklung und Produktion im Netzwerk .....	330
	Literatur .....	331

---

## Mitarbeiterverzeichnis

Bartsch, M.

Hans Hess Autoteile GmbH, Widdersdorfer Straße 188, 50825 Köln, Deutschland

De Doncker, R.W., Univ.-Prof. Dr. ir. Dr. h.c.

ISEA - Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe,  
RWTH Aachen University, Jägerstr. 17/19, 52066 Aachen, Deutschland

Deutskens, C., Dipl.-Ing., M.Eng.

Werkzeugmaschinenlabor (WZL),  
RWTH Aachen University, Steinbachstraße 19, 52074 Aachen, Deutschland

Drauz R., Dr., MBA, M.Sc.

Center for International Automobile Management,  
RWTH Aachen University, Templergraben 64, 52056 Aachen, Deutschland

Elsen, O., Dipl.-Ing.

StreetScooter GmbH, Hüttenstr. 1-9, 52068 Aachen, Deutschland

Flieger, B.

E.ON Energy Research Center (E.ON ERC),  
RWTH Aachen University, Mathieustraße 10, 52074 Aachen, Deutschland

Friedrich, B., Prof. Dr.-Ing.

IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling,  
RWTH Aachen University, Intzestrasse 3, 52072 Aachen, Deutschland

Genuit, K., Prof. Dr.-Ing.

Head Acoustics GmbH, Ebertstraße 30A, 52134 Herzogenrath, Deutschland

Georgi-Maschler, T., Dr.-Ing.

IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling,  
RWTH Aachen University, Intzestrasse 3, 52072 Aachen, Deutschland

Hagedorn, J., Dipl.-Ing.

Aumann GmbH, In der Tütenbeke 37, 32339 Espelkamp, Deutschland

Hameyer, K., Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c.

Institut für Elektrische Maschinen,

RWTH Aachen University, Schinkelstraße 4, 52062 Aachen, Deutschland

Heimes, H., H., Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing.

Werkzeugmaschinenlabor (WZL),

RWTH Aachen University, Steinbachstraße 19, 52074 Aachen, Deutschland

Hennen, M., Dr.-Ing.

Geschäftsstelle Elektromobilität,

RWTH Aachen University, Hüttenstr. 1-9, 52068 Aachen, Deutschland

Hübner, M., Dipl.-Ing.

ISEA - Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe,

RWTH Aachen University, Jägerstr. 17/19, 52066 Aachen, Deutschland

Ivanescu, S., Dipl.-Ing.

Werkzeugmaschinenlabor (WZL),

RWTH Aachen University, Steinbachstraße 19, 52074 Aachen, Deutschland

Kampker, A., Prof. Dr.-Ing.

Werkzeugmaschinenlabor (WZL),

RWTH Aachen University, Steinbachstraße 19, 52074 Aachen, Deutschland

Kampker, R., Dr.-Ing.

Hans Hess Autoteile GmbH, Widdersdorfer Straße 188, 50825 Köln, Deutschland

Kasperk, G., Dr. rer. pol.

Center for International Automobile Management,

RWTH Aachen University, Templergraben 64, 52056 Aachen, Deutschland

Maue, A., Dipl.-Wirt.-Ing.

Werkzeugmaschinenlabor (WZL),

RWTH Aachen University, Steinbachstraße 19, 52074 Aachen, Deutschland

Meckelnborg, A., Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing.

Werkzeugmaschinenlabor (WZL),

RWTH Aachen University, Steinbachstraße 19, 52074 Aachen, Deutschland

Morche, D., Dipl.-Ing.

StreetScooter GmbH, Hüttenstr. 1-9, 52068 Aachen, Deutschland

Müller, D., Univ.-Prof. Dr.-Ing.

E.ON Energy Research Center (E.ON ERC),

RWTH Aachen University, Mathieustraße 10, 52074 Aachen, Deutschland

Nee, C., Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing.

Werkzeugmaschinenlabor (WZL),

RWTH Aachen University, Steinbachstraße 19, 52074 Aachen, Deutschland

- Reisgen, U., Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF),  
RWTH Aachen University, Pontstr. 49, 52062 Aachen, Deutschland
- Röth, T., Prof. Dr.-Ing.  
FH Aachen - University of Applied Sciences, Lehr- und Forschungsgebiet  
Karosserietechnik, Hohenstaufenallee 6, 52064 Aachen, Deutschland
- Sauer, D.U., Prof. Dr.  
ISEA - Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe,  
RWTH Aachen University, Jägerstr. 17/19, 52066 Aachen, Deutschland;  
Jülich Aachen Research Alliance JARA, Section JARA Energy
- Schittny, B., Dipl.-Wi.-Ing.  
Werkzeugmaschinenlabor (WZL),  
RWTH Aachen University, Steinbachstraße 19, 52074 Aachen, Deutschland
- Schmitt, F., Dipl.-Ing.  
StreetScooter GmbH, Hüttenstr. 1-9, 52068 Aachen, Deutschland
- Schnettler, A., Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Institut für Hochspannungstechnik,  
RWTH Aachen University, Schinkelstraße 2, 52056 Aachen, Deutschland
- Stolze, T., Dipl.-Ing.  
Infineon Technologies AG, Max-Planck-Strasse 5, 59581 Warstein, Deutschland
- Swist, M., Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing.  
Werkzeugmaschinenlabor (WZL),  
RWTH Aachen University, Steinbachstraße 19, 52074 Aachen, Deutschland
- Thiele, R., Dipl.-Wirt.-Ing.  
Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF),  
RWTH Aachen University, Pontstr. 49, 52062 Aachen, Deutschland
- Thomes, P., Univ.-Prof. Dr.  
Lehr- und Forschungsgebiet Wirtschafts- und Sozialgeschichte,  
RWTH Aachen University, Kackerstraße 7, 52072 Aachen, Deutschland
- Vallée, D., Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr,  
RWTH Aachen University, Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen, Deutschland
- van Hoek, H., Dipl.-Ing.  
ISEA - Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe,  
RWTH Aachen University, Jägerstr. 17/19, 52066 Aachen, Deutschland
- Vest, M., Dipl.-Ing.  
IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling,  
RWTH Aachen University, Intzestrasse 3, 52072 Aachen, Deutschland

Vetter, A., Dipl.-Ing.

Infineon Technologies AG, Max-Planck-Strasse 5, 59581 Warstein, Deutschland

Wang, H., M.Sc.

IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling,

RWTH Aachen University, Intzestrasse 3, 52072 Aachen, Deutschland

Achim Kampker, Dirk Vallée und Armin Schnettler

Die Automobilindustrie befindet sich in einem tief greifenden Wandel. Das Thema Elektromobilität gewinnt zunehmend an Bedeutung und wird zu einem in der Öffentlichkeit viel diskutierten Thema. Intensive Forschungsbemühungen seitens der Automobilindustrie zeigen die hohe Bedeutung für die Zukunft. Nach 125 Jahren Automobilentwicklung ändern sich Fahrzeug- und Antriebskonzepte grundlegend. Aber nicht nur das Produkt Auto wird neu definiert, der gesamte Wertschöpfungsprozess muss neu entwickelt werden.

So ist ein wichtiger Faktor für die Entwicklung der Elektromobilität die Einrichtung der notwendigen Infrastruktur. Konzepte für den Aufbau einer Ladeinfrastruktur sind genauso erforderlich wie die Weiterentwicklung des vorhandenen Stromnetzes. Zusätzlich ergeben sich Chancen für neue Geschäftsmodelle. Elektrofahrzeuge werden aufgrund der begrenzten Reichweite und der günstigen Haltungskosten interessant für Carsharing-Modelle und Fuhrparkbetreiber.

Neben diesen Herausforderungen hängt der Markterfolg der Elektrofahrzeuge im Wesentlichen von ihrer Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Fahrzeugen mit konventionellem

---

A. Kampker (✉)

Werkzeugmaschinenlabor (WZL), RWTH Aachen University, Steinbachstraße 19,  
52074 Aachen, Deutschland  
e-mail: a.kampker@wzl.rwth-aachen.de

D. Vallée (✉)

Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr, RWTH Aachen University,  
Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen, Deutschland  
e-mail: vallee@isb.rwth-aachen.de

A. Schnettler (✉)

Institut für Hochspannungstechnik, RWTH Aachen University, Schinkelstraße 2,  
52056 Aachen, Deutschland  
e-mail: schnettler@ifht.rwth-aachen.de

Antrieb ab. Aufgrund der Mehrkosten der Batterie sind Elektrofahrzeuge jedoch deutlich teurer in der Herstellung und unterliegen damit in der Folge einem hohen Kostendruck. Da 80 % der Herstellkosten schon in der frühen Phase der Produktentwicklung festgelegt werden, gewinnt das Thema der integrierten Produkt- und Prozessentwicklung im Bereich der Elektromobilität an Relevanz.

Das vorliegende Buch greift die genannten Aspekte auf und gibt einen umfassenden Überblick über die Ansätze zur Weiterentwicklung der Elektromobilität. Neben der Produkt- und Prozessentwicklung werden auch die Themen Infrastruktur und Geschäftsmodelle in den veränderten Wertschöpfungsprozessen behandelt.

Im zweiten Kapitel werden die Herausforderungen der Elektromobilität näher erläutert, eingeführt durch eine historische Betrachtung. Im Anschluss werden die Kernherausforderungen zusammenfassend dargestellt und Lösungsansätze in den Themenfeldern Infrastruktur, neue Wertschöpfungsketten und Integrierte Produkt- und Prozessentwicklung skizziert.

Das dritte Kapitel widmet sich dem Thema Infrastruktur. Mobilitätskonzepte sowie die städteplanerischen Aufgaben stehen hier im Mittelpunkt. Dazu gehören auch die Entwicklungsbedarfe im Stromnetz und die Möglichkeiten von intelligenten Abrechnungssystemen. Zur Infrastruktur zählen ebenfalls Servicebetriebe, die sich auf die neuen Anforderungen einstellen müssen, entsprechende Ansätze werden vorgestellt.

Die Veränderungen in der automobilen Wertschöpfungskette werden in [Kap. 4](#) diskutiert. Neben den erforderlichen neuen Wertschöpfungsschritten wird die Beziehung zwischen Automobilherstellern und Zulieferern betrachtet. Zudem werden neue Geschäftsmodelle untersucht und zusätzliche Mobilitätsdienstleistungen benannt.

[Kapitel 5](#) gibt einen Überblick über die Veränderungen in der Automobilindustrie, die durch die Elektromobilität hervorgerufen werden. Dies betrifft vor allem die Fahrzeugkonzeption und den Entwicklungsprozess, die Funktionsauslegung, Eigenschaften und Attribute eines Fahrzeugs sowie das Gesamtsystem Fahrzeug. Die ganzheitliche Darstellung erfolgt aus Kunden-, Produkt- und Prozesssicht. Betrachtet werden die relevanten Fahrzeugklassen, in denen Elektromobilität sich zuerst durchsetzen wird, die Auswirkungen der revolutionären Veränderung auf den Entwicklungsprozess sowie das Package von Elektrofahrzeugen. Dem folgt die Diskussion der notwendigen, geänderten Funktionsauslegung, der geforderten Eigenschaften und Attribute von Elektrofahrzeugen im Hinblick auf Leichtbau, Akustik und Noise Vibration Harshness (NVH), der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) als auch des derzeit sehr interessanten Themas der funktionalen Sicherheit.

Den Abschluss bildet [Kap. 6](#) mit einer Betrachtung der neuen Komponenten. Dazu zählen der elektrische Motor, Umrichter, Powertrain Control Unit (PCU) bzw. Vehicle Control Unit (VCU), Batteriesystem und Battery Control Unit (BCU) und Ladesystem. Zudem werden Veränderungen gegenüber der konventionellen Bauweise bei Karosserie, Thermomanagement sowie Bordnetz und Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) dargestellt.

---

Das Buch liefert einen Gesamtblick auf das Thema Elektromobilität. Dazu war das Fachwissen einer Vielzahl von Experten erforderlich. Wir bedanken uns ganz herzlich bei allen Autorinnen und Autoren, die an diesem Buch mitgewirkt haben. Sie machten es mit ihren Ideen und ihrem Fachwissen möglich, dieses Buch herauszugeben. Ebenso bedanken wir uns beim Springer-Verlag für die äußerst kooperative und professionelle Zusammenarbeit.

Paul Thomes, Achim Kampker, Dirk Vallée,  
Armin Schnettler und Garnet Kasperk

---

P. Thomes (✉)

Lehr- und Forschungsgebiet Wirtschafts- und Sozialgeschichte, RWTH Aachen University,  
Kackertstraße 7, 52072 Aachen, Deutschland  
e-mail: paul.thomes@wiso.rwth-aachen.de

A. Kampker (✉)

Werkzeugmaschinenlabor (WZL), RWTH Aachen University, Steinbachstraße 19,  
52074 Aachen, Deutschland  
e-mail: a.kampker@wzl.rwth-aachen.de

D. Vallée (✉)

Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr, RWTH Aachen University, Mies-van-der-Rohe-  
Straße 1, 52074 Aachen, Deutschland  
e-mail: vallee@isb.rwth-aachen.de

A. Schnettler (✉)

Institut für Hochspannungstechnik, RWTH Aachen University, Schinkelstraße 2,  
52056 Aachen, Deutschland  
e-mail: schnettler@ifht.rwth-aachen.de

G. Kasperk (✉)

Center for International Automobile Management, RWTH Aachen University,  
Templergraben 64, 52056 Aachen, Deutschland  
e-mail: garnet.kasperk@rwth-aachen.de

## 2.1 Elektromobilität – Zukunftstechnologie oder Nischenprodukt?

### 2.1.1 Elektromobilität – eine historisch basierte Analyse

Paul Thomes

#### 2.1.1.1 Motivation und Methode

Elektromotoren in mobilen Anwendungen besitzen eine rund 180-jährige Tradition. Ihre Ursprünge fallen unmittelbar mit der Praxistauglichkeit des Elektromotors in den 1830er Jahren zusammen, technisch ergänzt 1859 durch die Erfindung des Bleiakkumulators und die Siemens'sche Entdeckung des dynamo-elektrischen Prinzips im Jahr 1866. Das Konzept ist damit älter als die mobile Verwendung von Verbrennungsmotoren, die auf dem 1876 patentierten Ottomotor basierenden und erstmals 1885/1886 durch Daimler und Benz realisiert wurden. Allerdings ist es weitaus jünger als der Wagenantrieb mittels Dampf. Dessen Geschichte lässt sich bis in die zweite Hälfte des 18. Jahrhunderts zurückverfolgen. Die schienengebundene Variante Dampfisenbahn katapultierte seit den 1820er Jahren, ausgehend von Großbritannien, dem Mutterland der Industrialisierung, die Effizienz und die Qualität des Transports von Menschen und Gütern in ungeahnte Dimensionen und generierte damit neue Anreize für den bis dato überwiegend pferdebewegten Straßenverkehr (Schiedt et al. 2010; Voigt 1965; Weiher und Goetzler 1981).

Auch das erste bis heute bekannte seriengefertigte Auto setzte 1878 auf Dampftrieb. Das erste Elektroauto fuhr wahrscheinlich 1881 in Frankreich als Drei- und Vierrad. Siemens stellte ein Jahr später mit dem „Elektromote“ in Berlin den weltweit ersten Oberleitungsbus vor; die erste O-Buslinie startete 1904. Ein Elektroauto mit dem bezeichnenden Namen „La Jamais Contente“ wiederum bewegte 1899 erstmals einen Menschen auf der Straße schneller als 100 km/h. Ein Elektroauto der bekannten französischen Marke Krieger, die ihre Taxis international vertrieb, schaffte 1901 ohne Nachladen eine Strecke von über 300 km mit einer mittleren Geschwindigkeit von knapp 20 km/h, während 1906 ein Dampfwagen zuerst die magische Marke von 200 km/h durchbrach (Abt 1998; Georgano 1996; Kirsch 2000; Mom 1997, 2004; Redaktion Berliner Verkehrsseiten 2011; Weiher und Goetzler 1981).

Die wenigen Daten indizieren dreierlei: Die Geschwindigkeit im Landverkehr, die zuvor über Jahrtausende konstant geblieben war, erhöhte sich rasant und führte zu einem geänderten Mobilitätsbewusstsein. Es gab äußerst rege Aktivitäten auf einem sich gerade entwickelnden neuen Wachstumsmarkt. Sie fielen zusammen mit einem Kopf-an-Kopf-Rennen der Antriebskonzepte. Dieser Prozess dauerte rund zwei Jahrzehnte, ehe sich seit Anfang des 20. Jahrhunderts die bis heute gültigen Strukturen herauszubilden begannen, geprägt vom in Anlehnung an Kuhn (Kuhn 1962) bezeichneten Verbrenner-Paradigma (Canzler und Knie 1994; Dienel und Trischler 1997; Möser 2002; Rammler 2004). Die seinerzeit noch als verheißungsvoll zu bezeichnenden Marktchancen des Elektroautos – Georgano (Georgano 1996) charakterisiert die Jahre von 1900–1920 als „Golden Age“ – fielen in sich zusammen.

Insbesondere der Technikhistoriker Gijs Mom (Mom 1997, 2004) hat sich auf der Suche nach den Ursachen für den frühen Karrierebruch „des Autos von Morgen“ akribisch, systematisch und philosophisch mit den historischen Zusammenhängen auseinandergesetzt. Im Ergebnis identifiziert er eine Mischung aus technischen und soziokulturellen Faktoren als für die Paradigmenentscheidung verantwortlich, die gleichzeitig, quasi dialektisch, das Auto als Mobilitätssystem zum Erfolg führte (Canzler und Knie 1994; Möser 2002).

Ausgehend von der Annahme, dass jede Technik das Ergebnis menschlicher Aktion ist, wird das Auto im vorliegenden Buch als sozio-technisches Konstrukt definiert. Entsprechend findet ein gemischter deduktiver und induktiver, Technik und Kultur verbindender Erklärungsansatz Anwendung (Abt 1998, nach Ropohl 1979). Er bezieht sich weitgehend auf die industrialisierte Welt des Globus und inkludiert alle automobilen Nutzungsarten, die aufgrund spezifischer Bedingungen phasenweise eine bestimmende Rolle spielten und spielen.

Ziel ist die Analyse der Prozess bestimmenden Faktoren und Bedingungen von Elektromobilität im Vergleich zum Verbrenner-Paradigma. Die Leitfrage ist, weshalb das moderne Normalauto zwar voll elektrifiziert ist, seine Kraftquelle aber (immer) noch konventionell arbeitet – und ein Paradigmenwechsel, verbunden mit der Durchbrechung des derzeitigen Wegs, noch auf sich warten lässt, und zwar trotz aller Dringlichkeit angesichts der Neige gehender Ölvorräte und der negativen Klimaprognosen.

### 2.1.1.2 Paradigmenbildung – Öl statt Strom

Die Ausgangsbasis der Untersuchung bildet neben einer vergleichenden quantitativen Bestandsaufnahme eine Stärken-Schwächen-Analyse (SWA) der beiden Antriebskonzepte Verbrennungs- und Elektromotor. Die Analyse erfasst zunächst den Zustand vor dem Ersten Weltkrieg, der u. a. dem Verbrenner-Paradigma zum Durchbruch verhalf.

Ein Blick auf das Vorreiterland der automobilen Fortbewegung, die USA, zu Beginn des 20. Jahrhunderts bestätigt, dass noch keine Vorentscheidung für ein Antriebsprinzip gefallen war. Rund 40 % der Kraftfahrzeuge fuhren mit Dampf, 38 % setzten auf Strom und 22 % auf Benzin. In New York erreichten die Elektroautos 1901 eine Quote von 50 % bei den automobilen Fahrzeugen, gefolgt von Dampfautos mit etwa 30 %. Was absolute Zahlen angeht, so bauten in den USA 1912, auf dem Höhepunkt der Entwicklung, 20 Hersteller beachtliche 33.842 Elektroautos. Allein in Detroit, der Elektroauto-Hochburg der USA, waren 1913 rund 6.000 Einheiten zugelassen. Andererseits kamen im gleichen Jahr landesweit bereits mindestens 80.000 Einheiten des seit 1908 von Ford gebauten Model T auf die Straße. Was das Typenspektrum angeht, waren 1914 alle heutigen im privaten und kommerziellen Bereich bekannten Varianten vorhanden, vom Sportwagen bis hin zum 10-Tonner-Schwerlastwagen (Abt 1998; Banham 2002; Model T Ford Club of America 2011; Georgano 1996; Kirsch 2000; Möser 2002; Mom 1997; Rao 2009).

Mit bahnbrechenden Leistungen tat sich der österreichisch-deutsche Konstrukteur Ferdinand Porsche hervor. Auf der Pariser Weltausstellung des Jahres 1900 präsentierte die Wiener Kutschenfabrik Lohner ein von Porsche entwickeltes Elektroauto.

Der „Semper Vivus“ – man beachte die Kombination aus neuer Technik und alter Sprache – erregte ob seiner innovativen Technik im Zentrum des europäischen Autoland Frankreich großes Aufsehen. Mit zwei Radnabenmotoren an der Vorderachse gilt er als erstes transmissionsloses und vorderradgetriebenes Auto. Der Wirkungsgrad soll bei über 80 % gelegen haben. Eine 410 kg schwere Bleibatterie sorgte für 50 km/h Höchstgeschwindigkeit und bis zu 50 km Reichweite bei einer Normleistung von rund 2,5 PS pro Motor. Eine Rennversion gilt mit ihren vier Radnabenmotoren mit einer Leistung von bis zu je 7 PS und einem gewaltigen Batteriegewicht von 1.800 kg als das erste Allradauto. Nicht viel später folgte mit dem „Mixte“ als erstem seriellen benzin-elektrischen Hybrid ein weiterer Meilenstein. Die Preise des Lohner-Porsche begannen ab 8.500 Mark, dem zehnfachen Jahresdurchschnittslohn eines Arbeiters. Abnehmer war die europäische Avantgarde der Adligen, Unternehmer und Künstler. Insgesamt wurden von dem Prestigeobjekt 300 Einheiten gebaut. Zum Vergleich: Der erste Opel kostete 1899 als günstiges Benzinfahrzeug mit 4 PS und Luftreifen 4.300 Mark, der legendäre erste Mercedes des Jahres 1901 mit 35 PS rund 16.000 Mark (Barthel und Lingnau 1986; Fersen 1982, 1986; Lewandowski o. J.; Norton 1985; Seherr-Thoss 1974).

Die kurze quantitative Bestandsaufnahme bestätigt zwei wesentliche Vermutungen. Zum einen spiegelt sie das ausgeprägte individuelle menschliche Mobilitätsbedürfnis, denn es verging jeweils nur eine kurze Zeit zwischen der Erfindung der Antriebstechnologie und ihrer mobilen Anwendung. Zum anderen offenbart sie, dass zu Beginn des 20. Jahrhunderts noch ein enger Zusammenhang zwischen dem Zeitpunkt des Markteintritts des Antriebskonzeptes und dem Verkaufserfolg bestand. Dieses Schema sollte sich bald ändern. Denn wie bereits angedeutet trat nicht viel später der 1876 patentierte Ottomotor seinen Siegeszug als Automobilantrieb an, während die Dampfmaschine ob ihres begrenzten Minimierungspotenzials nicht nennenswert weiter verfolgt wurde (Abt 1998; Kloss 1996; Lewandowski o. J.; Möser 2002).

Die SWA kommt für die Zeit der Jahrhundertwende zu folgendem Ergebnis. Als Stärken des Elektroautos galten insbesondere sein leichter, anspruchsloser und drehmomentstarker Antrieb, die einfache Bedienung, unterstützt durch eine gut dosierbare Geschwindigkeitsregelung, sodann die Effizienz in Gestalt mäßiger Betriebskosten und einer guten Zuverlässigkeit sowie seine Umweltverträglichkeit in Form einer geringen Geräusch- und Geruchsentwicklung. Gerade die letzteren Eigenschaften halfen, die verbreiteten Widerstände – man denke an die berühmt-berüchtigten britischen „Red Flag Acts“ – zugunsten des Autos generell aufzuweichen. Nicht zuletzt galt es ja, die Straßennutzungsrechte unter den Verkehrsteilnehmern neu aufzuteilen, und da war das leise Elektroauto eher im Vorteil; ebnete mit diesen Fähigkeiten nebenbei auch dem Benzinauto den Weg.

Als Schwächen galten zunehmend die begrenzte Reichweite und Geschwindigkeit sowie die aufgrund von mechanischen Schäden recht kurze Batterielebensdauer, als Folge von Kälteempfindlichkeit und Erschütterungsanfälligkeit. Ein Lebenszyklus von 6.000 km war aber bereits machbar. Kostentreibend wirkten die dämpfenden und der Beschleunigungsbeanspruchung standhaltenden Luftreifen. Als psychologisches

Moment wird aus der männlichen Nutzerperspektive gemeinhin der fehlende Spaßfaktor angeführt, der aus der Kombination von leichter Beherrschbarkeit und Zuverlässigkeit resultierte. Auch zum geschwindigkeitsfixierten ‚Sport‘ taugte das Elektroauto nur bedingt. Die spezifischen Unternehmensstrukturen mögen ebenfalls als Schwäche gegolten haben. Überwiegend konstruierten die Hersteller die Autos nicht selbst, sondern bauten sie aus zugelieferten Teilen zusammen, was die technische Entwicklung gehemmt haben könnte (Abt 1998; Mom 1997; Norton 1985; Sauter-Servaes 2011).

Als schärfste Bedrohung des Elektroautos sollte sich freilich die rasche Entwicklung der Verbrennungsmotorentechnologie erweisen. Das Benzinauto eignete sich so einerseits die positiven Eigenschaften seines elektrischen Konkurrenten an. Insbesondere die verbesserte Zuverlässigkeit und Handhabbarkeit, bspw. durch die optimierte Geschwindigkeitsdosierung, den Elektrostarter und tauglichere Aufbauten, verkürzten den Komfortvorsprung des Elektroautos. Andererseits konnten die Fahrer nach wie vor der „Lust an den Vibrationen des Verbrennungsmotors“ ebenso wie dem geschwindigkeitsaffinen „joy riding“ frönen (Mom 1997), während die Reichweite trotz höherer Geschwindigkeiten ebenfalls wuchs. Dies korrespondierte mit sich verändernden individuellen mobilen Bedürfnissen, die ebenfalls zulasten des Elektroautos zu gehen drohten.

Die Herausforderungen für das Elektroauto-Konzept zu Beginn des 20. Jahrhunderts lassen sich leicht identifizieren. Es musste sich dem Benzinkonkurrenten angleichen und zugleich weiter an eigener Kontur gewinnen. Es galt, den Ausbau der Versorgungsinfrastruktur ebenso rasch voranzutreiben wie die Batterietechnik, und vielleicht würde ja ein kritischeres Umweltbewusstsein im Kontext mit tendenziell steigenden Einkommen die Marktchancen gerade in den wachsenden städtischen Verdichtungsräumen zumindest stabilisieren. Diese Faktoren angenommen, würden aus höherer Nachfrage resultierende Skaleneffekte schließlich auch den sich abzeichnenden Preisnachteil gegenüber dem Benzinauto kompensieren.

Vor diesem Hintergrund veränderte sich das Elektroauto zwischen 1905 und 1925 in vielerlei Hinsicht. Letztlich lassen sich alle Applikationen identifizieren, die auch heute angewandt und diskutiert werden. Nicht nur Porsche experimentierte mit elektromotorischen Range-Extendern. Zur Verlängerung der Betriebszeiten setzte man schon 1896 Batteriewechselsysteme in Taxis ein. Zugleich wurden die Batterien robuster und leistungsfähiger. Damit wuchsen Radius und Geschwindigkeit. Überdies wurde die Batterietechnik mit erstaunlichen Ergebnissen im Bereich Schnellladung ebenso weiterentwickelt wie die Ladeinfrastruktur. So gab es in den USA u. a. eine Schnellladestationskette zwischen Philadelphia und Boston. Solche Anlagen trugen einerseits dazu bei, das Elektroauto von seinem Image als Stadtauto zu befreien. Andererseits dokumentieren sie die potenzielle Investitionsbereitschaft und damit den Glauben an den Erfolg des Konzeptes (Kirsch 2000; Mom 2004).

Allerdings gab es auch mindestens zwei bedeutende Rückschläge: Der seit 1912 seriell verbaute elektrische Anlasser für Benzinmotoren, bspw. seit 1919 in Fords Model T, bedeutete den Verlust eines wichtigen Wettbewerbsvorteils des Elektroautos, vor allem bei weiblichen Nutzern. Das „lady image“ des Elektroautos mutierte zum „old

lady image“ (Georgano 1996), obwohl nicht gesichert ist, ob Frauen tatsächlich eine relevante Kundengruppe darstellten. Gleichwohl war dies ein Baustein im Set der Misserfolgskriterien. Zu allem Überfluss bot kurz darauf der Erste Weltkrieg dem Verbrennungskonzept die Möglichkeit, seine Leistungsfähigkeit unter schwierigsten Bedingungen überzeugend unter Beweis zu stellen; die umfassendere Motorisierung der alliierten Truppen gilt als ein kriegsentscheidendes Kriterium. Dies hatte langfristige Folgen, da die forcierte Entwicklung von Benzinmotoren zusammen mit der Massenproduktion die Preise sinken ließ und das Elektroauto ein weiteres Mal ins Hintertreffen geriet (Abt 1998; Barthel und Lingnau 1986; Fersen 1986; Möser 2002; Mom 2004; Seherr-Thoss 1974).

Zwar gab es in den frühen 1920er Jahren noch eine kurze Erfolgswelle (Mom 2004), sie beruhte aber lediglich auf der Wiederaufnahme der zivilen Produktion nach dem Krieg. Es entstand kein Boom, vergleichbar etwa mit demjenigen der Benzinwagen in dieser Zeit. Schon bald darauf folgte der Rückzug des Elektroauto-Konzeptes in bestimmte Nischen, wo es unter gewissen Bedingungen dem Benziner überlegen war.

Die SWA, bezogen auf die 1920er Jahre, fällt ernüchternd aus. Sie belegt, dass die Optimierung des Konzeptes nicht ausreichte, um den Markterfolg zu sichern. Zwar wurden die Herausforderungen angenommen, der Durchbruch gelang aber nicht. Vielmehr bildete sich im zweiten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts das bis heute gültige Verbrenner-Paradigma vollständig aus, und zwar auch deshalb, weil der Aufbau konkurrierender Straßenverkehrsinfrastrukturen volkswirtschaftlich gesehen wenig Sinn machte. Das Elektroauto-Konzept als Zukunftstechnologie verhalf zwar dem Auto entscheidend zum Durchbruch und ist deshalb als Erfolg zu werten, konnte sich aber trotz beachtlicher Technikfortschritte (noch) nicht gegen den Verbrennungsmotor behaupten.

### **2.1.1.3 Leben in der Nische – Spezialfahrzeuge als Know-how-Speicher**

Trotz der Niederlage wurde das Konzept weiter ausgebaut, und zwar dort, wo es nicht auf Geschwindigkeit ankam, sondern auf die Bereitstellung von sauberer Leistung in vorhersehbaren Abläufen und einem fest definierten Aktionsradius. In dieser Nützlichkeitsphäre lebte das Prinzip des „elektrischen Pferdes“ fort (Mom 2004). Seit den 1920er Jahren begegnen Elektroautos überwiegend kommerziell genutzt als Kleintransporter in geschlossenen Räumlichkeiten wie Hallen und Lägern, wo Emissionsfreiheit ein Muss war. Im Außeneinsatz stabilisierten sie vor allem im städtischen Umfeld in Form von Omnibussen, Müllwagen und bei der Anlieferung von Milch, Post und Zeitungen ihre Position und nach 1945 reihte sich immer wieder einmal ein Vorkriegsmodell mutig in den Verkehr ein. In Ostberlin sollen noch in den 1960er Jahren Exemplare der in den 1920er Jahren von Bergmann gebauten 2,5-Tonner-Kleinlastwagen zu sehen gewesen sein; auch ein Indiz für die Langlebigkeit der Technologie (Georgano 1996).

In Deutschland existierten in der Zwischenkriegszeit mindestens zwölf Hersteller. Für die zweite Hälfte der 1930er Jahre geht man von etwa 5.000 zugelassenen Elektroautos aus, wovon etwa die Hälfte im Bereich der lokalen Postzustellung eingesetzt wurde.

Als spezielle deutsche Entwicklung gelten Elektrotraktoren. Oberleitungsbusse verbreiteten sich ebenfalls. Die kriegsvorbereitende NS-Autarkiepolitik spielte hier eine Rolle. Gleiches gilt für die erstmalige Normung von Batterien. Dabei traten die bekannten konzeptionellen Schwächen auch jetzt wieder vor allem im Winter auf (Abt 1998; Georgano 1996; Möser 2002).

Ein besonders Elektroauto-affiner Markt war Großbritannien (GB). Hier dominierte ebenfalls der Einsatz im Elektroauto-freundlichen lokalen „stop and go“-Liefer- und Entsorgungsgeschäft. Die Stadt Birmingham hatte 1917 bis 1971 ununterbrochen Elektroautos im Fuhrpark, das letzte Fahrzeug wurde 1948 angeschafft. Das britische Elektroauto-Highlight aber war und ist der „small electric van“, der vor allem als Auslieferungswagen für Milch und Brot reüssierte. Anfang der 1930er Jahre beförderte er rund 500 kg Nutzlast über 30 km weit. 1946 waren 7.828 dieser leichten, meist mit Batteriewechselsystemen ausgestatteten, als „milk-float“ bezeichneten Elektroautos in GB registriert. Zwei britische Milchwagen-Hersteller starteten sogar einen Elektro-Pkw-Neuanfang. Ein viersitziges Coupé im „petrol-car styling“, basierend auf einer 64-V-Batterie, schaffte 1935 eine Höchstgeschwindigkeit von 42 km/h bei einer Maximalreichweite von 64 km. Es verkauften sich nur 40 Exemplare, wofür nicht zuletzt der Preis von 385 Pfund den Ausschlag gab. Er lag fast das Doppelte über dem des populären Morris Ten, der annähernd 100 km/h erreichte. In den USA begann zu dieser Zeit (1930) die bis heute währende Erfolgsgeschichte der zweisitzigen „golf-carts“ und verwandter „shopping-carts“ (Georgano 1996; Sauter-Servaes 2011).

Der Zweite Weltkrieg mit seiner umfassenden Kraftstoffknappheit führte im besetzten Frankreich zu einer mangelgetriebenen kleinen Blüte des leichten Elektroautos. 50 verschiedene Typen sollen bis 1942 entstanden sein, keiner davon erreichte auch nur annähernd Großserienstatus. Interessant ist diese Entwicklung deshalb, weil man Elektroantriebe in Benziner-Chassis einsetzte; eine fortan häufig geübte Praxis. Das Verbrenner-Paradigma dokumentiert die Tatsache, dass ein 1946 auf dem ersten Pariser Nachkriegssalon gezeigter CGE-Tudor-Pkw nicht in Serie ging. Neue Pkw-Versuche in den USA scheiterten ebenfalls, obwohl Reichweiten und Geschwindigkeiten von je knapp 200 km realisiert wurden (Georgano 1996; Möser 2002).

Die Ursachen des neuerlichen Scheiterns lagen im Verhältnis von Leistung und Kosten, das sich nach 1945 deutlich zugunsten des Benziners veränderte. Ähnliches gilt für den Omnibus- und Lkw-Bereich, wo seit den 1920er Jahren der sparsame und in der Leistungscharakteristik dem Elektromotor ähnliche Dieselantrieb zum Einsatz kam. Die Deutsche Post stoppte aus diesem Grund ein nach dem Krieg gestartetes Elektro-Lkw-Projekt. Ein Übriges tat in der BRD die seit 1955 geltende Besteuerung der Elektroautos nach Gewicht, die in der Tat diskriminierend wirkte und die verbliebenen Hersteller wie etwa Gaubschat, Lloyd und Esslingen die Produktion einstellen ließ. Ein Gaubschat Elektro-Paketwagen, Baujahr 1956, angetrieben von einem Motor der Aachener Firma Garbe-Lahmeyer, war bis 1984 im Aluminiumwerk Singen in der internen Postzustellung im Einsatz. In GB behauptete sich die Tradition der Milchwagen und erreichte in den 1970er Jahren mit immerhin mehr als 50.000 Einheiten den höchsten

Stand. In keinem anderen Land der Erde waren jemals mehr Elektroautos im Einsatz (Abt 1998; Barthel und Lingnau 1986; Bonin et al. 2003; Fersen 1986; Georgano 1996).

Isolierte Elektroauto-Inseln entstanden in den autofreien Erholungsorten der Schweiz. In Zermatt, wo seit 1931 ein Autoverbot galt, wuchs ihre Zahl seit 1947 beständig, als ein Privatmann sich das erste Elektroauto, wahrscheinlich aus britischer Produktion, zulegte. Es gab viele Varianten. Da die schweizerische Elektrizität zudem überwiegend aus Wasserkraft stammt, galten sie als regenerative Verkehrsmodelle, trotz Verkehrsstaus in Stoßzeiten. Einige Familienbetriebe bauten die Elektroautos vor Ort.

Die weltpolitischen Krisen der 1950er Jahre, wie der Koreakrieg und die Suezkrise 1956, führten zu ersten kleinen Ölpreisschocks, hatten aber keine Auswirkungen auf das Paradigma. Öl überschwemmte geradezu die Märkte. Es gab also keine Notwendigkeit, sich vom Verbrennungsmotor abzuwenden, der überdies im Pkw-Diesel eine ökonomischere Ergänzung bekommen hatte. Zugleich begann das Zeitalter der individuellen Massenmobilisierung. Der Benziner war dafür das ideale Vehikel nach US-amerikanischem Vorbild (Andersen 1999; Bonin et al. 2003; Möser 2002; Thomes 1996; Voigt 1965). Dass der Landmaschinenhersteller Allis-Chalmers 1959 erstmals einen auf dem seit 1838 bekannten Brennstoffzellenprinzip basierenden, einsatzfähigen Traktor mit 20 PS und einem Wirkungsgrad von 90 % zeigte, ging völlig unter.

Die Zukunft des Elektroautos war ungewiss, wenn man einmal von den britischen „milk floats“ absieht. Technik- und Gebrauchsparadigma etablierten sich wechselwirksam nach dem US-Muster in einem stabilen, verbrennungsbasierten Automobilisierungspfad (Rammler 2004).

#### **2.1.1.4 Renaissance eines Zukunftskonzeptes**

Eher unverhofft öffnete das sich im Zeitalter des Überflusses entwickelnde Umweltbewusstsein dem Elektroauto-Konzept eine neue Chance, das nun rund 50 Jahre währende Verbrenner-Paradigma aufzuweichen. Den Anfang machten einmal mehr die USA, wo die wachsende ökologische Sensibilisierung (Smog) seit Mitte der 1960er Jahre infolge eines ersten „Clean Air Acts“ die Suche nach Alternativen zum Benzinauto verstärkte, während der Vietnamkrieg und die Hippiebewegung die Gesellschaft generell kritischer werden ließen. Die erfolgsverwöhnten Giganten Ford und General Motors testeten die umgerüsteten Alltagsmodelle Cortina und Opel Kadett als Demonstrationsobjekte auf der Basis von Blei- und Zinkbatterien. Zwei kleinere Firmen vertrieben umgebaute Renaults in zweistelliger Zahl und 1968 kam General Electric mit einem Versuchsträger, der zur Beschleunigung innovativ Zink- und zum Cruisen Nickelbatterien einsetzte. Neben dem Showeffekt mag auch die Hoffnung auf die baldige Verfügbarkeit leistungsfähigerer Batterien die Aktivitäten angeregt haben (Adams 2000; Möser 2002; Wehler 2008).

Da man sich in den USA aber nicht auf verbindliche gesetzliche Regelungen einigen konnte, blieb es wie in der Anfangszeit bei unkoordinierten Anstrengungen von einzelnen Autoanbietern und von Interessengruppen wie der Elektroindustrie, Elektrizitätserzeugern und Batterieherstellern. Auch eine systematische Forschung kam nicht zustande. Ein Langstreckenwettbewerb zwischen MIT und CalTech brachte 1968 die

ernüchternde Erkenntnis, dass man sich kaum vom Stand der 1920er Jahre entfernt hatte, denn die Durchschnittsgeschwindigkeit lag bei 25 km/h. Da besaß der fast gleichzeitig ebenfalls in den USA von Jerry Kugel in Kooperation mit Ford mit seinem „Lead Wedge“ erzielte Geschwindigkeitsrekord von rund 223 km/h nur statistischen Wert. Erst die Verschärfung des Umweltrechts zu Beginn der 1970er motivierte zu koordinierter Aktion.

Die US-Aktivitäten regten aber weltweit das Interesse an Elektroautos neu an. Die 1972 publizierte Studie des Club of Rome mit dem mahnenden Titel „Die Grenzen des Wachstums“ und die schockierende Ölpreiskrise 1973/74 trugen dazu bei, dass rund um den Erdball neue Nutz- und Personenwagen als Versuchsträger gebaut wurden und sich koordinierte Strukturen bildeten (Georgano 1996). Beteiligt war der komplette Fahrzeug- und Zuliefermarkt. Allerdings handelte es sich bei den Fahrzeugen in der Regel um umgerüstete Benzinern, wie etwa seit 1976 die frühen CitiSTROMER auf der Basis des VW Golf. Ausnahmen im Sinne des Purpose-Designs bildeten 1967 der Comuta, ein Stadtwagen der Ford-Werke, 1969–1976 durch einen griechischen Reeder finanziert, der auf der Insel Syros gebaute Enfield, ein 1974 in Amsterdam als Witkar lanciertes kommunales Micro-E-Carsharing-Konzept oder ein Stadtauto-Prototyp von Fiat 1976 (Abt 1998; Georgano 1996; Witkar 2011). Zu dieser Zeit stellte die Deutsche Bundesbahn 1977 den regulären Dampflokbetrieb ein, während alle Hauptstrecken elektrifiziert waren. Die Großserienproduktion von Elektroautos lag dagegen nach wie vor in weiter Ferne. Denn neben immer noch ungelösten Problemen wie Infrastruktur, Reichweite und Kosten war die Situation der globalen Emissionsreduzierung auf der Basis konventioneller fossiler Stromerzeugung ein weiteres Hemmnis.

Mitte der 1980er Jahre, als die zweite Ölkrise kurzzeitig bewusstseinsbildend wirkte, wurden der Fahrzeugtyp des Vans und Firmenflotten als Abnehmer als optimale Kombination für die Etablierung eines Elektroauto-Marktes definiert. Zudem gelang die lange erwartete Effizienzsteigerung der Batterieenergiedichte und mit der Wiederentdeckung der Brennstoffzelle als Antriebsmodul tauchten neue Perspektiven auf. Parallel zum stetig wachsenden Umweltbewusstsein gab es wieder kleinere Elektroauto-Hersteller. Sogar Selbstbaukits erschienen auf dem Markt, während etablierte Hersteller vermehrt Kleinwagen umrüsteten (Canzler und Knie 1994; Georgano 1996; Möser 2002). Die sich verdichtende Gesetzgebung der Folgejahre, verbunden mit immer konkreteren Maßnahmenkatalogen, verbesserte zwar die Rahmenbedingungen, aber eine erfolgreiche Markteinführung scheiterte erneut an hohen Kosten bei anfangs kleiner Stückzahl in Verbindung mit fehlenden Infrastrukturen, niedrigen Benzinpreisen, dem administrativen Unwillen zu anreizorientierter Marktsteuerung und dem freiheitsgeprägten, individuellen Mobilitätsbedürfnis (Abt 1998; Möser 2002; Norton 1985; Sauter-Servaes 2011).

Als 1990 Kalifornien das „Zero Emission Vehicle“ gesetzlich verankerte, setzte dieser Schritt ein weltweites Zeichen, unterstützt durch die Forderung nach ökologischer Stromerzeugung. Die IAA 1991 bspw. sah eine Reihe von Studien und Prototypen vor, u. a. von BMW, Mercedes, Opel und VW (Barthel und Lingnau 1986). Ebenfalls 1991 präsentierte Hercules das Electra als erstes Serienfahrrad. Ein Jahr später baute Ford

den Ecostar mit NaS-Batterie und einer mittleren Reichweite von 150 km. Über 100 Exemplare legten bis 1996 mehr als 1,6 Mio. Kilometer zurück, ehe sich Ford wegen Problemen mit der Batterietechnik auf die Entwicklung der Brennstoffzelle konzentrierte. Der Konkurrent GM brachte 1996 das berühmte EV1 im eigenständigen Purpose-Design auf den Markt. Bis 1999 entstanden 1.117 Exemplare, von denen etwa 800 an ausgewählte Kunden, darunter zahlreiche Prominente, gingen. EV1 spielte 2006 die Hauptrolle in dem Film „Who Killed the Electric Car?“, der sich in Form einer kritischen Akteurs-Analyse mit den Ursachen für das Scheitern des Elektroautos befasste.

Als deutsches Beispiel sei der 1992 in Kooperation mit Siemens neu aufgelegte Golf CitySTROMER genannt. Ausgestattet mit einem 20-kw-Drehstrom-Synchronmotor, Blei-Gel-Batterien und einem steckdosentauglichen Ladegerät kam er in drei Versionen auf rund 120 Exemplare. Die Aufbruchstimmung spiegelte sich auch in E-Flottenversuchen von Telekom und Post. Auf der Insel Rügen begann ein von der Bundesregierung finanzierter Elektroauto-Feldversuch, an dem sich fast alle namhaften Hersteller von Fahrzeugen und Komponenten beteiligten. Das Verbrenner-Paradigma schien zu wanken, das Auto sich neu zu definieren. Doch einmal mehr ließen die Praxisresultate das Unterfangen scheitern; bezeichnend dafür ist, dass der Vorreiter Kalifornien die gesetzlichen Ziele lockern musste (Abt 1998; Sauter-Servaes 2011; o.V. 1996). Das in der BRD prognostizierte Marktpotenzial von „acht bis neun Millionen Fahrzeugen“ erwies sich als ebenso illusorisch wie eine Shell-Studie, die bis 2010 rund 1,2 Mio. prognostizierte; dies bei knapp unter 2.000 Elektro-Pkw in 1996. 15 Jahre später, Anfang 2011, bewegten sich ganze 2.307 Elektro-Pkw und 37.256 Hybrid-Pkw auf Deutschlands Straßen (Kraftfahrt-Bundesamt 2011). Das Verbrenner-Paradigma hat also auch im dritten Jahrtausend Bestand, obwohl Oil Peak und Erderwärmung drängender denn je ein sofortiges Umdenken anmahnen, zahlreiche Staaten den Erwerb von Elektroautos subventionieren, alle Hersteller das Elektroauto oder Hybride im Angebot haben und der Ideenvorrat an Lösungsmöglichkeiten für das Mobilitätsbedürfnis unbegrenzt zu sein scheint. Ob bzw. wann sich das Elektroauto 130 Jahre nach seiner Jungfernfahrt vom ‚Stigma‘ der Zukunftstechnologie befreit, bleibt abzuwarten (auto motor und sport 2011; Canzler und Knie 1994; Deutsches Museum München 2010; Mom 2004).

### **2.1.1.5 Von der Zukunftstechnologie zum Paradigma?**

Die historische Analyse offenbart, dass die technischen Grundlagen aller Varianten von Elektromobilität bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts bekannt waren. Das Scheitern beruht letztlich auf einer Kombination von technischen, ökonomischen und psychologischen Faktoren, die seit den 1920er Jahren zu einem sich rasch verfestigenden Verbrenner-Paradigma führten. Seit Ende der 1960er Jahre änderten sich die Rahmenbedingungen, da die Ökologie als weiteres, mächtig an Gewicht gewinnendes Agens hinzukam, während sich die ökonomischen Koordinaten ebenfalls seit einiger Zeit zugunsten des Elektroautos verschieben.

Bislang verhinderte ein psychologisch-technischer System-Lock-in-Effekt den Durchbruch. Er führte zur Stigmatisierung des Elektroautos als Nischen- und

Zukunftskonzept, das in Krisensituationen – durchaus mit Placebo-Funktion – immer wieder auflebte, ohne das geltende Mobilitätsparadigma ernsthaft zu hinterfragen. So lautet der aus historischer Perspektive zu ziehende Schluss: Die angestrebte Entkopplung von CO<sub>2</sub>-Ausstoß und Verkehrsleistung bedarf einer strukturellen, auf der Basis langfristigen Nutzens optimierte ganzheitlichen Neudefinition von Mobilität. Die Welt braucht kurzfristig ein Gesamtkonzept regenerativer Mobilität. Gefragt sind alle Verkehrsträger integrierende Lösungen im Güter- und Personentransport, verbunden mit einer Verkehrsbedarfsoptimierung und einer möglichst strikten Aufgabentrennung zwischen den Verkehrsträgern. In einem solchen Konzept erhält das Auto einen neuen Stellenwert, der seinen Status als Universalfortbewegungsmittel beschneidet und zugleich dem Elektroauto die Chance eröffnet, integrierter Bestandteil des Zukunftsmobilitäts-Paradigmas zu werden (Thomes und Jost 2009). Neue, am zukünftigen Bedarf orientierte Elektroauto-Typen sind in diesem Gesamtkonzept nur ein wichtiger Bauteil unter vielen.

### 2.1.2 Aktuelle Herausforderungen der Elektromobilität

Achim Kampker, Christoph Deutsdens und Alexander Meckelnborg

Das Thema „Elektromobilität“ erfährt zurzeit eine große mediale Aufmerksamkeit und wird in der Bevölkerung vielfältig diskutiert. Aufgrund der Erkenntnis, dass herkömmliche Verbrennungsmotoren eine absehbar schwindende Ressource unter Erzeugung von klimaschädlichem Gas (CO<sub>2</sub>) verbrennen, rücken alternative Antriebstechnologien in den Fokus. Dabei handelt es sich bei der Elektromobilität, wie das vorherige Kapitel aufgezeigt hat, keineswegs um eine neue Erfindung. Die Technologie wurde lediglich „wiederentdeckt“, da sie Fortbewegung ohne CO<sub>2</sub>-Ausstoß ermöglicht.

Es ist gesellschaftlicher Konsens, dass eine der wichtigsten Anforderungen auch heute schon der effiziente Umgang mit Energie ist. Obwohl das Optimierungspotenzial des klassischen Verbrennungsmotors nicht völlig ausgeschöpft ist, bleibt ein Wechsel zu alternativen Antriebstechnologien zukünftig notwendig. Elektrofahrzeuge stellen hierbei eine Schlüsseltechnologie auf dem Weg zu energieeffizienter und umweltschonender Mobilität dar (Spath und Pitschetsrieder 2010; Hanselka und Jöckel 2010).

In diesem Kapitel wird zunächst eine Einführung in die wichtigsten Herausforderungen der Elektromobilität gegeben, von denen einige im späteren Verlauf präzisiert werden. Sowohl technisch geprägte Aspekte als auch ökonomisch-wirtschaftliche Überlegungen spielen eine große Rolle. Es gilt, in diesem Zusammenhang verschiedene Fragestellungen zu beleuchten: Welche Hürden muss das Elektroauto aus technischer Sicht nehmen, um als ausgereiftes Produkt auf dem Markt wirtschaftlich erfolgreich zu sein, und wie ist dabei die Bedeutung des Kostendrucks einzuschätzen? Wie sieht die allgemeine Marktentwicklung aus und welche Konsequenzen ergeben sich für die Hersteller von Elektroautos? Ein weiterer Fokus liegt auf der Produktionstechnik.

Bisherige Produktionsstrategien für Elektrofahrzeuge werden kritisch beleuchtet und Alternativen aufgezeigt.

### 2.1.2.1 Unsichere Marktsituation

Die Frage nach der Marktentwicklung lässt sich anhand historischer (vgl. [Kap. 2.1.1](#)) und aktueller Zahlen darlegen. Wie verschiedene Studien belegen, ist für Elektrofahrzeuge in den kommenden 15 Jahren lediglich ein Marktanteil von ca. 3 % zu erwarten. Da stellt sich die Frage, ob die Elektromobilität eine echte Zukunftstechnologie ist. Auf den ersten Blick erscheint es wahrscheinlicher, dass sich die Technologie aufgrund der hohen Investitionskosten und des geringen Ertragspotenzials nicht durchsetzen wird. Die Studie „Elektromobilität 2025“ kommt in dieser Frage zu einem eindeutigen Ergebnis:

*„Elektrofahrzeuge entscheiden über die langfristige Überlebensfähigkeit der Automobilindustrie“.*  
(Wyman 2009a)

Bisher verfügen jedoch nur wenige Automobilhersteller über ein marktreifes Elektrofahrzeug, weltweit konnten 2009 ca. 100.000 Fahrzeuge mit rein batteriebetriebenen Antrieb abgesetzt werden. Im Gesamtmarkt machen Elektromobile damit lediglich einen Anteil von 0,1 % aus (Wyman 2009a). Gleichzeitig hat die Automobilindustrie mit unterschiedlichsten Problemen, Hürden und Herausforderungen zu kämpfen.

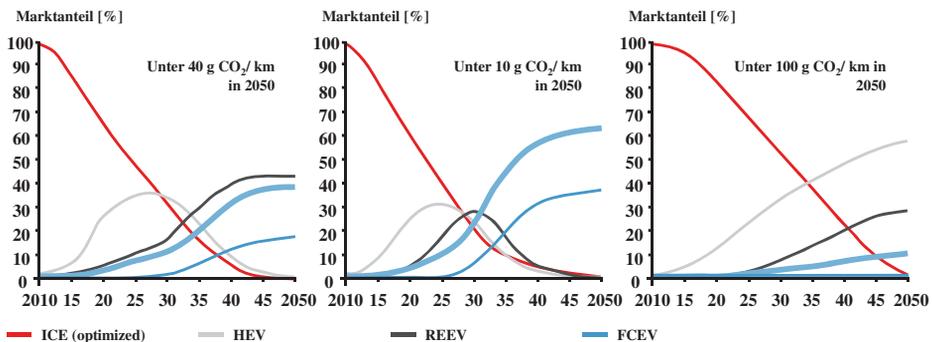
Die globale Marktentwicklung stellt die Automobilhersteller vor große Anstrengungen, besonders für Elektro- und Hybridfahrzeuge ist die Marktsituation als unsicher zu bezeichnen. Einerseits öffnen sich internationale Märkte immer stärker für westliche Automobilhersteller, wie bspw. aktuell wachsende Absatzzahlen in den sog. BRIC-Ländern (Brasilien, Russland, Indien, China) nahe legen. Andererseits gelingt es bspw. den chinesischen Automobilherstellern zunehmend, an westliche Produktions- und Qualitätsstandards heranzukommen. Damit steigt das Risiko, dass Absatzmärkte wegbrechen und die Absatzzahlen weder gehalten noch gesteigert werden können (McKinsey 2011).

Eine weitere Herausforderung identifizieren Studien in der langsamen Wachstumsgeschwindigkeit des Marktes für Elektrofahrzeuge. Die Prognosen weisen darauf hin, dass sich im Jahr 2025 weltweit ca. 15 Mio. batteriebetriebene Fahrzeuge auf dem Markt befinden werden. Gemessen an dem voraussichtlichen Fahrzeugbestand 2025 macht dies weniger als 1,5 % aus. Besser sieht die Prognose für Hybridantriebe aus, wobei hier die verschiedenen technischen Varianten eines Hybridantriebs berücksichtigt werden müssen: Während sog. Voll-Hybride voraussichtlich in Asien und Nordamerika, vornehmlich bei SUVs (Sport Utility Vehicle), Absatz finden werden, bilden Mild-Hybride eine zukünftige Basistechnologie für mittlere bis große Autos. Obwohl die Prognose der nächsten 15 Jahre für diese Antriebe zusammengenommen besser aussieht, werden sie insgesamt nur auf ca. 9 % Marktanteil kommen (Wyman 2009a).

Neben der unsicheren Situation auf den Absatzmärkten steht die Industrie zusätzlich durch die Gesetzgebung zu CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Fahrzeugen unter Druck. Diese Entwicklung verlangt nicht nur die Optimierung bestehender Antriebstechnologien,

sondern weist stark auf hybride Antriebstechnologien oder batteriebetriebene Fahrzeuge hin (Wyman 2009a). Laut einer Studie von Oliver Wyman werden im kommenden Jahrzehnt die Investitionen in die CO<sub>2</sub>-Reduktion global auf ca. 300 Mrd. Euro beziffert. Von diesem Investitionsvolumen entfallen ca. 50 Mrd. Euro auf alternative Antriebe (Hybrid oder Elektroantrieb) (Wyman 2009a). Die Gesetzgebung für CO<sub>2</sub>-Emissionen steht jedoch noch nicht abschließend fest, wodurch sich zusätzliche Unsicherheitsfaktoren ergeben. Die Industrie muss sich aber auf Vorgaben und Richtungen seitens der Legislation verlassen können, um Investitionen in zukünftige Technologien zu tätigen. Abhängig davon, wie restriktiv die Gesetzesvorgaben für CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Fahrzeugen ausfallen werden, sind verschiedene Entwicklungsrichtungen denkbar. Die gemeinsam von McKinsey und dem Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen durchgeführte Studie formuliert basierend auf drei möglichen Regulierungsrichtlinien verschiedene Szenarien für zukünftige Antriebsentwicklungen (s. Abb. 2.1).

Wie Abb. 2.1 zeigt, entsteht bei einer gemäßigten Regulierung mit angepeilter CO<sub>2</sub>-Emission von ca. 95 g CO<sub>2</sub>/km in 2050 kein unmittelbarer Innovationsdruck. Gleichzeitig ist jedoch langfristig die Entwicklung alternativer und CO<sub>2</sub>-sparender Antriebe unumgänglich. Anders sieht es bei einer mittleren Beschränkung mit vorgegebenen Grenzwerten für Emissionen von ca. 40 g CO<sub>2</sub>/km aus. In diesem Fall liegt eine stärkere Restriktion vor, die bis 2030 zu einer Dominanz vollelektronischer Antriebstechnologien führen würde. Berücksichtigt die Gesetzgebung dagegen die allgemeinen Weltklimaziele für den CO<sub>2</sub>-Ausstoß, so käme eine sehr strikte Regelung zustande. Mit Emissionswerten von ca. 10 g CO<sub>2</sub>/km würde ein solches Szenario bereits bis 2025 optimierte Antriebstechnologien und Mild-Hybrid-Antriebe deutlich benachteiligen (s. Abb. 2.1). Die Industrie sähe sich einem starken Innovationsdruck



**Abb. 2.1** Die zukünftigen Marktanteile der Antriebskonzepte sind abhängig von der Entwicklung der gesetzlichen CO<sub>2</sub>-Grenzwerte. *Legende* ICE Internal Combustion Engine, HEV Hybrid Electric Vehicle, REEV Range Extended Electric Vehicle, FCEV Fuel Cell Electric Vehicle, BEV Battery Electric Vehicle. *Quelle* McKinsey/WZL (2011). *Studie* Boost!; Marktanteile weltweit

**Abb. 2.2** Potenzial der Komponenten im automobilen Antriebsstrang nach McKinsey (2011)

„rising stars“	„transformers“	„under pressure“
Thermomanagement	Getriebe	Motorblock und Zylinderköpfe
Elektromotor	Turbolader	Einspritzsystem
Leistungselektronik	Bremsen	
Batteriepack		

hin zu vollelektrischen Antriebssystemen ausgesetzt. Dementsprechend sind die treibenden Kräfte bei den Marktentwicklungen in dieser Hinsicht noch nicht ausreichend geklärt, um Planungssicherheit zu gewährleisten (McKinsey 2011). Um die unsichere Marktsituation abzufangen und die Investitionskosten zu reduzieren, sind Förderprogramme und Subventionen gefragt. Die Bundesregierung hat bereits teilweise auf die Forderungen reagiert und ein umfassendes Unterstützungsprogramm angekündigt. Vorgesehen ist dabei die gezielte Förderung und Unterstützung für die Forschung und Entwicklung in diesem Bereich.

Während die Entwicklung der Elektromobilität für einige Hersteller, bspw. von Komponenten des Verbrennungsmotors, zukünftig wirtschaftliche Probleme aufwerfen wird, bedeutet die gleiche Entwicklung für andere Hersteller eine große Chance am Markt. Aufgeschlüsselt nach den verschiedenen Komponenten finden sich Hersteller, die von dieser Entwicklung langfristig bzw. kurzfristig profitieren werden (die sog. „rising stars“ bzw. die sog. „transformers“), und Hersteller, die unter starkem Druck geraten werden („under pressure“) (McKinsey 2011) (Abb. 2.2).

Während bspw. die Hersteller von Elektromotoren marktwirtschaftliche Vorteile aus der Entwicklung von elektrifizierten Antriebstechnologien ziehen, sehen sich die Hersteller herkömmlicher Verbrennungsmotoren mit möglichen Verlusten konfrontiert.

Aspekte wie bspw. die Bereitschaft der Verbraucher, für ein „grünes“ Auto mehr zu bezahlen, haben ebenfalls großen Einfluss auf die Entwicklung der Elektromobilität als Zukunftstechnologie. Die im Rahmen der Studie „Elektromobilität 2025“ durchgeführte Kundenbefragung hat eindeutig ergeben, dass die Verbraucher nicht bereit sind, Abstriche bei Nutzung, Sicherheit oder Fahrkomfort in Kauf zu nehmen. Außerdem ist die Mehrpreisbereitschaft bei den Verbrauchern zwar grundsätzlich vorhanden, aber nicht ausgeprägt genug (Wyman 2009a). Diese Rahmenbedingungen stellen eine weitere Herausforderung dar.

### 2.1.2.2 Kostendruck

Die Entwicklung von Elektrofahrzeugen braucht ein hohes Volumen an Anfangsinvestitionen in neue Produktionsanlagen und Forschung. Andererseits liegt der aktuelle Preis für Elektrofahrzeuge aufgrund der Mehrkosten der Batterie deutlich über dem Preis vergleichbarer Autos mit Verbrennungsmotor. Damit ist der entscheidende

Faktor für den Durchbruch dieser Technologie genannt: die Kosten. Es ist die Preisfähigkeit der Elektrofahrzeuge, die darüber entscheiden wird, ob die Technologie flächendeckend erfolgreich ist.

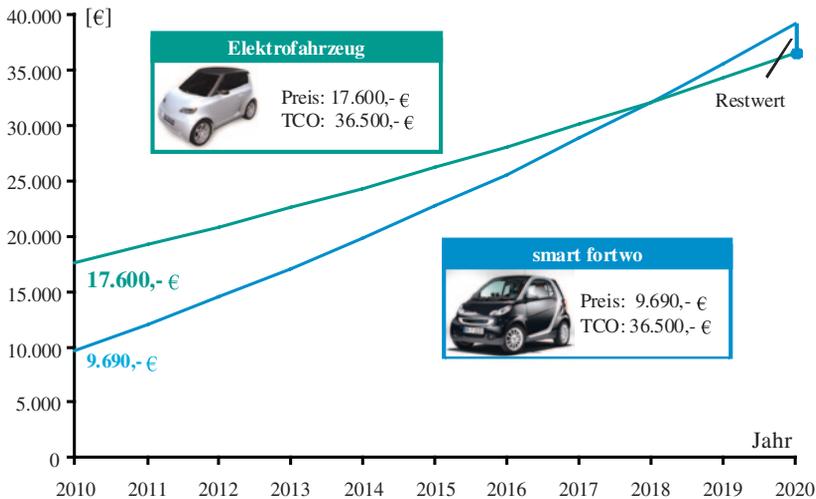
Wie aktuelle Studien nachweisen, sind die Kunden bereit, geringe Mehrkosten für ein Elektroauto zu tragen. Aktuell zeichnet sich ab, dass die Bereitschaft der Verbraucher, für ein Elektrofahrzeug mehr zu bezahlen, nicht die Spanne der Mehrkosten für ein solches Fahrzeug im Vergleich zu konventionellen Autos abdeckt (McKinsey 2011). Dabei stellt sich jedoch nicht nur die zentrale Frage, ob diese Bereitschaft ausreicht, sondern wie lange der gegenwärtige Trend hin zu „grünen“ Antriebstechnologien anhält. McKinsey und das WZL prognostizieren in ihrer Studie ein wachsendes Bedürfnis vor allem jüngerer Käufergruppen nach umweltfreundlichen und „grünen“ Technologien.

Die Initiative der Bundesregierung zur Förderung der Elektromobilität wird mit den vorgesehenen Steuervergünstigungen und Investitionsförderungen einen wichtigen Beitrag leisten, den Kostendruck zu verringern. Trotzdem zeichnet sich darüber hinaus keine gravierende Erleichterung beim Kostendruck ab. Studien kommen zu dem Ergebnis, dass die aktuellen Kosten für die Herstellung eines durchschnittlichen Elektromobils ca. 200 % über denen eines herkömmlichen Fahrzeugs liegen. Die gleichen Studien prognostizieren (unter Berücksichtigung der oben genannten Erleichterungen) auch für die Zukunft keine deutliche Verbesserung, die Mehrkosten eines Elektrofahrzeugs werden 2025 immer noch ca. 60 % betragen (McKinsey 2011; Wyman 2009a).

Der entscheidende Kostentreiber beim Elektroauto ist die Batterie. Bei Kosten von ca. 400–600 Euro pro Kilowattstunde (kWh) und einer Kapazität für einen Kleinwagen von ca. 15 kWh liegt der Preis alleine für eine Batterie bereits bei 7.500 Euro (McKinsey 2011). Effektive Wege, die Kosten für die Batterie zu senken und somit konkurrenzfähiger zu werden, zeichnen sich derzeit ausschließlich bei der Optimierung der Herstellungsprozesse ab.

Ein weiterer Kostentreiber ist die Infrastruktur, die für Elektrofahrzeuge neu entwickelt bzw. umstrukturiert werden muss (vgl. Kap. 2.2). Die vergleichende Beispielkalkulation der Kosten für ein Elektroauto (Kleinwagen 2015, Reichweite ca. 200 km, Viersitzer) und ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor identifiziert folgende Kostenstruktur (Abb. 2.3).

Die gezeigten Kosten berücksichtigen und a. einen anvisierten reduzierten Preis für die Batterie des Elektrofahrzeugs und prognostizierte Energiekosten mit einer Dynamik von 3–5 %, unter der Annahme, dass Elektrofahrzeuge mit einem BEV-Antrieb ca. 14 kWh auf 100 km benötigen, zu einem Preis von etwa 0,25 Euro pro kWh und einer Fahrleistung von 100.000 km. Dann sind diese Fahrzeuge bei den Verbrauchszahlen günstiger als ein herkömmliches Auto. Bei einem Spritpreis von 1,60 Euro pro Liter und einem durchschnittlichen Verbrauch von ca. 4,8 l/100 km ergeben sich deutlich höhere Kosten bei einer Fahrleistung von 100.000 km. Dieser Effekt verstärkt sich, wenn die stetig steigenden Benzinkosten mit in die Kalkulation einbezogen werden.



**Abb. 2.3** Durch die identifizierten Kostentreiber liegt der Anschaffungspreis eines Elektroautos noch deutlich über dem eines vergleichbaren Autos mit Verbrennungsmotor. *Quellen* eigene Berechnungen, smart, ADAC, RWTH Aachen, *BMWi BEV* Battery Electric Vehicle, *TCO* Total Costs of Ownership

### 2.1.2.3 Technische Hürden und unsichere Technologieentwicklung

Elektrofahrzeuge sollen wettbewerbsfähig sein, auch in direkter Konkurrenz zu herkömmlichen Fahrzeugen. Durch die Erweiterung der marktgeprägten Sichtweise und die Verbraucherperspektive ergeben sich zusätzliche Dimensionen bei den Anforderungen. Die Bevölkerung und in Teilen der Gesetzgeber werden Kompromisse bei der Sicherheit und Zuverlässigkeit von Elektrofahrzeugen ebenso wenig akzeptieren wie überdurchschnittlich hohe Anschaffungs- und Haltungskosten. Bezogen auf die Batterie stellt sich eine hohe technische Hürde dar. Aktuelle Batteriesysteme haben nicht nur eine eingeschränkte Reichweite, sondern sind teuer in der Anschaffung (s. o.), die Lebensdauer ist verbesserungswürdig und die anschließende umweltverträgliche Entsorgung der ausgetauschten Batterien ist nicht einfach. Aktuell zeichnen sich hier zwei grundverschiedene Ansätze ab: Einerseits finden sich viele Befürworter für fest installierte Batterien in den Fahrzeugen, die regelmäßig wieder aufgeladen werden. Andererseits wurden Konzepte basierend auf Wechselsystemen angedacht, um der Problematik der Reichweite zu begegnen (Hanselka und Jöckel 2010). Bei diesen Systemen werden die Batterien nicht aufgeladen, sondern regulär an Servicestationen ausgetauscht. Den Argumenten für ein Wechselsystem (Problem der Reichweite wird teilweise gelöst) stehen die berechtigten Einwände gegenüber, dass solche Systeme einen hohen Logistik- und Lageraufwand beinhalten und hohe Kosten für die Infrastruktur verursachen. Gegen eine fest installierte Batterie spricht dagegen die Tatsache, dass das Problem des kontinuierlichen Leistungsverlustes bei Lithium-Ionen-Batterien noch nicht gelöst ist. Weiterhin stellt sich bei diesem Ansatz die Frage nach dem Aufladen der Batterie. Noch verfügt kein

Land über eine Infrastruktur von Aufladestationen oder über alternative, dezentral organisierte Konzepte.

In den letzten Jahren hat sich die Lithium-Ionen-Batterie als geeigneter Energiespeicher für die Anwendung in Elektroautos etabliert. Ungeklärt ist dabei jedoch die Frage, welcher Zelltyp sich in der Zukunft durchsetzen wird. Der bekannteste Typ ist die sog. Rundzelle, die auch im täglichen Leben zum Einsatz kommt. Diese Batterie verfügt über den Vorteil, dass langjährige Erfahrungen mit dem Zelldesign vorliegen und sie über eine hohe Lebenserwartung verfügt. Gleichzeitig benötigt die Rundzelle eine anspruchsvolle Kühlung. Die sog. Coffee-bag-Zelle bietet dagegen sehr gute Kühleigenschaften und eine hohe Energiedichte. Negativ ist bei diesem Zellentyp, dass die Elektroden nicht einfach gestapelt werden können und die Abdichtung der Batterie mit einem hohen Aufwand verbunden ist. Einige der genannten Vorteile der Rundzelle und der Coffee-bag-Zelle vereint die sog. Prismatische Zelle (bspw. bessere Abdichtung, gute Lebenserwartung). Sie kann darüber hinaus im Gegensatz zur Coffee-bag-Zelle einfach verbaut werden.

An diese Problematik schließt sich direkt das Thema des Thermomanagements im gesamten Fahrzeug an. Je nach Temperaturentwicklung müssen sehr viele verschiedene Bereiche und Komponenten des Gesamtfahrzeugs gekühlt oder geheizt werden. In konventionell angetriebenen Autos finden sich zwar eine Motorkühlung und eine Innenraumklimatisierung, diese Konzepte sind nicht auf Elektrofahrzeuge übertragbar. Da die Batterie unabhängig von der Außentemperatur in einem sehr kleinen Temperaturbereich gehalten werden muss, ist die Regelung des Thermomanagements im Gesamtfahrzeug wesentlich anspruchsvoller als in herkömmlichen Fahrzeugen. Zusätzlich fallen bisher genutzte Synergieeffekte weg, da der elektrische Antriebsstrang, im Gegensatz zum herkömmlichen Antrieb, deutlich weniger Abwärme erzeugt. Diese Wärmeenergie, bspw. für die Heizung der Fahrerkabine, fällt also weg. Zudem müssen die unterschiedlichen Heiz- und Kühlkreisläufe so gestaltet sein, dass sie mit ihrem Bedarf an elektrischer Energie nicht unnötig die Batterie des Fahrzeugs und damit die Reichweite belasten. Insgesamt steht die Entwicklung des Thermomanagements damit vor mehrdimensionalen Problemen (Flik 2009).

Für Elektrofahrzeuge stellt die maximal mögliche Reichweite ein zentrales Erfolgskriterium dar, weshalb alle Systeme im Gesamtfahrzeug (nicht nur das Thermomanagement) so ausgerichtet sein müssen, dass sie die Batterie und damit die Reichweite so wenig wie möglich belasten. Hieraus ergibt sich für die Elektronik des Fahrzeugs die Notwendigkeit von bedarfsgerechten Systemen. Zielvorgabe ist, dass die Systeme bei möglichst geringem Verbrauch an elektrischer Energie absolute Sicherheit und Systemzuverlässigkeit gewährleisten (Hanselka und Jöckel 2010).

Die Technologieentwicklung steht neben dem großen Themenkomplex von Batterie und Leistungselektronik im Gesamtfahrzeug vor weiteren Herausforderungen. So hat sich bisher noch keiner der unterschiedlichen Antriebsansätze und Elektromotoren (Asynchronmotor, Synchronmotor, geschaltete Reluktanzmaschine usw.) eindeutig durchgesetzt. Auch bei den Antriebskonzepten (Mild-Hybrid, Full-Hybrid, Range-Extended-Vehicle) zeigt die Vielfalt, dass die momentane Entwicklung noch

unentschieden und damit unsicher ist. Welche Technologie sich letztendlich durchsetzen wird, hängt von vielen Faktoren ab. Es ist bspw. noch nicht abschließend geklärt, in welche Richtung der Innovationsdruck seitens der Gesetzgebung zu Emissionswerten wirken wird und welche Strategie der Technologieentwicklung die Automobilhersteller wählen werden.

#### **2.1.2.4 Herausforderungen aus produktionstechnischer Sicht**

Die Automobilindustrie verfolgt momentan das sog. Conversion-Design als Strategie für die Produktion von Elektrofahrzeugen. Dabei wird lediglich der Verbrennungsmotor bestehender Fahrzeuge durch einen Elektroantrieb ersetzt. Diese Vorgehensweise erscheint zunächst sinnvoll, da Überkapazitäten durch die Integration in bestehende Produktionslinien genutzt werden können und nicht in neue Produktionsanlagen investiert werden muss. Als Strategie für die Zukunft ist es jedoch wenig vielversprechend, da die so produzierten Fahrzeuge auf dem Markt nicht konkurrenzfähig sind. Zudem bleiben die Potenziale eines voll elektronischen Fahrzeugs bei dieser Strategie weitestgehend ungenutzt. Da der Verbrennungsmotor mit seinen speziellen Aggregaten und Subsystemen entfällt, ergeben sich für den Bauraum völlig neue Nutzungspotenziale (Kampker und Döring 2009; Kampker und Reil 2009; Kampker et al. 2010).

Dagegen wird das sog. Purpose-Design dieser Problematik besser begegnen können. Es bietet die Möglichkeit, den Antriebsstrang, seine Komponenten und die dazugehörigen Produktionskonzepte neu zu definieren. Die Herausforderung liegt darin, eine Gesamtfahrzeugstruktur zu entwickeln, die die verschiedenen Potenziale eines Elektrofahrzeugs gestalterisch umsetzt. Gleichzeitig müssen die sehr unterschiedlichen Anforderungen der Fahrzeugkomponenten berücksichtigt werden (Kampker 2010). Ebenso sind die bisher bekannten Produktionsverfahren nicht in der Lage, die an sie gestellten Anforderungen für die kosteneffiziente Herstellung eines Elektroautos zu bewältigen: Gefragt ist ein günstiger Kleinwagen, der im direkten Vergleich mit konventionellen Fahrzeugen bestehen kann und weder Einschränkungen der Sicherheit noch der Reichweite aufweist (Schulte 2010).

Elektrofahrzeuge weisen bei der Karosserie häufig gegenüber der klassischen Schalenbauweise aus Stahl alternative Karosseriestrukturen auf. Dies ist zum einen darin begründet, dass Elektrofahrzeuge zu Beginn in geringen Stückzahlen produziert werden und dadurch Karosseriestrukturen vorteilhafter sind, die weniger Investitionen in Anlagen und Werkzeuge erfordern. Zum anderen besteht bei Elektrofahrzeugen aufgrund des hohen Gewichts der Batterie und der begrenzten Reichweite ein erhöhtes Potenzial, Leichtbaumaßnahmen umzusetzen. Bei den Prozessen im Karosseriebau führt dies zu vielfältigen Veränderungen. So werden bspw. Multimaterialverbindungen wichtiger, um u. a. CFK- und Aluminiumkomponenten miteinander zu verbinden. Aber auch die Vielfalt an Metallverbindungen nimmt durch den gestiegenen Einsatz von Aluminium und Magnesium zu. Eine detaillierte Darstellung der Veränderungen in der Karosserie und den Implikationen für den Karosseriebau ist in [Kap. 6.1](#) zu finden.

Die Produktion des Elektromotors ist grundsätzlich aus anderen Anwendungen bekannt. Dennoch werden mit dem Einzug des elektrischen Antriebsstrangs ins

Fahrzeug ganz neue Anforderungen an die Produktion des Elektromotors als Traktionsmotor gestellt. Ziel sollte es dabei sein, die Elektromotoren in einem vollautomatischen Produktionsprozess herstellen zu können, um den zukünftig zu erwartenden Stückzahlen von >100.000 Einheiten pro Jahr gerecht zu werden. Zum einen führen die produktbedingten Anforderungen zu Herausforderungen in der Produktion. Als Beispiel wäre hierfür die Vereinbarung von einer hohen Nennleistung zwischen 40 und 70 kW mit einem äußerst geringen Bauraum im Fahrzeug zu nennen. Für diese produktseitigen Anforderungen wird eine möglichst hohe Wicklungsdichte der Magnetspulen oder eine möglichst dünne Imprägnierschicht des Stators verlangt. Ebenfalls werden an den Elektromotor als Traktionsmotor viel höhere Qualitätsanforderungen gestellt als bspw. an einen Elektromotor für Staubsauger. Außerdem wird durch die zu erwartenden hohen Stückzahlen der Elektromotoren ein ressourcenschonender Einsatz der zu verbauenden Materialien und Komponenten vorausgesetzt. Betrachtet man in diesem Rahmen bspw. das vollautomatische Vergraben von bereits vormagnetisierten Magneten in permanenterregten Synchronmotoren, erschwert dies neben dem Handling und dem Bestücken der Magneten auch den anschließenden Wuchtprozess (vgl. [Kap. 6.2](#)).

Eine zentrale Herausforderung der Elektromobilproduktion ist die Beherrschung des Produktionsprozesses der Lithium-Ionen-Batterie. Obwohl noch zu Beginn der 1990er Jahre in Deutschland zur Lithium-Ionen-Technologie geforscht wurde, konnten diese Bemühungen nicht aufrecht gehalten werden. Vor dem Hintergrund der Anwendung von Lithium-Ionen-Batterien in den Wachstumsmärkten der Elektromobilität sowie der stationären Energiespeicher müssen Unternehmen ihre Forschungsbemühungen intensivieren, um im internationalen Vergleich den Rückstand beim Produkt- und Prozess-Know-how der Lithium-Ionen-Batterien aufzuholen. Derzeit sind die Produktionsprozesse der Batterie weder durchgehend automatisiert noch auf hohe Stückzahlen ausgelegt. Zudem bedingen das mangelnde Produkt-Prozessverständnis und eine unzureichende Qualifikation der Mitarbeiter eine große Streuweite in der Produktqualität. Der Produktionsprozess der Batteriezelle und der Montagevorgang des Batteriepacks sind weder hinsichtlich produktionssystematischer noch -technologischer Gesichtspunkte effizient ausgelegt, hier gibt es ein großes Verbesserungspotenzial (vgl. [Kap. 6.3](#)).

---

## 2.2 Infrastruktur für die Elektromobilität

Dirk Vallée und Armin Schnettler

Mobilität sichert die Teilnahme der Menschen und die Verteilung von Gütern an den persönlichen und ökonomischen Austauschprozessen. Dabei steht für die Menschen die Erreichbarkeit unterschiedlicher Aktivitätsorte wie Arbeitsplätze, Einkaufsmöglichkeiten, Ausbildungsstätten oder Kultur- und Freizeiteinrichtungen im Vordergrund. Für die Wirtschaft sind die Erreichbarkeit und zuverlässige Bedienung von und mit Rohstoffen, Halbfertigprodukten und Endprodukten relevant.

Für die Realisierung der Mobilität werden neben dem Gehen vielfältige Verkehrsmittel genutzt. Im Personenverkehr spielen das Fahrrad und weitere Zweiräder, der öffentliche Personenverkehr (Bus, Bahn) sowie der Pkw eine wichtige Rolle. Im Güterverkehr sind Lieferfahrzeuge und Lkw, die Bahn und Schiffe die dominierenden Verkehrsträger. Flugzeuge, Schiffe und Rohrleitungen sind hinsichtlich der Anzahl Transportvorgänge bzw. Wege eher nachgeordnet oder haben besondere Einsatzbereiche und Nutzungsarten, weshalb sie an dieser Stelle nicht vertieft behandelt werden.

Die überwiegende tägliche Mobilität spielt sich in Entfernungsbereichen zwischen wenigen 100 m bis zu rund 100 km ab. Die durchschnittliche Entfernung der etwa 3,4 am Tag zurückgelegten Wege beträgt nur jeweils rund 12 km (MiD 2008). Aufgrund der guten Infrastruktur, der hohen Verfügbarkeit von Pkw sowie der erforderlichen Flexibilität bei der Arbeitsplatzwahl sind aber auch tägliche Distanzen von 70–80 km keine Ausnahme. Als Verkehrsmittel werden das Fahrrad, der ÖPNV oder der Pkw genutzt. Viele Wege im Nahbereich werden zu Fuß zurückgelegt.

Wesentlich durch den motorisierten Verkehr in Städten und Regionen ausgelöste Probleme sind Staus, Luftverschmutzung und Lärm. Aus Gründen des Gesundheitsschutzes existieren auf europäischer Ebene inzwischen eine Vielzahl von Richtlinien zur Luftqualität und zum Lärmschutz (EG 2002, 2008), die bei Überschreitung bestimmter Grenzwerte von den Kommunen Maßnahmen zur Verbesserung der Situation verlangen. Dabei werden häufig temporäre bzw. lokale Fahrverbote oder Geschwindigkeitsbeschränkungen ausgesprochen, um die Lärm- und Abgasemissionen zu reduzieren. Hier verspricht die Elektromobilität deutliche Verbesserungen, da sie lokal keine Emissionen erzeugt. Zudem kann eine Abkoppelung von der Erdölabhängigkeit des Verkehrs erwartet werden, die heute bei rund 90 % liegt und zu knapp 20 % aller CO<sub>2</sub>-Emissionen bundesweit führt (Umweltbundesamt 2010). Für elektrische Mobilität stehen vielfältige Primärenergiequellen zur Verfügung, die bei geeigneter Verteil- und Ladeinfrastruktur die Elektromobilität sichern.

Eine deutliche Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen kann allerdings nur dann gelingen, wenn der Strom aus regenerativen Energien gewonnen wird. Die Gewinnung von Strom aus Windkraft, Photovoltaik und Biomasse muss gesteigert werden. Dies verlangt ausreichend dimensionierte Übertragungs- und Verteilungsnetze sowie ggfs. Speicherkapazitäten, da insbesondere die Stromerzeugung aus Wind- und Photovoltaik nicht kontinuierlich und an allen Orten gelingt. Darüber hinaus ist zu bedenken, dass bspw. durch die Biomasseerzeugung Nutzungskonflikte zwischen Nahrungsmittel- und Energiepflanzenanbau entstehen. Neben den erforderlichen regenerativen Formen der Stromerzeugung ist ebenfalls zu bedenken, dass eine verstärkte und evtl. mit starken Spitzen versehene Nachfrage nach Ladekapazitäten auch eine Verstärkung oder einen Ausbau der Niederspannungsnetze nach sich ziehen kann, worauf im Folgenden näher eingegangen wird. Dabei ist es erforderlich, dass nicht nur die benötigte Energiemenge (kWh), sondern auch die zum Bedarfszeitpunkt erforderliche Leistung (kW) zur Verfügung steht. Letzteres wird dazu führen, dass ein Ausbau der Netzinfrastuktur erforderlich wird und zudem – bspw. durch den Einsatz von Informations- und

Kommunikationselementen – durch intelligente Ladestrategien eine Überlastung der Infrastruktur vermieden wird. Es könnten im Fall einer Großstörung sogar dezentral stützende Maßnahmen vorgenommen werden.

## 2.2.1 Netzinfrastruktur

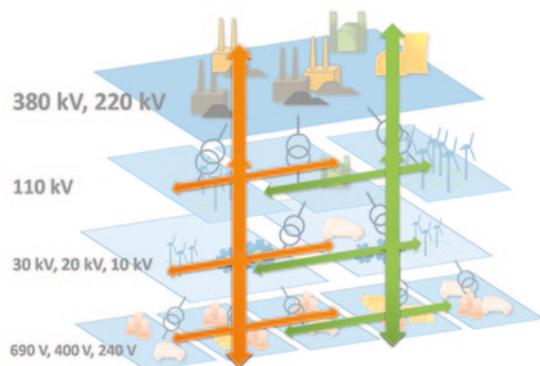
### 2.2.1.1 Generelle Struktur

Die Versorgung mit elektrischer Energie erfolgt durch die Stromnetze, die die Stromverbraucher mit den Erzeugungseinheiten mit einer sehr hohen Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit verbinden (Verfügbarkeit in Deutschland: >99,997 % bezogen auf die Endverbraucher). Klassisch erfolgte der Stromfluss von den (lastnah errichteten) Großkraftwerken (in Deutschland heute vorwiegend mit Kohle und Kernenergie betrieben) durch die Übertragungs- und Verteilungsnetze zu den Verbrauchern. Zukünftig wird sich der sog. Erzeugungspark in seiner Zusammensetzung deutlich zugunsten einer stärkeren Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien verändern (vornehmlich Wind, Photovoltaik, Wasser und Biomasse) (Abb. 2.4).

Es ist ein wesentliches Ziel, bis zum Jahr 2020 den Anteil dieser Energieträger an der Stromerzeugung auf über 30 % zu steigern. Aufgrund der starken Abhängigkeit der regenerativen Stromerzeugung von der Verfügbarkeit von Wind und Sonneneinstrahlung sind die Jahresnutzungsdauern deutlich geringer als bei anderen Energieträgern, sodass die installierten Leistungen deutlich höher sein müssen, als es der Energieanteil vermuten lässt (vgl. Tab. 2.1).

Die erheblich angestiegene Einspeisung durch Windenergie- und Photovoltaikanlagen bedingt einen sich häufig in seiner Richtung und Stärke ändernden Stromfluss (Lastfluss). Der zukünftig zu erwartende Stromerzeugungsmix wird diesen Trend weiter verstärken, sodass es häufig Situationen geben wird, in denen ein Überangebot an bzw. eine Unterdeckung von elektrischer Energie herrscht.

**Abb. 2.4** Struktur der zukünftigen Energieversorgung mit elektrischem Lastfluss (*rot*) und Informationsfluss (*grün*) („Smart Grids“)



**Tab. 2.1** Installierte Kraftwerksleistung in DE (Stand: Ende 2009)

Energieträger	2000	2009	Veränderung
Steinkohle	32,3	28,0	-4,3
Braunkohle	21,8	20,3	-1,5
Heizöl	7,5	6,0	-1,5
Gase	22,3	21,7	-0,6
Kernenergie	23,6	20,5	-3,1
Wasser	9,0	5,3	-3,7
Wind	6,1	25,8	+19,7
Photovoltaik	keine Angabe	9,8	
Biomasse	keine Angabe	4,6	
Sonstige	2,1	11,6	+9,5
<b>Insgesamt</b>	<b>124,7</b>	<b>155,5</b>	<b>+30,8</b>

Quelle BDEW, (Bemerkung: Zum Jahresende 2010 waren bereits etwa 17–18 GW an Photovoltaik-Leistung installiert (Wind: ca. 27 GW))

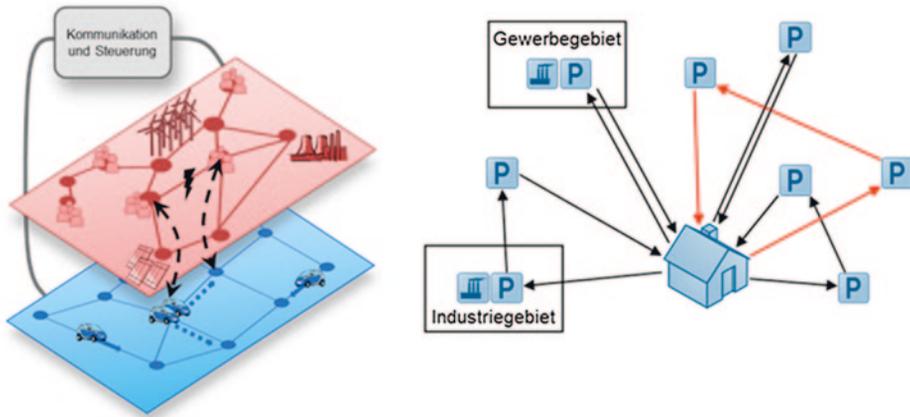
Entsprechend sind die elektrischen Netze auszubauen, Speichereinheiten oder steuerbare Verbraucher zu entwickeln bzw. in das Gesamtsystem zu integrieren, um einen kontinuierlichen bzw. erzeugungsgerechten Verbrauch elektrischer Energie zu ermöglichen.

Im Verteilungsnetz, das die Versorgung der Endverbraucher über die Spannungsebenen (10 und 20 kV bzw. 230/400 V (DIN IEC 38)) sicherstellt, wird der größte Anteil von Photovoltaikanlagen wie auch der Elektromobile angeschlossen. Damit gilt es, dezentrale (lastnahe und lastferne) Erzeugung mit den Versorgungsanforderungen von lokalen Speichern und Elektrofahrzeugen in Einklang zu bringen, sowohl für die sog. Anschlussleistung (voraussichtlich zwischen 2 kW und 44 kW) als auch für den Gesamtenergiebedarf (bei 22 % Durchdringungsgrad entsprechend ca. 8,5 Mio. Fahrzeugen, liegt der Energiebedarf bei ca. 18 TWh und damit unterhalb von 4 % des heutigen Stromverbrauchs).

### 2.2.1.2 Anforderungen an die Infrastruktur

Die Anschlussleistung der unterschiedlichen Elektrofahrzeuge ist heute noch nicht endgültig definiert und wird voraussichtlich zwischen 2 und 44 kW liegen. Aufgrund unterschiedlich gestalteter Netze sowie einer zu erwartenden inhomogenen Verteilung von Elektrofahrzeugen lassen sich die Auswirkungen auf die Netzauslastung nur durch umfangreiche Systemstudien und Szenarien beschreiben. Hierzu werden die erwarteten Verkehrsflüsse nachgebildet, die wiederum den Energiebedarf als Funktion des Ortes, des Verbrauchs und der Tageszeit simulieren (s. Abb. 2.5).

Dabei wird für eine betrachtete Region der zeitabhängige Energiebedarf pro Fahrzeug ermittelt und die resultierende Belastung auf die Verteilungsnetzkomponenten



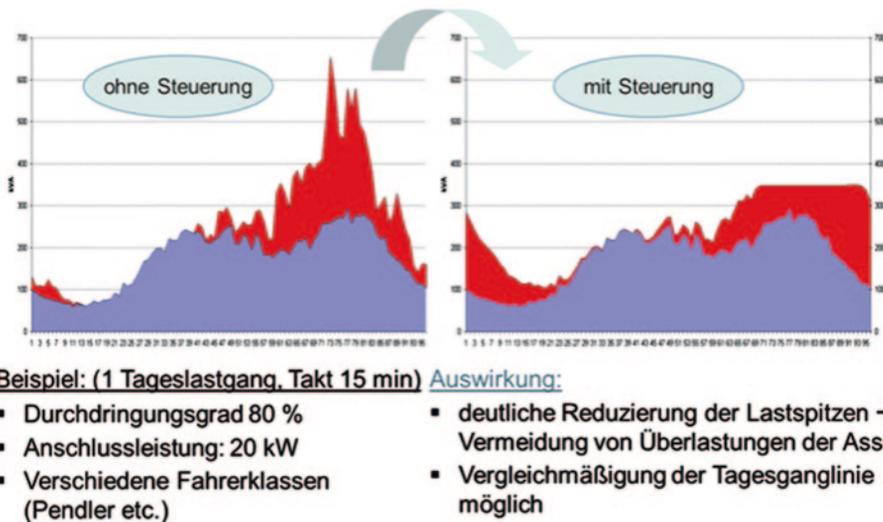
**Abb. 2.5** Gekoppelte Nachbildung der Verkehrsflüsse und der elektrischen Lastflüsse. *Quelle* ifht; RWTH Aachen University

berechnet. Eine wesentliche Belastung stellt der maximale Strom dar, der sich durch die an den unterschiedlichen Orten (Betriebsmitteln) auftretenden Einzelströme (der unterschiedlichen Verbraucher und Erzeuger) ergibt. Zudem muss sichergestellt sein, dass kein Betriebsmittel (Stecker, Schalter, Leitung/Kabel, Transformator etc.) außerhalb seiner zulässigen Grenzen betrieben wird (bspw. Nennbetriebsstrom). Neben der Einhaltung dieser Grenzwerte ist darauf zu achten, dass die Spannung im Verteilungsnetz die in den Normen vorgegebenen Spannungsbänder (Grenzwerte für minimale und maximale Spannung) einhält, bspw.  $\pm 10\%$  gemäß DIN EN 50160.

Gerade bei hohen Anschlussleistungen und hohen Durchdringungsgraden von Elektrofahrzeugen in Netzen mit geringer Lastdichte – bspw. ländliche Netze oder gemischt ländlich-städtische Netze – kann es zu einer unzulässigen Beanspruchung der Netzbetriebsmittel oder einer Verletzung der Spannungsbänder ( $\pm 10\%$ ) kommen. In solchen Fällen sind Gegenmaßnahmen zu ergreifen, die entweder die Ladeleistung verringern (und damit die erforderliche Ladezeit verlängern) oder einzelne Verbraucher (Elektrofahrzeuge oder sonstige steuerbare Verbraucher) temporär abschalten.

Exemplarisch zeigt Abb. 2.6 den Einfluss einer solchen Ladesteuerung auf die Auslastung des Verteilungsnetzes bei hohen Durchdringungsgraden über einen Zeitraum von 24 Stunden.

Es zeigt sich, dass eine aktive Steuerung unzulässige Betriebszustände vermeiden kann. Voraussetzung ist allerdings die Kenntnis über den aktuellen (und erwarteten) Zustand des Verteilungsnetzes (Strombelastung, Spannung). Dies erfordert die Integration von Sensoren und Kommunikationseinrichtungen bis in die Niederspannungsnetze (230 V), um aus den Zustandsdaten Maßnahmen zur Steuerung des Verteilungsnetzes bzw. der Verbraucher abzuleiten.



**Abb. 2.6** Auswirkung einer Ladeleistungssteuerung auf die Netzbelastung. *Quelle* ifht; RWTH Aachen University

## 2.2.2 Fahrzeuge, Einsatzmuster und Infrastrukturbedarf

### 2.2.2.1 Zweiräder

Zweiräder, insbesondere Fahrräder und emissionsarme motorisierte Zweiräder wie Pedelecs oder Roller, sind sehr stadtverträgliche Verkehrsmittel. Sie sind platzsparend, leise und lassen sich nahezu an allen Orten abstellen. Derzeit sind in Deutschland rund 70 Mio. Fahrräder vorhanden (MiD 2008), sodass rechnerisch nahezu jede Person über ein Fahrrad verfügt. Mit dem Fahrrad werden durchschnittlich knapp 10 % der täglichen Wege zurückgelegt, wobei die durchschnittliche Distanz eines Weges bei rund 5 km liegt (MiD 2008). Wesentliche Nutzungshemmnisse sind derzeit in der Witterungsabhängigkeit, der oft nicht besonders gut ausgebauten Wege-Infrastruktur, häufig fehlenden oder schwer zugänglichen vandalismus- und diebstahlsicheren Abstellmöglichkeiten sowie der erforderlichen Muskelkraft (beim Fahrrad) zu sehen. Allerdings zeigen Vergleiche zwischen den Städten in Deutschland sowie u. a. zu den Niederlanden, dass größere Nutzungspotenziale denkbar sind. So liegt die Fahrradnutzung in Münster mit 25 % deutlich über dem Bundesdurchschnitt und in den Niederlanden ist das Fahrrad ein alltägliches Verkehrsmittel für breite Bevölkerungsschichten.

Die Elektromobilität bietet die Chance, durch Fahrräder mit Unterstützungsantrieb das Manko Muskelkraft auszuschalten. Wird dies durch eine umfassende städtische Strategie zur Schaffung von Radwegen und Abstellmöglichkeiten flankiert, lassen sich auch die infrastrukturellen Voraussetzungen deutlich verbessern. Die Kapazität

der Akkus reicht heute für Distanzen von 80 km, ein tägliches Laden auch mit langer Ladedauer wäre ausreichend.

Beim Infrastrukturbedarf ist zu berücksichtigen, dass bei Pedelecs meist ein abnehmbarer Akku vorhanden ist, die Beladung kann also in der Wohnung oder am Arbeitsplatz an einer herkömmlichen Steckdose erfolgen. Darüber hinaus ist es sinnvoll, an Umsteige- und Zugangspunkten zum öffentlichen Personenverkehr wie Bahnhöfen sowie zentralen bzw. hoch frequentierten Bushaltestellen vandalismussichere Abstellanlagen (bspw. Fahrradboxen) mit einer Ladeinfrastruktur einzurichten. Bei hohem Aufkommen sind auch Fahrradparkhäuser, wie bspw. in Münster oder Freiburg, nützlich, die ggfs. mit Mehrwertdiensten wie Pflege und Reparatur sowie einer ausreichenden Ladeinfrastruktur ausgestattet sind. Außerdem sind Geschäftsmodelle denkbar, die einen Tausch entladener gegen geladene Akkus ermöglichen, was im Freizeit- und Tourismuseinsatz die Reichweite vergrößern kann. Hierfür sind ortsfeste Einrichtungen mit Ladeinfrastruktur, bspw. an Gasthäusern oder Automaten an Wanderparkplätzen, sowie eine Standardisierung der Akkus erforderlich.

Elektroroller verfügen aktuell nicht über abnehmbare Akkus, für sie ist eine Ladeinfrastruktur zu schaffen. Die Rahmenbedingungen sind ähnlich wie bei Pkw, sodass an dieser Stelle darauf verwiesen wird.

Generell gilt, dass bei kleinen Leistungen (ca. 2–3 kW) haushaltsübliche Steckdosen als Ladeinfrastruktur zur Verfügung stehen. Aufgrund des geringen Gleichzeitigkeitsfaktors, d. h. einer geringen Wahrscheinlichkeit, dass eine Vielzahl von solchen Ladeeinrichtungen gleichzeitig mit ihrer Nennleistung laden, sind auf absehbare Zeit keine Auswirkungen auf die Netzinfrastuktur zu erwarten.

### **2.2.2.2 Öffentlicher Personenverkehr (Bus und Bahn)**

Der öffentliche Personenverkehr ist fester Bestandteil des städtischen Verkehrs und bewältigt rund 10 % der täglichen Wege (MiD 2008). Allerdings sind im Hinblick auf die Infrastruktur vor allem die Einsatzmuster der Fahrzeuge und nicht so sehr die Nutzungsmuster der Kunden bedeutend. Attraktive und hoch leistungsfähige Systeme für städtische Verkehre können bei Bahnen sowie Trolley- und Hybridbussen durch die Elektromobilität an Bedeutung gewinnen. Im Fernverkehr sind mit dem inzwischen europaweit bestehenden Eisenbahn-Hochgeschwindigkeitsverkehr bereits umfassende Konzepte der Elektromobilität verwirklicht. Die Weiterentwicklung von Trolley- und Hybridbussen sowie die technische Optimierung der Stromversorgung für Stadt- und Straßenbahnen durch induktive Systeme zur Verbesserung der Stadtbildqualität versprechen eine baldige Einsatzfähigkeit sowie ein neues Nutzungs- und Innovationspotenzial für die Elektromobilität.

Als Basisinfrastruktur für einen attraktiven öffentlichen Personenverkehr sind besondere Trassen für eine zügige und pünktliche Abwicklung erforderlich. Eine besondere Herausforderung stellt dann die Energieversorgung dar. Klassische Oberleitungen sind vielfach für die Stadtbilder suboptimal, sodass hier Innovationen erforderlich werden. Die Einsatzmuster der Busse mit Umläufen von etwa 40 km und Tagesfahrleistungen

von rund 500 km (entspricht dem Durchschnittswert einer Vielzahl deutscher städtischer Verkehrsunternehmen, die im VDV zusammengeschlossen sind) lassen einen ausschließlich batteriegestützten, rein elektrischen Betrieb kaum zu. Auch die Rekuperation sowie ein Laden während der Halte würden nur bei sehr hohen Ladeleistungen die erforderliche Energiemenge bereitstellen können (Erfordernis eines leistungsstarken Netzanschlusspunktes). Insofern sind die Entwicklung und der Ausbau alternativer Ladestrategien, bspw. des induktiven Ladens, oder leistungsfähiger Ladepunkte (ggfs. Anschluss an das Mittelspannungsnetz mit Ladeleistungen von über 100 kW) für Bahn und Bus in dem häufig sensiblen städtebaulichen Umfeld erforderlich. Für den Bus- und Bahnverkehr zwischen den Städten bieten Hybridsysteme mit Power-Packs in den Fahrzeugen Perspektiven, ortsfeste Oberleitungsinfrastrukturen zu sparen. Hierfür sind Lade- und Versorgungsinfrastrukturen in Abhängigkeit von der Energiequelle für die Fahrzeuge (Öl, Wasserstoff, Strom) zu schaffen. Zudem sind Verknüpfungspunkte zwischen dem motorisierten Individualverkehr (MIV) und dem öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) an strategisch wichtigen Stellen anzulegen, auszubauen und mit der notwendigen Ladeinfrastruktur für Pkw und Zweiräder auszustatten. Hier bieten Fahrzeuge des ÖPNV die Möglichkeit, induktive oder automatisch koppelbare, leitungsgebundene Ladesäulen einzurichten, um eine schnelle und sichere Nachladung zu ermöglichen. Dabei sind die Auswirkungen auf die Umgebung (elektrische und magnetische Felder, Beeinflussung von Implantaten, Einfluss auf Tiere etc.) detailliert zu analysieren und zu minimieren.

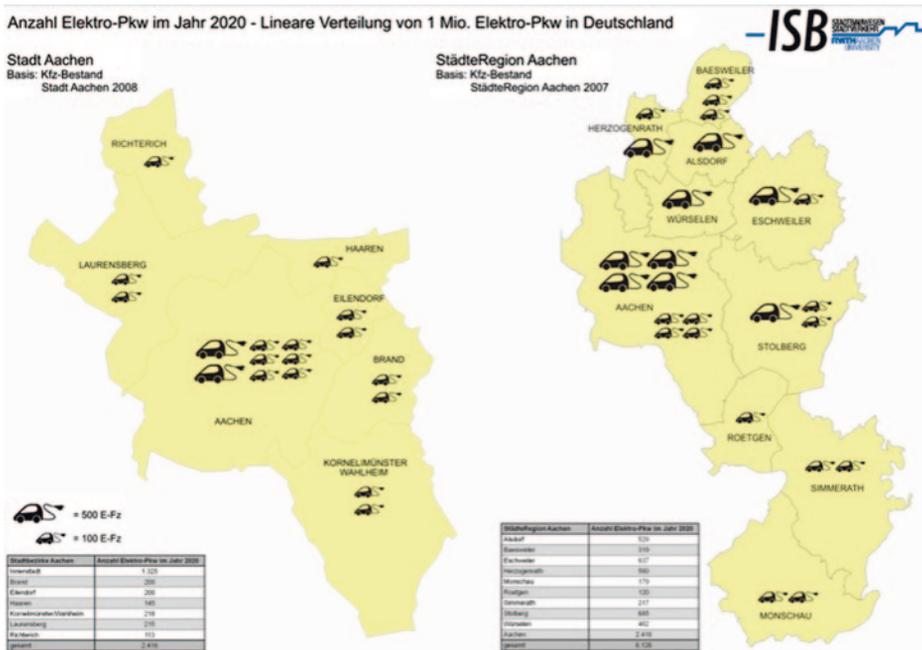
### 2.2.2.3 Personen-Kraftfahrzeuge

Der motorisierte Individualverkehr mit Pkw macht rund 65 % aller Wege im täglichen städtischen Verkehr aus (MiD 2008). Die Pkw sind mit durchschnittlich 1,2 Personen besetzt und legen täglich durchschnittlich rund 30 km zurück. Etwa 90 % der täglichen Wege sind kürzer als 100 km (MiD 2008) und damit grundsätzlich bei den heute technisch möglichen Reichweiten zur Substitution geeignet. Bei der Verbreitung der Elektromobilität bezieht sich die zentrale Frage auf die detaillierteren Nutzungsmuster der Verkehrsteilnehmer. Da der Mensch heute gewohnt ist, für wenige Male im Jahr ein Fahrzeug mit „Fernreisefähigkeit“ zu besitzen, muss davon ausgegangen werden, dass die Marktdurchdringung auch auf lange Zeit kein hohes Niveau erreichen wird. Wie kann also ein realitätsnahes Szenario auf der Basis von Wünschen, Bedürfnissen und Erwartungen, Preis und Nutzungsmodellen aussehen (Baum et al. 2010; Fojcik 2010; Topp 2010; Varesi 2009)? Dabei spielt eine Rolle, ob sich die Nutzer mehrere verschiedene Kfz anschaffen oder je nach Mobilitätsbedarf unterschiedliche Fahrzeuge aus Mietpools nutzen.

Eine grobe Abschätzung zur Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen als Basis für die Dimensionierung der Infrastruktur kann – ohne die Berücksichtigung von Einsatzmustern und Akzeptanzfragen – von der Annahme ausgehen, dass die von der Bundesregierung bis zum Jahr 2020 angestrebten 1 Mio. Elektrofahrzeuge (Bundesregierung 2009) gleichmäßig über alle Hubraum- bzw. Leistungsklassen sowie

in alle Orte und Ortsteile gelangen. Diese sehr vereinfachte Annahme stellt eine erste Annäherung dar und kann als Hilfestellung für eine Vordimensionierung der erforderlichen lokalen und überörtlichen Stromversorgungsinfrastruktur dienen. Wird die Anzahl linear auf den Kfz-Bestand in einem Versorgungsgebiet heruntergebrochen, ist ein erster Eckwert für die Dimensionierung vorhanden. Ausgehend von einem Pkw-Bestand von rund 40 Mio. in Deutschland im Jahr 2008 (BMVBS 2008) sowie den ebenfalls für 2008 vorliegenden Pkw-Zahlen für einzelne Kommunen (hier für Stadt und Region Aachen, errechnet vom Straßenverkehrsamt der StädteRegion Aachen sowie dem Statistischen Amt der Stadt Aachen) ergeben sich exemplarisch die in Abb. 2.7 dargestellten Werte. Analoge Vorgehensweisen erlauben die Abschätzung auch für andere Eckwerte.

Ein solches Szenario ist allerdings nicht besonders wahrscheinlich, da die Menschen in Kernstädten über weniger Pkw verfügen und am Stadtrand sowie in ländlichen Gebieten ein überproportionaler Anteil an Zweitwagen vorhanden ist. Gerade in diesen Gebieten sind jedoch die Verteilungsnetze deutlich schwächer ausgebaut als in Städten, da die Lastdichte, d. h. der Energie-/Leistungsbedarf bezogen auf die Fläche, erheblich geringer ist. Zudem ist der benötigte Energiebedarf größer, sodass entweder die Ladezyklen bei gegebener Ladeleistung länger dauern oder die erforderliche



**Abb. 2.7** Szenario für die Anzahl Elektrofahrzeuge in Stadt und StädteRegion Aachen. *Quelle* Eigene Darstellung

Ladeleistung größer wird. Beide Auswirkungen bedingen eine stärkere Belastung der Ladeinfrastruktur bzw. einen höheren Ausbaubedarf in den Verteilungsnetzen.

Infolge der beschränkten Reichweiten ist zu erwarten, dass in der Frühphase der Markteinführung der Elektromobilität in starkem Maß Zweitwagen mit hohen Fahrleistungen durch Elektrofahrzeuge ersetzt werden (Johanning und Vallée 2011). In einem solchen Szenario ist die Verteilung von Elektrofahrzeugen zwischen Stadt und Land deutlich verschieden. Ein komplexeres Szenario unter der Annahme bspw. einer höheren Marktdurchdringung bei Zweitwagen (50 % der Zweitwagen sind Elektrofahrzeuge) lässt sich dann analog berechnen. Dazu kann, ausgehend von der Quote von Pkw/Haushalt für Deutschland bzw. einer Stadt als Durchschnittswert und der Quote Pkw/Haushalt für einzelne Stadtbezirke, eine über- oder unterdurchschnittliche Zweitwagenquote ermittelt werden. Überdurchschnittliche Quoten sprechen für einen hohen Zweitwagenbesatz, unterdurchschnittliche für einen niedrigen. Im Weiteren kann durch eine Zuordnung der zu erwartenden absoluten Zahl von Elektrofahrzeugen eine spezifischere Verteilung erfolgen.

Für die Dimensionierung der lokalen Stromversorgungs- und Ladeinfrastruktur im sog. Ortsnetzstrang ist eine weitere Differenzierung auf Straßenzüge erforderlich. In der Mobilitäts- und Verkehrsforschung wird davon ausgegangen, dass der Pkw-Besitz in erster Linie an die Haushalte als eine wirtschaftliche Einheit gekoppelt ist. Insofern ist eine Berechnung über die Daten des Melderegisters, in dem Personen mit einer Adresse verbunden sind, nicht möglich, da die Anzahl von Personen je Haushalt nicht bekannt ist. Aus der Stadtentwicklungsforschung ist bekannt, dass eine ausreichend zuverlässige Näherung der Bestimmung von leerstehenden Wohnungen (und damit nicht mehr vorhandenen Haushalten) neben kostenpflichtigen Daten der Marktforschung bspw. über die Anzahl von Wasseruhren oder Stromzählern je Haushalt geschehen kann (Dennhardt und Ziegler 2006). Weitere Alternativen bestehen in einer sehr aufwändigen Abschätzung mithilfe von Luftbildern und Gebäudetypologien. So lassen sich mit den Daten der örtlichen Netzbetreiber die mögliche Anzahl von Elektrofahrzeugen je Straßenzug und damit der Bedarf an Ladepunkten sowie die Belastung der Versorgungsinfrastruktur abschätzen.

Bei der Ladeinfrastruktur ist hinsichtlich der zu erwartenden Nutzung von Elektro-Pkw sowie aus ökonomischen Gründen zunächst eine Konzentration auf private Ladepunkte (zu Hause), bei Arbeitgebern sowie an P+R-Haltestellen und in Parkhäusern sinnvoll. Dort sind ausreichende Standzeiten der Fahrzeuge vorhanden. Ladepunkte im öffentlichen Straßenraum (Ladesäulen am Straßenrand) werden eher die Ausnahme bilden, da sie teuer in der Erstellung sind und nur eine geringe Nachfrage erwarten lassen. Allerdings sollte für die Wahrnehmbarkeit nicht vollständig auf Ladestationen im öffentlichen Raum verzichtet werden, da auf diese Weise die psychologische Sicherheit vermittelt werden kann, man könne nachladen. Zudem werden besonders dicht bewohnte Stadtviertel ohne Abstellmöglichkeiten für Pkw auf Privatflächen im Hinblick auf eine sinnvolle Ladeinfrastruktur vertieft zu untersuchen sein. Dort bieten sich Ladesäulen im öffentlichen Raum an bestimmten Punkten an, wobei die Reservierung/Reservierbarkeit der Stellplätze mit zu berücksichtigen ist.

In einem nächsten Schritt wird die Erweiterung der Ladeinfrastruktur durch induktive Ladung über Modellversuche mit dem Test der Alltagstauglichkeit und Nutzerakzeptanz zu entwickeln sein. Auch Schnellladestationen für den öffentlichen Verkehr und den Individualverkehr können sinnvoll sein. Darüber hinaus wird in Grenzgebieten, wie bspw. dem Raum Aachen, der Ausbau des grenzüberschreitenden Ladens und die Erweiterung des heute bestehenden Roamings auf die Nachbarländer erforderlich.

Für die individuelle Nutzung der Elektromobilität stehen aus heutiger Sicht im Zuge der Markteinführung zunächst Flottenbetreiber im Fokus. Dieser Ansatz erlaubt, aufgrund der regelmäßigen und eingrenzbaeren Nutzungsmuster schnell ein hohes Maß an Nutzbarkeit zu erreichen. Hieraus entstehen intensiv nachgefragte Standorte für Ladestationen, die einer besonderen Betrachtung der elektrotechnischen Infrastruktur bedürfen, sich aufgrund ihrer intensiven Nutzung deutlich schneller amortisieren und nach einer gängigen netztechnischen Analyse eine hohe Umsetzungswahrscheinlichkeit aufweisen. Wesentliche Eingangsgrößen einer Analyse sind die Anschlussleistung bzw. die Anforderungen an die maximalen Ladezeiten, die wiederum die Anforderungen an das elektrische Netz und die lokale Ladeeinrichtung definieren. In Abhängigkeit von den Anforderungen würde das bestehende Niederspannungsnetz ggfs. um einen separaten Strang erweitert (bei kleineren Leistungen) oder es würde eine zusätzliche Ortsnetzstation in das Mittelspannungsnetz (10–30 kV) integriert, die die Versorgung des neuen Anschlussnehmers über typische Anschlussleistungen zwischen 400 kW und 1.250 kW sicherstellt.

#### **2.2.2.4 Wirtschaftsverkehr (Service, Liefern, Gütertransport)**

Besondere Potenziale für die Elektromobilität versprechen Kurier-, Express- und Paketdienste (KEP-Dienste), Post, Kuriere und andere Flottenbetreiber. Sie weisen in der Regel über den Tages- oder Wochenverlauf relativ homogene Einsatzmuster auf, an die Fahrzeuge, Batteriekapazitäten oder die Ladeinfrastruktur effizient angepasst werden können. So legen KEP-Fahrzeuge (bspw. DHL, UPS, Hermes, Trans-O-Flex u. a.) in Ballungsräumen tägliche Fahrtweiten von rund 150 km zurück, in ländlichen Gebieten rund 400 km (Quelle: eigene Recherchen bei den Betreibern). Besonders vorteilhaft erweist sich dabei, dass regelmäßig eine größere Zahl gleichartiger Fahrzeuge im Einsatz ist.

Postfahrzeuge sind meistens Pkw oder aus Pkw adaptierte Kleinlieferfahrzeuge und legen in ländlichen Gebieten rund 100 km täglich (Quelle: eigene Erhebung bei den Betreibern) zurück. In Städten erfolgt die Zustellung meist per Fahrrad oder zu Fuß. Damit sind diese Fahrzeuge aufgrund ihrer Jahresfahrleistungen von rund 30.000 km (300 Einsatztage zu je 100 km) besonders geeignet, als elektrisch betriebene Fahrzeuge im Einsatz zu sein und die Wahrnehmung, Marktdurchdringung und Erprobung der Elektromobilität zu stützen.

Weitere Flottenbetreiber sind bspw. Pizza-Dienste, Medikamentenlieferdienste, Pflegedienste, Stadtwerke oder andere Versorgungsunternehmen, aber auch Dienstfahrzeugflotten, bspw. von Städten. Darüber hinaus stellen die Service-Fahrzeuge

von Handwerkern, meist Lieferfahrzeuge mit eher kurzen Einsatzdistanzen, ebenfalls geeignete Testfelder und Anwendungsgebiete dar. Bei Mietfahrzeugflotten hingegen ist davon auszugehen, dass dort individuelle Einsatzmuster durch die Nutzer (Mieter) vorliegen, sie nähern sich mit ihrer Einsatzcharakteristik eher den oben beschriebenen Pkw.

Für die genannten Bereiche (KEP, Flotten, Service) gilt, dass die Fahrzeuge meistens in den nächtlichen Einsatzpausen an den Betriebsstandorten konzentriert stehen und dort nachgeladen werden können. Insofern ist dort die Infrastruktur vorzuhalten, allerdings nicht für Einzelfahrzeuge, sondern für eine Vielzahl von Fahrzeugen. Die erforderliche Dimensionierung der elektrischen Infrastruktur wird in Abhängigkeit von der spezifischen Nutzeranforderung und der zukünftigen Entwicklung vorgenommen. Die lokale Umsetzung orientiert sich an der bestehenden Verteilungsinfrastruktur und wird im Allgemeinen durch den Aufbau einer zusätzlichen Ortsnetzstation umgesetzt. Dabei sind lokale Erzeugungseinheiten zu berücksichtigen, die ggfs. einen Ausbau der Netzinfrastruktur verzögern können oder sogar vermeiden helfen.

Für den (Fern-)Güterverkehr sind die Anforderungen grundlegend anders. Fern-Lkw legen aufgrund der Lenk- und Ruhezeitvorschriften Etappen von rund 350–400 km zurück und haben dann Standzeiten von 30–60 Minuten. Nach einer weiteren solchen Etappe ist eine Ruhezeit der Fahrer von 8 Stunden erforderlich, die dann zu einer Standzeit führt, wenn kein zweiter Fahrer mit demselben Fahrzeug unterwegs ist. Aufgrund der Einsatzmuster und der Lastbeförderung sind hohe Leistungen und geringe Standzeiten erforderlich, ein elektrischer Antrieb wäre wegen der großen erforderlichen Speicherkapazitäten wenig wirtschaftlich.

Anders sieht es bei schweren Service-Lkw (Müll- und Lieferfahrzeuge, Reinigungsdienste, Rettungsdienst, Feuerwehr etc.) aus. Hier sind die Einsatzstrecken deutlich kürzer, ein elektrischer Betrieb wäre grundsätzlich denkbar. Auch bestehen regelmäßige Einsatzmuster und eine Rückkehr an zentrale Ausgangsstandorte, womit eine Konzentration der Ladeinfrastruktur denkbar wäre. Hier stehen Nutzlast-/ Gesamtgewichts-Verhältnisse sowie die zuverlässige Verfügbarkeit für den Einsatz im Vordergrund, die heute noch nicht befriedigend realisierbar sind. Im Hinblick auf die hohen Sicherheits- und Verfügbarkeitsanforderungen ist eine schnelle Umsetzung in diesem Bereich aber eher skeptisch zu beurteilen.

### **2.2.3 Implikationen für die Infrastruktur**

Es lässt sich festhalten, dass die Elektromobilität die Chance bietet, eine umfassende Weiterentwicklung des Mobilitätssektors zu induzieren. Dabei kommt es darauf an, wie umfassend sie als Chance für eine Neudefinition der urbanen Mobilität gesehen und genutzt wird. Allein die Einführung elektrisch betriebener Fahrzeuge im Personen- und Güterverkehr löst Probleme wie Platzbedarf oder Lärmemissionen in der Stadt kaum oder nur teilweise. Werden alle Verkehrsmittel in den Innovationsprozess einbezogen und dazu neue, umfassende Geschäftsmodelle zusammen mit einer nutzerfreundlichen

Vernetzung und Abrechnung etabliert, besteht die Möglichkeit, zu einem neuen Mix aus Zweirad-, ÖPNV- und Elektrofahrzeug-Nutzung zu kommen (vgl. [Kap. 3.1](#)). Wird dies mit Maßnahmen des Mobilitätsmanagements flankiert, könnte sich eine neue, stadtverträgliche Mobilitätskultur entwickeln. Die Ladeinfrastruktur wird aus heutiger Sicht in erster Linie an der Wohnung, am Arbeitsplatz, in Parkhäusern, an den Schnittstellen zum ÖPNV sowie an den Abstellhöfen der Flottenbetreiber erforderlich.

Durch eine stärker systemorientierte Integration von Elektrofahrzeugen in die Verteilungsnetze können die Fahrzeuge durch gesteuertes Laden und/oder ggfs. eine Rückspeisung im Fall von Versorgungsstörungen kurzzeitig zur Stabilität der elektrischen Energieversorgung beitragen. Ergänzend hierzu bieten sie auch die Möglichkeit, die lokal hohen Belastungen von Verteilungsnetzen durch die starke Einspeisung von Photovoltaikanlagen zu vermindern, indem man, regional steuerbar, die Fahrzeuge bevorzugt in Zeiten hoher Einspeisung lädt. Insofern ist eine Systembetrachtung bei der breiten Einführung von Elektrofahrzeugen zwingend erforderlich, um die zusätzliche Belastung der Infrastruktur zu minimieren und gleichzeitig die Potenziale einer Netzintegration effizient auszuschöpfen.

---

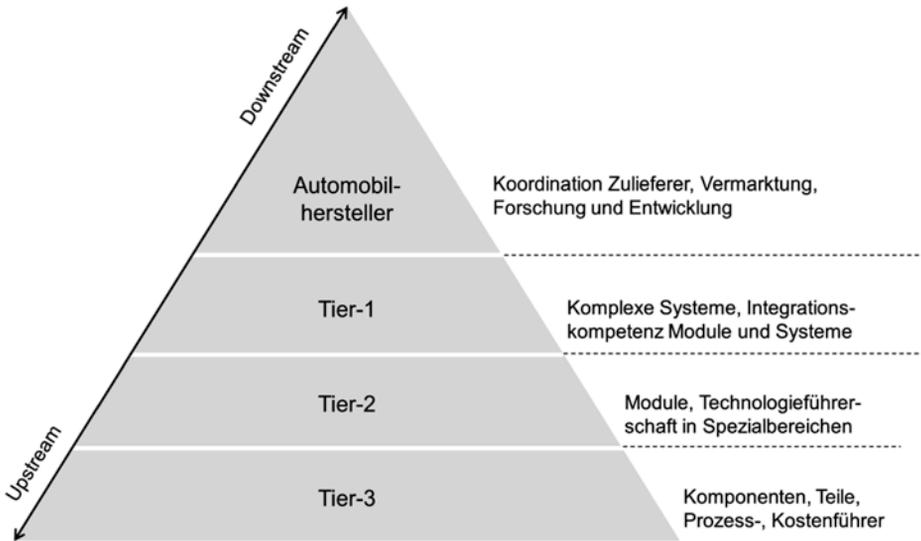
## 2.3 Die neue Wertschöpfungskette

Garnet Kasperk und Ralf Drauz

Obwohl die Marktprognosen für Elektromobilität weit auseinanderliegen, so ist doch heute schon klar, dass sich die automobilen Wertschöpfungskette verändern wird. Mit dem schrittweisen Übergang von Verbrennungsmotoren zur Elektrifizierung des Antriebsstrangs verschieben sich Wertschöpfungsanteile upstream. Neue Geschäftsmodelle, die mit den Herausforderungen der Elektromobilität wie Kosten, Reichweite oder Ladezeiten entstehen, bringen auch der Automobilherstellung neue Wertschöpfungsanteile. Dies geschieht zeitgleich und teilweise begründet durch weitere Veränderungen bzw. Einflussfaktoren. Dies sind etwa umwelt- und lokalpolitische Vorgaben, Emissionsnormen, Wachstum in BRIC-Staaten, De-Emotionalisierung von Fahrzeugen oder Überkapazitäten. Es lässt sich somit eine Zerteilung in Upstream- und Downstream-Veränderungen aufzeigen. Diese Veränderungen resultieren zum einen aus den veränderten Fahrzeugbestandteilen, zum anderen aus neuen Geschäftsmodellen.

### 2.3.1 Wertschöpfungskette als System von Aktivitäten

Um die Begriffe upstream und downstream besser zu verstehen, zeigt [Abb. 2.8](#) die unternehmensübergreifende Wertschöpfungskette grafisch. Dies erfolgt zunächst anhand der Zuliefererpyramide mit der wertschöpfungsorientierten Abfolge von Lieferanten (Throll und Rennhak [2009](#)). Die Rangfolge der Zulieferer ist anhand

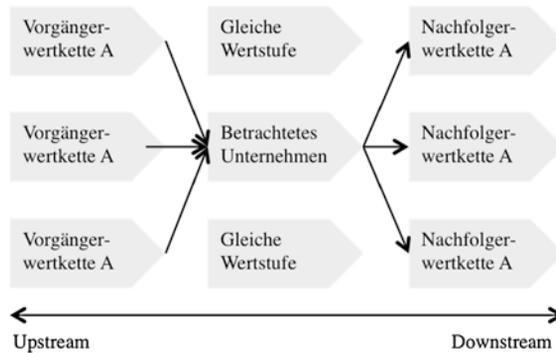


**Abb. 2.8** Zuliefererpyramide der Automobilindustrie. *Quelle* Eigene Darstellung

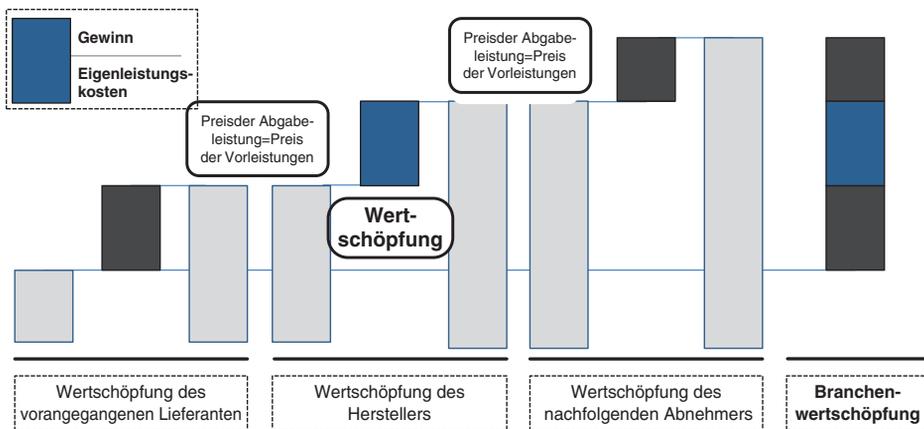
der Komplexität der produzierten Güter unterschieden. Automobilhersteller koordinieren die Automobilzulieferer und nehmen einen Großteil der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten ein. Tier-1-Zulieferer bringen eine hohe Integrationskompetenz mit, durch welche manche von ihnen sogar schon als Tier-0,5 bezeichnet werden können. Zulieferer auf Tier-2-Ebene sind häufig Technologieführer in Spezialbereichen, Tier-3-Zulieferer hingegen sind Prozess- oder Kostenführer. Sie stellen vornehmlich Komponenten und Teile mit niedrigerem Komplexitätsgrad her.

Unternehmen sind dabei nicht auf eine Ebene beschränkt, sondern können Aufgaben auf verschiedenen Ebenen übernehmen. Ein Zulieferer kann also als Komponentenlieferant und gleichzeitig als Teilelieferant für nachgelagerte Wertschöpfungsebenen tätig sein. Das Netz der miteinander verbundenen Unternehmen aller Wertschöpfungsstufen basiert auf den komplexen Wertschöpfungsumfängen der Automobilindustrie. Diese Wertschöpfungsumfänge mit Bereichen wie Entwicklung, Beschaffung und Produktion können nicht von einem einzelnen Unternehmen gewährleistet werden (Balling 1998; Müller-Stewens und Glocke 1995). In der Automobilindustrie wird die Unterteilung in upstream und downstream für gewöhnlich bei den Automobilherstellern gesehen (Abb. 2.9).

Die Wertschöpfung innerhalb eines solchen Systems stellt das theoretische Gewinnpotenzial dar. Sie teilt sich in Eigenleistungskosten und Gewinn. Die Wertschöpfung eines Herstellers ergibt sich aus dem am Ende der Produktion stehenden Produktionswert abzüglich der Vorleistungen des bzw. der vorangegangenen Lieferanten (in Volkswirtschaften mit Staat werden noch Abschreibungen, indirekte Steuern sowie Subventionen hinzugezogen) (Abb. 2.10).



**Abb. 2.9** Wertschöpfungssystem (in Anlehnung an Schmid und Grosche 2008)

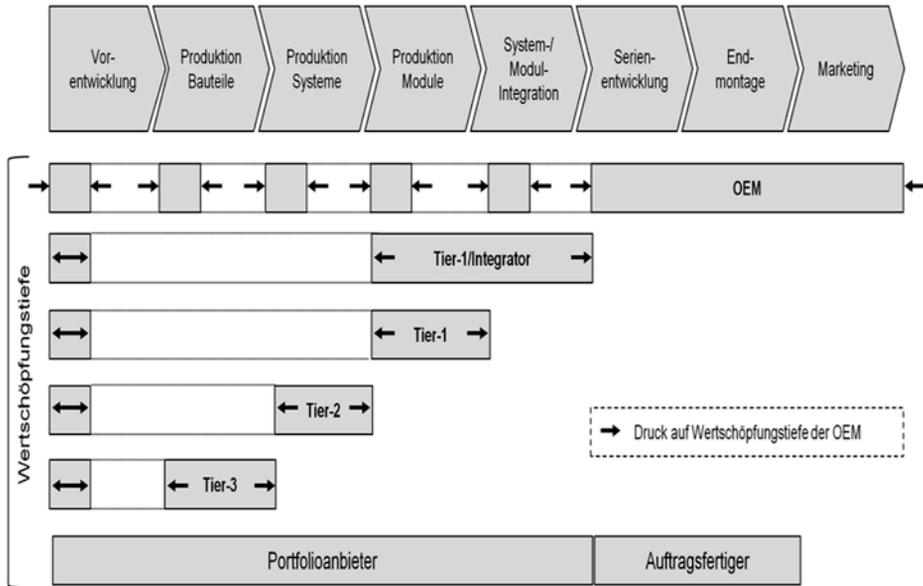


**Abb. 2.10** Branchenwertschöpfung (in Anlehnung an Müller-Stevens und Lechner 2005)

### 2.3.2 Aufbau und Veränderungen upstream

Die Wertschöpfungskette upstream umfasst Material-, Entwicklungs- und Produktionsumfänge. Physisch teilt sie sich nach Komplexitätsgrad in Teile, Komponenten, Module und Systeme. Aus diesen wird das automobilen Endprodukt erstellt. Die Endprodukte sind üblicherweise im oberen Bereich der Zuliefererpyramide zu finden (Abb. 2.11).

Die Eigenleistung der Automobilhersteller in den einzelnen Ebenen der Wertschöpfungskette ist in den vergangenen Jahren kontinuierlich zurückgegangen (Mercer 2004). Grund hierfür ist die in den letzten Jahren vollzogene Produktproliferation, d. h. die Einführung zusätzlicher Baureihen (Produktverbreiterung) und die Auffächerung bestehender Baureihen in verschiedene Typen (Produktdifferenzierung) (Diez 2006). Die mit dem erweiterten Modell- und Variantenangebot einhergehenden Kosten, verkürzte Modelllebenszyklen und Entwicklungszeiträume haben zu einer Konzentration auf Kernkompetenzen geführt (Wallentowitz et al. 2008). Neben diesen Trends



**Abb. 2.11** Upstream-Wertschöpfungskette und -Wertschöpfungstiefe (in Anlehnung an Koch 2006)

werden sich die Wertschöpfungsanteile mit der Elektrifizierung des Antriebsstrangs, der Automobilhersteller und Zulieferer bedroht, vermehrt neu verteilen. Dem Wegfall von Motor und Antriebsstrang stehen neue Wertschöpfungsumfänge gegenüber. Diese reichen von Rohstoffen wie Seltene Erden (Neodym und Dysprosium), Lithium, Platinmetallen (Platin, Palladium, Rhodium) oder Kobalt über Komponenten und Module wie Batterie, Elektromotor, Elektronikumfänge und Leichtbaukomponenten bis hin zu Prozesstechniken mit der Erzeugung von Legierungen, Lasertechnik, Nanotechnologie und integrierten Schaltungen. In Abb. 2.12 wird ersichtlich, welche komponentenseitigen Veränderungen mit dem Wandel zur Elektromobilität einhergehen und welche Kompetenzverteilungen je Komponente zu erwarten sind. Auf der Basis der heutigen Wertschöpfungstiefe der Automobilhersteller verlieren diese vor allem die Fertigung von Verbrennungsmotoren und Getriebe, aber auch den Bau von Abgasanlagen und Ölpumpen. Eine Rücknahme von anderen, zu Zulieferern ausgelagerten Wertschöpfungsumfängen ist also möglich. Um den heutigen Wertschöpfungsgrad zu halten, müssten die Automobilhersteller die Hälfte des Wertschöpfungsprozesses von Elektromotor- und Batteriekomponenten intern abbilden (McKinsey 2011). Die Eigenproduktion von Elektromotoren bei Automobilherstellern ist aufgrund der teilweise schon getätigten Investitionen (VW Elektromotoren-Fabrik in Kassel) wahrscheinlich, aber auch in Kooperationen abbildbar (Daimler und Bosch). Kompetenzen und Arbeitgeber müssen hierfür aber noch ausgebildet werden (McKinsey 2011). Auch weitere Zulieferer (ebm Pabst) oder Spezialmaschinenhersteller (STILL, Jungheinrich) können sich bei den hinzukommenden Komponenten mit vorhandenen Kompetenzen platzieren.

Entfall	Modifikation	Addition	
Verbrennungsmotor	 Antriebsstrang	 Elektromotor	
Tanksystem	 Lenksystem	 Leistungselektronik	
Einspritzanlage	 Klimasystem	 Traktionsbatterie	
Kupplung	 Bremssystem	 Hochspannungsnetz	
Abgasanlage	 Radaufhängung	 Batteriemangement	
		Bremssystem	
		Soundmodul	
 Automobilhersteller	 Zulieferer		

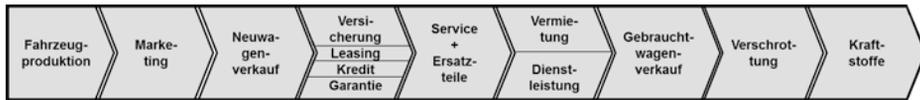
**Abb. 2.12** Veränderungen auf Komponentenseite und Kompetenzverteilung (in Anlehnung an Wallentowitz et al. 2010)

Einschneidende Veränderungen ergeben sich ebenfalls in den Montageabläufen, wo die Variantenvielfalt mit verschiedenen Antriebsalternativen weiter steigt. In den neuen Umfängen liegen gleichzeitig Chancen für Automobilzulieferer, ihre Marktposition auszubauen. Dies gilt auch für Unternehmen anderer Industrien, bspw. die Chemie- und Elektronikbranchen. Diese können als Lieferanten zur Entwicklung und Integration neuer Komponenten und Konzepte in die automobiler Wertschöpfungskette eingebunden werden. Themen sind hierbei die Materialversorgung sowie die Anpassung bestehender Fahrzeugbestandteile an die Anforderungen der Elektrifizierung. Dies ist bspw. beim Thermomanagement der Fall. Der Wertschöpfungsanteil von Elektrik und Elektronik im Fahrzeug erhöht sich noch weiter. Mechanische und hydraulische Fahrzeugumfänge hingegen entfallen zunehmend.

### 2.3.3 Aufbau und Veränderungen downstream

Die Downstream-Wertschöpfungskette beginnt mit der Fertigstellung des Fahrzeugs. Hier sind Marketing, Fahrzeugverkauf und Finanzierungsoptionen verortet. Die Automobilhersteller und Zulieferer sind in diesem Bereich mit After-Sales- und Service-Tätigkeiten aktiv, mit denen auch die Mobilität gewährleistet wird. Vermietung und weitere Dienstleistungen wie Kraftstoff und schlussendlich die Entsorgung des Fahrzeugs runden die derzeitige automobiler Downstream-Wertschöpfungskette ab (s. Abb. 2.13).

Kraftstoffe und antriebsstrangrelevante Ersatzteile und Services verlieren bei der Downstream-Wertschöpfungskette nach und nach an Bedeutung. Sie werden durch mit der Elektrifizierung des Antriebsstrangs einhergehende Teile ersetzt. Hinzu kommen neue Geschäftsmodelle, die bisherige Ansätze wie Neuwagenverkauf, Leasing oder Vermietung ergänzen. Im Mittelpunkt – dies zeigen bspw. urbane Modellregionen – entstehen



**Abb. 2.13** Downstream-Wertschöpfungskette (in Anlehnung an Diez 2006)

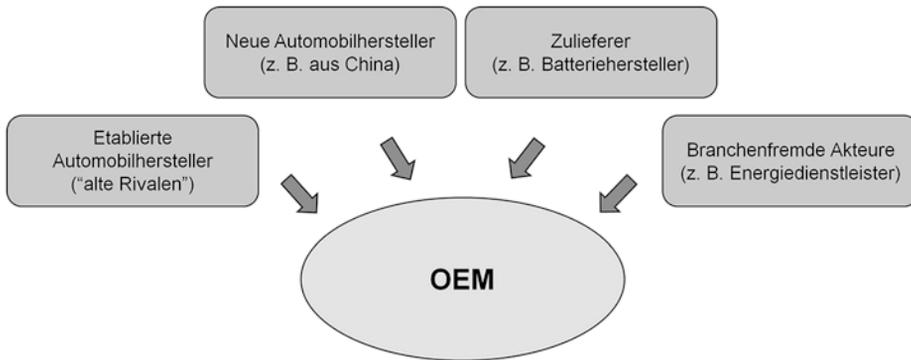
umfassende Mobilitätskonzepte. Solche neuen Mobilitätsdienstleistungen sind regional zu differenzieren. Für Westeuropa besitzen sie eine hohe Bedeutung und sind auch in China wegen seiner Großstädte durchaus relevant. In den USA, Indien und Russland ist ihre Bedeutung deutlich geringer einzuschätzen, da dort andere infrastrukturelle und sozio-kulturelle Rahmenbedingungen vorherrschen. Der Grund für das Entstehen neuer Geschäftsmodelle liegt in den Herausforderungen der Elektromobilität. Die Motivation hinter Ansätzen wie Batteriewechsel oder intermodalen Mobilitätsangeboten sind die mit derzeitigen Batterietechnologien verbundenen geringen Reichweiten und langen Ladezyklen. Das Aufladen der Batterie unterwegs ist für den Endnutzer noch zu zeitintensiv. Weiterhin entspricht die Kundenakzeptanz eines Mehrpreises nicht den tatsächlich entstehenden Kosten (Wyman 2009b). Mit neu entstehenden Geschäftsmodellen ergeben sich aber zusätzliche Potenziale zur Wertschöpfung. Bisher genutzte Kraftstoffe werden durch Energieversorgung substituiert. Neue Wertschöpfungsstufen entstehen mit komplexen Anforderungen an Batterie- und Ladetechnologien. Netzmanagement und Infrastruktur müssen aufgebaut werden. Ebenfalls bieten Mehrwertdienste wie Telematik-Dienstleistungen oder eine Ortungsfunktion als Teil von neuen Carsharing-Geschäftsmodellen Chancen. Daraus ergeben sich verschiedene, dem Automobilhersteller nachgelagerte neue Kompetenzanforderungen. Sie können durch die strategische Zusammenarbeit von Energieversorgern, Dienstleistungsunternehmen und Automobilherstellern realisiert werden. Modellregionen zeigen, wie sich ein Wertewandel in der Gesellschaft vollzieht. Mobilität wird mehr und mehr als Dienstleistung statt als Produkt gesehen und führt damit zu neuen Finanzierungs- und Mobilitätslösungen, die heute Kernkompetenzen von Mietwagen- und Carsharing-Unternehmen sind. Dies schafft Raum für neue Akteure und verändert die Wettbewerbslandschaft. Um dieser Verschiebung entgegenzuwirken, geht die strategische Entwicklung von Automobilherstellern hin zu einer Mobilitäts- und Dienstleistungsstrategie. Ein Beispiel dafür ist Daimler mit car2go, einem innerstädtischen Mobilitätskonzept für Kurzzeitmieten von Kleinfahrzeugen der Marke Smart. Diese Ausrichtung ist verbunden mit einem ausgeprägten Kooperationsmanagement, um ein durchgängiges Mobilitätsangebot zu gewährleisten.

### 2.3.4 Verschiebung der Wettbewerbslandschaft

Mit den aufgezeigten Veränderungen der Wertschöpfungskette upstream durch andere Fahrzeugbestandteile und downstream durch neue Geschäftsmodelle zeichnet sich eine Verschiebung der Wettbewerbslandschaft ab. Sie bringt den Eintritt neuer Akteure

aus anderen Industrien mit sich und stellt die bestehenden Akteure der automobilen Wertschöpfungskette vor neue Herausforderungen. Hersteller von Lithium-Ionen-Batteriezellen und Zellkomponenten sowie entsprechender Elektronikbestandteile können sich mit ihren Kompetenzen entlang der Wertschöpfungskette platzieren. Großunternehmen wie Sanyo oder Samsung könnten hier nicht nur eine Technologieführerschaft, sondern Integrationskompetenz und damit eine Position als Tier-1 anstreben. Hersteller von Zellkomponenten hingegen können sich aufgrund ihrer heute schon vorhandenen Prozess- und Kostenführerschaft als Tier-3 platzieren. Es entsteht upstream ein Wettbewerb um Ressourcen und Technologien. Er bietet auch die Chance, für bestehende Automobilzulieferer auf vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsstufen tätig zu werden. Automobilhersteller und Tier-1-Zulieferer sehen sich an dieser Stelle einer immer wichtiger werdenden Rolle als Koordinator vorgelagerter Wertschöpfungsstufen gegenüber. Mit der verringerten Bedeutung bisheriger Kernkompetenzen der aktuellen Akteure müssen diese sich neu ausrichten. Trotzdem müssen die in den kommenden Jahren noch vorherrschenden Verbrennungsmotoren von Automobilherstellern und Zulieferern weiterentwickelt werden, um gegen Wettbewerber zu bestehen. Um dies zu bewältigen und Kosten sowie Risiken zu teilen, entstehen neuartige strategische Allianzen wie die Kooperation von Automobilherstellern mit Zulieferern im Bereich elektrischer Antriebsstrang. Dies wurde bspw. zwischen Daimler und Bosch initiiert (Buchenau und Herz 2011). Der Wettbewerbsdruck auf Automobilhersteller erhöht sich ebenfalls durch neue Geschäftsmodelle. Neben etablierten Automobilherstellern treten neue Hersteller als Wettbewerber auf den Markt. Es handelt sich hierbei teils um komplett neue Unternehmen oder um Hersteller, die bislang hauptsächlich regional tätig waren und – wie bei chinesischen Herstellern – schon elektromobile Kompetenzen aufgebaut haben wie bspw. BYD als vormals reiner Batterieproduzent. Auch Zulieferer mit Spezialwissen in relevanten Komponenten wie der Batterietechnik bauen eine starke Machtposition upstream auf. Downstream haben branchenfremde Akteure Kompetenzen, mit denen sie an der automobilen Wertschöpfungskette den Automobilherstellern nachgelagert begegnen. In Abb. 2.14 ist diese Belastungssituation dargestellt.

Im Umgang mit der Belastungssituation durch Elektromobilität erschließen sich Automobilhersteller neue Einnahmequellen. Bspw. bietet Volkswagen in Partnerschaft mit einem Energiedienstleister Mini-Kraftwerke für Wohnhäuser an und plant den Einstieg in Offshore-Windparks. Downstream ist der Zugang zum Endkunden entscheidend und wird erstmals nicht nur von Automobilherstellern ausgewertet (bspw. bietet PSA ein Leasingmodell für die noch sehr teuren Batterien von Elektrofahrzeugen an). Energieversorger und Dienstleister haben hier die Chance, sich als Mobilitätsanbieter zu etablieren (Wyman 2010; PWC 2010; Deloitte 2009). In Modellregionen geschieht dies stets im Zusammenspiel mit Automobilherstellern, da diese Kompetenzen in After-Sales, Service und Vermarktung haben. Teilweise werden auch Städte und Dienstleister in den Modellregionen mit eingebunden. Die Abrechnung von neu entstehenden Geschäftsmodellen ist noch nicht benannt, wird jedoch wie auch andere Services von



**Abb. 2.14** Belastungssituation Automobilhersteller (in Anlehnung an Brazel 2010)

IT- oder Telekommunikationsdienstleistern als strategisches Geschäftsfeld definiert (Accenture 2009). Interorganisationale Zusammenschlüsse, wie sie in Modellregionen zu sehen sind, bieten einzelnen Akteuren nicht nur die Möglichkeit der Teilnahme an der automobilen Wertschöpfung, sondern auch die Chance, die eigene Wettbewerbsposition zu verbessern.

### 2.3.5 Verteilung der neuen Wertschöpfungskette nach Ländern

Die Verschiebung der Wettbewerbslandschaft durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs führt upstream zu einer Verlagerung von Wertschöpfungsanteilen in Länder mit entsprechenden Zulieferern bzw. Rohstoffen. Downstream lassen sich Verschiebungen nur nach neuen Akteuren, insbesondere bei Energieversorgern, ausmachen, die regional gebunden sind. Eine Andersverteilung ist somit höchstens mit dem Betreiber eines neuen, dominanten Geschäftsmodells nach Ländern klassifizierbar und derzeit nicht auszumachen. Mit dem hohen Bedarf an elektrischen Fahrzeugen haben Europa und die USA Chancen, Upstream-Anteile an der Wertschöpfungskette zu stellen. Dem stehen jedoch das Ressourcenvorkommen und bereits etablierte Kompetenzen in Ländern wie Japan und China gegenüber. Tabelle 2.2 bietet eine Zusammenstellung von Kooperationen zwischen Automobilherstellern und Batterielieferanten nach den Herkunftsländern der Batterielieferanten.

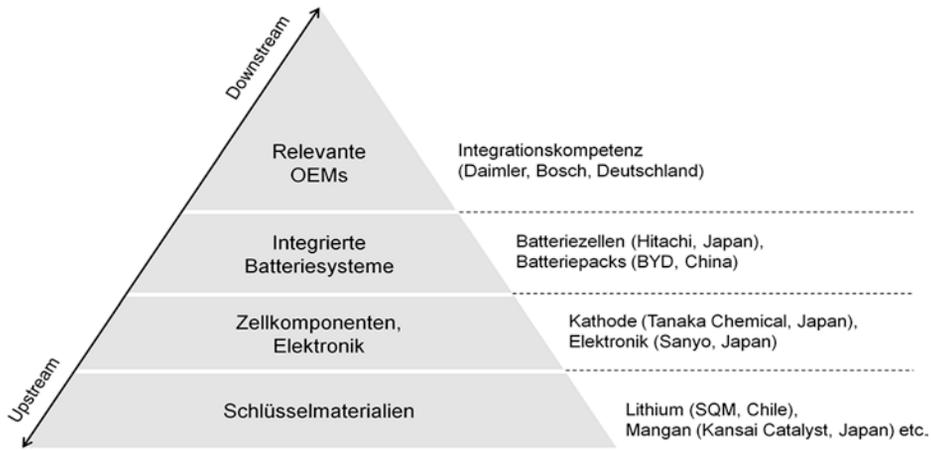
Aus der Zusammenstellung wird eine Dominanz japanischer Firmen ersichtlich. Japan hielt 2008 einen Marktanteil von 57 % der Lithium-Ionen-Batterien. Allein 23 % des Weltmarktes liegen bei dem japanischen Hersteller Sanyo. Aber auch Sony, Panasonic und Hitachi Maxell rangieren unter den größten zehn Lithium-Ionen-Batterieherstellern weltweit. Nach Japan folgen in 2008 Südkorea mit 17 % (Samsung, LG Chem) und China (BYD, ATL) mit 13 % (Meti 2010). Neue Batteriehersteller wie das Evonik-Daimler-Joint-Venture Deutsche Accumotive, der US-Hersteller

**Tab. 2.2** Kooperationen von Batterielieferanten und Automobilherstellern nach Ländern (in Anlehnung an Dohr 2010; Göschel 2010)

Batteriehersteller	Herkunft	Kooperationen mit OEM
Sanyo	Japan	Honda, PSA, Toyota, VW (Audi)
Samsung	Südkorea	BMW (mit Bosch über SB LiMotive)
BYD	China	VW, BYD, Daimler über BYD Auto
LG Chem	Südkorea/USA	GM
Panasonic	Japan	Honda, Toyota
NEC	Japan	Renault-Nissan
Toshiba	Japan	VW
GS Yuasa	Japan	Honda, Mitsubishi, PSA
JCI Saft	Frankreich	Ford, Daimler
A123	USA	Think
Li-Tec	Deutschland	Daimler (mit Evonik)

A123 Systems oder auch geplante Fabriken von Magna bringen sicherlich erste Weltmarktanteile in die USA und nach Europa. Trotzdem verbleiben die Hauptanteile der Lithium-Ionen-Batterieproduktion mit Kompetenzen und entsprechend ausgebildeten Angestellten weiterhin in Korea, China und Japan (Grove 2010). Die aktuelle Verteilung von Marktanteilen nach Bestandteilen wird von Experten entsprechend der derzeit vorhandenen Batterieproduktion eingeschätzt. Anoden- und Kathodenmaterial wird aktuell ausschließlich in Japan und Südkorea gefertigt. Auch bei weiteren Komponenten werden diese Länder als führend eingestuft. Bei der Batteriezelle lautet neben diesen Ländern die Marktanteilsrangfolge China, Europa, USA. Bei Elektronikkomponenten ist Europa vor den USA und China einzuschätzen, aber erst nach Japan und Südkorea (CGGC 2010). Die Zuliefererpyramide der Batterieherstellung stellt sich wie in Abb. 2.15 dar.

Bei den Schlüsselmaterialien kommt eine besondere strategische Bedeutung den Seltenen Erden (bspw. Dysprosium und Neodym) zu, sie erleben durch die Elektromobilität eine hohe zukünftige Nachfrage, sind schwer substituierbar sowie kosten- und mengenrelevant. Mit der Hauptproduktion von über 97 % in China sind sie als kritisch einzustufen (Achzet 2010). Politische Unsicherheit und Handelshemmnisse müssen schon heute berücksichtigt werden, ebenso wie die mögliche geografische Entfernung von Wertschöpfungsstufen beim Aufbau von Wertschöpfungsketten. Die chinesische Regierung steuert hier mit Ausfuhrverboten und -zöllen eine Weiterverarbeitung im eigenen Land, um neben anderen entstehenden globalen Automobilherstellern global präsenste chinesische Zulieferer zu etablieren. Der strategische Aspekt eines durch Arbeitskräfte teureren Abbaus von Seltenen Erden in Ländern mit Vorkommnissen wie Australien und USA bedeutet eine Diversifizierung der Lieferquellen. Lithiumcarbonat hat wie die Seltenen Erden eine strategische und



**Abb. 2.15** Zuliefererpyramide anhand der Batterie mit Beispielakteuren. *Quelle* Eigene Darstellung

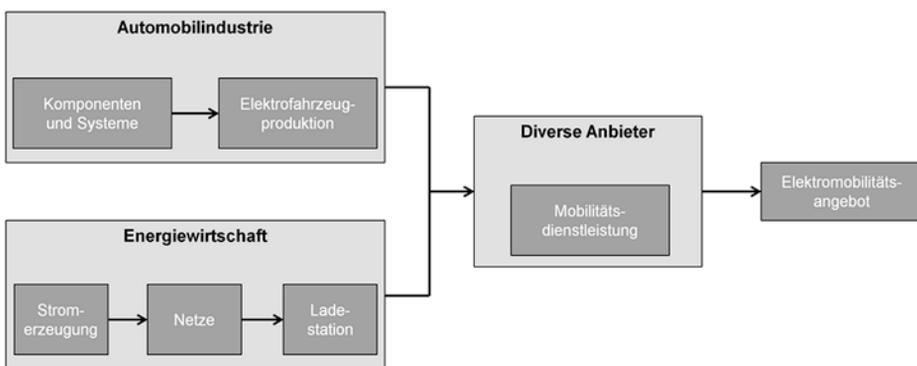
kritische Bedeutung für die Produktion von elektromobilen Fahrzeugen und wird aktuell hauptsächlich aus Salzlake gewonnen. Hauptförderländer sind Chile, China, Argentinien, Australien und Russland. Das Hauptvorkommen hingegen befindet sich in dem noch nicht fördernden Bolivien mit fast 36 % des Weltvorkommens (Luft und Korin 2009). 75 % der bekannten Vorkommen sind in Südamerika. Weiterhin besteht aufgrund hoher Investitionen zur Förderung ein Oligopolmarkt mit der deutsch-amerikanischen Chemetall, der chilenischen SQM, der amerikanischen FMC und der chinesischen CITIC (Meridian 2007). Dies ist für die Nachfrageseite nicht unproblematisch. Ein wichtiger Schritt für Automobilhersteller wäre, sich gegen eine Knappheitssituation durch den Dialog mit Lithium-Produzenten abzusichern. Strategische Partnerschaften oder langfristige Liefervereinbarungen sind wie bei der Lieferung von anderen kritischen Rohstoffen wie den Seltenen Erden zielführend. Implikationen für Automobilhersteller sind weiterhin die Steigerung von Materialeffizienz sowie die Nutzung von Recyclingpotenzialen.

### 2.3.6 Zusammenspiel von Akteuren

Durch die Neuausrichtung der Wertschöpfungskette ist nicht absehbar, inwiefern sich Machtverhältnisse, die derzeit Automobilhersteller begünstigen, ändern. Mit neuen Kooperationen und veränderten Material-, Entwicklungs- und Produktionsumfängen Upstream-verschobene Abhängigkeiten, Batterie-Joint-Ventures zwischen Herstellern und Zulieferern (bspw. PEVE von Toyota und Panasonic, Deutsche Accumotive

von Daimler und Evonik). Ebenfalls kommt Joint-Ventures zwischen bestehenden Automobilzulieferern und Batterieherstellern (bspw. SB LiMotive von Samsung und Bosch). Weiterhin werden mit Lieferverträgen langfristige Beziehungen festgelegt (bspw. VW und BYD, Daimler und JCS, Magna und A123) (Goldman Sachs 2010). Die Absicherung des Ressourcen- und Technologiezugangs ist aktuell über verschiedenste Kooperationen und Lieferantenverträge geregelt. Langfristig müssen sich noch präzisere Strategien der Wertschöpfungsverteilung herausbilden (McKinsey 2011). Downstream nähern sich Automobilindustrie und Energiewirtschaft einander an. Von ihnen, aber auch von der Politik hängt es ab, länderübergreifende Standards zu etablieren. Hinzu kommen diverse Anbieter von Dienstleistungen, die an Geschäftsmodellen mit Informations- und Kommunikationsleistungen wie der Abrechnung beteiligt sein können. Aus all dem ergibt sich ein komplexes, interdependentes Wertschöpfungssystem (Abb. 2.16).

Um die Akzeptanz von Elektromobilität beim Endkunden zu halten bzw. zu erhöhen, sollte es sie weiterhin aus einer Hand geben (PWC 2010). Möglich ist dies über eine enge Zusammenarbeit der beteiligten Akteure und intelligente Abrechnungssysteme. Allein mit dem Verkauf von Strom lässt sich auf der Seite der Energiewirtschaft noch kein tragfähiges Geschäftsmodell abbilden. Hier kommt ein Konzept wie in der Mobilfunkbranche infrage, wo Netzbetreiber die Schnittstelle zum Endkunden bilden (Deloitte 2009). Ob sich ein solches systemübergreifendes Modell in der Automobilindustrie etablieren kann, hängt davon ab, wie sich Automobilhersteller und Energieversorger in der Wertschöpfung der Elektromobilität positionieren werden. Mit dem gesellschaftlichen Wandel der Bedeutung individueller Mobilität werden intermodale Angebote, also das Zusammenspiel verschiedener Verkehrsmittel, interessant. Für den Kunden spielt dabei neben dem Produkt auch die Preis-, Distributions- und Kommunikationspolitik eine entscheidende Rolle (Diez 2006).



**Abb. 2.16** Zusammenspiel der Akteure und Ausrichtung auf Endnutzer (PWC 2010)

## 2.4 Produktion von Elektrofahrzeugen

Achim Kampker, Christoph Deutsdens und Carsten Nee

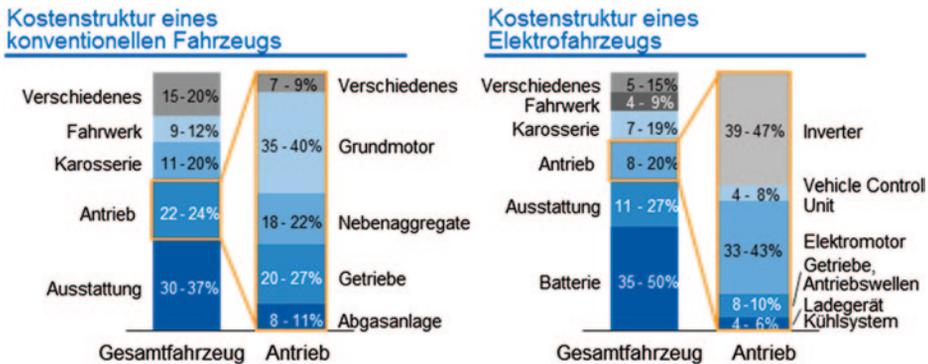
Elektrofahrzeuge haben trotz positiver ökologischer und gesellschaftlicher Eigenschaften eine breite Diffusion am Markt noch nicht erreichen können. Dies ist überwiegend auf die preisliche Unattraktivität dieser Fahrzeuge zurückzuführen. Trotz obsoletter Antriebskomponenten können die Mehrkosten für die Batterie nicht kompensiert werden. Um zukünftig konkurrenzfähige Elektrofahrzeuge anzubieten, braucht es Verständnis für die veränderten Kostenstrukturen und Zielkosten von Elektrofahrzeugen. Zum anderen müssen massive Potenziale in der Produktion dieser Fahrzeuge identifiziert werden. Zielführend für die bestmögliche Erschließung dieser Potenziale ist die integrierte Produkt- und Prozessentwicklung, indem bereits im Entstehungsprozess ein aktiver Einfluss der Produktion auf die Produktspezifikationen ausgeübt wird. Eine Technologieauswahl, die Validierung von Prozessen im Entwicklungsstadium und neue Produktionstechniken für Elektrofahrzeuge ergänzen die integrierte Produkt- und Prozessentwicklung zur Erschließung der Kostenpotenziale.

### 2.4.1 Kostenstruktur von Elektrofahrzeugen

Hervorgerufen durch den stark veränderten Antriebsstrang und noch nicht vollständig etablierte Produktionsprozesse, ergeben sich neue Kostenstrukturen von Elektrofahrzeugen; unterschiedliche Betriebsbedingungen führen ebenfalls zu veränderten Fahrzeuglebenszyklus- sowie Zielkosten. Tabelle 2.3 zeigt die Veränderungen bei den zu verbauenden Komponenten im Antriebsstrang, während Abb. 2.17 die veränderten Kostenstrukturen für Gesamtfahrzeug und Antriebsstrang darstellt.

**Tab. 2.3** Veränderungen im Antriebsstrang

Obsolete Komponenten	Stark veränderte Komponenten	Hinzukommende Komponenten
- Verbrennungsmotor (Motorblock, Kolben, Dichtungen, Ventile, Nockenwelle, Ölwanne, Ölfilter, Lager)	- Getriebe - Radaufhängung - Kraftübertragung - Klimaanlage, Heizung - Kühlwasserpumpe - Wärmedämmung	- Elektromotor (und weitere Antriebsselemente) - Leistungselektronik - Batteriesystem (Akkumulator, Batteriemanagement)
- Tanksystem		
- Einspritzanlage		
- Kupplung		
- Abgasanlage		
- Nebenaggregate (Ölpumpe, Turbolader, Lichtmaschine)		



**Abb. 2.17** Veränderungen in der Kostenstruktur für Gesamtfahrzeug und Antriebsstrang

Nicht nur der Verbrennungsmotor mit seinen zahlreichen Komponenten im Abgassystem und in der Treibstoffversorgung entfällt, auch die Komponenten des Schalt- bzw. Automatikgetriebes werden im Elektroauto nicht verbaut. Neben der Fahrzeugbatterie, dem Elektromotor, der Leistungselektronik und dem Fahrwerk verfügt das Elektroauto über ein komplexes Bordnetz, womit der konventionelle mechanisch-hydraulische Standard durch überwiegend elektrische Bauteile substituiert wird (Bernhart und Zollenkop 2011).

Bedingt durch die stark verringerte Anzahl an Komponenten im Elektromotor (ca. 200 Teile) reduziert sich der Kostenanteil des Antriebs am Gesamtfahrzeug gegenüber dem mit Verbrennungsmotor (ca. 1.400 Teile) um mindestens 4 %. Elektromotoren für den Anwendungsfall in der Elektromobilität werden nur in Kleinserien hergestellt, sodass sich aufgrund von Skaleneffekten die Motorkosten in einer Massenfertigung halbieren können. Bei der Wahl eines Synchronmotors als Fahrzeugantrieb besteht große Abhängigkeit von den volatilen Preisen für Seltene Erden zur Permanentmagnetherstellung. Der Asynchronmotor ist eine kostengünstigere Alternative, um sich zu Ungunsten des Wirkungsgrades von dieser Rohstoffabhängigkeit zu entkoppeln.

Die Batterie stellt mit bis zu 50 % der Fahrzeugkosten den größten Kostenblock bei Elektrofahrzeugen dar. Produkt- und Prozessinnovationen werden in der nächsten Dekade jedoch eine Kostendegression von 500 Euro/kWh auf ca. 140–300 Euro/kWh ermöglichen.

Des Weiteren ist die Leistungselektronik (Inverter und Mikroprozessor) ein neu hinzukommender Kostenblock für Elektrofahrzeuge. Aktuell in Elektrofahrzeugen verbaute Inverter haben Herstellkosten von ca. 600 Euro, 60 % davon sind auf Materialkosten, 10 % auf Lohnkosten und 30 % auf Produktionsanlagenabschreibungen und Gemeinkosten zurückzuführen. Ein Anstieg der Produktionsstückzahlen erlaubt eine breitere Verteilung der Abschreibungskosten, stärkere Automatisierung sowie größere Rabatte im Materialeinkauf.

## 2.4.2 Integrierte Produkt- und Prozessentwicklung

Die integrierte Produkt- und Prozessentwicklung dient der Erschließung der aufgezeigten Potenziale im Bereich der Kostenreduzierung und der Erreichung der Zielkosten. Sie befähigt zu Kosteninnovation sowie zur Hervorbringung, Einführung und Durchsetzung von Elementen, Systemen oder Prozessen, die neuartig sind und zu massiven Kosteneinsparungen führen. Zwei Aspekte zeigen zugleich Notwendigkeit und Herausforderung der integrierten Produkt- und Prozessentwicklung für die Elektromobilität auf: zum einen die Entscheidung über den gewählten Entwicklungsansatz (Conversion-Design vs. Purpose-Design), zum anderen die Beherrschung der durch die Elektromobilität zusätzlich gestiegenen Produktvarianz und der damit verbundenen Produktkomplexität.

### 2.4.2.1 Conversion-Design vs. Purpose-Design für Elektrofahrzeuge

Im Rahmen der Elektromobilität eröffnen sich zwei grundverschiedene Entwicklungsansätze bei der Fahrzeuggestaltung: das Conversion-Design und das Purpose-Design (Gies 2009). Der Conversion-Design-Ansatz beschreibt die Überarbeitung eines bestehenden Fahrzeugkonzeptes durch den Austausch des Verbrennungsantriebs mit einem Elektroantrieb. Die Produktion von Fahrzeugen, die mit diesem Ansatz entwickelt werden, basiert auf bestehenden Strukturen und Produktionstechniken. Die Potenziale einer ganzheitlichen Produkt- und Prozessgestaltung können nicht erreicht werden, da die für Verbrennungsmotoren optimierte Struktur übernommen wird. Beispiel ist die Übernahme von Position und Bauraum des Verbrennungsmotors für die Elektromaschine. Als Vorteil erweist sich allerdings, dass die Entwicklung effizienter und schneller ist, da auf bestehende und serienreife Konzepte aufgebaut werden kann. In der Produktion werden Skaleneffekte bei Gleichteilen erreicht, insbesondere können Werkzeugkosten für die Karosserie über höhere Stückzahlen abgeschrieben werden. Gerade während der Etablierungsphase der Elektromobilität sind geringe Absatzzahlen zu erwarten, weshalb durch eine Integration der angebotenen Elektrofahrzeuge in die bestehenden Produktionsstrukturen variable Fertigungszahlen bei akzeptablen Fertigungskosten möglich sind. Im Gegenzug fehlt oftmals der Raum für Innovationen, da auch die Fahrzeugproduktion für Verbrennungsantriebe ausgelegt ist. Somit sind bei der Modifikation starke Einschränkungen der Gestaltungsfreiheit und der daraus resultierenden technischen Möglichkeiten hinzunehmen (Wallentowitz 2010). Es zeigt sich, dass bislang trotz der vielen Vorteile die Entwicklungen nach dem Conversion-Design-Ansatz nicht in der Lage sind, die Mehrkosten der Batterie durch den Austausch der Antriebskomponenten zu kompensieren.

Der Purpose-Design-Ansatz beschreibt die komplette Fahrzeugneuentwicklung, basierend auf den spezifischen Anforderungen an Elektrofahrzeuge. Der Einfluss produktionstechnischer Aspekte auf die Produktgestaltung kann damit ganzheitlich und in frühen Entwicklungsstadien mit in die Planung einbezogen werden. Somit sind

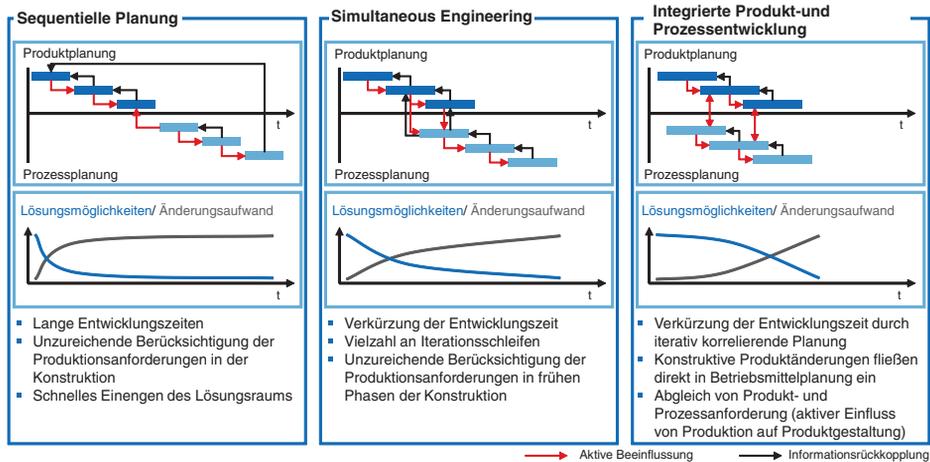
neue Fertigungstechnologien, -prozesse, -layouts und Montagestrukturen möglich. Das Purpose-Design zusammen mit einer integrierten Produkt- und Prozessentwicklung ermöglicht es, die etablierten automobilen Produktionsstrukturen neu zu durchdenken und verbesserte, auf die Elektrofahrzeugherstellung angepasste Produktionssysteme zu entwickeln. Beispielsweise kann die Position der Batterie im Fahrzeug unabhängig von bestehenden Strukturen gewählt werden und so funktionstechnisch als auch produktionstechnisch optimal gewählt werden.

#### **2.4.2.2 Beherrschung der Produktkomplexität durch Front- und Side-Loading**

Die Produkt- und die Prozessentwicklung müssen mit der allgemein steigenden Komplexität des Produktprogramms umgehen. Insgesamt steigt die Anzahl der Fahrzeugderivate und gleichzeitig nimmt die Lebensdauer der Modell-Generationen stetig ab. Durch die Elektromobilität steigt die bereits bestehende Komplexität des Produktprogramms deutlich und unabhängig vom gewählten Entwicklungsansatz. Beim Conversion Design steigt die Komplexität durch die Berücksichtigung einzelner Komponenten des Antriebsstrangs vergleichbar mit dem Komplexitätszuwachs durch zusätzliche Verbrennungskraftmotoren und Getriebe-Typen. Beim Purpose Design muss eine neue Produktlinie in das Produktprogramm aufgenommen werden, die zwar entkoppelt vom restlichen Produktprogramm ist, dennoch insgesamt die Komplexität des zu verwaltenden Produktprogramms deutlich erhöht.

Vor dem Hintergrund steigender Produktkomplexität nimmt auch die Bedeutung der integrierten Betrachtung von Produkten und Prozessen zu. Es müssen Lösungen gefunden werden, um die Produktkomplexität möglichst effizient in der Produktion abbilden zu können. Es zeigt sich, dass dazu die Ansätze des Front-Loadings (die frühe Einbindung der Produktion in die Produktentwicklung) insbesondere für die Elektromobilität umgesetzt werden müssen. Dazu wird auf bestehende Konzepte des Simultaneous Engineering zurückgegriffen (Ehrlenspiel et al. 2007). Nur auf diese Weise kann dem großen Kostendruck begegnet werden. Front-Loading reicht jedoch nicht aus. Je größer die Freiheitsgrade und die Ungewissheit in der Produktentwicklung sind, desto schwerer fällt der Produktionsplanung, die beste Lösung zur produktionstechnischen Umsetzung ermitteln zu können. Um diesem Problem zu entgehen, ist die Einführung einer übergeordneten Entwicklungs-Instanz notwendig, das „Side-Loading“. Es handelt sich dabei um eine Entwicklungsinstanz, die unabhängig von Entwicklungsprojekten und Produktlebenszyklen die zukünftigen Strukturen von Fahrzeugen und der Fahrzeugproduktion abstimmt und vordenkt. Hierzu zählen die Entwicklung der Produktarchitektur, der Prozess- und Anlagenbaukästen sowie das Technologiemanagement. Die Entwicklungsergebnisse des Side-Loadings werden den Konstrukteuren und Planern wie in einem Supermarkt angeboten, aus dem sie sich für eine konkrete Entwicklungsaufgabe bedienen können bzw. sogar gezwungen sind, sich daraus zu bedienen.

Durch die Verbindung von Front- und Side-Loading in integrativen, hochkommunikativen Entwicklungsteams wird eine neue Form der integrierten Produkt- und



**Abb. 2.18** Vergleich der Beeinflussungsgrade und Informationsflüsse verschiedener Entwicklungsansätze (in Anlehnung an Schuh et al. 2011)

Prozessentwicklung beschrieben, um die für die Elektromobilität wichtigen Ziele der Verkürzung der Time-to-Market, der Reduzierung der Entwicklungs- und Herstellkosten sowie die Sicherstellung der Produktqualität zu erreichen (Eversheim 2005). Die angestrebte interdisziplinäre Arbeit kann nur erfolgreich sein, wenn das Projektmanagement der übergeordneten Verwaltungsinstanzen und die Kommunikation der beteiligten Teams untereinander sowie gegenüber den vorgesetzten Instanzen reibungslos funktionieren (Ehrlenspiel 2009) (Abb. 2.18).

### 2.4.2.3 Bestandteile der integrierten Produkt- und Prozessentwicklung

Zu den wesentlichen Bestandteilen der integrierten Produkt- und Prozessentwicklung speziell für den Anwendungsfall der Elektromobilität zählen folgende Elemente:

- Produktionsanforderungen schon in den Fahrzeugspezifikationen
- Technologieauswahl
- Validierung der Produktionsprozesse in frühen Phasen der Produktentwicklung
- Cardboard Engineering
- Kostenvergleich und Transparenz schon in der Entwicklungsphase
- Fabrikplanung und „Digitale Fabrik“ zur Prozessvalidierung

#### *Produktionsanforderungen schon in den Fahrzeugspezifikationen*

Besondere Anforderungen an die Produktion von Elektrofahrzeugen sind Flexibilität und Wandlungsfähigkeit, vor allem im Hinblick auf Stückzahlskalierbarkeit und Integration neuer Produktionen in bestehende Produktionslinien. Große Automobilhersteller sind aufgrund der bereits bestehenden Produktionsprozesse sehr an einer

Integration der Elektrofahrzeugproduktion in bestehende Produktionsstrukturen interessiert. Damit diese Integration gelingen kann, ist ein hohes Maß an Flexibilität im Bereich der Fertigung und Montage erforderlich. Prozesse, die nicht in bestehende Montagelinien integriert werden können, werden dabei als Offline-Stationen bezeichnet und müssen unbedingt vermieden werden.

Zu erwartende steigende Absatzzahlen für Elektrofahrzeuge erfordern eine Skalierbarkeit der Produktionsmengen (Westkämpfer und Zahn 2009). Im Fall der Produktionsintegration in bereits bestehende Produktionslinien kann zunächst durch das Absenken der Produktionsmengen anderer Produktvarianten für neue Kapazitäten gesorgt, können Arbeitsstationen mit einem Vielfachen des Fertigungs- bzw. Montagetaktes eingefügt oder gezielt Leistungsumfänge an Lieferanten vergeben werden. Sind dies hingegen keine Optionen, besteht lediglich die Möglichkeit einer neuen Produktionslinie. In diesem Fall kann die Produktion mit Rücksicht auf veränderliche Produkteigenschaften neu konzipiert werden, um das maximale Innovationspotenzial des Produkts bei einer möglichst effizient gestalteten Produktion zu gewährleisten.

In der frühen Phase der Produktentwicklung muss daher der Integrationsgrad in bestehende Linien als strategisches Entwicklungsziel festgelegt werden. In Abhängigkeit von dieser Entscheidung müssen dann produktionsseitige Restriktionen analysiert und in das Lastenheft der Fahrzeugentwicklung mit aufgenommen werden.

### *Technologieauswahl*

Die Effizienz, Effektivität und Innovationsfähigkeit von Produktionsprozessen ist in starkem Maß abhängig von der verwendeten Produktionstechnologie. Deren Auswahl hat Einfluss auf Prozess- und damit Produktkosten. Eine Technologievorauswahl sollte daher schon vor Beginn der integrierten Produkt- und Prozessentwicklung stattfinden. Hierzu bedarf es einer genauen Analyse etablierter und innovativer Technologien im Hinblick auf alle relevanten Eigenschaften und Anforderungen.

Die Technologieplanung setzt auf eine konsequente Früherkennung möglicher Optionen in Verbindung mit einer ausführlichen Technologiebewertung, die über dokumentierende Datenblätter in Form umfangreicher digitaler Datenbanken realisiert werden kann. Technologieinformationssysteme, die bei etablierten Technologien sehr gut für manuelle Recherchen geeignet sind, betrachten die Technologiegestaltung, die Wirtschaftlichkeit, die betriebliche Organisation und weitere Informationen aus dem Technologieumfeld (Dangelmaier 2001). Darunter sind bspw. Prozessbeschreibung und -daten, Geometrie- und Werkstoffdaten, Investitionen und Betriebskosten, Operationszeiten, Personalbedarf sowie Technologieanbieter und Lohnfertiger zu verstehen (Corsten 1989; Eversheim und Schuh 2005; Schuh und Klappert 2011).

Tools der Technologiefrüherkennung und -kettenbewertung sind zunächst nur für Elektrofahrzeuge, die mit dem Purpose-Design-Ansatz entwickelt werden, interessant. Besonders für Antriebsstrangkomponenten mit hohem Potenzial für Kostenoptimierung und Leistungsverbesserung (Batterie, Elektromotor, Leistungselektronik) ist aufgrund der Innovationsdynamik eine Technologieauswahl erforderlich. Sie wird weiter an

Relevanz gewinnen, wenn die Elektromobilität eine steigende Innovationsdynamik in allen Produktbereichen verzeichnet und sich mit wachsenden Absatzzahlen zunehmend anforderungsgerechte Produktionslinien lohnen.

#### *Validierung der Produktionsprozesse in frühen Phasen der Produktentwicklung*

Es ist für die optimale Entwicklung von großer Bedeutung, dass Prozesse möglichst zeitnah und unter Einhaltung realistischer Rahmenbedingungen validiert werden können, um auf diese Weise kostenintensive spätere Änderungen zu vermeiden. Dies betrifft die Prozessauswahl und -anordnung sowie deren Bewertung.

Wenn eine Fertigungsfolge als geeignet erkannt wird, kann ein Prototyp zur Verifikation gebaut werden. Auf diese Weise wird der praktische Beweis für oder gegen die theoretisch ermittelte Planung ermittelt und es entsteht ein reales Modell des Produkts. Für die Realisierung sind allerdings Fertigungsmittel, Material und Personalkapazitäten notwendig, was Prototypen in der Herstellung mitunter teuer und aufwändig werden lässt. Eine günstigere, aber ungenauere Option bilden digitale Prototypen durch Simulationen (Bertsche und Bullinger 2007).

#### *Cardboard Engineering*

Die Brücke zwischen der computergestützten Arbeitsplatzgestaltung und dem realen Arbeitsplatz bildet das Cardboard Engineering. Darunter wird das prototypische Herstellen von und das Ausprobieren an einfachen Modellen des Produkts bzw. der Produktionseinrichtungen aus Pappe (oder anderem einfach zu verarbeitendem Material) verstanden. Als Resultat erhält man ein wirklichkeitsnahes und preisgünstiges Abbild der bisherigen Planung, da die Papp-Modelle real existieren und für ein persönliches Ausprobieren von Arbeitsschritten in einer vollständig dreidimensionalen Testumgebung zur Verfügung stehen. Änderungen, insbesondere bei der räumlichen Aufteilung der modellierten Umgebung, können nach der Fehleridentifikation leicht vorgenommen und rückwirkend in die theoretische Planung übernommen werden (Caborn et al. 1998). Das Modellieren mit Pappe ist einfach, flexibel und kostengünstig. Man erhält so die Möglichkeit der anschaulichen Planungsverifikation, bei minimalem finanziellen und technologischen Aufwand. Zudem ist das Modell ein anschauliches Kommunikationswerkzeug, das Missverständnisse vermeidet und die interdisziplinäre Abstimmung zwischen Entwicklung und Prozessplanung vereinfacht.

#### *Kostenvergleich und Transparenz schon in der Entwicklungsphase*

Die Prozessvalidierung kann neben der technischen Realisierung auch auf computergestützte wirtschaftliche Bewertungen in allen Arbeitsphasen zurückgreifen. Ein Beispiel sind Prozesskostenkalkulationsprogramme: Als Basis der Kostenrechnung werden die anfallenden Informationen im eigenen Unternehmen verwendet und durch externe Daten, wie bspw. die aktuelle Marktsituation, durchschnittliche Lohnkosten, zu erwartende Krankentage etc., erweitert. Auf diese Weise können zu jedem Zeitpunkt möglichst genaue Kostendimensionen identifiziert und im weiteren Prozess berücksichtigt und verglichen werden.

### Fabrikplanung und „Digitale Fabrik“ zur Prozessvalidierung

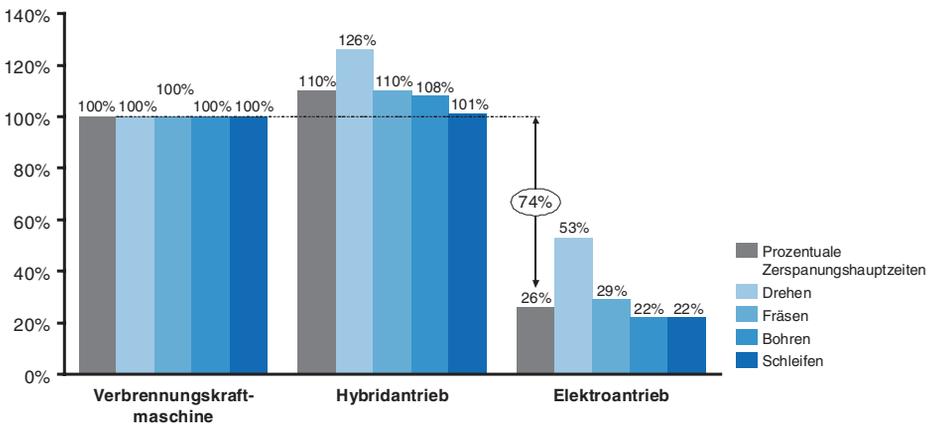
Die Grundaspekte der Fabrikplanung sind die technische Ausstattung, interne Logistik, Software und datentechnische Vernetzung, Lagerkonzeption sowie die räumliche und zeitliche Strukturierung von Arbeitsplätzen in den Fertigungsstandorten. Durch die Anfertigung von Fertigungslayouts und die rechnerische Validierung von Fertigungsabläufen lassen sich Planungszwischenstände der integrierten Produkt- und Prozessentwicklung vergleichen und validieren.

Im Vergleich zu den konventionellen Simulationsprogrammen verfügt die digitale Fabrik über Materialfluss- und Logistik- sowie Prozesssimulationen, die sogar die Ergonomie des Arbeitsplatzes berücksichtigen. Mit der Eingabe von Arbeitszeitmodellen und dem Produktspektrum können Kapazitätsbewertungen für die Produktion erstellt und mit Prozesssimulationen Montageschritte bzw. Fügefolgen analysiert und bewertet werden (Bierschenk und Brandner 2005).

### 2.4.3 Veränderung der Produktionstechnik für die Elektromobilität

Durch veränderte Komponenten im Antriebsstrang ergeben sich Verschiebungen bei der Bedeutung von Fertigungstechnologien zur Herstellung der Antriebskomponenten. Besonders zerspanende Fertigungsverfahren werden für die Antriebsstrangproduktion deutlich weniger in Anspruch genommen (s. Abb. 2.19). Zukünftig steigen wird hingegen die Bedeutung von umformenden, trennenden und fügenden Fertigungsverfahren für die Elektromobilproduktion (Pressen, Ziehen, Biegen, Stanzen, Schweißen) (Fraunhofer 2010).

Beispielsweise wird bei der Herstellung von Elektromotoren der Draht der Spulen gezogen und gewickelt sowie der Stator imprägniert, sodass die Fertigungsverfahren



**Abb. 2.19** Veränderungen der Zerspanungshauptzeiten für den Elektroantrieb. *Quelle* Abele et al. (2009)

Ziehen, Biegen und Imprägnieren an Bedeutung gewinnen. Dagegen zeichnet sich der Batterieproduktionsprozess durch bis zu 150 Ultraschallschweißverbindungen zwischen Stromableiter und Kontaktfahne pro Batterie aus. Damit zeigt die Produktion der Batterie beispielhaft die steigende Relevanz von Schweißprozessen in der Fertigung von Elektrofahrzeugen.

Durch das zusätzliche Gewicht der Batterie wiegen elektrische Antriebsstränge nahezu doppelt so viel wie konventionelle (der Kraftstofftank wird als leer angenommen). Um das zusätzliche Fahrzeuggewicht auszugleichen, werden viele Elektrofahrzeuge mit Kunststoffaußenhaut entwickelt. Für die Produktionstechnik bedeutet dies eine erhöhte Relevanz für Handlaminierten, Thermoformen, Reaktions-schaumguss und Spritzguss.

CFK ist als Werkstoff für die Massenproduktion mit einem Preis von ca. 60 Euro pro kg Gewichtsersparnis zum jetzigen Zeitpunkt noch unattraktiv. Es gilt deshalb, die Verarbeitungs- und Fertigungsverfahren zu optimieren, um die preisliche Attraktivität von Kunststoffen zu steigern und somit Leichtbaupotenziale bestmöglich nutzen zu können. Der erweiterte Einsatz von Kunststoff für die Fahrzeugaußenhaut macht die Kunststoffverarbeitung zu einer Produktionskompetenz mit dem größten Wachstum in den nächsten 20 Jahren (McKinsey 2011).

---

## Literatur

- Abele E et al (2009) Wandel im Pkw-Antriebsstrang: Auswirkungen auf Produktionskonzepte. In: Maschinenbau und Metallbearbeitung, Kuhn Fachverlag, Villingen-Schwenningen
- Abt D (1998) Die Erklärung der Technikgenese des Elektroautomobils. In: Europäische Hochschulschriften, Reihe Volks- und Betriebswirtschaft, Bd 2295. Peter Lang, Frankfurt am Main
- Accenture (2009) Changing the game – Plug-in electric vehicle pilots. [http://www.accenture.com/SiteCollectionDocuments/PDF/Accenture\\_Uilities\\_Study\\_Changing\\_the\\_game.pdf](http://www.accenture.com/SiteCollectionDocuments/PDF/Accenture_Uilities_Study_Changing_the_game.pdf). Zugegriffen: 09. July 2012
- Achzet B (2010) Strategische Rohstoffplanung für elektrische Antriebstechnologien im Automobilbau: Eine Entscheidungshilfe für Lithium, Neodym und Platin. Diplomica Verlag, Hamburg
- Adams WP (2000) Die USA im 20. Jahrhundert. In: Oldenbourg Grundriss der Geschichte, Bd 29. Oldenbourg, München
- Andersen A (1999) Der Traum vom guten Leben. Alltags- und Konsumgeschichte vom Wirtschaftswunder bis heute. Campus Verlag, Frankfurt am Main
- auto motor und sport (Hrsg) (27.01.2011) 125 Jahre Auto. Nr 4/2011
- Balling R (1998) Kooperation – Strategische Allianzen, Netzwerke, Joint Ventures und andere Organisationsformen zwischenbetrieblicher Zusammenarbeit in Theorie und Praxis. Verlag Lang, Frankfurt am Main
- Banham R (2002) The Ford century. Ford Motor Company and the innovations that shaped the World. Artisan, San Diego
- Barthel M, Lingnau G (1986) 100 Jahre Daimler-Benz. Die Technik. v. Hase & Koehler Verlag, Mainz
- Baum H et al (2010) Nutzen-Kosten-Analysen der Elektromobilität. Z. Verk 81(3):153–196

- Bernhart W, Zollenkop M (2011) Geschäftsmodellwandel in der Automobiliindustrie – Determinanten, zukünftige Optionen, Implikationen. Springer, Berlin
- Bertsche B, Bullinger HJ (2007) Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte – Rapid Prototyping: Grundlagen, Rahmenbedingungen und Realisierung. Springer, Berlin
- Bierschenk S, Brandner C (2005) Schwerpunktthema Digitale Fabrik. In: Lernen und lehren: Elektrotechnik - Informatik, Metalltechnik 77:5
- BMVBS (2008) Verkehr in Zahlen 2008/2009. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Hamburg
- Bonin H et al (Hrsg) (2003) Ford. The European history, Bd 2. P.L.A.G.E., Paris
- Buchenau M, Herz C (2011) Die Mächtigen der neuen Autowelt. Handelsblatt 13.04.2011
- BUNDESREGIERUNG (2009) Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung, Berlin
- Caborn C, Mould I, Cave J (1998) Design & technology. Nelson Thornes Ltd Educational, Cheltenham
- Canzler W, Knie A (1994) Das Ende des Automobils. Fakten und Trends zum Umbau der Autogesellschaft. Müller, Heidelberg
- CGGC (Center on Globalization, Governance & Competitiveness, Duke University) (2010) Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles – The U.S. Value Chain. [http://cggc.duke.edu/pdfs/Lithium-Ion\\_Batteries\\_10-510.pdf&searchx=Electric%20Vehicles%20VALUE%20CHAIN](http://cggc.duke.edu/pdfs/Lithium-Ion_Batteries_10-510.pdf&searchx=Electric%20Vehicles%20VALUE%20CHAIN). Zugegriffen: 20. Mai 2011
- Corsten H (1989) Die Gestaltung von Innovationsprozessen: Hindernisse und Erfolgsfaktoren im Organisations-, Finanz- und Informationsbereich. Erich Schmidt, Berlin
- Dangelmaier W (2001) Fertigungsplanung: Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung. Springer, Berlin
- Deloitte (2009) Konvergenz in der Automobilindustrie: Mit neuen Ideen Vorsprung sichern. [http://www.deloitte.com/assets/DcomGermany/LocalAssets/Documents/de\\_mfg\\_studie\\_konvergenz-automobilindustrie.pdf](http://www.deloitte.com/assets/DcomGermany/LocalAssets/Documents/de_mfg_studie_konvergenz-automobilindustrie.pdf). Zugegriffen: 04. Aug 2011
- Dennhardt H, Ziegler K (2006) Strategien zur Ermittlung, Bewertung und konzeptionellen Weiterentwicklung von leerstehender Bausubstanz im ländlichen Raum. Diplomarbeit von Frau Nicole Kippenberger am Fachgebiet „Ländliche Ortsplanung“. TU, Kaiserslautern
- Deutsches Museum München (Hrsg) (2010) Kultur und Technik. (Nr 3. Ökologisch Mobil)
- Dienel HL, Trischler H (Hrsg) (1997) Geschichte der Zukunft des Verkehrs. Verkehrskonzepte von der Frühen Neuzeit bis zum 21. Jahrhundert. In: Beiträge zur historischen Verkehrsforschung, Bd 1. Campus, Frankfurt am Main
- Diez W (2006) Automobil-Marketing: Navigationssystem für neue Absatzstrategien. In: Moderne Industrie, 5. Aufl. Landsberg am Lech
- Dohr M (2010) E-Auto-Technologie: Die Kooperationen der Hersteller. <http://www.auto-motor-und-sport.de/eco/e-autos-die-kooperationen-der-hersteller-1431038.html>. Zugegriffen: 20. Mai 2011
- EG (2002) Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm
- EG (2008) Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa
- Ehrlenspiel K (2009) Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Hanser Verlag, München, Wien
- Ehrlenspiel K, Kiewert A, Lindemann U (2007) Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Springer, Berlin
- Eversheim W, Schuh G (2005) Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Springer, Berlin
- Fersen HH von (1982) Autos in Deutschland 1885–1920. Eine Typengeschichte, 4. Aufl. Motorbuch Verlag, Stuttgart
- Fersen O von (1986) Opel. Räder für die Welt, 3. Aufl. Automobile Quarterly Publication, Stuttgart

- Flik M (2009) Thermomanagement bei Hybridfahrzeugen. In: Technischer Pressetag 2009
- Fojcik TM (2010) CAMA-Studie – Elektromobilität 2010 – Wahrnehmung, Kaufpräferenzen und Preisbereitschaft potenzieller E-Fahrzeug-Kunden. Lehrstuhl für ABWL & Internationales Automobilmanagement, Universität Duisburg-Essen
- Fraunhofer ISI, VDW, VDMA (2010) Online-Umfrage „Veränderungen des Kfz-Antriebsstrangs“ Düsseldorf
- Georgano N (1996) Electric vehicles. Shire Publications Ltd., Buckinghamshire
- Gies S (2009) Herausforderungen der Elektromobilität auf Basis technischer und strategischer Analysen. In: Erster Deutscher Elektro-Mobil Kongress, Bonn, 16–17. Juni 2009
- Goldman Sachs (2010) Goldman Sachs Global investment report: Americas clean energy storage battery
- Göschel B (2010) Ausrichtung von Zulieferer-Geschäftsmodellen auf die veränderten Strukturen der Automobilindustrie. In: Magna International 21. Automobil Forum, Stuttgart
- Grove A (2010) How America can create jobs. [http://www.businessweek.com/magazine/content/10\\_28/b4186048390203.htm](http://www.businessweek.com/magazine/content/10_28/b4186048390203.htm). Zugegriffen: 20. Mai 2011
- Hanselka H, Jöckel M (2010) Elektromobilität – Elemente, Herausforderungen, Potenziale. In: Hüttel R, Pitschetsrieder B, Spath D (Hrsg) Elektromobilität: Potentiale und wissenschaftlich-technische Herausforderungen. Springer, Berlin
- Johanning K, Vallée D (2011) Nutzungspotenziale und Infrastrukturbedarf für Elektro-Pkw. Internationales Verkehrswesen 4/2011. Deutscher Verkehrsverlag, Hamburg
- Kampker A (2010) Über das Netzwerk zum Serienprodukt. VDMA Nachrichten 02:14–15
- Kampker A, Döring S (2009) Freiraum für radikale Innovationen. Industrieanzeiger 45/46:37
- Kampker A, Reil T (2009) Forscher Schrittmacher. Industrieanzeiger 42(42):34–35
- Kampker A, Swist M, Schmitt F (2010) Immense Spareffekte. Industrieanzeiger 8:30
- Kirsch DA (2000) The Electric vehicle and the burden of history. Rutgers University Press, New Brunswick
- Kloss A (1996) Elektrofahrzeuge. Vom Windwagen zum Elektromobil. VDE-Verlag, Berlin
- Koch W (2006) Wertschöpfungstiefe von Unternehmen: Die strategische Logik der Integration. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden
- Kuhn TS (1962) The structure of scientific revolutions. University of Chicago Press, Chicago
- Kraftfahrt-Bundesamt (Hrsg) (o. J.) Emissionen, Kraftstoffe – Zeitreihe 2006 bis 2011. [http://www.kba.de/cln\\_033/nn\\_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/EmissionenKraftstoffe/b\\_emi\\_z\\_teil\\_2.html](http://www.kba.de/cln_033/nn_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/EmissionenKraftstoffe/b_emi_z_teil_2.html). Zugegriffen: 14. Dec 2011
- Lewandowski J (o. J.) Das Jahrhundert des Automobils. Bertelsmann, Gütersloh
- Luft G, Korin A (2009) Turning oil into salt: energy independence through fuel choice. Booksurge Llc., Charleston
- McKinsey & Company Inc. (Hrsg) (2011) Boost! Transforming the powertrain value chain – a portfolio challenge
- Meadows D (1973) Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. Rowohlt, Hamburg
- Mercer (2004) Future Automotive Industry Structure (FAST) 2015: Struktureller Wandel, Konsequenzen und Handlungsfelder für die Automobilentwicklung und -produktion. In: Mercer Management Consulting, Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik (Hrsg) Management Summary, Stuttgart, Dortmund
- Meridian International Research (2007) The trouble with lithium – implications of future PHEV production for lithium demand. <http://www.inference.phy.cam.ac.uk/sustainable/refs/nuclear/TroubleLithium.pdf>. Zugegriffen: 20. Mai 2011
- Meti (2010) Battery storage system industry report. <http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g100519a02j.pdf>. Zugegriffen: 20. Mai 2011

- MiD (2008) Mobilität in Deutschland 2008. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung durchgeführte Erhebung zum Mobilitätsverhalten in Deutschland; Ergebnisse unter. [www.mobilitaet-in-deutschland.de/02\\_MiD2008](http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/02_MiD2008). Zugegriffen: 09. July 2012
- Model T Ford Club of America (Hrsg) (2011). [www.mtfca.com](http://www.mtfca.com). Zugegriffen: 14. Dec 2011
- Mom G (1997) Das ‚Scheitern‘ des frühen Elektromobils (1895–1925). Versuch einer Neubewertung. *Technikgeschichte* 64(4):269–285
- Mom G (2004) *The Electric Vehicle. Technology and Expectations in the Automobile Age*. The John Hopkins University Press, Baltimore
- Möser K (2002) *Geschichte des Autos*. Campus, Frankfurt am Main
- Müller-Stewens G, Glocke A (1995) *Kooperation und Konzentration in der Automobilindustrie*. G+B-Verlag, Chur
- Müller-Stewens G, Lechner C (2005) *Strategisches Management – Wie strategische Initiativen zum Wandel führen*, 3. Aufl. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart
- Norton N (1985) *100 Jahre Automobil. Autos. Rennen. Rekorde*. A. Weichert, Hannover
- o. V. (1996) *Elektromobile. Rollende Heizung*. *Der Spiegel* 47:85–86
- PWC (2010) *Elektromobilität – Herausforderungen für Industrie und öffentliche Hand*, Frankfurt am Main
- Rammler S (2004) *Automobiles Leitbild*. In: Projektgruppe Mobilität (Hrsg) *Die Mobilitätsmaschine. Versuche zur Umdeutung des Autos*, Edition Sigma, Berlin
- Rao H (2009) *Market rebels. How activists make or break radical innovations*. Princeton University Press, Princeton
- Redaktion Berliner Verkehrsseiten (Hrsg) (2011) *Obus Berlin*. [www.berliner-verkehrsseiten.de/obus/](http://www.berliner-verkehrsseiten.de/obus/). Zugegriffen: 14. Dec 2011
- Ropohl G (1979) *Eine Systemtheorie der Technik. Zur Grundlegung der allgemeinen Technologie*. Hanser, München
- Sauter-Servaes T (2011) *Technikgeneseleitbilder der Elektromobilität*. In: Rammler S, Weider M (Hrsg) *Das Elektroauto Bilder für eine zukünftige Mobilität. Mobilität und Gesellschaft*, Bd 5. LIT, Berlin
- Schiedt HU et al (Hrsg) (2010) *Verkehrsgeschichte. Histoire des transports*. Chronos, Zürich
- Schmid S, Grosche P (2008) *Management internationaler Wertschöpfung in der Automobilindustrie: Strategie, Struktur und Kultur*. Bertelsmann Stiftung, Gütersloh
- Schuh G, Klappert S (2011) *Handbuch Produktion und Management 2: Technologiemanagement*. Springer, Berlin
- Schuh G, Arnoscht J et al (2011) *Production system with respect for variable quantities for an economical electric vehicle production*. In: 1. WGP Jahreskongress, Berlin
- Schulte A (2010) *Unterwegs zum neuen Volksauto*. *Handelsblatt* 8:60–61
- Seherr-Thoss HC (1974) *Die deutsche Automobilindustrie. Eine Dokumentation von 1886 bis heute*. DVA, Stuttgart
- Spath D, Pitschetsrieder B (2010) *Einleitung*. In: Hüttel R, Pitschetsrieder B, Spath D (Hrsg) *Elektromobilität: Potenziale und wissenschaftlich-technische Herausforderungen*. Springer, Berlin
- Thomes P (1996) ‚Theo, gebb Gas‘. *Autoerfahrungen – Autobiographien – Automobilität zwischen Wirtschaftswunder und Ölkrise, ein Beitrag zur Alltagskultur in der BRD*. In: van Dülmen R, Dillmann E (Hrsg) *Lebenserfahrungen an der Saar. Studien zur Alltagskultur 1945–1995*. Röhrig, St. Ingbert
- Thomes P, Jost N (2009) *The battery electric vehicle. Burden of history or tomorrow’s motive force?* In: Conference paper, 7th international conference on the history of transport, traffic and mobility, Lucerne, Switzerland, 5–8 Nov 2009
- Throll M, Rennhak C (2009) *Der Wandel der Wertschöpfungskette im Bereich der Hersteller*. In: Rennhak C (Hrsg) *Die Automobilindustrie von morgen: Wie Automobilhersteller und-zulieferer gestärkt aus der Krise hervorgehen können*. Ibidem-Verlag, Stuttgart

- Topp H (2010) Elektro-Mobilität – Auch auf dem Land? Straße und Autobahn 8:566–570
- Umweltbundesamt (2010) „Emissionen des Verkehrs.“ <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=3577>. Zugegriffen: 09. July 2012
- Varesi A (2009) Kurz- und mittelfristige Erschließung des Marktes für Elektroautomobile Deutschland – EU. Technomar GmbH, TÜV SÜD, Energie & Management Verlagsgesellschaft
- Voigt F (1965) Die Entwicklung des Verkehrssystems, Bd 2. Duncker & Humblot, Berlin
- Wallentowitz H et al (2008) Strategien in der Automobilindustrie: Technologietrends und Marktentwicklungen. Vieweg + Teubner, Wiesbaden
- Wallentowitz H et al (2010a) Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges – Technologien, Märkte und Implikationen. GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden
- Wallentowitz H et al (2010b) Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges – Technologien, Märkte und Implikationen. Vieweg + Teubner, Wiesbaden
- Wehler HU (2008) Deutsche Gesellschaftsgeschichte. Von der Gründung der beiden deutschen Staaten bis zur Vereinigung 1949–1990. In: Deutsche Gesellschaftsgeschichte, Bd 5. C. H. Beck, München
- Weiherr S, Goetzeler H (1981) Weg und Wirken der Siemens-Werke im Fortschritt der Elektrotechnik 1847–1980, 3. Aufl. Steiner, Wiesbaden
- Westkämpfer E, Zahn E (2009) Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Springer, Berlin
- Witkar (2011) <http://en.wikipedia.org/wiki/Witkar>. Zugegriffen: 14. Dec 2011
- Wyman O (2009a) „Elektromobilität 2025“ – Powerplay beim Elektrofahrzeug. In: Wyman O (Hrsg) Management Summary
- Wyman O (2009b) Powerplay beim Elektrofahrzeug. Management Summary zur Studie: Elektromobilität 2025. [http://www.oliverwyman.com/de/6293\\_10825.html](http://www.oliverwyman.com/de/6293_10825.html). Zugegriffen: 04. Aug 2011
- Wyman O (2010) Elektrofahrzeugen gehört die Zukunft. [http://www.oliverwyman.com/de/pdf/files/Oliver\\_Wyman\\_Automotivemanager\\_I\\_2010\\_DE.pdf](http://www.oliverwyman.com/de/pdf/files/Oliver_Wyman_Automotivemanager_I_2010_DE.pdf). Zugegriffen: 04. Aug 2011

Dirk Vallée, Armin Schnettler und Ralf Kampker

---

## 3.1 Mobilitätskonzepte

Dirk Vallée

### 3.1.1 Einführung

Mobilität stammt vom lateinischen Begriff „mobilis“ und bedeutet zunächst Beweglichkeit. Heute wird unter dem Begriff Mobilität in erster Linie die Teilhabe der Menschen an persönlichen und wirtschaftlichen Austauschprozessen verstanden und als ein Bedürfnis interpretiert. Aus diesem Bedürfnis heraus entsteht bei der Realisierung von Ortswechseln der Verkehr zu Fuß oder mit Fahrzeugen wie Fahrrädern, öffentlichen Verkehrsmitteln, Pkw und Lkw sowie Flugzeugen und Schiffen. Dabei löst die Nutzung motorisierter Verkehrsmittel (Busse, Bahnen, Pkw, Lkw, Lieferfahrzeuge, Schiffe und Flugzeuge) einen

---

D. Vallée (✉)

Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr, RWTH Aachen University,  
Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen, Deutschland  
e-mail: vallee@isb.rwth-aachen.de

A. Schnettler (✉)

Institut für Hochspannungstechnik, RWTH Aachen University,  
Schinkelstraße 2, 52056 Aachen, Deutschland  
e-mail: schnettler@ifht.rwth-aachen.de

R. Kampker (✉)

Hans Hess Autoteile GmbH, Widdersdorfer Straße 188,  
50825 Köln, Deutschland  
e-mail: R. Kampker@hess-gruppe.de

Primärenergiebedarf für den Antrieb der Motoren aus, der heute in erster Linie durch fossile Brennstoffe, insbesondere Öl, befriedigt wird.

Angesichts der Endlichkeit der Ölreserven (Peak-Oil-Debatte) (Held et al. 2010) sowie des Klimawandels und der zur Minderung und Vermeidung erforderlichen Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes kommt der Reduzierung des Anteils fossiler Brennstoffe am Primärenergieverbrauch des motorisierten Verkehrs eine maßgebliche Bedeutung zu. Hier verspricht Elektromobilität neue Chancen, auf einem attraktiven Niveau und für viele Anwendungsfälle nutzbar einen umweltfreundlichen und nachhaltigen Ersatz zu schaffen. Dafür sind jedoch die nachhaltige, möglichst regenerative Erzeugung der Energie, die Speicherung, der Transport und die Versorgung der Fahrzeuge sicherzustellen.

Für die Beantwortung der Frage, ob es sich bei Elektromobilität um ein Nischenprodukt oder eine Zukunftstechnologie handelt, sind in erster Linie die Kundenakzeptanz sowie die technologischen Potenziale von Transport, Versorgung und Speicherung elektrischer Energie in den Fahrzeugen von Bedeutung. Dabei ist nach Anwendungsfeldern bzw. Nutzergruppen und deren jeweiligem Mobilitätsverhalten zu unterscheiden, was im Folgenden näher beschrieben wird. Das heutige sowie das für die Zukunft zu erwartende Nutzerverhalten werden sodann an den technischen Möglichkeiten und Potenzialen sowie Mobilitätskonzepten (Geschäfts- und Nutzungsmodellen) gespiegelt. Zudem sollen im Sinne eines Ausblicks weitergehende Effekte vor allem im Bereich der Umwelt und des städtebaulichen Umfeldes beschrieben werden, die äußere Impulse setzen oder eine Wirkung auf die Akzeptanz haben.

### 3.1.2 Einsatzfelder von Elektromobilität

Die Betrachtung der Zukunftschancen von Elektromobilität muss ganzheitlich erfolgen. Dabei sind alle Verkehrsarten und Distanzbereiche zu beleuchten, im Hinblick auf ihre Anforderungen an die Elektromobilität zu charakterisieren und die vielversprechendsten zu identifizieren. Ansatzpunkt dafür ist vor allem eine Würdigung der Einsatzdistanzen und Energiespeicherkapazitäten. Werden für die bekannten und regelmäßig angewendeten Mobilitätsketten passende Produkte der Elektromobilität entwickelt, sind eine schnelle Markteinführung, eine hohe Akzeptanz und damit eine weite Verbreitung zu erwarten. Des Weiteren lassen sich auf diese Weise die Entwicklungspotenziale und -erfordernisse benennen, deren Umsetzung die Verbreitung der Elektromobilität fördern kann.

Neben dem Preis stellen die auf längere Zeit noch begrenzten Speicherkapazitäten der Batterien derzeit das Haupthindernis für die Nutzung der Elektromobilität dar (NPE 2011). Vor diesem Hintergrund ist kaum zu erwarten, dass Schiffe und Flugzeuge in absehbarer Zeit batterie-elektrisch angetrieben werden, weshalb sie nicht weiter betrachtet werden. Die nachfolgende Betrachtung konzentriert sich in erster Linie auf die Landverkehrsmittel Lkw, Lieferfahrzeuge, Pkw und Zweiräder, aber auch Busse und Bahnen. Diese werden heute sowohl auf langen Distanzen eingesetzt als auch im urbanen Raum.

Für die Beschreibung von Mobilität und Verkehr sowie die Einsatzfelder von Verkehrsmitteln wird in der Verkehrsplanung eine Aufteilung in Personenverkehr und Wirtschaftsverkehr vorgenommen. Der Unterschied liegt im Wesentlichen im Zweck bzw. in der Motivation der Ortsveränderung, nämlich einer persönlichen, privaten Motivation (Personenverkehr; Zwecke Arbeit, Ausbildung, Einkauf, Freizeit) oder einer externen Motivation (Wirtschaftsverkehr; Zwecke Lieferrn und Laden, Servicedienste, Dienst-/Geschäftsfahrten). Busse, Lkw und Lieferfahrzeuge sind bis auf wenige Ausnahmen (bspw. privater Umzug) dem Wirtschaftsverkehr zuzuordnen (KiD 2002). Die Einsatzbereiche von Pkw sind bis auf den Personenwirtschaftsverkehr bzw. den Reisezweck „dienstlich/geschäftlich“ sowie die Taxifahrten, die nach der Erhebung Mobilität in Deutschland rund 5 % ausmachen (MiD 2008), meistens dem Personenverkehr zuzuordnen.

Im Bereich des Personenverkehrs lassen sich aufgrund der räumlichen Lage und Rahmenbedingungen zu Abstellmöglichkeiten, Platzbedarf und Umweltwirkungen die in Abb. 3.1 dargestellten Einsatzpotenziale für die Elektromobilität identifizieren. Neben Elektrofahrzeugen im Sinne von Personenkraftwagen mit elektrischem oder Hybridantrieb kommen eine Reihe weiterer Fahrzeuge und Betriebsformen für die Elektromobilität in Betracht. Dazu zählen in erster Linie der Einsatz von Zweirädern (Pedececs, E-Bikes und Elektroroller) und die Weiterentwicklung der öffentlichen

## Einsatzfelder der Elektromobilität



Grafik: ISB, RWTH Aachen

**Abb. 3.1** Einsatzfelder der Elektromobilität im Personenverkehr. Quelle ISB, RWTH Aachen University

Verkehrsmittel, insbesondere der heute mit Verbrennungskraft angetriebenen Busse und Bahnen. Während Bahnen bereits überwiegend elektrisch betrieben werden (können), bieten sich als Lösungen für den straßengebundenen öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) Trolley- oder Elektrobusse an (Vgl. u. a. Vallée 2011). Dabei ist neben der fahrzeugtechnischen Seite vor allem die Ladeinfrastruktur (punktuell oder linienförmig – stationär oder linear – mechanisch gekuppelt oder induktiv) weiter zu entwickeln.

Neben der fahrzeugtechnischen Seite bieten auch organisatorische Konzepte (vgl. Kap. 3.1.4) wie Carsharing oder Verietsysteme sowie die Optimierung, Weiterentwicklung und Anpassung intermodaler Mobilitätsketten wie bspw. Park&Ride oder Bike&Ride Ansatzpunkte für Marktchancen der Elektromobilität. Dazu sind in erster Linie attraktiv ausgestattete Umsteigeknoten, mit Abstell- und Ladeinfrastrukturen an Bahnhöfen und Haltestellen, erforderlich.

Für die größtmögliche Hebung der Potenziale im Personenverkehr und die Nutzung von Elektromobilität als umfassender Ansatz ist ein Bündel an Maßnahmen aus verschiedenen Handlungsfeldern erforderlich. Dazu zählen primär:

- die Nutzung der besonderen Potenziale verschiedener Arten der Elektromobilität unter besonderer Berücksichtigung städtebaulicher, verkehrlicher, ökologischer und wirtschaftlicher Erfordernisse
- die Schaffung ganzheitlicher, intelligenter, vernetzter und integrierter Mobilitätskonzepte
- der Aufbau von Flotten als Impulsgeber zur Akzeptanzsteigerung und Darstellung der Nutzen, insbesondere bei hohen Betriebsleistungen
- die Schaffung einer attraktiven Ladeinfrastruktur unter besonderer Berücksichtigung kommerzieller Erfordernisse durch die Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle
- die Entwicklung innovativer ganzheitlicher Fahrzeugkonzepte in allen Segmenten (2-Rad, Pkw, Nutz-/Lieferfahrzeug, ÖPNV (Bus und Bahn))

Elektromobilität bietet durch abgasfreie und leise Fahrzeuge Chancen für die Verbesserung der Stadtverträglichkeit des Verkehrs. Ein rein auf individuell genutzte Pkw gestützter Ansatz ist jedoch nicht geeignet, Beiträge zur Verbesserung des städtischen Umfeldes sowie zur Reduzierung der Stauproblematik zu leisten. Insofern sind sämtliche individuellen Fortbewegungsarten mit zwei- und vierrädrigen Fahrzeugen (Pedelec, Roller, Pkw, Lieferfahrzeuge) sowie die Verkehrsmittel des öffentlichen Verkehrs in die Betrachtung mit einzubeziehen. Im Hinblick auf die Stadtverträglichkeit kommt der Verbesserung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) eine besonders wichtige Rolle zu, weil dieser viele Menschen auf kleinem Raum mit hoher Ressourceneffizienz befördern kann.

Kleinteilige und historische Altstädte sowie topografisch bewegte Städte bieten spezielle Potenziale für die Nutzung von Pedelecs oder Elektrofahrrädern, weil diese wenig Platz benötigen und in einem engen städtebaulichen Umfeld flexibel und konfliktarm eingesetzt werden können. Für mittlere Distanzen können sie durch ein leistungsfähiges ÖPNV-System aus Bahnen sowie Trolley- und Hybridbussen unterstützt werden. Dazu sind als Basisinfrastruktur besondere Trassen und der Ausbau des induktiven Ladens für

Bahn und Bus in einem häufig sensiblen städtebaulichen Umfeld erforderlich. Zudem sind Verknüpfungspunkte zwischen dem Individualverkehr mit Zweirädern und Pkw und dem öffentlichen Verkehr an strategisch wichtigen Stellen anzulegen, auszubauen und mit der erforderlichen Ladeinfrastruktur für Pkw und Pedelecs auszustatten. Des Weiteren können ein Pedelec-Vermietsystem, das Carsharing sowie Lieferservices mit Elektrofahrzeugen wichtige Beiträge zur breiten Einführung und Nutzung der Elektromobilität liefern.

Mietmodelle wie bspw. das Carsharing ermöglichen schon heute, je nach Nutzungsbedarf einen Kleinwagen, ein größeres Fahrzeug oder ein Lieferfahrzeug zu wählen. Ähnliche Lösungen sind bei Miet- bzw. Leasing-Modellen vorhanden, bei denen die Nutzer bei einem Anbieter je nach Bedarf das passende Fahrzeug mieten (vgl. Kap. 3.1.4). Die Kernfrage vor dem Hintergrund der heutigen Lebensgewohnheiten sowie der Mobilitätsmuster lautet also, gelingt es von dem heute gewohnten Eigentum am Fahrzeug als Nutzungsdeterminante zu anderen Modellen wie „rent for use“ bzw. „mobility on demand“ zu kommen. Hier besteht eine Chance für neue Mobilitätskonzepte, zumal aufgrund der teuren Batterie die Fragen nach der Kostenakzeptanz bei Leasing oder Kauf der Batterie und nach Bezahlung bzw. Abrechnung für die Aufladung sowieso zu stellen sind.

Im Hinblick auf die urbane Mobilität gewinnen diese Fragen eine zusätzliche Dimension. Heute müssen die Verkehrsteilnehmer bei verschiedenen Anbietern die jeweils nachgefragte Mobilität einkaufen, also das Auto und die Tankfüllung, ein Fahrrad, eine Fahrkarte für den ÖPNV oder die Bahn, ein Flugticket, Carsharing oder andere Modelle. Regelmäßig sind dafür einzelne Zugänge, Anmeldungen und vertragliche Vereinbarungen erforderlich. Die Frage ist, welche organisatorischen Voraussetzungen neben den infrastrukturellen geschaffen werden müssen, um zu einem nutzerfreundlichen und stadtverträglichen neuen Mix in der urbanen Mobilität zu gelangen, und ob nicht die Elektromobilität die Chance bietet, die dafür notwendigen Änderungen bei den Angeboten wie bei den Einstellungen der Menschen zu befördern und gleich einen Quantensprung statt nur eine Weiterentwicklung zu schaffen.

In der Frühphase der Markteinführung von Elektromobilität sind Fragen der Sichtbarkeit sowie die Darstellung von Zuverlässigkeit, Funktionalität und Wirtschaftlichkeit besonders relevant. Die Akzeptanz neuer Technologien ist eng mit den vorgenannten Größen korreliert. Hier bieten sich Flotten an, da sie häufig ein einheitliches Handling der Fahrzeuge, wiederkehrende Einsatzmuster und hohe Betriebsleistungen aufweisen. Dieser Ansatz erlaubt, aufgrund der regelmäßigen und eingrenzenden Nutzungsmuster schnell ein hohes Maß an Nutzbarkeit zu erreichen, indem die ökonomisch aufwändigen Komponenten Batteriekapazitäten und Ladeinfrastruktur auf die Einsatzmuster abgestimmt werden können und so schnell Skaleneffekte und damit Kosteneinsparungen zu erzielen sind. Damit wird die Sichtbarkeit der Elektromobilität für Einsatzmuster und Zuverlässigkeit schnell erhöht, was eine breite Markteinführung flankiert und die Akzeptanz steigert. Die besonderen Vorteile der geringen Verbrauchskosten (EWI 2010) sind vor allem für Unternehmen von Bedeutung, denn Betriebe sind in erster Linie auf die Nutzung betriebswirtschaftlicher Vorteile bedacht. Werden zudem attraktive Leasingmodelle für die Fahrzeugkosten geschaffen, ist mit einer hohen Akzeptanz zu

rechnen. Auf der Basis dieser Markteinführungsstrategie kann erwartet werden, dass eine verbesserte Akzeptanz in breiten Nutzerschichten erreicht wird und mittelfristig eine höhere Marktdurchdringung erfolgt.

Erhebungen der Wege- und Zeitmuster im Wirtschaftsverkehr zeigen, dass eine Reihe von Lieferservices, bspw. Post, Pizzadienste, Medikamentenlieferservices, Handwerker und soziale Dienste aufgrund ihrer täglichen Wegeweiten mit den Reichweiten heutiger Elektrofahrzeuge auskommen können. Die Rückkehr zu einem Betriebshof erlaubt einen kostengünstigen Aufbau einer Ladeinfrastruktur und die Standzeiten sind ausreichend für ein Nachladen. Vor diesem Hintergrund sind für eine Nutzung der Elektromobilität insbesondere die Investitionskosten den Betriebskosten gegenüber zu stellen. Gelingt es, die höheren Investitionskosten durch reduzierte Betriebskosten zu kompensieren, ist ein wirtschaftlicher Vorteil gegeben, der die Nutzung steigern kann (ISB 2011).

Unter der Annahme zusätzlicher Investitionskosten für eine Batterie in Höhe von 10.000 Euro sowie weiterer 5.000 Euro für eine Ladesäule wäre also ein zusätzlicher Investitionsaufwand von 15.000 Euro zu kompensieren. Derzeit im Markt befindliche Hochdachkombis und Transporter haben einen Kraftstoffverbrauch von etwa 10–20 l pro 100 km, sodass sich Kraftstoffkosten von 15–30 Euro pro 100 km ergeben. Laut Herstellerangaben haben Elektrofahrzeuge dieser Klasse Verbrauchskosten von 2–4 Euro pro 100 km. Daraus ergibt sich unter der Annahme einer auf 5 Jahre angelegten Nutzung und unter Vernachlässigung der Zinsen ein Kostenvorteil für Elektrofahrzeuge ab einer jährlichen Fahrleistung von 12.000–25.000 km.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Marktchancen und die Nutzbarkeit der Elektromobilität im privaten Personenverkehr ist die Verfügbarkeit einer Ladeinfrastruktur. Heute ist der Nutzer gewohnt, Fahrzeuge alle 600–1.000 km nachtanken zu müssen. Dabei kann auf ein dichtes Tankstellennetz zurückgegriffen werden, das Risiko einer nicht ausreichenden Primärenergieversorgung ist gering. Derzeit gibt es in Deutschland etwa 15.000 Tankstellen, also knapp 2 Tankstellen je 10.000 Einwohner (VDI-Nachrichten 2010), an Autobahnen ist etwa alle 50 km eine Tank- und Rastanlage vorhanden. Diese Situation kann aufgrund der langen Entwicklung als ökonomischer Ausgleich aus Angebot und Nachfrage sowie einem wirtschaftlichen Betrieb angesehen werden.

Zur Erreichung vergleichbarer Marktchancen ist die Frage der Versorgung batterie-elektrisch betriebener Fahrzeuge, insbesondere des Nachladens, also intensiv zu betrachten, um über Nischenprodukte hinauszukommen. Im Hinblick auf den Aufbau einer elektrischen Ladeinfrastruktur wird derzeit eine Konzentration auf private Ladepunkte, bei Arbeitgebern sowie an P+R-Haltestellen und in Parkhäusern angestrebt. Damit lässt sich eine aus netzökonomischen und Nutzungsaspekten wirtschaftliche Ladeinfrastruktur aufbauen. Ein wesentliches Merkmal dafür ist auch, dass die Standzeiten der Fahrzeuge für ein Nachladen aus energetischen Gesichtspunkten dort ausreichend lang sind. Für die Wahrnehmbarkeit sollte jedoch nicht vollständig auf Ladestationen im öffentlichen Raum verzichtet werden, auch wenn hier die Wirtschaftlichkeit wegen geringer Nutzungsfrequenzen und hoher Infrastrukturkosten eher problematisch ist. Insbesondere für dicht bewohnte Stadtviertel ohne Abstellmöglichkeit für Pkw auf Privatflächen sind zudem Konzepte für eine sinnvolle

Ladeinfrastruktur im öffentlichen Raum erforderlich, weil die dort lebenden Menschen ein besonderes Nutzerpotenzial darstellen (vgl. [Kap. 3.1.3](#)). Außerdem muss die Erweiterung der Ladeinfrastruktur mittels induktiver Ladung durch Modellversuche und Tests der Alltagstauglichkeit und der Nutzerakzeptanz sowie von Schnellladestationen untersucht werden. Dies gilt für den öffentlichen und den Individualverkehr, um zu einer ähnlichen Versorgungsinfrastruktur wie im heutigen fossilen Verkehr zu gelangen.

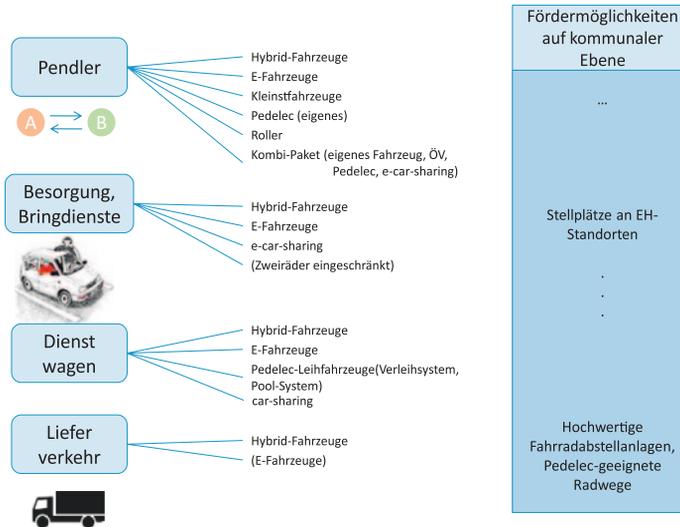
Neben der Weiterentwicklung, Optimierung und Standardisierung von Komponenten wie der Ladeinfrastruktur und der Batterien bietet die Elektromobilität die Chance, auch gänzlich neue Fahrzeugkonzepte zu entwerfen. Die Dezentralisierung des Antriebs sowie die kompakteren und geometrisch vielfältigen Bauformen der Batteriepacks lassen neue und innovative Fahrzeugkonzepte zu. Außerdem bietet die Einführung elektrisch betriebener Zweiräder große Chancen für neue, kompakte und innovative platzsparende Fahrzeuge. Angesichts der zunehmenden Individualisierung der persönlichen Lebensstile und damit auch der Mobilitätsformen bieten modulare Konzepte die Möglichkeit, über Nischenprodukte hinaus zu Massenprodukten zu gelangen, für die eine Einbindung in neuartige Mobilitätsverbünde oder direkte Absatzmärkte erkennbar ist.

Die Beurteilung der Marktpotenziale für den Güter- und Wirtschaftsverkehr hat neben den heutigen Einsatzfeldern die Entwicklungen im Logistik-Sektor zu berücksichtigen. Aufgrund immer kleiner werdender Sendungen und immer häufigerer Liefervorgänge ist zu erwarten, dass im städtischen und regionalen Kontext die Zahl der Verteilfahrten mit Lieferfahrzeugen der Klasse 2,8–3,5 t zulässiges Gesamtgewicht weiter ansteigen werden. Diese sog. KEP-Fahrzeuge (KEP = Kurier- und Express-Dienste) haben heute Einsatzmuster im Bereich von täglich 80–15 km im städtischen Umfeld und bis zu 400 km in ländlichen Gebieten. Aufgrund der hohen Stückzahl der Fahrzeuge – derzeit sind in Deutschland ca. 5,5 Mio. leichte Nutzfahrzeuge und Lieferfahrzeuge bis zu einem zulässigen Gesamtgewicht von 3,5 t zugelassen (ViZ 2009) – sowie weiterer ähnlicher Fahrzeug- und Einsatzmuster mit Kleinbussen ergibt sich die Chance, unter Berücksichtigung der Reichweiten und Transportkapazitäten der Fahrzeuge neue und auf diese Felder angepasste Fahrzeug- und Batteriekonzepte zu entwickeln. Ein weiteres treibendes Argument liegt in den sich verschärfenden Umweltaforderungen in städtischen Gebieten, die emissionsarme und leise Fahrzeuge verlangen (vgl. [Kap. 3.1.5](#)). Durch City-Logistik-Konzepte mit Elektrofahrzeugen kann eine Verknüpfung von Fern- und Nahverkehr gelingen, die eine Renaissance derartiger Konzepte anregen könnte. Zuvor sind allerdings die bisherigen Hemmnisse nochmals genau zu analysieren und dann mittels raum- und verkehrsplannerischer Push- und Pull-Maßnahmen in ein Gesamtkonzept zu integrieren.

### 3.1.3 Nutzergruppen und Nutzungsmuster

Mobilität in Städten und Regionen sichert die Erreichbarkeit unterschiedlicher Orte wie Arbeitsplätze, Einkaufsmöglichkeiten, Ausbildungsstätten oder Kultur- und Freizeiteinrichtungen. Sie spielt sich überwiegend in Entfernungsbereichen von wenigen 100 m bis zu rund 100 km ab. Aufgrund der guten Infrastruktur, der hohen

## Mobilitätswerkzeuge und Wegemuster



**Abb. 3.2** Mobilitätswerkzeuge und Wegemuster. *Quelle* ISB, RWTH Aachen University

Verfügbarkeit von Pkw sowie der erforderlichen Flexibilität bei der Arbeitsplatzwahl sind heute auch tägliche Distanzen von 70 und 80 km keine Ausnahme. Allerdings beträgt die durchschnittliche Entfernung aller durchschnittlich 3,5 am Tag zurückgelegten Wege nur jeweils rund 12 km, die mit dem Pkw als Selbstfahrer zurückgelegten haben eine durchschnittliche Länge von rund 15 km (MiD 2008). Dieser Wert schwankt zwischen 14,7 und 19 km je nach Raumtyp (ländliche Räume weisen weitere Wege auf). Mit 38 % bzw. 35 % stellen die Wegezwecke Einkauf/Erledigung bzw. Freizeit die häufigsten dar. Auf die Wege von und zur Arbeit sowie von und zur Ausbildung entfallen zusammen rund 19 % aller täglichen Wege (MiD 2008). Wesentlicher Unterschied zwischen den benannten Wegezwecken ist, dass bei den Wegen zur Arbeit und zur Ausbildung statische räumliche und häufig auch zeitliche Muster vorhanden sind während die Wege in der Freizeit sowie zu Einkauf und Erledigungen sehr disperse räumliche und zeitliche Verteilungen aufweisen. Als Verkehrsmittel werden zu 10 % das Fahrrad, zu 9 % der ÖPNV und zu 59 % der Pkw genutzt. Der Anteil der Fußwege beträgt 22 % und bezieht sich im Wesentlichen auf den Nahbereich (MiD 2008).

Für die Bewältigung der persönlichen Mobilität stellen Fahrzeuge ein Verkehrsmittel bzw. ein Werkzeug dar. Abbildung 3.2 verdeutlicht den heute üblicherweise vorzufindenden Einsatz bestimmter Mobilitätswerkzeuge für ausgewählte Wegemuster.

Innerhalb der einzelnen Wegezwecke variiert die zurückgelegte Entfernung z. T. deutlich. Zudem ist festzustellen, dass die zurückgelegten Entfernungen nach der Antriebsart der Fahrzeuge (Benzin oder Diesel) sowie der Fahrzeuggröße ebenfalls deutlich variieren. Die durchschnittliche Fahrleistung von Pkw beträgt rund 14.300 km (Benzinfahrzeuge

11.800 km und Dieselfahrzeuge 22.300 km). Minis und Kleinwagen legen dabei im Mittel knapp 12.000 km zurück, Fahrzeuge der Kompaktklasse rund 14.000 km und Fahrzeuge der Mittelklasse rund 16.000 km (MiD 2008). Die Fahrleistung der Geländewagen (einschließlich Oberklasse und Sportwagen) und der Mini-Vans liegt zwischen der Leistung der Kompaktklasse und derjenigen der Mittelklasse. Die Fahrzeuge der oberen Mittelklasse und die Utilities weisen mit gut 17.000 km ebenso deutlich höhere Fahrleistungen auf wie Großraum-Vans mit über 19.000 km. Wird für die beschriebenen Fahrzeugklassen eine Differenzierung der Fahrleistung nach Benzin und Diesel vorgenommen, zeigen sich ebenfalls große Differenzen. Die Spanne reicht hier von rund 50 % mehr Jahreskilometer beim Utility-Diesel gegenüber dem Utility-Benziner bis hin zu mehr als doppelt so vielen Jahreskilometern beim Diesel der oberen Mittelklasse gegenüber dem Benzin.

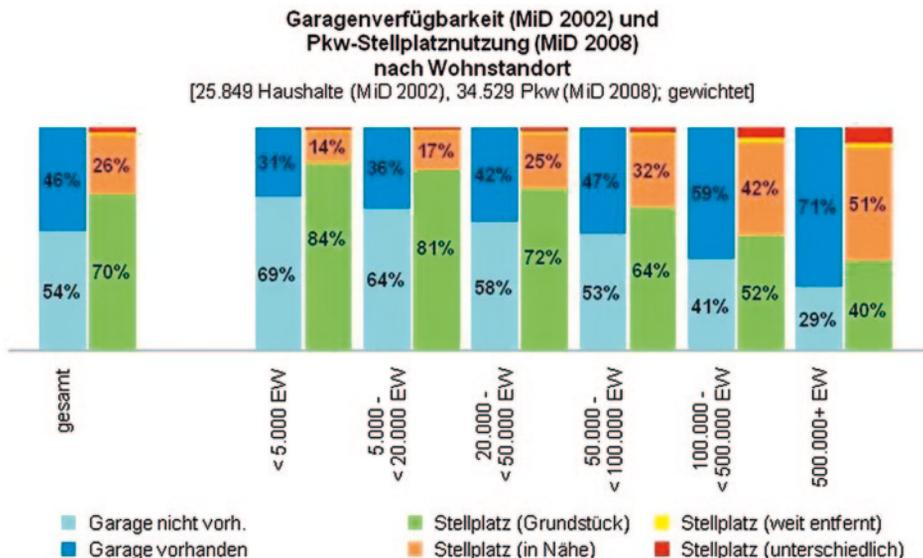
Auswertungen des seit 1997 erhobenen Deutschen Mobilitätspanels (Deutsches Mobilitätspanel 2012; Zumkeller et al. 2011), einer Längsschnittuntersuchung des Mobilitätsverhaltens, zeigen, dass etwa 1/3 der mobilen Personen sog. „Multimodale“ sind, d. h. im Verlauf einer Woche unterschiedliche Verkehrsmittel nutzen (Beckmann et al. 2006). Etwa die Hälfte der Multimodalen verfügt über einen Pkw. Dieser Befund sowie der Umstand, dass der Anteil der Multimodalen an allen Verkehrsteilnehmern in den letzten Jahren angewachsen ist, stützen die These, dass die Menschen zunehmend das für sie in der jeweiligen Situation beste Verkehrsmittel wählen und nicht mehr, wie in der Vergangenheit, auf einzelne Verkehrsmittel fixiert sind. Insofern ist eine reine Fixierung auf einzelne Verkehrsmittel, insbesondere den Pkw, sicher nicht geeignet, umfassend die Potenziale der Elektromobilität zu beschreiben. Zudem sind die sich so eröffnenden Chancen auf die Nutzung anderer Verkehrsmittel eine Option, die Einschränkungen bei Kosten und Reichweiten durch andere Verkehrsmittel zu substituieren.

Mit den heutigen technischen Rahmenbedingungen der Elektro-Pkw (begrenzte Reichweite und lange Ladedauern), dem hohen Anschaffungspreis sowie der fehlenden flächendeckenden Ladeinfrastruktur scheint eine einfache und schnelle Substitution der konventionellen Pkw durch Elektromobilität nicht möglich. Um trotzdem Marktpotenziale abschätzen zu können, wurden bisher in einer Vielzahl von Studien potenzielle Elektrofahrzeug-Nutzer identifiziert (Vgl. u. a. Fojcik 2010; Varesi 2009; Baum et al. 2010; EWI 2010). Für eine Potenzialabschätzung der privaten Einsatzfelder von Elektromobilität wurden dazu in erster Linie Kriterien der Fahrzeugnutzung verwendet und dann ein Abgleich zu den technischen Möglichkeiten der Elektromobilität gemacht. So ergaben sich Zahlen für potenzielle Nutzer von Elektro-Pkw. Im Folgenden werden ausgewählte Studien beschrieben und die dort verwendeten Merkmale der Haushalte sowie die derzeitige Pkw-Nutzung in Deutschland näher betrachtet.

Wesentliche Basis der Nutzerpotenzialstudien sind die Daten der Erhebung „Mobilität in Deutschland 2008“ (MiD 2008). Diese zeigen, dass der Pkw-Besitz sowie die Pkw-Nutzung in ländlichen Räumen stärker sind als in Ballungsräumen. Mit wachsender Einwohnerzahl der Kommunen steigt die Anzahl der Haushalte ohne und sinkt die Anzahl der Haushalte mit mehreren Pkw. Als Ursache dafür können der attraktivere öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) in städtischen Gebieten, die oft problematische

Parkraumsituation in den hoch verdichteten und oft aus der vorautomobilen Zeit stammenden städtischen Wohnvierteln ohne Stellplätze auf privaten Grundstücken und die starken Nutzungsverflechtungen der Bewohner in Ballungsräumen angesehen werden, die wegen kurzer Distanzen den Pkw weniger nutzen bzw. weniger auf diesen angewiesen sind. Zudem können Stadtbewohner als potenzielle Nutzer eines Elektro-Pkw bspw. für längere Autofahrten, für die ein Elektro-Pkw nicht geeignet ist, einfacher auf den ÖPNV, den öffentlichen Fernverkehr oder andere Mobilitätsformen wie Carsharing ausweichen. In ländlichen Räumen ist dagegen der Umstieg auf die öffentlichen Verkehrsmittel aufgrund einer deutlich geringeren Netzichte oft sehr viel schwieriger. Insofern kann davon ausgegangen werden, dass die Pkw-Nutzer in ländlichen Räumen wegen der Reichweitenbeschränkungen eher einen konventionellen Pkw oder Hybridfahrzeuge nutzen werden. Die Einwohnerverteilung in Deutschland zeigt, dass etwa 40 % in Kernstädten und hoch verdichteten Kreisen wohnen und knapp 60 % in ländlichen Gebieten. Von den Arbeitsplätzen befinden sich etwa 45 % in Kernstädten und hoch verdichteten Kreisen und 55 % in ländlichen Gebieten (eigene Berechnung nach INKAR 2010).

Für die Abschätzung der erforderlichen Ladeinfrastruktur ist wichtig, wo ein Pkw abgestellt wird. Dabei ist vor allem zu klären, wo und welcher Bedarf nach Ladeinfrastruktur im öffentlichen Raum besteht und wo auf Privatgrundstücken (zu Hause, am Arbeitsplatz, bei Einkauf und Freizeit) nachgeladen werden kann bzw. der Wunsch danach besteht (vgl. Johanning und Vallée 2011). Die Daten der MiD 2002 zeigen, dass Pkw in ländlichen Räumen überwiegend auf einem festen Pkw-Stellplatz auf dem eigenen Grundstück abgestellt werden (s. Abb. 3.3). Die Garagen- bzw.

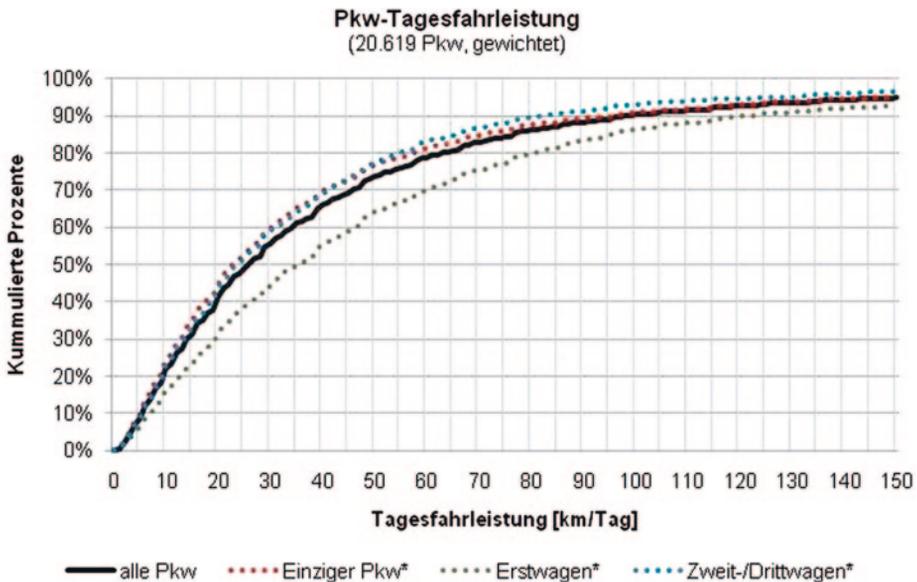


**Abb. 3.3** Garagenverfügbarkeit und Stellplatznutzung. *Quelle* Johanning und Vallée (2011)

Stellplatzverfügbarkeit nimmt mit steigender Einwohnerzahl der Kommune ab (vgl. Topp 2010). Unter der Annahme, dass eine Garage über einen Stromanschluss verfügt oder dieser angebracht werden kann, lässt sich für Ballungsräume ein wesentlich höherer Bedarf an Ladeinfrastruktur im öffentlichen Raum oder an definierten Stellen wie bspw. Parkhäusern oder Quartiersgaragen ableiten. Damit ist auch die Relevanz einer öffentlichen Ladeinfrastruktur mindestens in kernstädtischen Wohngebieten begründbar.

Die Analyse der Verteilung der Pkw-Tagesfahrleistung zeigt, dass 95 % aller Pkw nicht mehr als 150 km und 90 % nicht mehr als 100 km am Tag fahren (s. Abb. 3.4). Es besteht also eine grundsätzliche Eignung für die Alltagsmobilität. In der aktuellen Diskussion wird immer wieder davon gesprochen, dass sich vor allem Zweitwagen aufgrund einer geringeren Fahrleistung als substituierbar erweisen. Eine differenzierte Analyse macht deutlich, dass die Fahrleistungsverteilungen der Pkw aus einfach motorisierten Haushalten („einziger Pkw“) und der Zweit- bzw. Drittwagen sehr ähnlich sind, weshalb beide Pkw-Ränge im Hinblick auf die Fahrleistung das gleiche Substitutionspotenzial bieten (s. Abb. 3.4). Zudem wird ersichtlich, dass auch die Erstwagen trotz der höchsten durchschnittlichen Tagesfahrleistung ein hohes Substitutionspotenzial aufweisen.

Angesichts der begrenzten Reichweiten und der von den Pkw-Nutzern heute gewohnten Flexibilität kommen zunächst vor allem mehrfach motorisierte Haushalte als potenzielle Nutzer der Elektromobilität in Betracht (Johanning und Vallée 2011). Sofern diese neben einem konventionellen Pkw über einen weiteren Pkw mit einer maximalen Tagesfahrleistung



\*Die Zuordnung des Pkw-Ranges erfolgt über die Jahresfahrleistung. In einem mehrfach motorisierten Haushalt wird der Pkw mit der höchsten Jahresfahrleistung als Erstwagen bezeichnet.

**Abb. 3.4** Pkw-Tagesfahrleistungen. *Quelle* Johanning und Vallée (2011)

von 100 km/Tag verfügen, können sie in Sondersituationen (bspw. Urlaubsfahrt etc.) auf einen vorhandenen konventionellen Pkw ausweichen. Diese Haushalte werden im Folgenden als Nutzergruppe 1 bezeichnet. Darüber hinaus sind aber auch einfach motorisierte Haushalte geeignet, deren Pkw eine maximale Tagesfahrleistung von 100 km/Tag aufweist und die gleichzeitig über einen guten Zugang zum ÖPNV-Netz verfügen (Nutzergruppe 2). Werden diese Haushalte in der MiD 2008 identifiziert und wird davon ausgegangen, dass zu Beginn der Markteinführung von Elektro-Pkw maximal ein Pkw pro motorisiertem Haushalt ersetzt wird, so ergibt sich für die Nutzergruppe 1 ein hochgerechnetes Substitutionspotenzial von rund 8 Mio. Pkw und für die Nutzergruppe 2 von 1,4 Mio. Pkw in Deutschland. Zusammenfassend wäre das für beide Nutzergruppen ein Gesamtpotenzial von 9,5 Mio. Pkw. 81 % der potenziellen Nutzerhaushalte (7,7 Mio. Haushalte) verfügen über einen Pkw-Stellplatz auf dem eigenen Grundstück und könnten über eine eigene Steckdose den Elektro-Pkw laden. In den größeren Gemeinden zeigt sich jedoch ein deutlich höherer Bedarf an Ladeinfrastruktur im öffentlichen Raum. Rund 46 % der Haushalte, die keinen Stellplatz auf dem eigenen Grundstück haben, wohnen dort (0,8 Mio. Haushalte).

Wie oben dargestellt schwanken das Verkehrsverhalten und vor allem die Verkehrsmittelwahl im Wochenverlauf, etwa 1/3 der Verkehrsteilnehmer ist multimodal. Insofern sind für eine vollständige Abschätzung der Potenziale der Pkw-Elektromobilität weitergehende Analysen der Längsschnittdaten aus dem Deutschen Mobilitätspanel (MOP) (Zumkeller et al. 2011) zu Entfernungen und Häufigkeiten anzustellen. Aus der Gegenüberstellung bzw. den Schnittmengen der Untersuchungen auf der Basis der MiD sowie des MOP ließen sich dann die endgültigen Potenziale und evtl. Steigerungsstrategien ableiten.

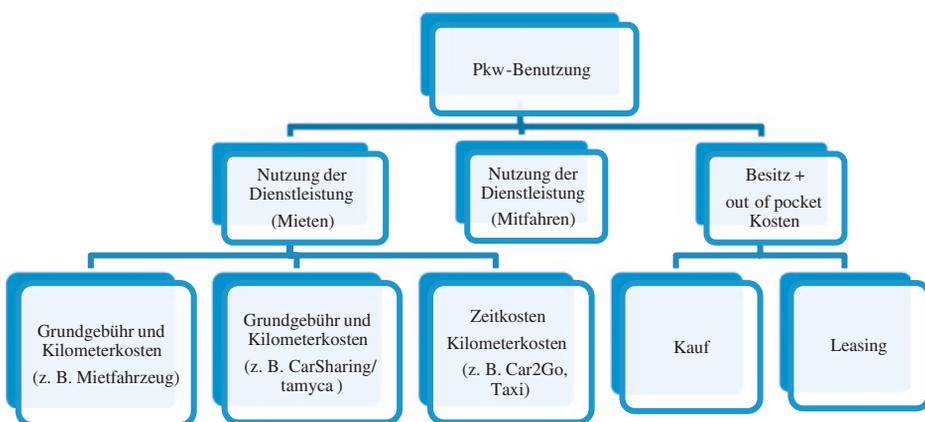
Für die Beurteilung der Substitutionspotenziale konventioneller Pkw durch Elektrofahrzeuge ist zudem wegen der heute gewohnten Besitz-gestützten Mobilität neben einer Analyse der alltäglichen Mobilität auch die Frage nach den nicht alltäglichen Einsatzfeldern wie Wochenend-Ausflug, Freizeitverkehr und Urlaubsreise zu diskutieren. Mit Verbrennungskraft angetriebene Fahrzeuge ermöglichen heute Reichweiten von 600–1.000 km und können überall nachgetankt werden (s. o.). Erst wenn solche Randbedingungen auch für die Elektromobilität gelten oder gänzlich andere Mobilitätskonzepte im Bewusstsein der Menschen breit verankert und einfach nutzbar sind, kann mit einem vielfältigen Einsatz von Elektrofahrzeugen gerechnet werden.

Neben den infrastrukturellen Voraussetzungen können unmittelbar erkennbare wirtschaftliche Vorteile wie geringe Betriebskosten oder finanzielle Fördermaßnahmen die Marktdurchdringung, insbesondere bei Flotten, beschleunigen. Weitere planerische, ordnungspolitische oder fiskalische Maßnahmen (bspw. Bevorrechtigung von Elektro-Pkw in bestimmten Gebieten, besondere Parkzonen etc., vgl. Kap. 3.1.5), umfassende kundenfreundlich nutzbare intermodale Konzepte sowie Nachlade- und Batterietauschkonzepte können die Marktdurchdringung und Akzeptanz zusätzlich positiv beeinflussen. Darüber hinaus können Fahrzeugtausch- und Leasingkonzepte als Teil umfassender Mobilitätskonzepte die auf mittlere Sicht begrenzten Einsatzfelder und höheren Kosten mindestens teilweise kompensieren.

### 3.1.4 Mobilitätskonzepte

Für die Beurteilung der Potenziale und Chancen der Elektromobilität ist neben den oben dargestellten persönlichen Mobilitätsmustern und -konzepten die Bezahlung der Mobilitätskosten beim Einsatz von Fahrzeugen von Bedeutung. Dabei ist der Begriff „Mobilitätskonzept“ bisher nicht eindeutig definiert, er wird hier als Rahmen für die Nutzung von Mobilität bzw. die Nutzung der Verkehrsmittel verstanden. Im Folgenden werden in Abb. 3.5 die heute gängigen Angebote für den Besitz eines Fahrzeugs bzw. die Nutzung von Privat-Pkw als Elemente eines Mobilitätskonzeptes beschrieben. Im Anschluss erfolgt eine Darstellung anderer Entgeltformen für Mobilität.

Die heutige Verkehrsmittelnutzung stützt sich in erster Linie auf den Besitz von Fahrzeugen und die Bezahlung laufender Betriebskosten. In 2011 waren in Deutschland rund 42 Mio. Pkw (inklusive 5,5 Mio. leichte Nutzfahrzeuge bis zu einem zulässigen Gesamtgewicht von 3,5 t) und rund 4,5 Mio. Lkw und Sattelzugmaschinen zugelassen (ViZ 2009). Nach der MiD 2008 besitzen 82 % der Haushalte mindestens ein Fahrrad und rund 85 % verfügen über einen Pkw (MiD 2008). Mit diesen Verkehrsmitteln werden rund 70 % aller Wege zurückgelegt. Bei einem solchen Mobilitätskonzept (Besitz) fallen Kosten für den Erwerb der Fahrzeuge, für die Wartung und Reparatur sowie Kraftstoff und evtl. erforderliche Park- und Mautgebühren an. Kraftstoffkosten sowie Park- und Mautgebühren können als Betriebskosten gelten und werden in der Verkehrswissenschaft als „out-of-pocket-Kosten“ zusammengefasst, die direkt mit der Transportleistung in Verbindung stehen. Die Kosten aus Besitz, Besitzsteuern, Wertverlust und Abschreibung, Wartung und Reparaturen sowie für einen dauerhaften Stellplatz (bspw. häusliche Garage) werden als Kapitalkosten interpretiert und von den Nutzern häufig vernachlässigt, obwohl sie oft einen nicht unerheblichen Teil zu den Gesamtkosten beitragen. Die Ursachen für die mangelhafte Wahrnehmung und meist



**Abb. 3.5** Besitz- und Finanzierungsmodelle von Mobilitätsangeboten mit Privat-Pkw. *Quelle* ISB, RWTH Aachen University

nicht vorhandene Zuordnung zu den Betriebskosten sind in ihrem unregelmäßigen Auftreten und der nicht unmittelbaren Verbindung mit dem Fahrzeugeinsatz zu sehen.

Die Frage der Höhe der Anschaffungskosten für Elektrofahrzeuge und deren Akzeptanz ist – zumindest in der Anfangsphase und solange Elektrofahrzeuge und herkömmliche Fahrzeuge parallel angeboten werden – vor dem beschriebenen Hintergrund der Nutzungsgewohnheiten zu beurteilen. Insofern ist es plausibel, bei deutlich höheren Anschaffungskosten für Elektrofahrzeuge von einer abschreckenden Wirkung auf die Kunden auszugehen. Zudem ist sehr fraglich, inwieweit die höheren Anschaffungskosten durch günstigere Betriebskosten im Segment der privaten Nutzung kompensiert werden können.

Im Unterschied zur Besitz-gestützten individuellen Mobilität erfolgt bei der Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel die Bezahlung für die Nutzung einer Dienstleistung, also eines Entgelts für den Transport. Die Tickets sind in der Regel vor einer Reise zu erwerben und zu bezahlen. In wenigen Fällen erfolgt eine Zusammenfassung und nachträgliche Bestpreis-Abrechnung. Üblich sind rabattierte Dauerkarten wie Wochen-, Monats- oder Jahreskarten.

Für den individuellen städtischen Verkehr sind in den letzten Jahren eine Reihe weiterer Mobilitätskonzepte entstanden, die sich mit den Begriffen Carsharing, car2go, CarTogether, private Fahrzeugvermietung wie bspw. tamya oder Mitfahrerservices (Pendlerservicesysteme oder Mitfahrzentralen) zusammenfassen lassen. Sie sind durch Entrichtung einer Grundgebühr und einer leistungsabhängigen Kostenkomponente zu nutzen. Den genannten Modellen ist gemeinsam, dass die Nutzer sich zunächst registrieren lassen müssen und für die Registrierung in der Regel ein Basisentgelt (Grundgebühr) zahlen. Damit werden Overheadkosten wie die Organisation, Versicherungen und die Vorhaltung der Vermittlungssysteme sowie anteilig auch die Fahrzeuge finanziert. Außerdem fallen Nutzungsentgelte für die tatsächlich in Anspruch genommene Leistung an, die entweder vorher nach Kilometerentgelten fixiert sind oder zwischen den privaten Nutzern auszuhandeln sind.

Neben dem Kauf eines Fahrzeugs ist seit vielen Jahren auch das Fahrzeugleasing ein gängiges Geschäftsmodell. Dabei werden mit einem Finanzierer, dem Leasinggeber, eine Anzahlung und ein bestimmtes Kilometerkontingent sowie ein Restwert vereinbart. Die Anzahlung ist bei Übernahme zu leisten. Während der Nutzungszeit fallen meist monatliche Leasingraten an, deren Höhe sich nach dem Wertverlust im Wesentlichen aus dem Kilometerkontingent ergibt. Nach Ablauf der vereinbarten Nutzungszeit wird der Restwert ermittelt, zu dem das Fahrzeug entweder übernommen werden kann oder beim Leasinggeber verbleibt. Ist der tatsächliche Restwert niedriger als der vorab erwartete und vereinbarte, muss eine Ausgleichszahlung geleistet werden. Solche Geschäftsmodelle werden überwiegend für den geschäftlichen Gebrauch abgeschlossen, weil die Leasingraten als Kosten für die Betriebsmittel buchhalterisch angesetzt werden können.

Ein inzwischen verbreitetes Mobilitätskonzept ohne Besitz eines Fahrzeugs ist das Carsharing. Carsharing-Konzepte bestehen in Deutschland seit 1988 in knapp 300 Städten (Bundesverband CarSharing; [www.carsharing.de](http://www.carsharing.de)). Das Geschäftsmodell basiert

auf der Vorhaltung von Fahrzeugen durch den Carsharing-Anbieter sowie dem Verleih der Fahrzeuge an Kunden. Der Anbieter hält in der Regel unterschiedliche Fahrzeuge vor, insbesondere unterschiedliche Fahrzeuggrößen, um die Kundenwünsche flexibel realisieren zu können. Für den Kundenstatus sind eine Registrierung beim Dienstleister und die Hinterlegung einer Grundgebühr erforderlich. Die Fahrzeuge sind an verschiedenen Stellen in einer Stadt auf reservierten Plätzen abgestellt und können nach Buchung dort entgegengenommen werden. Für die Benutzung fallen kilometerabhängige Kosten sowie Kraftstoffkosten an, nach Benutzung ist das Fahrzeug am Ausgangspunkt oder einem anderen Abstellplatz der Organisation betankt wieder abzustellen. Seit Oktober 2010 sind einzelne Elektrofahrzeuge in Carsharing-Flotten in Düsseldorf, Köln, Bamberg, Remscheid, Bremen, Dortmund, Braunschweig, Nürnberg, München, Lünen, Meerbusch sowie den DB-Carsharing-Flotten in Berlin, Frankfurt am Main und Saarbrücken im Einsatz.

Unter der Marke „tamyca“ (take my car) ([www.tamyca.de](http://www.tamyca.de)) besteht inzwischen eine private Vermittlungsbörse, bei der Privatpersonen ihren Pkw für fremde Nutzer gegen ein zu vereinbarendes Entgelt zur Verfügung stellen. Neben der individuell zu vereinbarenden Nutzungsgebühr fällt ein Entgelt für die Vermittlung an, aus dem die Overhead- und Vermittlungskosten sowie eine Rückstufungsversicherung gegen Schäden für den Vermieter bezahlt werden. Die Fahrzeugart wird dabei nicht von einem Anbieter bestimmt, sondern ergibt sich aus den privaten Angeboten.

Unter dem Namen „car2go“ betreibt die Firma Daimler in Hamburg (seit Mai 2011, 29 ct pro Minute inkl. Kraftstoff, Parkplatz, Versicherung etc.), Austin (USA, Texas), Vancouver (Kanada) und Ulm (seit Mai 2009, 29 ct pro Minute, inkl. aller Kosten) und weiteren Städten ein Fahrzeug-Sharing-Konzept ([www.car2go.com](http://www.car2go.com)), bei dem die Nutzer die im öffentlichen Raum geparkten Fahrzeuge gegen eine Nutzungsgebühr freizügig nutzen können. Im Gegensatz zum Carsharing ist das Fahrzeug weder an einem bestimmten Platz wieder abzustellen noch fällt eine Grundgebühr oder eine Reservierung bzw. Buchung an. Nach einer (kostenlosen) Registrierung können die Fahrzeuge durch einen auf dem Führerschein angebrachten Chip freigeschaltet werden. Als Kosten ist ein Nutzungszeitentgelt zu entrichten, das monatlich abgebucht wird. In Ulm sind die Fahrzeuge alle Kleinwagen des Typs Smart. Ähnliche Modelle werden auch von anderen Automobilherstellern in anderen Städten meist mit Kleinwagenflotten angeboten. In einem Feldversuch in Amsterdam wird dieses Modell seit Ende 2011 sowie seit Oktober 2012 auch in Stuttgart mit je 300 Elektrofahrzeugen erprobt ([www.media.daimler.com](http://www.media.daimler.com)).

Neben den beschriebenen Modellen, die das individuelle Mieten und freizügige selbstfahrende Nutzen eines Fahrzeugs umfassen, bestehen Vermittlungssysteme, die Mitfahrten bei anderen Personen in deren Fahrzeugen organisieren. Solche Systeme gibt es für die Vermittlung einzelner Fahrten (Mitfahrzentralen) oder regelmäßiger Fahrten (Pendlerservicesysteme, Pendlerzentralen oder CarTogether). Diese Mobilitätskonzepte sind nicht auf bestimmte Antriebsarten fokussiert und finanzieren sich durch individuelle Preisabsprachen. Prinzipiell könnten dafür auch Elektrofahrzeuge genutzt werden, sofern die Fahrer ein solches nutzen.



**Abb. 3.6** Mobilitätsverbund. *Quelle* ISB, RWTH Aachen University

Darüber hinaus besteht als Geschäftsmodell noch die klassische Autovermietung, bei der ein Fahrzeug der Wahl gegen eine Grundgebühr und ein Kilometerentgelt auf Leihbasis genutzt werden kann. Die Geschäftsanbahnung erfolgt durch Reservierung einer bestimmten Fahrzeugklasse beim Dienstleister. Das Fahrzeug muss an einem zu vereinbarenden Ort abgeholt und an einem (anderen) vereinbarten Ort wieder abgegeben werden.

Im Hinblick auf die heute nach Zeit und Ort sehr flexiblen Mobilitätsbedürfnisse der Menschen (Multimodalität und Multioptionalität, vgl. [Kap. 3.1.2](#)) erscheinen Mobilitätskonzepte nach dem Muster „Mobility on Demand“ sehr zukunftssträftig, die mit dem Begriff „Mobilitätsverbund“ charakterisiert werden sollen (s. [Abb. 3.6](#)). Damit ist gemeint, dass nur die tatsächlich in Anspruch genommene Leistung zu zahlen ist, keine Besitzabgaben anfallen und auch eine mehrfache Registrierung mit Grundgebühren nicht erforderlich ist. Die Bezahlweise des Modells entspricht der des ÖPNV, wird aber für die Nutzer um weitere Verkehrsmittel ergänzt.

Ein solcher Mobilitätsverbund besteht aus einem umfassenden Verbund aller städtischen und regionalen Verkehrsmittel und bietet die Möglichkeit, Elektromobilität in viele Teilessegmente zu integrieren. Für eine hohe Nutzerakzeptanz ist dieser Verbund kundenfreundlich durch eine Registrierung bzw. einen Zugang auszugestalten. Denkbar ist, einen solchen Mobilitätsverbund in Ergänzung zu bereits bestehenden Verkehrsverbänden im ÖPNV als Bausteine umzusetzen bzw. die Leistungen des Verkehrsverbundes durch zusätzliche Bausteine zu einem Mobilitätsverbund weiterzuentwickeln.

Zu den Kernleistungen eines solchen umfassenden Mobilitätsverbundes zählen die ÖPNV-Systeme (Bahnen und E-/Hybridbusse), darüber hinaus werden weitere Dienste wie öffentlich zugängliche Fahrrad- bzw. Pedelec-Vermietsysteme, Taxi, Carsharing- und Mietfahrzeuge sowie Hol- und Bringdienste, ggfs. gegen Zusatzentgelte, integriert. Wichtig dabei ist, dass über sämtliche Dienste nutzerfreundlich und einfach informiert wird, diese einfach buchbar sind und die Abrechnung einmalig erfolgt. Die einzelnen Komponenten können herkömmlich oder elektrisch betrieben werden.

Ein wesentlicher Aspekt neben der Vernetzung und durchgehenden Nutzbarkeit für die Kunden ist die Integration der Abrechnung bzw. des Ticketing sowie von Informationen über Standorte, Abfahrtszeiten und Verfügbarkeiten in das System. Zudem sind zentrale Halte- und Umsteigepunkte mit einem nutzerfreundlichen dynamischen Leit- und Informationssystem sowie der erforderlichen Abstell- und Ladeinfrastruktur für elektrisch betriebene Pkw und Fahrräder auszurüsten. Damit entfallen für die Nutzer die Einstiegshürden hoher Anschaffungskosten, die heute eine der größten Zugangs- und Einstiegsbarrieren für die Elektromobilität darstellen.

Der Mobilitätsverbund zeichnet sich durch zwei wesentliche Merkmale aus. Zum einen kann er die Elektromobilität unterstützen, indem die Stärken der einzelnen elektrisch angetriebenen Verkehrsmittel umfassend demonstriert werden, und zum anderen, indem das System als Marke verstanden und vermarktet wird. Die so entstehende Multioptionalität lässt den Fahrzeugbesitz weitgehend überflüssig werden. Wichtig dafür ist jedoch, dass das System mit einem Zugangsschlüssel (Karte, IT-Gerät) genutzt werden kann und alle Verkehrsmittel und Services mit automatischer Bestpreis-Abrechnung (one stop shopping) ausgestattet sind. Ein solcher Verbund erlaubt insbesondere

- die Demonstration und Nutzung unterschiedlicher Anwendungen der Elektromobilität
- die Darstellung von Stärken, Potenzialen und Entwicklungsbedarfen in den einzelnen Modi
- die einfache und durchgängige Nutzung durch die Verkehrsteilnehmer und damit einen einfachen und umfassenden Zugang sowie den Abbau von Hemmnissen und Vorbehalten
- eine gemeinsame Darstellung nach außen, die Präsentation aller Mobilitätsbausteine

Im Hinblick auf die Akzeptanz und Markteinführung verlangt ein solcher Mobilitätsverbund flankierend:

- die Formulierung eines Masterplans Mobilität sowie dessen politische Adaption einschließlich der Etablierung erforderlicher Fördermechanismen, in dem die organisatorischen, finanziellen und infrastrukturellen Rahmenbedingungen dargestellt und Handlungsaufträge zu deren Umsetzung formuliert sind
- den Aufbau einer Organisation, die die Vernetzung, das Ticketing und die Abrechnung samt der Vertriebsstrukturen übernimmt einschließlich einer Basis-/Anschubfinanzierung und der Entwicklung tragfähiger Geschäftsmodelle

- den umfassenden Einsatz von Elektrofahrzeugen in allen Feldern
- die Bereitstellung einer umfassenden Beratung über alle Angebote hinweg
- die strategische, konzeptionelle und angebotsbezogene gemeinsame Weiterentwicklung aller Mobilitätsangebote und deren Anbieter

Neben den beschriebenen Mobilitätskonzepten, die sich mit der Nutzung der Fahrzeuge bzw. der verschiedenen Verkehrsarten befassen, sind weitere Aspekte wie kombinierte Miet- bzw. Leasing-Lade-Konzepte oder Batterie-Tauschkonzepte zu nennen (vgl. u. a. [www.betterplace.com](http://www.betterplace.com)). Derartige Konzepte gehen davon aus, dass der Nutzer das Fahrzeug (Zweirad oder Pkw) kauft und die Batterie mietet bzw. least. In vielen Fällen wird das Batterieleasing mit einem Ladetarif gekoppelt, sodass für den Kunden eine Situation entsteht, die dem heutigen Nutzungsmuster des Pkw entspricht, wo beim Betanken die Kosten für den Betrieb zu zahlen sind. Derartige Tarife (Batterieleasing + Laden) werden derzeit von den großen und überregional tätigen Energieversorgungsunternehmen sowie einer Reihe von Stadtwerken, aber auch von Automobilherstellern in Zusammenarbeit mit Energieversorgern angeboten.

Schlussendlich stellt die Koppelung von Ladeinfrastruktur, Ladetarif und Parkkosten eine Option für ein Nachladen in Innenstädten oder anderen Parkieranlagen (Bahnhöfen, Einkaufszentren, Freizeitgroßeinrichtungen) dar, weil in der Regel längere Aufenthaltsdauern von über zwei Stunden (Falk 2002) bestehen, die ein wirtschaftlich und technisch sinnvolles Nachladen erlauben. Ein Problem ist derzeit noch der Gebietsbezug der Energieversorgung, weil er die freizügige Nutzung der Ladeinfrastruktur im Raum erschwert. Inzwischen ist eine Standardisierung der Stecker gelungen, ein wesentlicher Fortschritt. Als Nächstes ist es erforderlich, den Zugang zu den Lade- und Abrechnungseinrichtungen zu vereinheitlichen, um diese ubiquitär zugänglich zu machen. Vorstellbar wären Tarifmodelle ähnlich dem Roaming bei Handy-Tarifen oder bei Umsetzung der vollständigen Freizügigkeit der Anbieter eine organisatorische Trennung von Stromlieferung und Ladeinfrastruktur.

Ein weiterer, derzeit noch bedeutender Nutzervorbehalt neben der eingeschränkten Reichweite ist die Zuverlässigkeit und Haltbarkeit der Batterie. Derzeit sind mit Lithium-Ionen-Batterien bis zu 800 Ladezyklen möglich, sodass Laufleistungen von 120.000 km bzw. bei den heute üblichen durchschnittlich 14.000 km Fahrleistung pro Jahr (MiD 2008) im privaten Personenverkehr Lebensdauern von 8,5 Jahren erreicht werden können. Wegen der hohen Kosten der Batterie steigern Garantien die Akzeptanz und damit die Markteinführung. Zudem wäre denkbar, eine Leistungsversicherung für die Batterie vergleichbar der heute für Fahrzeuge bekannten Kasko-Versicherung entweder in den Batteriepreis, die Leasinggebühr oder den Ladetarif zu integrieren. Damit wird das Zuverlässigkeits- und Akzeptanzhemmnis deutlich reduziert.

Zugleich ist es wichtig, daran zu arbeiten, neben dem konventionellen Laden ein Nachladen oder Schnellladen oder den einfachen und schnellen Batterietausch zu ermöglichen. Für die Ladeoptionen und die dafür erforderliche Infrastruktur wird auf [Kap. 3.2](#) verwiesen. Beim Batterietausch besteht derzeit u. a. ein Konzept mit dem Namen „betterplace“. Es geht davon aus, dass an speziellen Servicestationen leere Batterien gegen volle

getauscht werden. Durch eine spezielle Konstruktion der Fahrzeuge sowie der Batterie im Fahrzeugboden sind Tauschzeiten von wenigen Minuten denkbar, womit keine Zeitverluste gegenüber den heute üblichen Tankzeiten zu erwarten sind. An den Servicestationen können die Batterien in Lagern wieder aufgeladen werden und stehen anschließend erneut zur Verfügung. Die Stationen müssten mit entsprechend leistungsfähigen Stromanschlüssen versorgt werden und lassen sich im Schnelllade-Modus oder konventionell betreiben. Derzeit ist geplant, diese Konzepte in Israel und Dänemark umzusetzen.

### 3.1.5 Externe Anschläge und weitere Wirkungen

Elektromobilität besitzt ein großes Potenzial, um einen innovativen und nachhaltigen Beitrag zur Lösung innerstädtischer Umweltprobleme, insbesondere der Lärm- und Abgasemissionen, zu leisten. Dies kann durch Anreize oder Restriktionen erreicht werden. So hat bspw. China inzwischen den Einsatz von Zweirädern mit Verbrennungskraftantrieb in den Innenstädten der großen Zentren mit Verweis auf die schlechte Luftqualität verboten.

Die europäischen Luftqualitäts- und Umgebungslärmrichtlinien (EG 2002, 2008) verlangen aus Gründen des Gesundheitsschutzes bei Überschreitung bestimmter Grenzwerte von den Kommunen Maßnahmen zur Verbesserung der Situation. Dabei werden die Grenzwerte und Anwendungsbereiche kontinuierlich verschärft, was zunehmend technologische Innovationen verlangt. Bisher werden häufig temporäre bzw. lokale Fahrverbote oder Geschwindigkeitsbeschränkungen ausgesprochen, um die Lärm- und Abgasemissionen zu reduzieren. Hier kann Elektromobilität einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Situation leisten, da lokal kaum oder keine Abgasemissionen entstehen und auch die Lärmemissionen reduziert sind.

Wesentliche Herausforderungen für die urbane Mobilität sind die Reduktion von Lärm- und Abgasemissionen sowie die Stau- und Flächenproblematik. Hinzu kommen grundsätzliche Anforderungen an den Ressourcenschutz sowie die Reduzierung des Primärenergieaufwands für die Mobilität, insbesondere die Einsparung von fossilen Brennstoffen. Ein wesentlicher Auslöser der aktuellen intensiven Forschung und Förderung der Elektromobilität ist die Begrenztheit der Erdölreserven, auf deren Grundlage die heute gebräuchlichen Verkehrsmittel wie Busse oder Pkw betrieben werden. Durch den motorisierten Verkehr werden in Deutschland derzeit etwa 161 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Jahr freigesetzt (Umweltbundesamt 2010). Damit trägt der Verkehr zu etwa 18 % an allen Treibhausgasemissionen in Deutschland bei. Innerhalb des Verkehrssektors ist der hauptsächliche Primärenergieträger mit einem Anteil von rund 90 % Rohöl, das in unterschiedlichen Formen, wie Diesel, Benzin, Kerosin oder Schweröl für die Antriebsmotoren verwendet wird. Selbst im Bahnverkehr, der in hohem Maß durch elektrisch angetriebene Lokomotiven und Triebzüge stattfindet, sind etwa 20 % der Primärenergie auf der Basis fossiler Brennstoffe (Kohle und Öl) für Diesellokomotiven und -triebzüge, aber auch für die Stromerzeugung ([www.deutschebahn.com/nachhaltigkeitsbericht](http://www.deutschebahn.com/nachhaltigkeitsbericht) 2009).

Vor dem Hintergrund der Endlichkeit der Ölreserven verspricht Elektromobilität hier neue Chancen, auf einem wirtschaftlich attraktiven Niveau und für viele Anwendungsfälle nutzbar einen umweltfreundlichen und nachhaltigen Ersatz zu schaffen. Dafür sind die Energiegewinnung aus regenerativen Quellen, die Speicherung, der Transport und die Versorgung der Fahrzeuge sicherzustellen. Durch eine intelligente Vernetzung von Energieerzeugung, Speicherung und Abgabe sowie eine kundenfreundliche Abrechnung ist es möglich, die Elektromobilität als einen zentralen Baustein sog. „Smart Grids“ (vgl. [Kap. 3.3.2](#)) zu nutzen. Dafür ist die Schaffung bidirektionaler Speicher-, Transformations- und Ladeinfrastrukturen erforderlich, um Reserveleistungen in den Fahrzeugbatterien für die Abpufferung von Spitzenlasten zu nutzen. Wird dies mit Mindestspeichervolumen der Fahrzeugbatterien und für die Endverbraucher interessanten Abrechnungsmodalitäten verknüpft, kann dadurch ein Beitrag zur Kompensation der heute noch vorhandenen Kostennachteile geleistet und gleichzeitig ein Speichervolumen für überschüssige Potenziale regenerativ erzeugter Energie geschaffen werden.

Für die Reduzierung der Lärmemissionen ist zu berücksichtigen, dass im Bereich bis 30 km/h die Motorengeräusche (Sandberg und Eismont 2005) dominant sind, sodass in diesem Geschwindigkeitsbereich eine Verminderung durch die geräuscharme Elektromobilität erreicht werden kann. Gerade im Bereich innerstädtischer Knoten werden die Anfahrgeräusche zudem deutlich reduziert, ein positiver Beitrag und ein hohes Potenzial zur Verbesserung der Umweltsituation. Eine grundsätzliche Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h und ausnahmsweise höhere Geschwindigkeiten auf Hauptverkehrsstraßen können zudem dazu beitragen, den Kfz-Verkehr lärmärmer und damit stadtverträglicher zu gestalten (Wissenschaftlicher Beirat 2011). Im Bereich von 30–60 km/h dominieren die Rollgeräusche, daher kann auf städtischen oder regionalen Hauptverkehrsstraßen nur eine teilweise Reduzierung des Lärms mithilfe der Elektromobilität erreicht werden. Flankierende Maßnahmen zur Verbesserung der Reifenprofile oder Fahrbahnbeläge wie bspw. offenporiger Asphalt (Umweltbundesamt und Wende et al. 2004) tragen dazu bei, die Vorteile komplett nutzen zu können. Bei höheren Geschwindigkeiten dominieren die aerodynamischen Geräusche, sodass auch hier weitere Maßnahmen erforderlich werden.

Bei Fußgängern und Radfahrern spielt das Gehör eine wichtige Rolle für die Orientierung und Verkehrssicherheit. Zu leise Fahrzeuge können die Verkehrssicherheit negativ beeinflussen, wenn sie nicht mehr wahrgenommen werden. Es sind daher weitere Untersuchungen, Risikoabschätzungen und ein stadtverträgliches Akustik-Management erforderlich.

Durchweg einen positiven Beitrag leistet die Elektromobilität bei den Abgasemissionen vor Ort, da keine lokalen Emissionen entstehen. Für die Gesamt-Emissionsbilanz ist in erster Linie die Frage der Stromerzeugung von Bedeutung. Je höher der Anteil regenerativer Energien ist, desto eher ergibt sich eine positive Gesamtbilanz (vgl. [Kap. 3.2](#)).

In den Feldern des Staus, des Parkraumbedarfs oder anderer Flächenprobleme wird mit elektrisch betriebenen Fahrzeugen als Adaption eines herkömmlichen Fahrzeugs, also dem Austausch der Antriebstechnologie, allein keine Verbesserung erreicht. Insofern sind innovative, platzsparende Fahrzeugkonzepte, eine stärkere Vernetzung und damit ein leichter Nutzungstransfer zwischen den vorhandenen Verkehrsträgern sinnvoll, um auch in diesem

Bereich Verbesserungen zu erreichen. Zudem ist zu berücksichtigen, dass Wirtschafts- und Lieferverkehre besondere Anforderungen an den Platz und die Leistungsfähigkeit haben, die hinsichtlich Energiespeicher und Reichweite noch zu lösen sind.

Für den städtischen Verkehr sind derzeit planerisch administrative Flankierungen als Anreize in der Diskussion. Diese reichen von einer City-Maut mit Befreiung für Elektrofahrzeuge (London), einer sog. „Blauen Zone“, in der allein Elektrofahrzeuge zugriffsberechtigt sind (Aachen), der Mitbenutzung von Sonderfahrstreifen (bspw. Busspuren) (NPE 2011) bis hin zu Bevorrechtigungen beim Parken oder integrierten Lade- und Parktarifen (ISB 2011).

### 3.1.6 Fazit

Ob angesichts der auf absehbare Zeit begrenzten Reichweite von Elektrofahrzeugen sowie der Mobilitätsmuster der Menschen Elektromobilität eine Zukunftstechnologie zu sein verspricht oder ein Nischenprodukt bleibt, ist differenziert zu beantworten. Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2020 Deutschland zu einem Leitmarkt für Elektromobilität zu entwickeln und eine Mio. Elektrofahrzeuge in den Verkehr zu bringen (NPE 2011). Dabei bietet die Elektromobilität wesentliche Potenziale zur Senkung lokaler Emissionen, zur Reduzierung des Primärenergieverbrauchs sowie zur Integration erneuerbarer Energien. Die Vernetzung der heute bekannten Verkehrsträger zu einem umfassenden Mobilitätsverbund sowie intelligente und integrierte Verkehrs- und Energiesysteme stellen weitere Bausteine für die Senkung von Zugangsbarrieren und eine Steigerung der Marktpotenziale dar. Im Bereich der Fahrzeuge gibt es innovative Fahrzeugkonzepte für zwei- und vierrädrige Personenfahrzeuge sowie für Lieferfahrzeuge. Dabei ist für Zweiräder ein Kauf oder die Integration in ein Fahrradverleihsystem im Rahmen eines Mobilitätsverbundes zu erwarten. Das Marktpotenzial kann auf rund 10 Mio. Pedelecs geschätzt werden. Für elektrisch angetriebene Pkw ist in Deutschland ein Marktpotenzial je nach Rahmenbedingungen von 1,5–10 Mio. Fahrzeugen vorhanden. Für Lieferfahrzeuge (bis 3,5 t zul. Gesamtgewicht) kann das Marktpotenzial auf bis zu 3 Mio. Fahrzeuge geschätzt werden.

---

## 3.2 Stromnetze

Armin Schnettler

### 3.2.1 Struktur der Stromversorgung in Deutschland

Die Versorgung mit elektrischer Energie erfolgt traditionell durch (Verbraucher-nahe) Großkraftwerke, die über die Stromnetze untereinander und mit den einzelnen

Verbrauchern verbunden sind. Die installierte Kraftwerksleistung in Deutschland betrug Ende 2010 über 155 Gigawatt (GW), davon ca. 55 GW aus regenerativen Energiequellen (Wind ca. 27 GW, Photovoltaik ca. 17 GW). Der Bruttostromverbrauch liegt bei über 630 TWh bei einer Spitzenlast in Deutschland von ca. 80 GW. Mit dem Ziel einer deutlichen Reduktion der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen des Energieverbrauchs sollen (bei gleichzeitigem Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie) regenerative Energieträger stark ausgebaut und Energieeffizienzpotenziale systematisch genutzt werden. Es ist davon auszugehen, dass die installierte Kraftwerksleistung in Deutschland im Jahr 2025 überwiegend aus den regenerativen Energieträgern Photovoltaik und Wind (onshore und offshore) besteht. Vorbereitend ist dafür die Infrastruktur zur Stromversorgung durch Optimierungsmaßnahmen, Netzverstärkungen sowie Netzausbau erheblich anzupassen (Dena 2010).

Das öffentliche Energieversorgungsnetz in Europa wird mit Wechselspannung einer Frequenz von 50 Hertz betrieben und verfügt über verschiedene Spannungsebenen, die unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Hierbei wird im Wesentlichen zwischen dem Übertragungsnetz und dem Verteilungsnetz unterschieden.

Die in Deutschland installierten Netzlängen betragen ca. 1,7 Mio. Leitungskilometer; die mittlere Verfügbarkeit elektrischer Energie für Privathaushalte beträgt ca. 99,998 % (entsprechend einer Nichtverfügbarkeit pro Netzkunde von etwa 10 min/a).

### 3.2.1.1 Übertragungsnetz

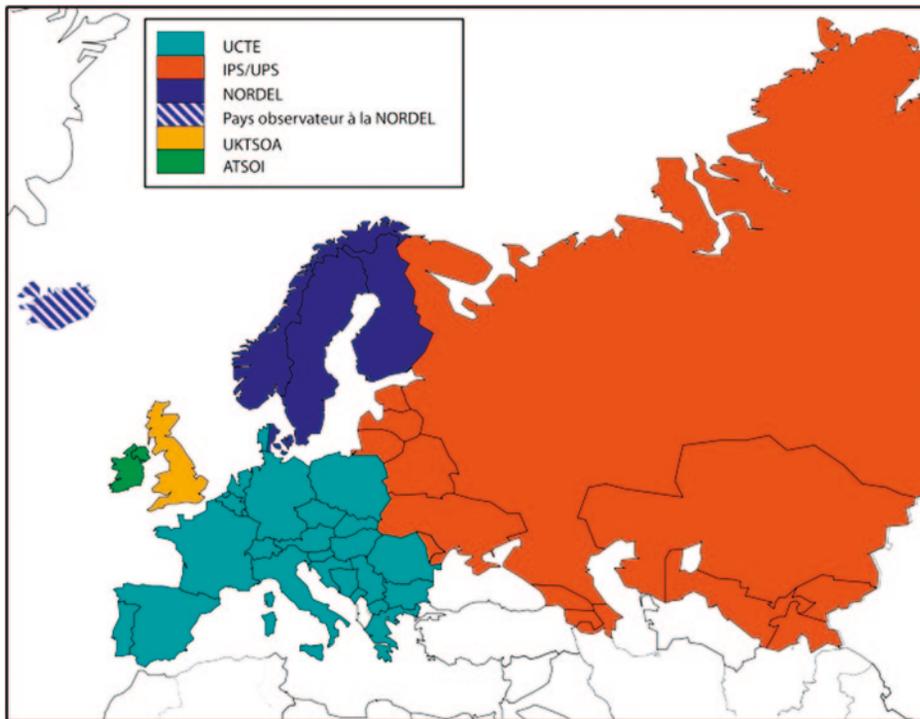
Das deutsche Übertragungsnetz ist stark vermascht und bildet mit den europaweit ausgebauten Verbindungen das westeuropäische Verbundnetz UCTE – das elektrische Rückgrat der europäischen Energieversorgung (s. Abb. 3.7).

Das UCTE wird synchron, also vermascht betrieben und versorgt in Europa ca. 450 Mio. Verbraucher. Bei einer installierten Kraftwerksleistung von ca. 650 GW beträgt die Spitzenlast im UCTE-Netz ca. 400 GW (maximal auftretende Verbraucherlast) bei einem Stromverbrauch in Höhe von ca. 2.400 TWh.

Das deutsche Übertragungsnetz wird aktuell von vier Unternehmen betrieben (Amprion GmbH, EnBW Transportnetz GmbH, TenneT TSO GmbH, 50Hertz Transmission GmbH), die für den sicheren, zuverlässigen und wirtschaftlichen Betrieb verantwortlich sind und damit einen wesentlichen Beitrag für die fast 100 % verfügbaren Übertragungsnetze leisten.

Das Übertragungsnetz wird mit Betriebsspannungen von 380 kV und 220 kV betrieben und hat im Wesentlichen folgende Aufgaben:

- Integration von Großkraftwerken und Großverbrauchern (bspw. Stahlwerke)
- verlustarme Versorgung der unterlagerten Spannungsebenen (i. A. 110 kV in Deutschland), die regional die Versorgung sicherstellen
- Bereitstellung von Systemdienstleistungen (Frequenz, Stabilität, Reservekapazität zum Ausgleich zwischen den Regionen bzw. Staaten, bspw. nach Kraftwerksausfällen)
- Sicherstellung ausreichender Übertragungskapazität für den Stromhandel



**Abb. 3.7** Europäische Verbundnetze. *Quelle* entso (2012)

Aufgrund ihrer herausragenden wirtschaftlichen Bedeutung sind Übertragungsnetze redundant geplant und werden vollständig beobachtet betrieben. Zudem werden kontinuierlich Netzsicherheitsuntersuchungen durchgeführt, um jederzeit auf Störfälle vorbereitet zu sein und eine stete Verfügbarkeit zu gewährleisten. Damit werden Kraftwerksausfälle im UCTE-Netz in Höhe von bis zu 3.000 MW jederzeit erfolgreich ausgeglichen.

### 3.2.1.2 Verteilungsnetz

Die Verteilungsnetze in Deutschland werden vorwiegend mit den Spannungsebenen 110 kV, 20 kV/10 kV und 0,4 kV betrieben. Die Kopplung mit den überlagerten Spannungsebenen erfolgt über Leistungstransformatoren (i. A. 380 kV/110 kV oder 220 kV/110 kV).

Die 110-kV-Netzgruppen sind regional vermascht und bilden somit voneinander entkoppelte Netzeinheiten, die wiederum über Leistungstransformatoren die Versorgung der unterlagerten Mittelspannungsebenen sicherstellen bzw. temporär eine Entsorgung dezentral erzeugter elektrischer Energie gewährleisten. Damit können die 110-kV-Netze vereinfacht als übergeordnete Spannungsebene der Verteilungsnetze bezeichnet werden. Die Mittelspannungsnetze weisen in Deutschland eine Spannung von 10 kV oder 20 kV auf und versorgen lokal die Niederspannungsnetze mit einer Betriebsspannung von 0,4 kV

(bzw. einphasig 230 V). Die Mittel- und Niederspannungsnetze werden im Allgemeinen als offene Ringnetze oder Strahlennetze betrieben, um eine einfache und robuste Netzführung zu gewährleisten. Der Ausfall eines Betriebsmittels oder eine erhebliche Überlastung führen zu einer Versorgungsunterbrechung, die erst nach Fehlerklärung behoben ist. Aufgrund der einfachen Struktur der Verteilungsnetze sind solche Unterbrechungen in der Regel lokal sehr begrenzt und dauern deutlich kürzer als eine Stunde.

Die Aufgaben der Verteilungsnetze sind im Wesentlichen:

- Anschluss der Verbraucher und Integration von dezentralen Stromerzeugern
- Gewährleistung einer schnellen Wiederverfügbarkeit nach Störungen
- Bereitstellung ausreichender Anschlusskapazitäten bei geringen Verlusten, akzeptablen Kosten und hoher Verfügbarkeit

Die Verteilungsnetze werden von den über 800 Verteilungsnetzbetreibern in Deutschland betrieben. Sie sind bis zur Umspannstation 110 kV/Mittelspannung (Schwerpunktstation) mit einer Vielzahl von Einrichtungen zur Messung von Strom und Spannung ausgerüstet, um eine hohe Beobachtbarkeit der Stromversorgung sicherzustellen. Die weitere Verteilung der elektrischen Energie zu den Verbrauchern, die über sog. Ortsnetzstationen (ca. 550.000 Ortsnetzstationen in Deutschland im Netz) und die Niederspannungsnetze erfolgt, wird aktuell nicht überwacht. Aufgrund der großen Erfahrung mit den Verbrauchsverläufen der Privathaushalte, Gewerbe/Handel/Dienstleistung sowie Kleinindustrieverbraucher war eine solche Beobachtbarkeit oder Steuerung bisher nicht erforderlich.

Mit zunehmendem Anteil dezentraler Erzeugung durch Klein-/Kleinstkraftwerke (zunehmend mit Kraft-Wärme-Kopplung), Photovoltaikanlagen etc.) sowie steigender Durchdringung von Elektrofahrzeugen oder Hybrid-Fahrzeugen mit Netzanschluss können die bewährten Planungsrichtlinien und Betriebserfahrungen nicht mehr die neuen technischen Herausforderungen abbilden. Gerade bei schwach ausgebauten Verteilungsnetzen, bspw. in ländlichen Gebieten oder Stadtteilen mit geringer Lastdichte (Ein-/Zweifamilienhausbebauung), ist eine sehr stark ausgeprägte Volatilität der Lastflusssituation zu beobachten. Durch vermehrte Einspeisung aus Photovoltaik erfolgt zur Mittagszeit oftmals eine Leistungsflussumkehr, da lokal mehr elektrische Energie erzeugt als verbraucht wird.

Damit liegt die elektrische Spannung im Verteilungsnetz im Netzstrang teilweise höher als an der einspeisenden Station, die zu diesen Zeitpunkten als „Entsorgungsstation“ dient, während die Spannung am selben Ort bei fehlender Einspeisung (Wolken, Dunkelheit etc.) üblicherweise niedriger liegt. Ursache hierfür ist die Netzimpedanz, speziell der Leitung (Freileitung, Kabel) zwischen der einspeisenden Station und den Netzkunden (Verbraucher, Einspeiser). Sie ist für einen Spannungsabfall verantwortlich, der sich aus Sicht des Netzkunden zur einspeisenden Spannung positiv oder negativ addiert.

Damit besteht für den Netzbetreiber die Notwendigkeit, diesen zeitabhängigen (von der Einspeisung abhängigen) Spannungsänderungen entgegenzuwirken, um bei jedem Netzkunden eine definierte Spannungsqualität zu garantieren (VDE 2008).



**Abb. 3.8** Ortsnetzstation mit regelbarem Ortsnetztransformator (rechtes Bild) zur Kopplung der Mittelspannungsebene (10 kV, 20 kV) mit der Niederspannungsebene 0,4 kV. *Quelle* Maschinenfabrik Reinhausen GmbH

Bei steigendem Anteil lokaler Erzeugung und der Elektromobilität besteht somit die Anforderung, den Einfluss der stark zeitabhängigen Residuallast, die sich aus der Differenz des lokalen Verbrauchs und der lokalen Erzeugung ergibt, auf das Netz zu beherrschen. Neben der Verstärkung des Verteilungsnetzes (Netzausbaumaßnahmen) sind dabei auch Maßnahmen der Spannungsregelung durch den Einsatz von Laststufenschaltern in Ortsnetztransformatoren (s. Abb. 3.8) oder der Blindleistungsregelung in Verteilungsnetzen möglich (als Teil von „intelligenten Verteilungsnetzen“).

Bei der Entwicklung der zukünftigen Verteilungsnetze und der Transformation der heutigen Energieversorgung wird daher auf eine stärkere Integration dezentraler Erzeuger sowie von Speichern und Elektrofahrzeugen und deren Interaktion mit dem lokalen Verbrauch (Strom, Wärme/Kälte) zu achten sein.

### 3.2.1.3 Energieversorgung für Elektromobilität

Es ist davon auszugehen, dass Elektrofahrzeuge ausschließlich über die Niederspannungsebene geladen werden. Zunächst werden einphasige Ladungen mit Anschlussleistungen von ca. 3 kW umgesetzt. Damit einhergehend treten Ladezeiten im Bereich mehrerer Stunden auf, sodass höhere Ladeleistungen, bspw. Ladeleistungen bis über 44 kW (Wechselspannung oder Gleichspannung) oder bidirektionale Verbindungen diskutiert werden. Auch unter der Annahme, dass die anzuschließenden Elektrofahrzeuge die technischen Anschlussbedingungen für Niederspannungsnetze individuell erfüllen, ist von folgenden Herausforderungen für die Integration in das Niederspannungsnetz auszugehen:

- hohe Gleichzeitigkeit
- hohe Anschlussleistung

- unbekanntes Verhalten in Störsituationen
- unsymmetrische Belastung des Netzes

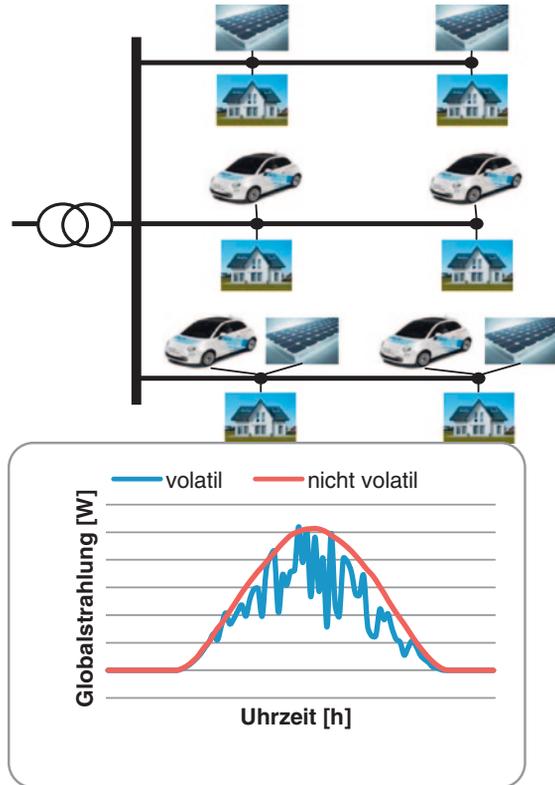
Aktuellen Erkenntnissen zum erwarteten Energieverbrauch durch Elektrofahrzeuge folgend ist ein signifikanter Einfluss auf die Kraftwerksstruktur in Deutschland nicht zu vermuten, da der angenommene Jahresenergieverbrauch durch die Elektromobilität bei maximal ca. 15 % der aktuellen Bruttostromerzeugung liegen wird. Wesentlich für die erfolgreiche Netzintegration der Elektromobilität ist vielmehr die Anschlussleistung, die kalkulatorisch dieselbe Größenordnung wie die in Deutschland installierte Kraftwerksleistung erreicht (über 150 GW bei 100 % Durchdringung und minimaler Anschlussleistung von 3,6 kW). Damit sind umfangreiche Untersuchungen erforderlich, die den sicheren und zuverlässigen Betrieb einer Vielzahl von Elektromobilen zum Ziel haben. Hierzu sind die erwarteten Durchdringungsraten, das Fahr- und Ladeverhalten sowie ggfs. erforderliche Maßnahmen im Niederspannungsnetz (bspw. Netzausbau, Ladesteuerung) zu berücksichtigen und mit den bestehenden bzw. erwarteten Netzsituationen (insbesondere der dezentralen Erzeugung) in Einklang zu bringen.

Während das Verhalten typischer Verbraucher in Niederspannungsnetzen genau bekannt ist und durch sog. Lastprofile beschrieben werden kann, liegen bis 2011 kaum belastbare Informationen über das Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen vor. Damit ist bei der Analyse der Integration von Elektromobilen in die Verteilungsnetze von Prognosen und Szenarien auszugehen, die u. a. vom Fahrverhalten (Energieverbrauch, (Start-)Zeit der Ladevorgänge) und der Anschlussleistung abhängen. Insbesondere die lokale Spannungshaltung, die thermische Überlastung von Netzbetriebsmitteln sowie die Asymmetrie der Niederspannungsnetze sind Gegenstand vieler Untersuchungen. Besondere Komplexität gewinnen diese Fragestellungen durch die Volatilität der lokalen Einspeisung, die aktuell schwer abzuschätzende Entwicklung der Durchdringungsrate von Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen sowie die Bewegung der Fahrzeuge insgesamt und das Ladeverhalten bzw. die Ladestrategie („Wird nach jeder Fahrt oder an jedem Tag die Batterie nachgeladen?“).

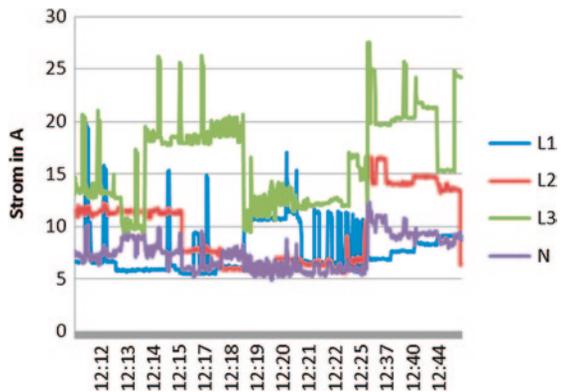
Die Analyse der Netzbelastung hat sowohl durch umfangreiche messtechnische Untersuchungen und Pilotversuche als auch durch Analysen repräsentativer Verteilungsnetze (Mittelspannung, Niederspannung) zu erfolgen (s. Abb. 3.9).

Diese haben den Vorteil, dass frühzeitig eine große Zahl möglicher Konstellationen gebildet werden kann, die sich anschließend auf ein reales und größeres Kollektiv übertragen lassen. Wesentlich ist, dass sich die Lasten adäquat durch ihr stochastisches Verhalten abbilden lassen und das Verbraucherverhalten durch repräsentative Modelle beschrieben wird. Damit wird sowohl das individuelle Verhalten als auch das Kollektiv einer größeren Anzahl von Verbrauchern modelliert. Zudem kann durch die Nachbildung einphasiger Verbraucher bzw. Einspeisungen die unsymmetrische Belastung modelliert und durch repräsentative Messungen verifiziert werden (s. Abb. 3.10). Es wird deutlich, dass gerade bei Schwachlastphasen häufig eine stark unsymmetrische Belastung des Niederspannungsnetzes vorliegt.

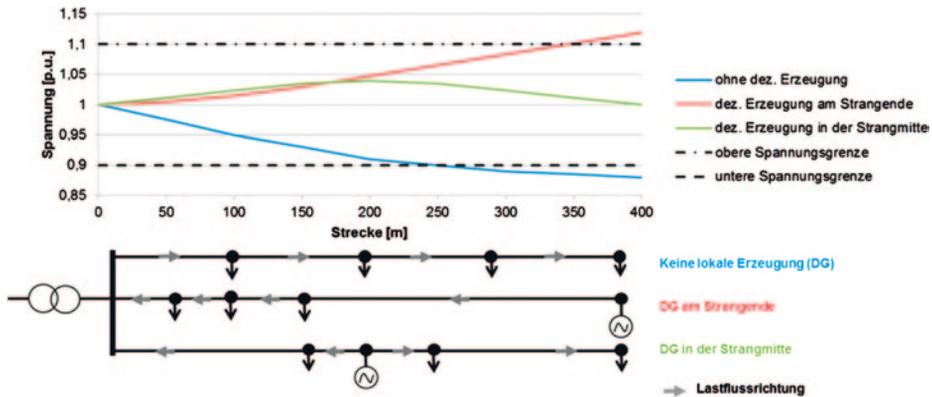
**Abb. 3.9** Vereinfachte Einspeise- und Lastsituationen in Niederspannungsnetzen. *Quelle* ifht, RWTH Aachen University



**Abb. 3.10** Messung der unsymmetrischen Belastung einer Ortsnetzstation auf Niederspannungsseite. *Quelle* ifht, RWTH Aachen University



Durch den Vergleich repräsentativer Messungen und Einspeise-/Verbrauchssituationen mit Modellen ist es möglich, bspw. den Verlauf der elektrischen Spannung entlang eines Niederspannungsstrangs zu ermitteln. Abbildung 3.11 zeigt exemplarisch verschiedene Einspeise-/Lastsituationen in den Niederspannungsabgängen einer Ortsnetzstation.



**Abb. 3.11** Verlauf der elektrischen Spannung auf Niederspannungssträngen in Abhängigkeit von der Einspeise-/Verbrauchssituation. *Quelle* ifht, RWTH Aachen University

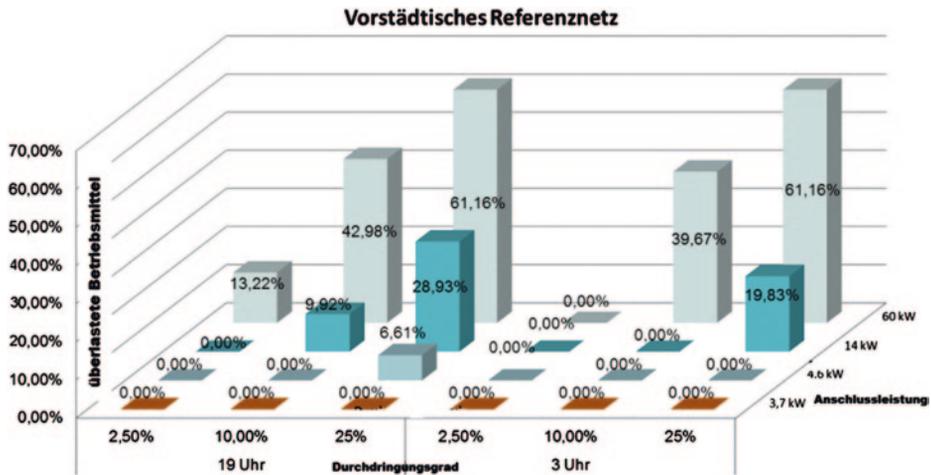
Kritisch gestalten sich Situationen, in denen in Niederspannungssträngen derselben Ortsnetzstation deutlich unterschiedliche Einspeise-/Verbrauchssituationen vorliegen, die stark differierende Spannungsverläufe im Niederspannungsnetz zur Folge haben. Diese Spannungsverläufe hängen von der lokalen Stromstärke sowie von Leitungstyp, -querschnitt und -länge ab. Technische Gegenmaßnahmen in Form von lokaler Blindleistungsregelung oder einer Spannungsstellung über regelbare Ortsnetztransformatoren bieten bei solchen Worst-Case-Bedingungen nur bedingt Vorteile.

Bei der Integration von Elektrofahrzeugen zeigen sich große regionale bzw. netztypische Unterschiede in den problemlos zu integrierenden Durchdringungsgraden. Mit hoher Wahrscheinlichkeit kann angenommen werden, dass die Integration von Elektrofahrzeugen auf absehbare Zeit (2020 +) nicht kritisch sein wird (s. Abb. 3.12). Ausnahmen bilden hier lediglich Konstellationen mit sehr hohen Anschlussleistungen sowie ländliche Netze, die ggfs. zu verstärken sind – oftmals sind gerade diese Netztypen von einem hohen Durchdringungsgrad dezentraler Erzeugungseinheiten betroffen, sodass hier vielleicht sogar kompensierende Effekte realisierbar sind.

Erst bei hohen Anschlussleistungen und hohem Durchdringungsgrad wären Netzanpassungsmaßnahmen erforderlich. Über aktive Steuerungsmaßnahmen („Smart Grids“) können mögliche Netzüberlastungen verzögert bzw. verhindert werden.

Generell lassen sich folgende Aussagen zur Netzintegration von Elektrofahrzeugen in die Niederspannungsnetze ableiten:

- Mit steigender Anschlussleistung der Elektrofahrzeuge sinkt der durchschnittliche Gleichzeitigkeitsfaktor der Netzbelastung – somit steigt die Netzauslastung nicht zwangsläufig mit der Anschlussleistung der Elektrofahrzeuge.
- Die Aufnahmekapazität des Niederspannungsnetzes wird im Wesentlichen durch die Mobilitätsmuster (Gleichzeitigkeit) bestimmt.



**Abb. 3.12** Überlastete Betriebsmittel in einem vorstädtischen Referenznetz als Funktion des Durchdringungsgrades von Elektrofahrzeugen, deren Anschlussleistung sowie die Netzbelastung (Uhrzeit). *Quelle* ifht, RWTH Aachen University

- Kurze Netzstrahlen ermöglichen eine höhere Integrationsdichte (geringere Netzimpedanz und damit verbunden geringerer Spannungsabfall entlang der Leitungsimpedanz).
- Das Verhalten einer Vielzahl von Elektrofahrzeugen insbesondere im Fehlerfall bzw. bei Störungsbehebung ist im Wesentlichen ungeklärt. Hier sind Maßnahmen zu treffen, die einen hohen Gleichzeitigkeitsgrad, bspw. gleichzeitiges Laden nach einer Versorgungsunterbrechung, verhindern. Netzanschlussbedingungen sollen dabei sicherstellen, dass sich Elektrofahrzeuge im Fehlerfall systemfreundlich verhalten.
- Eine dreiphasige Ladeinfrastruktur ermöglicht höhere Anschlussleistungen bei gleichzeitig symmetrischer Netzbelastung. Kritisch hierbei ist die Tatsache, dass Niederspannungsnetze an den üblichen Ladepunkten (private Ladestation) lediglich einphasig ausgeführt sind.

Stromtankstellen, d. h. leistungsstarke Ladesäulen, die ein schnelles „Auftanken“ (Laden) der Fahrzeugbatterie ermöglichen sollen, werden voraussichtlich direkt über Verteilnetztransformatoren mit dem Mittelspannungsnetz verbunden. Aufgrund der einfachen Prognostizierbarkeit der Anschlussleistung können öffentliche Stromtankstellen direkt in die Planung und den Betrieb der Verteilungsnetze integriert werden. Negative Beeinflussungen sind – unter Beachtung der resultierenden Netzzrückwirkungen durch Oberschwingungen und ggfs. Flicker etc. – nicht zu erwarten bzw. durch bekannte technische Gegenmaßnahmen schnell zu beseitigen.

Unter Berücksichtigung der aktuellen Entwicklungen zur dezentralen Stromerzeugung durch Photovoltaik und Mini- oder Mikro-Blockheizkraftwerke wird der Ausbau der Verteilungsnetze (speziell der Mittel- und Niederspannungsnetze) nicht durch die

Entwicklung der Elektromobilität dominiert. Erst bei lokalen Durchdringungsraten von ca. 20 % (bei Anschlussleistungen von 3,6 kW) sind bei schwach ausgebauten Netzen Netzverstärkungen erforderlich. Zudem sind lokale Kompensationseffekte, die einen Netzausbau verschiebbar oder vermeidbar erscheinen lassen, durch die Kombination dezentraler Erzeugung und lokaler Verbrauchssteuerung denkbar. Als steuerbare Verbraucher sind dabei insbesondere die lokale elektrische Wärmebereitstellung, bspw. durch Wärmepumpen, und die Elektrofahrzeuge zu sehen.

### 3.2.2 „Intelligente Netze“

Der stetige Ausbau erneuerbarer Energien in Verbindung mit dezentraler Stromerzeugung erfordert die Anpassung der Verteilungsnetzstruktur bzw. des Netzbetriebs. Mit dem Ziel, die Versorgungsqualität beizubehalten und gleichzeitig einen robusten und kostengünstigen Netzbetrieb zu gewährleisten, wird postuliert, dass ein verstärkter Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien in Niederspannungsnetzen notwendig wird. Dabei zeichnet sich eine zukünftige Verteilungsnetzstruktur durch den verbreiterten Einsatz leistungselektronischer Komponenten, aktiver Steuerungseinheiten (bspw. Spannungsregelung) sowie erweiterter Betriebsführungsstrategien aus, mit denen auch überregionale Systemdienstleistungen aus dem Verteilungsnetz heraus angeboten werden können. Mit der hierzu erforderlichen Kommunikationsinfrastruktur könnten sich neue Betriebskonzepte ergeben, die – als Demand-side-management (Last- und Erzeugungsmanagement) – wiederum eine optimierte Ladesteuerung von Elektrofahrzeugen ermöglichen.

Unter einem „intelligenten Netz“ („Smart Grid“) versteht man im Allgemeinen ein Netz, oftmals ein Verteilungsnetz, dessen Teilnehmer aus Erzeugungseinheiten, (steuerbaren) Verbrauchern, Speichern, Elektrofahrzeugen etc. bestehen, die miteinander direkt oder indirekt kommunizieren und sich für einen zuverlässigen und wirtschaftlichen Betrieb optimieren, indem sie überregionale Systemdienstleistungen anbieten.

Aktuelle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, u. a. eEnergy- Projekte, beschäftigen sich mit der Optimierung des Verteilungsnetzbetriebs unter Berücksichtigung lokaler Erzeugung und Verbrauchssituationen sowie einer Speicherbewirtschaftung. Hierbei werden auch Bündelungen vieler kleiner Erzeugungseinheiten oder Speicher zu „virtuellen Großerzeugern oder -speichern“ analysiert, mit denen Aggregatoren (Dienstleister) auf den Regelleistungsmärkten entsprechende Dienstleistungen anbieten wollen. Wesentliches Augenmerk wird auf die Zwischenspeicherung der lokalen, z. T. sehr hohen Photovoltaik-Einspeisung in Form von thermischer Energie (Warmwasser) oder elektrischer Energie (stationäre Batteriespeicher oder Elektrofahrzeuge) gelegt.

Allen Projekten gemeinsam ist, dass aktuell keine Geschäftsmodelle für den wirtschaftlichen Betrieb solcher „Smart Grids“ bestehen; die Pilotprojekte sollen vielmehr das technisch-wirtschaftliche Potenzial abschätzen und die Grundlage für die zukünftige Entwicklung von Smart-Grid-Technologien liefern.

### 3.3 Servicenetz

Ralf Kampker und Mitja Bartsch

#### 3.3.1 Service und Mobilität

Als Service wird eine konkrete Dienstleistung oder Hilfestellung verstanden, die für einen Verbraucher erbracht wird. Hierbei kann es sich um einen Dienst handeln, eine ausführende Tätigkeit an Kunden durch eine gastronomische Fachkraft oder um einen Kunden-/Reparaturservice.

Hinter einzelnen Dienstleistungen oder Produkten stehen meist komplexe Konzepte und Prozesse, die einen guten Service ausmachen. Bedarfe werden dann optimal befriedigt, wenn der Kunde in allen Phasen des Bedarfsprozesses optimal unterstützt wird. Optimaler Service hilft ihm herauszufinden, was er wirklich braucht, deckt seinen Bedarf und betreut ihn in der Zeit der Inanspruchnahme sowie in der Phase des Produktupdates. Unternehmen, die im Vorfeld ihre Produkte und Servicekomponenten aufgrund von Analysen optimal auf die Bedürfnisse des Kunden abgestellt haben, stehen bei den Verbrauchern mit ihren Produkten hoch im Kurs (bspw. Ikea). Nachfolgend wird Service als ganzheitlicher Dienst am Kunden verstanden.

Ein Servicekonzept für die Mobilität bei der Nutzung von Elektrofahrzeugen ist eine Mischung aus Analysen und Dienstleistungen. Sie sollen dem Kunden die Bewegung mit dem Elektroauto so angenehm wie möglich machen und das Elektroauto als erstrebenswerte Variante der Mobilität präsentieren. Die prozentuale Verteilung der Hilfsmittel der Fortbewegung zeigt Folgendes (Tully und Baier 2006):

- 23 % aller Wege werden ausschließlich zu Fuß zurückgelegt (bei den anderen Verkehrsmitteln sind auch Fußwege enthalten)
- 9 % werden mit dem Fahrrad erledigt
- 8 % mit dem öffentlichen Personen-Nahverkehr (ÖPNV)
- 45 % aller Wege werden mit dem Kraftfahrzeug als Fahrer zurückgelegt
- 16 % als Beifahrer

Es stellt sich die Frage, wie ein überzeugendes Servicekonzept gestaltet sein muss.

#### 3.3.2 Komponenten eines Mobilitäts-Servicenetzes

Ein ganzheitlich orientiertes Servicekonzept für die Mobilität mit einem Elektrofahrzeug enthält mehrere Komponenten, die zusammen den Kunden von der Qualität des Produkts überzeugen sollen. Ein solches Konzept fängt also dort an, wo ein Produkt oder eine Dienstleistung gemeinsam mit dem Nutzer entwickelt wird. Im Falle des Elektroautos

bestehen sowohl der Zwang als auch die Chance, bei seiner Entwicklung den Verbraucher mit einzubeziehen; Zwang, weil es sich auf den ersten Blick um ein Produkt handelt, das in Form von vielen Automarken und Typen bereits tausendfach auf dem Markt erhältlich ist. Warum soll der Verbraucher ein weiteres Auto kaufen? Hier setzt das ganzheitliche Servicekonzept an und ermittelt die Bedarfe des Kunden. Der Kunde möchte eine preiswerte, innovative Möglichkeit, um Kurzstreckenfahrten zu bewältigen. Diese Fahrten sollen nicht nur den eigenen Geldbeutel schonen, sondern auch die Umwelt entlasten und mit einem „angesagten“ Produkt erledigt werden. Zum Bedarf gehören auch integrierte Servicepakete, die Mobilitätswünsche und gestiegene Anforderungen des Kunden an Kommunikation (bspw. Smartphone-Integration) befriedigen. Die Chance besteht darin, dass Elektroautos nicht nach dem gleichen Muster wie Autos mit Verbrennungsmotor gebaut werden müssen, weil die Treiber dieses Produkts nicht ausschließlich die bisherigen Autohersteller sind, sondern auch andere Branchen wie die Stromindustrie, Automobilzulieferer, Stadtwerke, Telekommunikationsindustrie, Parkhausbetreiber etc. Durch diese neue Form von Konsortien kann ein Produkt entwickelt werden, das nah am Bedarf des Nutzers entsteht und flexibel gestaltbar ist. Ein Auto wird wie ein Handy vertrieben, weil Stromkonzerne den Strom verkaufen wollen und beides subventionieren. Kraftwerksbetreiber sehen in den Batterien einen interessanten Zwischenspeicher für Energie in der Nacht, wenn zwar Wind weht, aber niemand Strom verbraucht. Im Folgenden werden die zentralen Bausteine eines optimalen Servicekonzeptes vorgestellt.

- a) Vertriebsnetz Ohne ein Vertriebsnetz und eine Vertriebsorganisation kann kein Produkt erfolgreich vermarktet werden. Zu einem guten Servicekonzept gehört, dass der Nutzer sich über das Produkt gut informieren (bspw. im Internet) und es bei Bedarf anfassen und testen kann. Hierzu müssen sowohl die Informationsplattform als auch Erlebnisorte in ein ganzheitliches Servicekonzept integriert werden. Je besser die Information und die Orte zum Erleben des Produkts in den täglichen Ablauf des Nutzers eingebunden werden, desto einfacher wird es ihm gemacht, sich mit dem Produkt und seinen Vorteilen auseinanderzusetzen. Daher sind bspw. Vertriebskanäle über bestehende Discounter, die der Kunde zur Deckung seines täglichen Bedarfs mindestens einmal wöchentlich aufsucht, sehr geeignet (erfolgreiches Beispiel: Prepaid-Handy, Reise oder Rasendünger über Aldi oder Lidl).
- b) Finanzierungsmodelle Der Kauf eines Produktes steht und fällt mit der Finanzierung. Sehr geringwertige Güter sind problemlos zu vermarkten. Güter, die einen Wert von 5.000 Euro übersteigen, müssen sich dem Thema Finanzierung widmen. Zu einem guten Servicekonzept gehört es daher auch, dass der Vertreiber dem Kunden verschiedene Möglichkeiten anbietet, das Produkt zu erwerben. Leasingmodelle wie beim Auto oder Ratenzahlungen wären hier zu nennen.
- c) Umfassendes Servicekonzept Kunden müssen mit ihren Mobilitätsprodukten ganzheitlich betreut werden, weil Mobilität mittlerweile für sehr viele Lebensbereiche

notwendig geworden ist. Die Kinder werden zur Schule gefahren, der Arbeitsplatz kann häufig nicht mehr ohne Individualverkehr erreicht werden, die Einkaufszentren liegen vor der Stadt. Daher braucht ein Mobilitätsprodukt ein Servicekonzept mit sicherer Verfügbarkeit bzw. Verlässlichkeit. Das geht nur, wenn der komplette Produktlebenszyklus in ein Servicekonzept integriert wird.

- d) Werkstätten bereitstellen Dem Käufer eines Produkts muss im Vorfeld die Sicherheit gegeben werden, dass Probleme mit seinem Produkt durch kompetente Partner gelöst werden. Das Servicekonzept muss also enthalten, wo und wer Wartung und Reparaturen zu welchem Preis durchführt und wie der Kunde diese Dienstleister erreichen kann.
- e) Ergänzungsbedarfe Benötigt ein Produkt regelmäßig Ergänzungen oder verbraucht es Rohstoffe, muss das Servicekonzept die Versorgung mit diesen Elementen beschreiben und ein Netz von Versorgern sicherstellen. Bei dem Produkt Elektroauto ist der Strom der Rohstoff, der regelmäßig aufgenommen werden muss.
- f) Intelligente Wartungskonzepte und Frühwarnsysteme Je weniger Kosten und Umstände ein Produkt im Betrieb macht, desto zufriedener ist ein Verbraucher. Ein guter Service dient dem Erreichen dieser positiven Umstände. Frühwarnsysteme, die Produkte vor dem Defekt zur Wartung leiten, sind daher zu bevorzugen. Ein einfaches Frühwarnsystem zeigt Serviceintervalle an und fordert den Nutzer auf, diese einzuhalten.
- g) Entsorgung der Produkt-Komponenten Jedes Produkt hat seinen Lebenszyklus. Ganzheitliche Servicekonzepte integrieren die Entsorgung des Produktes und ermöglichen dem Nutzer so den Tausch von alt gegen neu, ohne große Mehrkosten oder Aufwand.

Diese ganzheitlichen Servicekonzepte/Service-netze werden im nächsten Kapitel betrachtet. Dazu erfolgt zuerst ein Blick in die Strukturen des Automarktes mit seinen Lieferketten und Servicenetzen.

### 3.3.3 Servicestruktur im freien Automarkt und OES

In Deutschland gibt es insgesamt 38.050 Kfz-Betriebe (Vogel 2011). Sie kümmern sich um die Wartung und Reparatur der 42,3 Mio. zugelassenen Pkw. Exklusive der Unfallreparaturen handelt es sich um einen Markt mit einem Gesamtumsatz von etwa 18,2 Mrd. Euro. Im Durchschnitt werden für die Wartung 230 Euro und für die Reparaturarbeiten 201 Euro pro Pkw und Jahr ausgegeben.

Durch verlängerte Wartungsintervalle und die Einführung von Fahrzeugsystemen, die eine Wartung verschleißabhängig messen und signalisieren, sinkt das Wartungs-Soll

pro Fahrzeug und Jahr immer weiter. 2010 lag es bei 1,05 Wartungen. Wirklich durchgeführt werden sie aber nicht, das Wartungs-Ist lag 2010 bei nur 0,91 Wartungsarbeiten.

Der Kfz-Wartungs- und Reparaturmarkt unterliegt einem starken Wettbewerb. Es hat sich zwar 2010 das seit einigen Jahren zu beobachtende Werkstattsterben verringert (2004 gab es noch 41.700 Kfz-Betriebe), trotzdem zwingt der Konsolidierungsprozess die Marktteilnehmer, um jeden Prozentpunkt Marktanteil zu kämpfen. Ein wirkliches Wachstum ist nicht erkennbar, es geht primär um die Verteilung des Potenzials (Vogel 2011).

Von den 38.050 Kfz-Betrieben sind 18.100 sog. Markenbetriebe (OES – Original Equipment Supplier) (Vogel 2011). Sie sind vertraglich mit einem oder mehreren Kfz-Herstellern oder

-Importeuren verbunden. Die Kombination mehrerer Fahrzeugfabrikate in einem Betrieb ist seit Inkrafttreten der europäischen Gruppenfreistellungsverordnung für das Kfz-Gewerbe 1400/02 im Jahr 2002 möglich. Außerdem sind seither die Bereiche Verkauf und Service vertraglich getrennt. Nicht alle der markengebundenen Kfz-Betriebe haben darum neben dem Servicevertrag auch einen Vertrag für den Neuwagenverkauf. Die Versorgung mit dem für die Wartung und Reparatur erforderlichen Know-how und mit Ersatzteilen übernimmt in erster Linie der jeweilige Fahrzeughersteller bzw. Importeur.

Die übrigen 19.950 Kfz-Betriebe sind sog. freie Werkstätten. Sie sind herstellerunabhängig, im Fachterminus wird ihr Markt als Independent Aftermarket (IAM) bezeichnet. Dieser IAM beschränkt sich jedoch nicht nur auf die freien Werkstätten, zu ihm gehören auch die Aftermarket Division der Teilezulieferer-Industrie sowie die Kfz-Teilergroßhandelsorganisationen. Sie bieten den freien Werkstätten intensive Unterstützung, damit diese an modernen Fahrzeugen arbeiten können. Zu diesen Hilfen gehören Services wie technische Daten und Reparaturhilfen, umfangreiche Schulungsprogramme oder Marketinghilfen.

Darüber hinaus wird der Kfz-Markt durch spezielle Regeln und Ausnahmen reguliert. Erwähnenswert sind die Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007 (die sog. Euro-5/6-Abgasverordnung; sie regelt u. a. die Bereitstellung von technischen Daten und die Diagnostizierbarkeit via EOBD-Schnittstelle an einem Fahrzeug) und die im Mai 2010 aktualisierte und erlassene Verordnung (EU) Nr. 461/2010 (die sog. Gruppenfreistellungsverordnung). Deren Vorgaben gelten auch für Elektrofahrzeuge.

Insbesondere das Bereithalten von technischen Informationen gegenüber dem IAM sowie der Erhalt von Gewährleistungsansprüchen bei Arbeiten eines freien Betriebs sind in diesen Verordnungen geregelt und bilden die Grundlage für die Arbeit des IAM.

Wichtig ist außerdem die Rolle der Zulieferer. Denn die modernen Produktionsprozesse basieren heute auf einer Just-in-Time-Belieferung von Bauteilen und Modulen direkt ans Band des Fahrzeugherstellers. Diese Aufgabe übernehmen die Unternehmen der Zuliefererbranche. Neben der Ware, die für die Fahrzeugproduktion geliefert wird, produzieren sie auch die Ersatzteile, die aber nicht nur über die

Aftersales-Organisationen der Fahrzeughersteller und -importeure in den Markt gebracht werden, sondern auch über die Strukturen des IAM.

Die meisten namhaften Zulieferer-Unternehmen haben große Tochterfirmen, die sich mit dem Vertrieb von Ersatzteilen im IAM beschäftigen. Über den Teilevertrieb hinaus werden vertriebsunterstützende Services wie technische Datenbanken, Telefonhotlines oder Marketinghilfen angeboten. Bis das jeweilige Ersatzteil aber im Fahrzeug verbaut wird, durchläuft es weitere Handelsstufen, denn die wenigsten Zulieferer verkaufen ihre Ersatzteile direkt an die Werkstätten.

Der übliche Distributionsweg führt über überregional tätige Kfz-Teilehandelsorganisationen, die wiederum an regionale Händler oder direkt an Kfz-Werkstätten verkaufen. Diese Unternehmen sind teilweise in Gesellschaften organisiert, in denen sie gemeinsam mit Mitbewerbern der gleichen Handelsebene Einkaufswege optimieren, Serviceangebote zentralisieren oder Marketing organisieren.

Die meisten deutschen Kfz-Teilegroßhandelsunternehmen haben sich im Gesamtverband Autoteile-Handel e.V. (GVA) organisiert. Er ist die politische Interessenvertretung des freien Kfz-Teilehandels und vertritt derzeit 154 Handelsunternehmen mit über 1.000 Betriebsstellen und 127 Kfz-Teilehersteller. Außerdem spricht der GVA auch für die über 2.000 Einzelhändler von Kfz-Ersatzteilen.

Kernaufgabe der Unternehmen ist der Verkauf von Ersatzteilen. Darüber hinaus haben sie in den letzten 15–20 Jahren etliche Dienstleistungen entwickelt, die den Teilevertrieb forcieren und das Geschäft langfristig sichern sollen. Die Großhandels-Unternehmen bieten den Werkstätten die heute notwendige technische Unterstützung, Schulungen und eine ausgefeilte Logistik. 4 oder 5 Belieferungen pro Tag sind heute eher die Regel als die Ausnahme. Gerade am Beispiel der Distributionslogistik wird deutlich, wie komplex und professionell der Ersatzteilerhandel im IAM mittlerweile aufgestellt ist.

Die höchste Ausbaustufe in der Unterstützung, Betreuung und Bindung der für den Teilegroßhandel so wichtigen freien Werkstätten sind die mittlerweile etablierten Full-Service-Werkstattssysteme. Diese Servicekonzepte werden im folgenden Kapitel näher erläutert.

### **3.3.4 Werkstattkonzepte**

Seit etwa 15 Jahren gibt es sog. Full-Service-Werkstattkonzepte, die zum größten Teil vom Teilegroßhandel oder den jeweiligen gemeinsamen Gesellschaften angeboten werden. Auch wenn der Begriff Franchising nicht oft benutzt wird, handelt es sich letztlich um Franchisesysteme, bei denen der Franchisegeber der Markeninhaber ist und den Franchisenehmern die jeweilige Marke und verschiedene Leistungen zur Verfügung stellt. Neben den Großhandelsorganisationen bieten auch die Zulieferer-Industrie selbst und teilehandelsunabhängige Gesellschaften Werkstattkonzepte an. Die derzeit in Deutschland angebotenen Werkstattkonzepte teilen sich in sog. Detailkonzepte und in Full-Service-Konzepte auf.

### 3.3.4.1 Detailkonzepte

Detailkonzepte sind oft Einstiegskonzepte mit geringen Standards und ohne nennenswerte Gebühren. Anbieter sind Teilegroßhandelsgesellschaften und viele Unternehmen der Zulieferer-Industrie. Oft beschränken sich die Leistungsangebote der Detailkonzepte auf bestimmte Baugruppen, bspw. bei den Konzepten LuK-Meisterservice oder HELLA-Servicepartner. Der Teilehandel bietet seine Detailkonzepte eher als Einstiegskonzept an und versucht, die damit gebundenen Betriebe dann in die Full-Service-Konzepte zu überführen.

Viele freie Werkstätten des IAM nutzen mehrere Detailkonzepte parallel, oft auch in Verbindung mit einem Full-Service-Konzept. Die wenigen Filialsysteme wie A.T.U. oder Pit-Stop sind separat zu betrachten. A.T.U. gehört dem US-Finanzinvestor Kohlberg Kravis Roberts (KKR) und wird nicht im Franchise angeboten. Pit-Stop gehörte bis vor Kurzem zum Luxemburger Beteiligungsfonds BluO, wurde aber 2010 an den Essener Kfz-Teilegroßhändler PV Automotive verkauft. Nach eigener Aussage plant PV, Pit-Stop innerhalb der nächsten Jahre in ein Franchisesystem umzuwandeln.

### 3.3.4.2 Full-Service-Konzepte

In Deutschland werden derzeit 14 Full-Service-Konzepte angeboten, denen etwa 8.800 Kfz-Betriebe angeschlossen sind. Nur zwei der Konzepte gehören einem Unternehmen der Zulieferer-Industrie, nämlich AutoCrew und BOSCH CAR SERVICE. Systemgeber ist in beiden Fällen die Robert Bosch GmbH. Die Konzepte werden aber trotzdem primär über Teilehandelsunternehmen vertrieben (Springer 2011). Alle anderen Systeme gehören Großhandelsbetrieben oder deren gemeinsamen Gesellschaften und werden meist über diese vermarktet (Abb. 3.13).

Für Autofahrer bedeutet diese Entwicklung mehr Entscheidungsspielraum. Die den Full-Service-Konzepten angeschlossenen Werkstätten sind heute in der Lage, auch komplexe Arbeiten an modernen Fahrzeugen durchzuführen. Dadurch wird die Chancengleichheit am Markt zwischen den fabrikatsgebundenen Werkstätten und den freien Konzeptwerkstätten erhöht. Diese Marktliberalisierung war auch einer der treibenden Motivatoren der Europäischen Kommission für den Erlass der Kfz-spezifischen Gruppenfreistellungsverordnung.



**Abb. 3.13** Auszug von Full-Service-Konzepten

Die Motivation der Konzeptanbieter ist nachvollziehbar. Für sie sind die angebotenen Werkstattssysteme Marketingwerkzeuge, mit denen Werkstätten als Neukunden gewonnen und bestehende Kunden an das eigene Unternehmen gebunden werden. Die Flankierung des Distributionskanals mit einer eigenen Marke, die intensive Unterstützung der angeschlossenen Kfz-Werkstätten und die B2C-Bewerbung schützen und stärken den Vertriebskanal für das Teilehandelsunternehmen.

Für die freien Werkstätten sind Werkstattssysteme die Chance, vielfältige Services und Unterstützungen wahrzunehmen, die ihnen wiederum ermöglichen, ihren Kunden einen qualitativ hochwertigen Service anzubieten. In Zeiten immer komplexerer Fahrzeugtechnik ist es kaum möglich, alle notwendigen Informationen, Hilfsmittel und Kenntnisse selbst zu organisieren und zu finanzieren. Auch das Thema Bildung und Weiterbildung ist in der Kfz-Branche so umfangreich, dass es kaum von einer Werkstatt zu managen ist. Und nicht zuletzt die werbliche Arbeit stellt einen freien Kfz-Betrieb vor schwierige Aufgaben. Durch den Anschluss an ein Werkstattssystem kann er in vielen Bereichen Skaleneffekte nutzen, und zwar sowohl organisatorischer als auch finanzieller Art.

Die branchenbekannte Unternehmensberatung BBE beschäftigte sich schon in mehreren Studien mit den Werkstattskonzepten. Interessant ist die Bedürfnisanalyse, der eine umfangreiche Befragung freier Werkstätten zugrunde lag. Sie zeigt, dass vor allem in den Bereichen Technische Unterstützung (Diagnose, Daten, Arbeitsanleitungen und Hotline), Schulung/Weiterbildung und Marketing Bedarf an professionellen Lösungen besteht.

Auch die Umsetzung in den jeweiligen Systemen hat BBE untersucht. In einer Studie zur Zufriedenheit der Partnerbetriebe wurden die Aussagen der Systemanbieter überprüft. Unter 13 Full-Service-Systemen landete der Anbieter MOTOO bei der Bewertung der Akzeptanz durch ihre Partner auf dem 1. Platz. Zusammen mit zwei weiteren Werkstattssystemen erhielt das Komplettsystem für Werkstätten die Bestnote 2,0.

In ihrer repräsentativen Studie, die in Zusammenarbeit mit dem Zentralverband Deutsches Kraftfahrzeuggewerbe (ZDK) durchgeführt wurde, befragte die BBE insgesamt 398 Werkstätten in Detail- und 437 Werkstätten in Full-Service-Systemen, 127 Reifenhändler, 129 Autohäuser und autorisierte Servicebetriebe sowie 77 freie Werkstätten. Ziel war es, die Leistungsfähigkeit der Systeme aus Sicht der Partnerwerkstätten qualitativ zu bewerten. Dabei wurde festgestellt, dass – gerade angesichts der steigenden Haltbarkeit von Pkw-Komponenten bei gleichzeitig ansteigender technischer Komplexität und Elektrifizierung – Werkstattssysteme mehr und mehr zum Rettungsanker vor allem für freie Betriebe des Kfz-Gewerbes werden (BBE 2006).

### **3.3.4.3 Leistungsbausteine eines Full-Service-Konzeptes**

Exemplarisch sollen die Leistungsbausteine eines Full-Service-Konzeptes aufgezeigt werden, das von einem mittelständischen, familiengeführten Unternehmen, der Hans Hess Autoteile GmbH, angeboten wird. Die Werkstätten, die dieses Full-Service-Konzept nutzen, werden im Folgenden als MOTOO-Werkstätten zusammengefasst (MOTOO 2012).

### *Technik & IT*

Ein Online-Teilekatalog hilft bei der Identifikation von Ersatzteilen, Serviceplänen und Arbeitsvorgaben. Alle Konditionen und Verfügbarkeiten der jeweiligen Teile sind in Echtzeit sichtbar. Darüber hinaus sind umfangreiche technische Informationen wie bspw. Reparaturanleitungen, Arbeitszeitvorgaben, Füllmengen oder Wartungsvorgaben enthalten. Wichtig für die Werkstätten und die Autobesitzer ist, dass diese Informationen auf den originalen Angaben der Fahrzeughersteller basieren.

Darüber hinaus steht den MOTOO-Werkstätten eine kostenlose Technik-Hotline zur Verfügung, über die die Kfz-Mechaniker Zugriff auf originale Daten haben und auf umfassende Erfahrungsdatenbanken. Für die Arbeit im Kfz-Betrieb steht Software bereit, die neben der Abbildung aller Werkstattvorgänge von der Auftragsannahme bis zur Rechnung Schnittstellen zu allen marktrelevanten Systemen (bspw. Teccod, Schwacke) bietet. Funktionen zur Kundenbindung gibt es ebenfalls. Anschreiben mit Erinnerungen an die fällige Hauptuntersuchung oder die nächste Inspektion gehören zum Service. Kunden erhalten also den gleichen Service, den sie von markengebundenen Betrieben kennen.

### *Schulung & Weiterbildung*

Die Service-Zentrale bietet den Partnern mehr als 100 Schulungen pro Jahr an. Ob kaufmännisch oder technisch, alle für einen freien Kfz-Betrieb relevanten Themen sind berücksichtigt. Dazu zählen auch notwendige Sachkundeführergänge für Klima oder Airbag. Die Referenten und Trainer sind meist erfahrene Profis von der Handwerkskammer, aus der Industrie oder von bekannten Bildungsunternehmen.

### *Marketing & Werbung*

Viel Wert wird auf die Maßnahmen und Aktionen zur Kundenbindung und Neukundengewinnung gelegt. Es gibt zentral gesteuerte Werbekampagnen oder einzelne Aktionen im Kfz-Betrieb. Die gemeinsame Zielgruppe ist der Autofahrer.

### *Betriebswirtschaftliche Unterstützung*

Die angeschlossenen Partner können eine umfangreiche Unterstützung bei vielen betriebswirtschaftlichen Belangen in Anspruch nehmen.

### *Fahrzeughandel*

Kfz-Betriebe, die das Geschäft Fahrzeughandel professionell betreiben möchten, erhalten von ihrer Systemzentrale Förderung. Das Modul Fahrzeughandel ist geeignet für diejenigen, die den Fahrzeughandel als Zusatzgeschäft zu ihrer bestehenden Werkstatt verstehen. Damit können den Endkunden nicht nur Wartungen und Reparaturen, sondern auch Neu- und Gebrauchtfahrzeuge angeboten werden.

Die Systemzentrale ermöglicht den Werkstätten auch im Fahrzeughandel den Zugang zu Kooperationspartnern. So bestehen meist Kooperationen mit Fahrzeug-Vermarktungsportalen, Schulungsanbietern und Anbietern von Spezialbedarf für den Fahrzeughandel, wie bspw. Preisschilder oder Wegeleitsysteme.

### *Finanzierung*

Ein wichtiges Thema im Fahrzeughandel ist die Finanzierung. Die Servicekonzepte sorgen dafür, dass ihren Partnern sowohl eine Einkaufs- als auch eine Absatzfinanzierung zur Verfügung stehen. Die Werkstätten können ihren Kunden Angebote zu Leasing und Finanzierung machen.

Sie haben auch Zugriff auf eine Einkaufsfinanzierungslinie zur Finanzierung des eigenen Fahrzeug-Bestands. Dabei wirkt sich die Zugehörigkeit zum Werkstattnetz positiv auf die jeweiligen Konditionen aus.

### *Rechtsberatung*

Im Servicekonzept gibt es oft eine Kooperation mit einer spezialisierten Anwaltskanzlei, die den Partnern in allen rechtlichen Fragen des Kfz-Betriebs beratend zur Seite steht. So wird die Schadensabwicklung für die Werkstatt und deren Kunden deutlich vereinfacht und beschleunigt.

### *Finanzierung von Reparaturkosten*

Über Kundenkarten besteht die Möglichkeit, Kunden eine Reparaturkostenfinanzierung zu ermöglichen. Die Kundenkarte im Servicenetz ist eine Kreditkarte mit allgemeiner Gültigkeit.

### *Umweltschutz und Entsorgung*

In einer Autowerkstatt gibt es einige umweltschädliche Stoffe. Bei falscher Handhabung können dadurch Probleme entstehen. Deshalb haben Servicenetz-Partner Zugriff auf die Services von Umweltspezialisten wie bspw. Partslife, dem Umweltdienstleister der Kfz-Branche. Partslife bietet seinen Werkstattpartnern Abscheider- und Entsorgungsservice an. Insbesondere die Wertstoffrückgewinnung, bspw. bei alten Katalysatoren oder Batterien, steht im Fokus. Zusätzliche Dienstleistungen wie umfassende Beratung in allen die Werkstatt betreffenden Umweltfragen und Energieberatung runden diesen Leistungsbaustein ab. Persönlich ansprechbare Experten von Partslife unterstützen die Werkstätten, die auf diese Weise die hohen Anforderungen besser umsetzen können.

## **3.3.5 Elektro-Servicekonzepte**

Bestehende Servicekonzepte und -netze sind in Teilbereichen bereits ganzheitlich aufgebaut. Zusätzliche Dienstleistungen für Elektrofahrzeuge und Erweiterungen dieser Angebote sind jedoch erforderlich. Auf einige Ergänzungen, die in aktuellen Projekten in Förderprogrammen des Bundes bereits realisiert werden, soll im Folgenden eingegangen werden.

### **3.3.5.1 Schulungen der Werkstätten**

Meisterwerkstätten müssen spezielles Know-how für Elektrofahrzeuge aufbauen, das von Organisationen wie dem TÜV oder der DEKRA mit einem Siegel bestätigt wird.

Dazu werden Schulungskonzepte gemeinsam mit den Hochschulen (Bildungscampus RWTH Aachen) entwickelt mit dem Ergebnis, dass Werkstätten mit diesem breiten Wissen Elektroautos warten und reparieren können. Bereits heute sind in den Werkstattkonzepten Schulungsblöcke für Elektrofahrzeuge enthalten, die zügig erweitert werden. Auch die Vielfalt der Elektromobile muss bei der Ausbildung kritisch betrachtet werden. Bereits heute zeichnet sich ab, dass besonders freie Werkstätten sich u. a. wegen des eigenen Vertriebs von Elektrorollern, die aus China importiert werden, mit Know-how über Stromantriebe versorgen. Während in den Flotten der großen deutschen Automobilhersteller Elektrofahrzeuge noch selten sind, kommen Elektro- und Hybridfahrzeuge aus Fernost häufiger vor. Deren Markenservicenetze in Deutschland haben aber große Lücken, sodass sich der Verbraucher stärker auf die freien Werkstätten konzentriert.

### **3.3.5.2 Besondere Wartungsautomatismen (Diagnosetools)**

Online-Diagnoseplattformen analysieren mit selbst lernender Software die Fehler der verschiedenen Marken und speichern diese in Datenbanken. Sie sollen Werkstätten dabei helfen, die Elektrofahrzeuge aller Marken warten und reparieren zu können. Gerade in der zu erwartenden heterogenen Landschaft der Elektrofahrzeuge sind alle Hersteller daran interessiert, solche freien Datenbanken und Diagnosewerkzeuge zu etablieren.

Die Steuerelemente der Elektrofahrzeuge, die in Abstimmung mit den aktuellen Entwicklungen bei den Diagnoseplattformen gebaut werden, melden auf Wunsch der Besitzer Daten automatisch an diese Analyseelemente, die Servicenutzer werden dann frühzeitig auf notwendige Schritte hingewiesen.

### **3.3.5.3 Besondere Serviceleistung**

Wie bereits auf dem konventionellen Markt im Angebot können auch einige Elektroautos der aktuellen Modellregionen für Elektrofahrzeuge in NRW bspw. über Easy Auto Service gewartet werden. Easy Auto Service ist ein Dienstleistungsunternehmen, das Fahrzeugnutzern anbietet, den Wagen am Wunschort abzuholen, zu warten und an einen Wunschort (gewaschen und mit Innenraumreinigung) zurückzuliefern. Bei diesem Service entfallen Leihauto und der Weg zur Werkstatt. Im Vorfeld können online verbindliche Kostenvoranschläge eingeholt werden. Aufgrund der Verknüpfung von Diagnoseplattformen kann diese Servicekette auch komplett genutzt werden. Die Steuerelemente im Auto melden Daten an die Diagnoseplattform. Die Analysesoftware stellt nach Wartungsplänen oder Fehlercodes die notwendigen Arbeiten fest und schlägt dem Fahrer vor, einen Kostenvoranschlag über Easy Auto Service einzuholen. Mit dem Kostenvoranschlag ist im zweiten Schritt eine Abstimmung von Wunschterminen möglich. Neben der Online-Anfrage von Serviceleistungen stehen Kfz-Mechaniker telefonisch zur Verfügung, die den Fahrzeughalter unterstützen. Die Auswahl einer Werkstatt, die zur Wartung von Elektrofahrzeugen zertifiziert ist, erfolgt dann über einen Dienstleister im Servicenetz für Elektrofahrzeuge.

#### **3.3.5.4 E-ITK-Strukturen**

Kunden, die einen hohen Automatismus wünschen, erwarten eine Kombination technischer Hilfsmittel. So wie intelligente Informations- und Telekommunikationstechnologien (ITK) im Haus Alarmanlagen überwachen und die Heizkosten optimieren, können auch die Steuergeräte des Elektrofahrzeugs gemeinsam mit dem im Fahrzeug integrierten Handheld-Gerät kommunizieren. Über diese Integration wird ein bestehendes Servicenetz angesprochen, Dienstleistungen können abgerufen und terminiert werden. Diese Kopplung führt zu optimaler Zeitersparnis. Ähnlich wie bei Waschmaschinen, die den Start der Wäsche auf kostengünstige Zeiten legen, wird das Auto Werkstattkapazitäten aus Kontingenten abrufen, die möglichst preiswert sind.

#### **3.3.5.5 Besondere Elektrofahrzeug-Finanzierungen**

Es ist grundsätzlich denkbar, dass Stromkonzerne in das Geschäft mit Elektroautos einsteigen, weil hier für ein aktuelles Produkt ein weiterer Vertriebskanal eröffnet wird. Das Elektroauto könnte – vergleichbar einem Handyvertrag – in Form eines zeitlich begrenzten Mietvertrags dem Kunden überlassen werden. Während das Auto nach Vertragsablauf dem Kunden gehört, wird die Batterie (wie die SIM-Karte) wieder an den Hersteller zurückgegeben. Man kann eine neue Batterie mit neuen Leistungskennzahlen erwerben und kauft diese bspw. gemeinsam mit einem Stromvertrag als Energiepaket ein. Solche Finanzierungsmöglichkeiten machen den Produktpreis attraktiv, indem sie Einmalproduktkosten über die Zeit strecken und mit anderen Produkten gekoppelt finanziert werden. Welche Formen der Finanzierung tatsächlich auf den Markt kommen, ist momentan nicht abschätzbar, da seitens der Politik vielfältige Subventionsvarianten dieses Produktes in der Diskussion sind.

#### **3.3.5.6 Service Ergänzungsprodukte**

Um ein Produkt dauerhaft attraktiv zu machen, werden für Elektroautos zukünftiger Generationen Shops entstehen, die das Aussehen und die Funktionen des Autos durch Zusatzartikel und Zusatzsoftware ständig erweiterbar und innovativer machen. Durch einen solchen Service wird ein Besitzer in die Lage versetzt, sein Produkt den aktuellen Ansprüchen und Wünschen anzupassen. Auf der Vertriebsseite werden neue Artikel in den Absatzkanal gesteuert, die den Umsatz nach der Anfangsinvestition stabiler halten. Wo solche Shops integriert werden, wird aktuell diskutiert. Eine Verbreitung wie bei Handyshops mit Niederlassungen in allen größeren Einkaufszentren ist denkbar. In den freien Werkstätten des aktuellen Automarktes sind ergänzende Produkte zum Tuning oder zur Pflege der Fahrzeuge bereits etabliert, auch große Discounter haben diesen Markt bereits erfasst. Hier kommt dem freien Markt zugute, dass Beschaffungskanäle sehr breit und flexibel aufgestellt sind und große Markenvielfalt herrscht.

#### **3.3.5.7 Service Umweltressourcenmanagement**

Im Bereich des Elektroautos wird es eine Vielzahl von Applikationen geben, die es dem Nutzer des Fahrzeugs gemeinsam mit dem Handheld oder Table-PC ermöglichen,

eine für sich optimale Energiebilanz, abgestimmt auf persönliche Wünsche, zu erhalten. Welche Stromanbieter bieten Strompakete an, die die Umwelt am meisten schonen und alle Energiebedarfe rund um das Leben integrieren (Strom-Flats frei wählbar)? Wie bewegt sich der Nutzer wann fort, um seine Termine mit optimalem Ressourcenverbrauch bewältigen zu können (öffentliche Verkehrsmittel und Individualverkehr werden miteinander gekoppelt)? Wie werden aktuelle Informationen mit dem Mobilitätsverhalten des Nutzers abgestimmt und so ein optimaler Einsatz seiner Ressourcen (Zeit und Energie) möglich? Je unabhängiger ein Servicenetz des Trägerproduktes ist, desto freier wird es Services anbieten, die einen ausgewogenen Einsatz verschiedener Transportmittel unterschiedlicher Marken mit dem Ziel der Ressourcenschonung forcieren.

### 3.3.6 Fazit

Bestehende Servicekonzepte für Autonutzer (Werkstattssysteme) bilden bereits Servicenetze, die den Nutzungslebenszyklus eines Automobils und seines Besitzers ganzheitlich betreuen. Für Elektroautos können eher solche Servicenetze herangezogen werden, die bereits heute nicht nur eine Automarke bedienen, sondern schon auf die Markenvielfalt eingestellt sind. Diese Vielfalt ist bei Elektroautos wegen der Marktanteile aus Fernost deutlich ausgeprägt. Außerdem müssen gezielt ergänzende Servicekomponenten in die bestehenden Servicenetze integriert werden, um Elektroautos erfolgreich in einer Mobilitätsnische platzieren zu können.

---

## Literatur

- Baum H et al (2010) Nutzen-Kosten-Analyse der Elektromobilität. *Z Verk* 3:153–196
- BBE Unternehmensberatung (2006) Werkstatt-Akzeptanzuntersuchung 2006
- Beckmann K et al (2006) Multimodale Verkehrsmittelnutzer im Alltagsverkehr. *Int Verk* 59:4
- BMU Bundesumweltministerium (2011) Kraftwerke ab 100 MW. [www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/kraftwerkskarte.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/kraftwerkskarte.pdf). Zugegriffen: 30. März 2012
- Dena (Deutsche Energie-Agentur GmbH) (2010) Dena Netzstudie II: Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015–2020 mit Ausblick 2025. [http://www.dena.de/fileadmin/user\\_upload/Download/Dokumente/Studien\\_Umfragen/Endbericht\\_dena-Netzstudie\\_II.PDF](http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Download/Dokumente/Studien_Umfragen/Endbericht_dena-Netzstudie_II.PDF). Zugegriffen: 14. Juli 2012
- Deutsches Mobilitätspanel (2012) <http://mobilitaetspanel.ifv.uni-karlsruhe.de>. Zugegriffen: 13. Juli 2012
- Duden (2007) Das große Fremdwörterbuch. Herkunft und Bedeutung der Fremdwörter. 4. aktualisierte Aufl. Dudenverlag, Mannheim
- EG (2002) Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm
- EG (2008) Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa

- Entso-e (2012) Europäische Verbundnetze. [http://de.m.wikipedia.org7w/index.php?title=Datei:ElectricityUCTE.svg&filetimestamp=20120114232945#section\\_1](http://de.m.wikipedia.org7w/index.php?title=Datei:ElectricityUCTE.svg&filetimestamp=20120114232945#section_1). Zugegriffen: 30. März 2012
- EWI (Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln) (2010) Potenziale der Elektromobilität bis 2050 – Eine szenarienbasierte Analyse der Wirtschaftlichkeit, Umweltauswirkungen und Systemintegration
- Falk B (2002) Standortentscheidungen für Großeinrichtungen des Handels und der Freizeit. Schriftenreihe Stadt Region Land des Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr der RWTH Aachen, Heft 73
- Fojcik T (2010) CAMA-Studie – Elektromobilität 2010 – Wahrnehmung, Kaufpräferenzen und Preisbereitschaft potenzieller E-Fahrzeug-Kunden. Lehrstuhl für ABWL & Internationales Automobilmanagement, Universität Duisburg-Essen
- Held M et al (2010) Postfossile Mobilität, Wegweiser für die Zeit nach dem Peak-Oil. VAS Verlag für Akademische Schriften, Bad Homburg
- INKAR (2010) Indikatoren und Karten zur Raum- und Stadtentwicklung in Deutschland und in Europa. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
- IWES (2010) Marktübersicht Kommunikation/Steuerung. Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES (Hrsg), Kassel, Oldenburg
- Johanning K, Vallée D (2011) Nutzungspotenziale und Infrastrukturbedarf für Elektro-Pkw. Internationales Verkehrswesen Heft 4/2011, Deutscher Verkehrsverlag
- KiD (2002) Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland – KiD 2002, Kontinuierliche Befragung des Wirtschaftsverkehrs in unterschiedlichen Siedlungsräumen. Phasen 1 (Methodenstudie) und 2 (Hauptstudie). Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen – BMVBW (Hrsg)
- Knoll M, Marwede M (2010) Dossier Elektromobilität und Dienstleistungen. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Berlin
- MiD (2008) Mobilität in Deutschland 2008. Ergebnisbericht. In: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (Hrsg), Infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Bonn, Berlin
- MOTOO (2012) Konzepthandbuch. In: Bartsch M (Hrsg) Hans Hess Autoteile GmbH
- NPE (2011) Nationale Plattform Elektromobilität (NPE). Zweiter Zwischenbericht der nationalen Plattform Elektromobilität, Berlin
- ISB (2011) Abschlussbericht zum Verbundvorhaben „Machbarkeitsanalyse Elektromobiles Oberzentrum und ländliche Region“, Förderkennzeichen 03KP563E (Querschnitt), Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr der RWTH Aachen, Nov 2011
- Sandberg U, Eismont JA (2005) Tyre/Road Noise Reference Book. INFORMEX, Kisa
- Schwab AJ (2009) Elektroenergiesysteme, 2. Aufl. Springer, Berlin
- Springer Fachmedien München GmbH (2011) (Hrsg) Sonderheft Werkstattssysteme 2011
- Topp HH (2010) Elektro-Mobilität – Auch auf dem Land? Straße Autob 8:566–570
- Tully CJ, Baier D (2006) Mobiler Alltag: Mobilität zwischen Option und Zwang: Vom Zusammenspiel biographischer Motive und sozialer Vorgaben. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden
- Umweltbundesamt (2010) Emissionen des Verkehrs. <http://www.umweltbundesamt-umweltdeutschland.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=3577>. Zugegriffen: 19. Aug 2011
- Umweltbundesamt, Wende H et al (2004) Lärmwirkungen von Straßenverkehrsgeräuschen – Auswirkungen eines lärmarmen Fahrbahnbelages
- Vallée D (2011) Bus oder Bahn – Konzepte und Chancen zur Lösung urbaner Verkehrsprobleme. ZEVrail, Heft 135: 6–7 Juni–Juli
- Varesi A (2009) Kurz- und mittelfristige Erschließung des Marktes für Elektroautomobile Deutschland – EU. Technomar GmbH, TÜV SÜD, Energie & Management Verlagsgesellschaft
- VDE (2008) EN 50160 Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen. VDE Verlag, Berlin

- VDI-Nachrichten 48/2010: Verein Deutscher Ingenieure (VDI). VDI Verlag GmbH, Düsseldorf
- ViZ (2009) Verkehr in Zahlen 2009/2010. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (Hrsg), Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW). DVV Media-Group, Hamburg
- Vogel Business Media (2011) DAT-Report 2011
- Wissenschaftlicher Beirat (2011) Möglichkeiten zur Erhöhung der Straßenverkehrssicherheit in Deutschland. Zeitschrift für Verkehrswissenschaft Heft 1, Verkehrsverlag Fischer, Düsseldorf
- Zumkeller et al (2011) Kurzbericht zu den Erhebungswellen der Alltagsmobilität (2007 bis 2009) sowie zu Fahrleistungen und Treibstoffverbräuchen. Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe

---

# Geschäftsmodelle entlang der elektromobilen Wertschöpfungskette

# 4

Garnet Kasperk und Ralf Drauz

---

## 4.1 Gezeitenwende in der Automobilindustrie

Mit der Umstellung auf elektrische Antriebsformen ändert sich die Wertschöpfungskette. Das Marktvolumen für automobiler Antriebsformen wird für das Jahr 2030 auf etwa 460 Mrd. Euro geschätzt. Dieses Volumen wäre mit Beschäftigungseffekten von 420.000 zusätzlichen Arbeitsplätzen verbunden (McKinsey 2011). Die Volumensteigerung ist einerseits die Folge des Nachfragewachstums in Schwellenländern wie China und Indien. Hier werden mehr als die Hälfte der zusätzlichen Arbeitskräfte benötigt. Andererseits resultiert sie aus der Elektrifizierung des Antriebsstrangs, die im Mittelpunkt des disruptiven Veränderungsprozesses steht und Teil eines umfassenderen Mobilitätsverständnisses ist.

Mit der Neuordnung der Wertschöpfungskette müssen etablierte Akteure der automobilen Wertschöpfung, insbesondere Automobilproduzenten und große Zulieferer, bereits heute Entscheidungen über eine Re-Positionierung ihrer Aktivitäten treffen. Derzeit entstehen schnell neue Märkte mit neuen Akteuren und Geschäftsformen. Aus Sicht der Kunden gibt es Angebotsmärkte für Fahrzeuge, Batteriesysteme und Stromversorgung. Aus Sicht der Anbieter werden ehemals starr miteinander verbundene Wertschöpfungsanteile dekonstruiert und zu neuen Geschäftsmodellen angeordnet (Müller-Stewens und Lechner 2003). Neue Fahrzeugkomponenten werden ebenso benötigt wie neue Infrastrukturen und Dienstleistungen. Diese Neuordnung eröffnet große Potenziale für etablierte Akteure wie Automobilhersteller und -zulieferer,

---

G. Kasperk (✉) · R. Drauz (✉)

Center for International Automobile Management, RWTH Aachen University,  
Templergraben 64, 52056 Aachen, Deutschland  
e-mail: garnet.kasperk@rwth-aachen.de

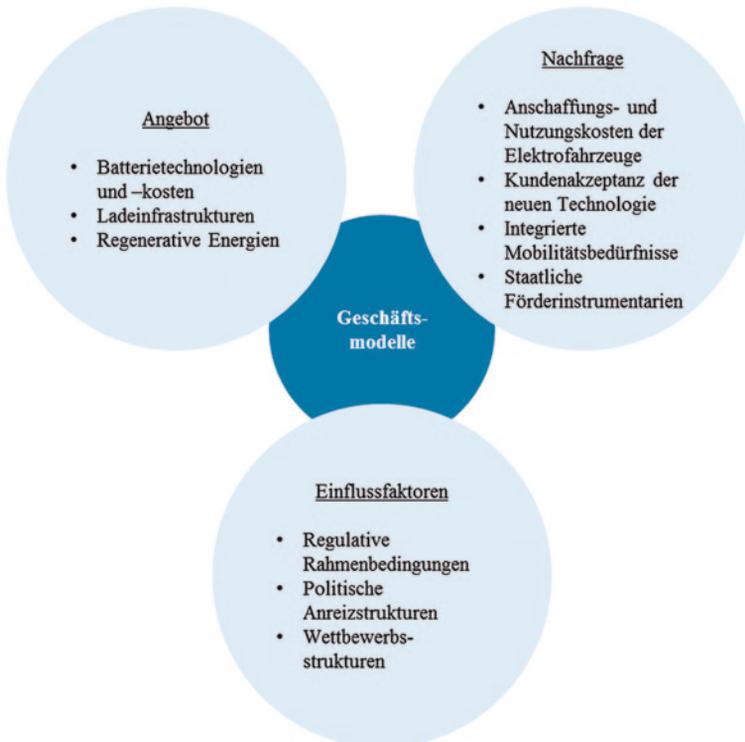
R. Drauz

e-mail: ralf.drauz@rwth-aachen.de

für Energieversorgungsunternehmen, aber auch für innovative Unternehmen anderer Industriezweige. Neue Geschäftsmodelle werden darüber entscheiden, welche Anteile der Wertschöpfungskette Unternehmen oder Unternehmenskooperationen für sich gewinnen können. Die Transformationsgeschwindigkeit der Wertschöpfungskette und die Prognose zukünftiger Gewinnpotenziale der Wertschöpfungsaktivitäten sind aber mit Risiken behaftet. Diese resultieren aus den regulativen Rahmenbedingungen (insbesondere CO<sub>2</sub>-Restriktionen), der Geschwindigkeit technologisch notwendiger Entwicklungen (insbesondere der Batterietechnologie), den Infrastrukturerfordernissen und dem Nachfrageverhalten.

Die Ausprägung der in Abb. 4.1 dargestellten Einflusskategorien auf Geschäftsmodelle ist in jedem Land anders, demzufolge auch die Prognosen für den Absatz der verschiedenen Antriebstechnologien. Die Ausbildung von automobilen Wertschöpfungsnetzwerken wird mittel- bis langfristig auch im Markt für Elektromobilität zu einer länder- oder regionenspezifischen Arbeitsteilung führen.

Elektromobilität stellt aufgrund der technologischen Einfachheit und ausreichenden Verfügbarkeit der Energiequelle Elektrizität für Regierungen und



**Abb. 4.1** Herausforderungen der Elektromobilität. *Quelle* Eigene Darstellung

Automobilproduzenten derzeit die attraktivste Lösung dar, den Anforderungen globaler Klimaziele, dem Unabhängigkeitsstreben von fossilen Energiequellen wie Öl und neuen Mobilitätsbedürfnissen in urbanen Zentren gerecht zu werden. Die meisten Elektrofahrzeuge, die heute und in naher Zukunft vermarktet werden, sind elektrifizierte Abwandlungen eines auf den Verbrennungsmotor ausgerichteten Antriebskonzeptes. Erst langfristig werden reine Elektrofahrzeuge eine Alternative im Hinblick auf technische und finanzielle Entscheidungsgrößen darstellen. Diese Entwicklung hängt im Wesentlichen von der Geschwindigkeit ab, mit der leistungsfähige Akkumulatoren entwickelt werden.

Im Folgenden werden die wichtigsten Marktentwicklungen und Einflussfaktoren im Bereich der Elektromobilität vorgestellt. Die Ausführungen orientieren sich an den in Abb. 4.1 dargestellten Herausforderungen der Elektromobilität in den Bereichen Angebot, Nachfrage und Einflussfaktoren.

## 4.1.1 Einflussfaktoren auf die Marktentwicklung

### 4.1.1.1 Batterietechnologie und Fahrzeugpreise

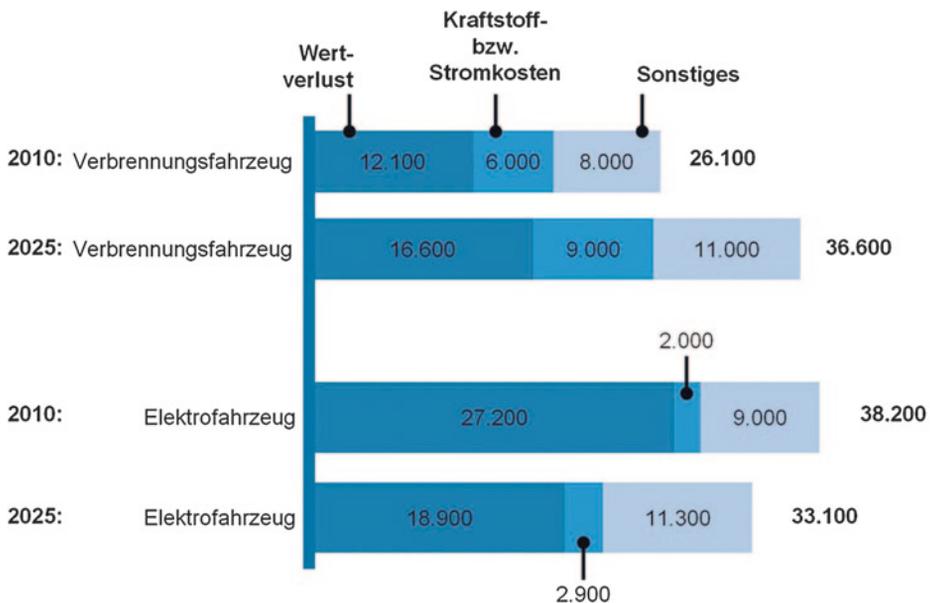
Entscheidend für die Elektrifizierung des automobilen Antriebsstrangs ist der Traktionselektromotor bzw. die Traktionsbatterie. Ihre Speicherkapazität und Ladedauer bestimmen das Nutzungskonzept, ihre Energiedichte und geometrisches Ausmaß das Design und Fahrzeugkonzept und ihre hohen Material- und Fertigungskosten den Preis (bzw. das Geschäftsmodell). Als Energiespeicher für Elektrofahrzeuge kommt kurz- und mittelfristig nur die Lithium-Ionen-Batterie infrage, da diese über ein kleines Volumen, eine kleine Masse und ein großes Arbeitsspektrum verfügt (VDA 2008). Bis heute konzentriert sich der Einsatz von Li-Ionen-Technologie auf die Unterhaltungs- und Industrieelektronik. Etwa 90 % der Marktanteile entfallen auf Unternehmen aus Asien: Japan (ca. 58 %), Korea (ca. 18 %) und China (ca. 12 %). Da japanische Hersteller ihre Fertigung zunehmend nach China verlagern und chinesische Anbieter wie BYD schnell aufholen, wächst der chinesische Marktanteil insbesondere für die Unterhaltungselektronik schnell. Für Hybridanwendungen werden mobile Hochleistungsbatterien auf der Basis der Li-Ionen-Technologie benötigt. Das Rennen um Marktanteile für diese Li-Ionen-Technologie hat begonnen. Beispiele sind Kleinserien mit Hochleistungszellen der Firma Hitachi (Fuso-Canter) und der Firma Johnson Controls Saft (Mercedes-Benz S-Klasse und BMW 7er). Unternehmen wie Sanyo (Japan), Samsung/Bosch (Korea/Deutschland) und SKEnergy (Korea) stehen kurz vor dem Markteintritt.

Verschiedene Batteriesysteme sind schon im Einsatz. Ein 450 kg schweres Batteriesystem im Tesla Roadster mit einer Energiedichte von 120 Wh/kg ermöglicht bei moderater Fahrweise eine maximale Reichweite von 350 km. Das Fahrzeug ist für den Preis von 100.000 Euro allerdings ein reines Luxusfahrzeug. Die Kosten der Batterie sind entscheidend für den Preis von Elektrofahrzeugen. Sie liegen derzeit zwischen 500 und 1.000 Euro pro kWh. Eine Batterie, die eine Reichweite von 100–180 km ermöglicht,

kostet etwa 10.000 Euro. Die Optimierung der Lithium-Ionen-Batterie ist darauf ausgerichtet, den Zellpreis auf 250–500 Euro je Kilowattstunde zu senken (bei 100.000 verkauften Einheiten pro Jahr) (VDA 2008). Nach einer Studie von Roland Berger ist bis zum Jahr 2020 sogar ein Preis von 200 Euro/kWh realistisch. Eine 150 kg schwere Batterie (Lithium-Ionen) mit 27 kWh (Reichweite ca. 250 km) würde dann etwa 6.000 Euro kosten.

Für die nächsten Jahre wird die Preisdifferenz bei den Lebenszykluskosten zwischen einem Auto mit klassischem Verbrennungsmotor und einem Elektrofahrzeug somit im Wesentlichen von dem Preis zwischen Treibstoff und Kosten der Batterie und seiner Neuaufladung bestimmt (bei Eigentum einer Batterie). Hinzu kommen Variablen des Nutzungsverhaltens, insbesondere der Nutzungsdauer und der Nutzungshäufigkeit. Bis zur Weiterentwicklung der Batterietechnologie sind hybride Antriebsformen marktfähiger, da sie geringere Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Akkumulatoren stellen.

McKinsey kalkulierte im Jahr 2009 für ein Plug-in-Hybridfahrzeug mit 40 Meilen Reichweite einen Preisaufschlag von mehr als 8.000 Euro; für ein rein batteriebetriebenes Fahrzeug mit 100 Meilen Reichweite würden sogar knapp 17.000 Euro mehr verlangt (McKinsey 2009). Die deutsche Unternehmensberatung Wyman prognostiziert für das Jahr 2015 bei einer Nutzungsdauer von vier Jahren und einer Fahrleistung von 15.000 km pro Jahr für batteriebetriebene Fahrzeuge einen Mehrpreis von knapp 18.000 Euro. Werden allerdings die Lebenszykluskosten berücksichtigt, reduziert sich zu diesem Zeitpunkt der Unterschied zu einem Fahrzeug mit konventioneller Antriebstechnologie auf 10.800 Euro (Wyman 2010) (Abb. 4.2).



**Abb. 4.2** Lebenszykluskosten von Verbrennungs- und Elektrofahrzeugen im Vergleich (in Anlehnung an Wyman 2010)

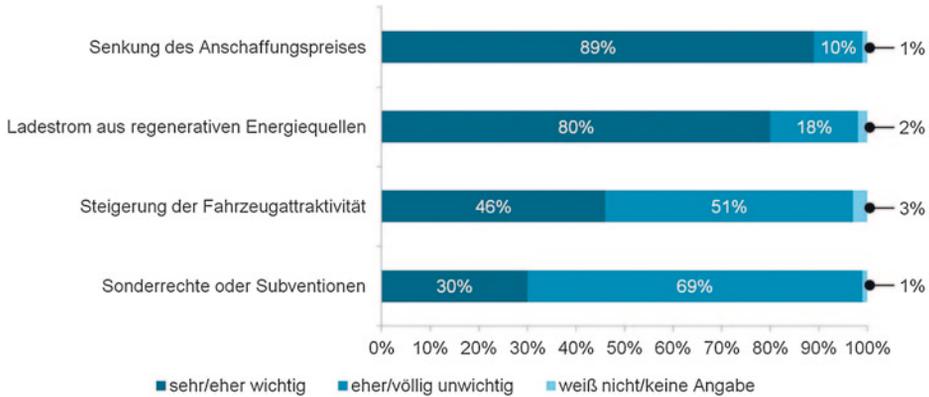
Die initialen Mehrkosten des Elektroautos lassen sich für den Kunden nur anhand der Gesamtkosten relativieren, die von Nutzungsdauer und Laufleistung bestimmt sind. Ein weiteres Mittel dieser Relativierung ist die Entwicklung innovativer Abrechnungsmechanismen. Flottenkonzepte, die sich durch eine überdurchschnittlich hohe Laufleistung der einzelnen Fahrzeuge auszeichnen, senken den Gesamtkostennachteil in Bezug auf klassische Verbrennungsantriebe. In urbanen Ballungszentren und innerhalb von Organisationen mit großem Fuhrpark kann die Substitution von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor durch Elektrofahrzeuge als Chance genutzt werden, den Nutzer mit der neuen Technologie vertraut zu machen, ohne sie mit hohen Anschaffungskosten zu belasten.

#### 4.1.1.2 Nachfrage

Unternehmen müssen ihre Geschäftsmodelle für Elektromobilität an einer genauen Definition der Markt- und Kundensegmente orientieren. Flottenbetriebe im privatwirtschaftlichen (Autovermietungen, Post, Wohnungsgemeinschaften) und öffentlichen Bereich können in naher Zukunft die Vorteile von Elektrofahrzeugen in Bezug auf die genannten Charakteristika nutzen. Für Privatkunden sind einerseits innovative Mobilitätsangebote, andererseits eine Emotionalisierung für das Produkt Elektrofahrzeug nötig. „Early adopters“ in Großstädten wie New York und Paris sind bereit, als Pioniere von batterie-betriebenen Fahrzeugen Einschränkungen bei ihrer Mobilität in Kauf zu nehmen. Eine erste Begegnung mit der neuen Technologie führt aufgrund der Umweltfreundlichkeit (Emissionen und Geräusche) oft zu Begeisterung. Das niedrige Drehmoment von Elektromotoren erlaubt zudem eine schnellere und ruhigere Beschleunigung und könnte für Käufer ein Erlebniswert und damit Vorteil sein. Gerade im Stadtverkehr sind Zeiteinsparungen bei Kurzstrecken realisierbar.

Autofahrer in Deutschland sind in ihrem Mobilitätsverhalten eher konservativ. Der Pkw in ihrem Besitz entspricht ihren Mobilitätsanforderungen und spiegelt die individuelle Kostengrenze für diese Mobilität wider (vgl. Kap. 3.1). Zwar wird der Technologie in Zukunft eine wichtige Rolle beigemessen, insbesondere in Bezug auf Ressourcenknappheit und Umweltschutz, jedoch reichen die aktuellen Leistungsdaten (wie etwa Reichweite, Ladedauer und Preis) aus Sicht potenzieller Käufer nicht aus, um vom Kauf eines Elektromobilmfahrzeugs zu überzeugen (PWC 2010). Für viele Nutzer wird aufgrund der skizzierten Vorteile das Plug-in-Hybridfahrzeug eine relevante Übergangstechnologie sein (Abb. 4.3).

In großen Schwellenländern wie China und Indien ist die Situation der potenziellen Käuferschaft eine andere. In China sind bereits 140 Mio. zweirädrige Elektromobile auf dem Markt und die Nutzer sind mit der Handhabung der Batterie (Reichweite und Ladedauer) vertraut. Das verfügbare Pro-Kopf-Einkommen in städtischen Zentren hat ein Niveau von etwa 1.850 Euro (2009) erreicht und wächst weiter an. Deshalb kann der Ersatz des bisher etablierten Scooterverkehrs durch Elektroautos nahe liegend sein. Wer bisher kein Fahrzeug besaß, der kann mit einer Reichweite eines Elektrofahrzeugs von 100 km seinen Mobilitätsradius deutlich verbessern. Grundvoraussetzung für einen Kauf ist in diesen Ländern ein niedriges Preisniveau, das bisher nur mit Subventionierung des



**Abb. 4.3** Voraussetzungen für den Kauf eines Elektroautos (in Anlehnung an PWC 2010)

**Tab. 4.1** Förderinstrumentarium der Elektromobilität (Eigene Darstellung in Anlehnung an PWC 2010)

Förderinstrumente	Beispiele
Zuwendungen/Zuschüsse	Forschung & Entwicklung; Aufbau von Kompetenznetzwerken; Entwicklung von Produktionstechnologien; Verkehrsfor-schung, Feld- und Flottenversuche
	Marktvorbereitung: Modellregionen, Testzentren, Pilotanlagen und -projekte
	Kaufzuschüsse
Kapitalbereitstellung	Zinsvorteile bei Kreditvergabe Haftungsfreistellungen Flexible Laufzeiten
Steuerprivilegien	Vergünstigungen bei der CO <sub>2</sub> -Steuer Umsatzsteuerbefreiung
Nutzungsprivilegien	Kostenlose Parkplätze Nutzung von Busspuren
Beschaffung	Flottenbeschaffung durch Gebietskörperschaften und öffentliche Unternehmen

Kaufpreises erzielbar ist. Diese wird von der chinesischen Regierung auch geleistet, denn explizites Ziel ist es, ein weltweit führender Anbieter von Elektrofahrzeugen zu werden.

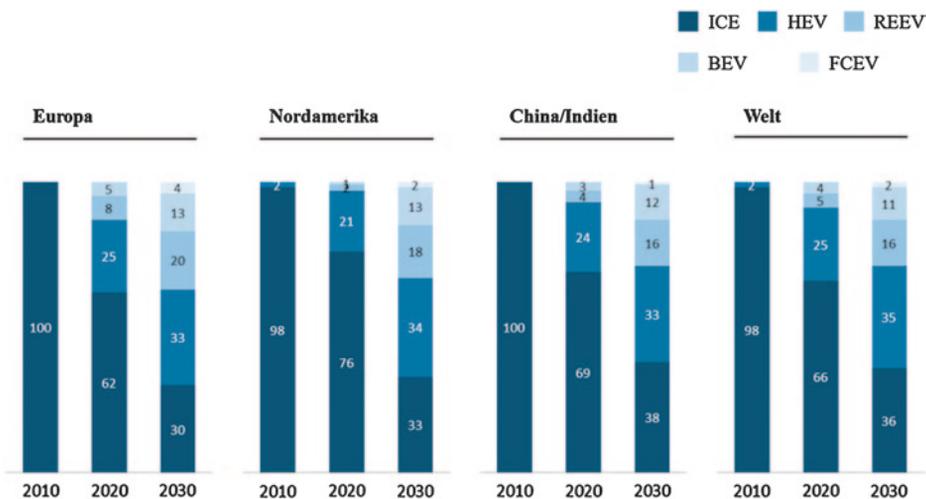
#### 4.1.1.3 Staatliche Fördermechanismen

Kurz- und mittelfristig können staatliche Subventionen helfen, sowohl die Preisdifferenz zwischen alten und neuen Antriebstechnologien zu verringern als auch den nötigen Infrastrukturaufbau zu beschleunigen. Eine Reihe von Förderinstrumenten zur Einführung und Verbreitung von Elektrofahrzeugen steht zur Verfügung, allerdings wird ihr Einsatz kontrovers diskutiert (Tab. 4.1).

Anreizstrukturen für ein politisch erwünschtes Nachfrageverhalten können allerdings ohne nachhaltige Wirkung bleiben, wenn grundlegende Strukturen fehlen oder eine ökonomische Rationalisierung nicht erreicht werden kann. Als nachhaltig werden solche Investitionen der öffentlichen Hand bewertet, die den Aufbau von Kompetenzen und den technologischen Fortschritt zum Ziel haben (Zuwendungen/Zuschüsse). Von der deutschen Bundesregierung werden bspw. mit einem Volumen von 500 Mio. Euro acht Modellregionen gefördert. Hier werden unterschiedliche Akteure der Elektromobilität im Rahmen von Pilotprojekten zusammengeführt. Sie profitieren von gemeinsamen Forschungen und Erfahrungswerten (vgl. Kap. 3.3.7). Steuervorteile werden in fast allen Ländern gewährt, die sich im Bereich Elektromobilität positionieren möchten. Sehr unterschiedlich wird die direkte finanzielle Förderung des Kaufs eines Elektroautos gehandhabt. Norwegen und Japan sind derzeit führend mit einer Unterstützung von bis zu 17.000 bzw. 11.000 Euro, gefolgt von China (ca. 6.500 Euro) und Frankreich (5.000 Euro) (PWC 2010).

#### 4.1.2 Absatzprognosen für Elektrofahrzeuge

Weltweit wird für das Jahr 2020 der Anteil reiner Elektrofahrzeuge am Gesamtfahrzeugmarkt bei 3–6 % gesehen (PWC 2010). In Deutschland gehen optimistische Schätzungen von 2 Mio. Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 aus. Dies entspräche 0,4 % des gesamten Fahrzeugbestands (50 Mio.). Zu diesem Zeitpunkt könnte bereits ein Drittel weltweit verkaufter Fahrzeuge mit alternativen Antriebsformen ausgestattet sein, bis zum Jahr 2030 sogar zwei Drittel (McKinsey 2011) (Abb. 4.4).



**Abb. 4.4** Fahrzeugabsatz 2025 nach Antriebstechnologie und Region (in Anlehnung an McKinsey 2011)

Unstrittig ist, dass hybride Antriebsformen marktfähig werden. Dabei bestimmen die regulativen Anforderungen die CO<sub>2</sub>-Reduktion zumindest in Europa und den USA, in welchem Maß sich die unterschiedlichen innovativen Antriebsformen am Markt etablieren können. Abseits aller Prognosen scheint ein langfristiger Bedeutungsverlust des klassischen Verbrennungsmotors sicher zu sein.

Automobilproduzenten sind gefordert, ein intelligentes Portfolio der verschiedenen Antriebsarten zu entwickeln und anzubieten. Dieses Portfolio sollte sich möglichst flexibel an die schwer vorhersehbaren externen Rahmenbedingungen anpassen können. Ebenso sollte die Wertschöpfungskette transnational konfiguriert sein, um die unterschiedlichen Wachstumschancen der verschiedenen Antriebstechnologien zu nutzen.

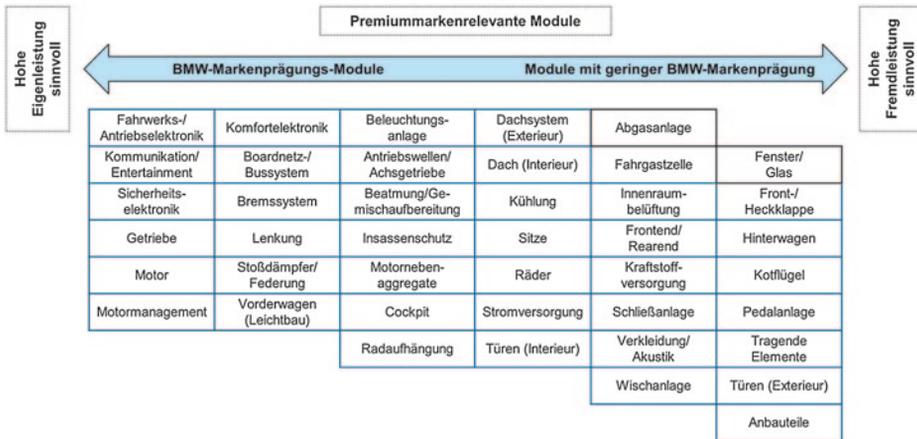
---

## **4.2 Herausforderungen für Akteure entlang der Wertschöpfungskette**

Ein Großteil der automobilen Wertschöpfung lag bisher bei Automobilproduzenten und -zulieferern. Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs wird die Wertschöpfungsanteile aus diesem Zentrum in vor- und nachgelagerte Wertschöpfungsstufen verschieben. Die Restrukturierung der Wertschöpfungskette geht damit über die Veränderung wesentlicher Komponenten weit hinaus. Es wird sich langfristig eine völlig neue Industriestruktur ergeben. Allerdings ist die Bedeutung der einzelnen Akteure noch offen. Ein in zahlreichen Studien entwickeltes Szenario basiert zudem auf einem völlig neuen Rollenverständnis von Energieversorgungsunternehmen (Deloitte 2009; Wyman 2010; PWC 2010). Ihnen eröffnen sich nicht nur direkte Gewinnmöglichkeiten über wachsenden Stromabsatz, sondern auch der Markteintritt in völlig neue Geschäftsfelder. In Folge sowohl der technologischen Koordinationsanforderungen an Elektrofahrzeuge als auch der sich wandelnden Mobilitätsbedürfnisse können sich zudem bisher branchenfremde Marktteilnehmer in der elektromobilen Wertschöpfungskette positionieren. Langfristig ist es sogar möglich, dass sich diese neuen Spieler trotz hoher Markteintrittsbarrieren in den Vordergrund drängen.

### **4.2.1 Herausforderungen für Automobilhersteller und -zulieferer**

Die Veränderung der Wertschöpfungsstrukturen im Upstream-Bereich ist produkttechnologisch getrieben und verändert das zukünftig benötigte Kompetenzspektrum von Automobilproduzenten und Zulieferern. Im Mittelpunkt der Veränderungen stehen der elektrifizierte Antriebsstrang und die entsprechende Anpassung von Komponenten und Fahrzeuganforderungen. Ein Kernstück der markenprägenden



**Abb. 4.5** Markenprägende und nicht-markenprägende Module am Beispiel von BMW (in Anlehnung an Becker 2006)

Module von Automobilproduzenten – der Verbrennungsmotor – wird langfristig ersetzt durch den Elektromotor (s. Abb. 4.5).

Damit nimmt in den nächsten Jahren der Bedarf an wesentlichen Komponenten, deren Produktionskompetenz bisher bei Automobilproduzenten lag, ab. Neben dem Verbrennungsmotor werden das Getriebe und eine Vielzahl von verbundenen Bauteilen als Kernelemente der Markenprägung an Bedeutung verlieren. Dafür eröffnen sich in den Bereichen Transaktionsbatterie und Elektronik Wachstumschancen, die zur Kompensation der Wertschöpfungsschrumpfung von Automobilproduzenten genutzt werden müssen. Eine Identifikation neuer Kernkompetenzen, die der Markenprägung zugrunde liegen, geht mit der Restrukturierung der Wertschöpfungsaktivitäten einher.

In den letzten Jahren hat eine zunehmende Verlagerung der Wertschöpfung von Automobilproduzenten auf Zulieferer stattgefunden. Derzeit konzentrieren sich in den Wertschöpfungsstufen Antriebsstrang/Komponenten etwa 25–30 % auf Automobilproduzenten. Insbesondere bei den Kernelementen des Verbrennungsmotors, der Transmission und der Steuerung, liegt der Wertschöpfungsanteil höher (PWC 2010 spricht von 63 % Know-how-Anteil beim Verbrennungsmotor). Beim Elektromotor konzentrieren Automobilproduzenten bisher nur einen geringen Anteil der Wertschöpfung auf sich. Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs bedeutet deshalb einen geschätzten Wegfall von etwa 30 % der derzeitigen Wertschöpfung von Automobilproduzenten. Nach Angaben von McKinsey müssten OEM etwa 50 % der Elektromotoren produzieren und im Bereich Batteriesysteme führen, um im Jahr 2030 den gleichen Anteil der Wertschöpfung zu haben (McKinsey 2011). Die Herausforderung besteht für sie darin, die verbleibenden Kernkompetenzen (wie etwa Fahrzeugbau) innovativ an veränderten Bedürfnisstrukturen auszurichten und die Wachstumspotenziale der Elektromobilität

		Europa	Nord-amerika	Japan	China/Indien
ICE	Motor	1	2	-1	7
	Turbolader	-1	16	-2	9
	Einspritzsystem	0	5	1	9
Beide	Bremsen	1	1	-2	6
	Übersetzung	1	3	-1	7
	Temperatur	9	7	6	19
xEV	Batterie	73	35	19	70
	Elektromotor	75	34	18	71
	Elektronik	70	31	15	69

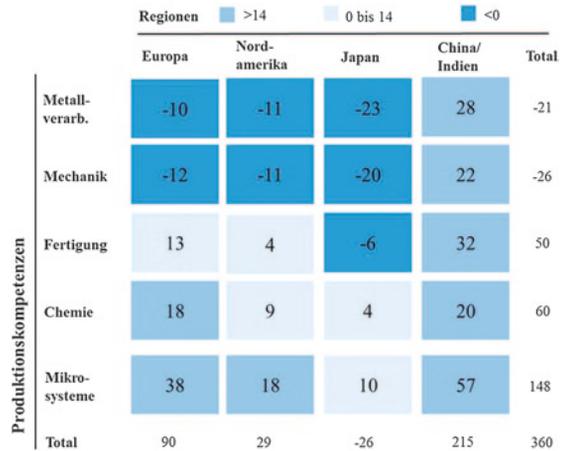
**Abb. 4.6** Regionale Bedarfsentwicklung von Komponenten (in Anlehnung an McKinsey 2011)

durch Erschließung neuer Geschäftsfelder und Kooperationen mit vor- und nachgelagerten Akteuren entlang der Wertschöpfungskette zu nutzen. Dazu ist eine Neuordnung der Wertschöpfungsaktivitäten nötig, bei der Kooperationen und Akquisitionen eine entscheidende Rolle spielen. Zusätzlich müssen die regionalen Wachstumspotenziale berücksichtigt werden, damit die Konfiguration des Wertschöpfungsnetzwerks eine optimale Risikoallokation erlaubt.

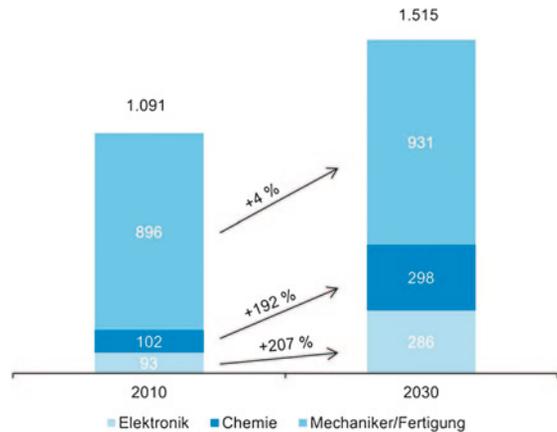
Abbildung 4.6 zeigt, dass der Bedarf an Automobilen mit Verbrennungsmotor und den verbundenen Modulen in Schwellenländern wie China und Indien noch nicht gedeckt ist. Zusätzliche Kapazitäten für die Produktion von Motoren, Turboladern und Einspritzsystemen werden in Asien benötigt. Automobilproduzenten und -zulieferer können dieses Wachstumspotenzial nutzen, um Absatzreduktionen in angestammten Märkten zumindest teilweise zu kompensieren. Darüber hinaus sind die Wachstumspotenziale für Kernelemente von Elektrofahrzeugen wie Batterien, Elektromotoren und elektronische Systeme in Europa, China und Indien herausragend. Volumenmäßig bleibt der Markt für Antriebstechnologien in Europa auch im Jahr 2030 mit einem geschätzten Volumen von etwa 160 Mrd. Euro führend, gefolgt von Nordamerika (ca. 90 Mrd. Euro) und den beiden großen asiatischen Ländern (zusammen knapp 90 Mrd. Euro) (McKinsey 2011). Die Weiterentwicklung innovativer Antriebstechnologien verändert insbesondere für Automobilproduzenten das erforderliche Spektrum an Kernkompetenzen, während Automobilzulieferer ihre Kompetenzen vertiefen können.

Zusätzliche Experten aus dem Bereich Mechanik werden vor allem in den Ländern China und Indien benötigt. Ausgeprägte Forschungs- und Entwicklungsinvestitionen im Bereich des Elektromotors und der Traktionsbatterie ziehen einen hohen Bedarf an Experten der Bereiche Chemie und Elektronik nach sich; Kompetenzen, die nahezu ausschließlich bei Zuliefererunternehmen gebündelt sind. Eine Prognose für das regional verteilte Beschäftigungswachstum in verschiedenen Produktionskompetenzen liefert McKinsey (Abb. 4.7):

**Abb. 4.7** Entwicklung regionaler Kompetenzprofile (in Anlehnung an McKinsey 2011)



**Abb. 4.8** Beschäftigungszuwachs nach Qualifikationen 2010–2030 (in Anlehnung an McKinsey 2011)



In nahezu allen produktionsrelevanten Funktionen wird in den nächsten Jahren ein Beschäftigungswachstum in China und Indien erwartet. Da in diesen Ländern auch der Absatz von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor weiter steigt, werden klassische Kompetenzen der Metallverarbeitung, Mechanik und Produktionstechnik gebraucht. In gesättigten Automarktmärkten und -regionen wie den USA und Europa werden in den metallverarbeitenden Bereichen und der Mechanik Arbeitsplätze entfallen. Dafür entsteht ein Mehrbedarf im Bereich Leichtbau, aber auch in forschungs- und entwicklungsrelevanten Bereichen der Chemie und der Leistungselektronik (Abb. 4.8).

Ausgeprägte Kompetenzen existieren in Deutschland in den Bereichen Elektromotoren, mechanische Bauteile/Getriebe sowie der Leistungselektronik. Für industrielle Anwendungen werden mehr als 5 Mio. Elektromotoren pro Jahr hergestellt. Allerdings liegt der Anteil des für die Elektromobilität relevanten Leistungsbereichs ab

25 kW bei unter 10 % (Nationale Plattform für Elektromobilität 2010a). Langjährige Kooperationsbeziehungen zwischen Wissenschaft und Industrie haben zu einer umfangreichen Kompetenzbasis geführt, die der in Ostasien (insbesondere Japan) ebenbürtig ist. Durch Bündelung ihrer Kompetenzen können Automobilproduzenten und -zulieferer diesen Wachstumsmarkt bedienen. Auch bei der Fertigung mechanischer Bauteile und Getriebe haben deutsche Produzenten eine Führungsrolle, die sich durch hohe Effizienz in der Großserie auszeichnet. Allerdings erfordert die Elektromobilität eine verstärkte mechatronische Integration und eine drastische Verschärfung der Leichtbauanforderungen. Großserienfähige Technologien für hochintegrierte, mechatronische Komplettsysteme stehen nur im Ansatz zur Verfügung. Die Kostenstruktur einer hoch automatisierten Großserienfertigung stellt für die anfänglich geringe Stückzahl der Elektromobilität eine Herausforderung dar. Schon jetzt kooperieren Unternehmen, um in diesem Bereich möglichst schnell höhere Stückzahlen zu erreichen (vgl. Kap. 3.2). Auf dem Gebiet der Leistungselektronik für industrielle Anwendungen ist Deutschland Technologieführer. Die Engineering-Kompetenz zur Entwicklung von Halbleitertechnologien und Architekturen ist ausgeprägt. Automobilzulieferer und auch Unternehmen anderer Branchen haben hier große Chancen, eine wesentliche Rolle im Bereich der Elektromobilität zu spielen (Nationale Plattform für Elektromobilität 2010b).

Besondere Kompetenzen haben Automobilproduzenten und -zulieferer bei der Integration von Systemen, sowohl bei technischen Systemen (hochintegrierte Antriebssysteme, Getriebe-E-Motor-Verbund) als auch bei organisatorischen Systemen. Die Steuerung komplexer Koordinationsbeziehungen mit Zulieferern, Forschungsinstitutionen und Universitäten hat Automobilproduzenten und große Zulieferer befähigt, als fokale Organisationen die Funktion von Netzwerkkoordinatoren wahrzunehmen und organisationsübergreifende Lern- und Innovationsprozesse zu implementieren. Gerade diese Fähigkeiten können im System Elektromobilität einen gewichtigen Wettbewerbsvorteil ausmachen.

Der Markt für Elektrofahrzeuge eröffnet ebenfalls für etablierte Produzenten neue Möglichkeiten. Elektromobile können helfen, die zunehmend restriktiven CO<sub>2</sub>-Richtwerte zu erfüllen. Die deutsche Automobilindustrie muss bspw. allein auf dem europäischen Markt bis zum Jahr 2020 mehr als 110 Mrd. Euro in die Entwicklung und Produktion investieren, um die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte der EU erfüllen zu können.

Um die Wachstumschancen der Elektromobilität nutzen zu können, sind Automobilhersteller gefordert, intelligente Kooperationen mit Zulieferern in Europa, USA und Asien zu initiieren. Neben der Herausforderung, ein flexibles Portfolio verschiedener Antriebsformen zu produzieren und zu entwickeln, müssen sie gleichzeitig den Zugang zum Kunden sichern. Ansätze neuer Mobilitätskonzepte lassen bereits erkennen, dass ein Mobilitätsangebot prinzipiell auch ohne Automobilproduzenten in der ersten Reihe möglich ist. Der langfristige Ersatz markenprägender Kernmodule bedeutet für diese außerdem, neue prägende Kernelemente ihrer Automobilmarke zu identifizieren und zu kommunizieren.

Für Automobilzulieferer der ersten Stufe gelten ähnliche Herausforderungen wie für Automobilproduzenten. Aktuelle Module und Systeme sind an den Erfordernissen klassischer Verbrennungstechnologien ausgerichtet. Das Beispiel des deutschen Zulieferers Bosch zeigt, wie eine Redefinition der Wertschöpfung aussehen kann. Ziel ist es, ein vernetzter, umweltorientierter Konzern mit innovativen Antriebssystemen und Energietechnologien zu sein. Die Vernetzung erfordert eine hohe Kompetenz im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien. Hier sind leistungsstarke Wettbewerber wie Apple, IBM und Microsoft etablierte Marktakteure. Andererseits eröffnet die technologische Simplifizierung des Elektroautos die Möglichkeit, unabhängig von Automobilproduzenten wertschöpfungsübergreifende Leistungen zu definieren und in andere Branchen vorzudringen. Intelligente Kooperationen werden für Automobilproduzenten und für große Zulieferer eine Erfolgsvoraussetzung sein.

Das Wachstumspotenzial im Bereich der Batterietechnologien ist groß. Bei einem Verkauf von 6–8 Mio. Elektrofahrzeugen jährlich könnte mit Batterien ein Umsatz von 60 Mrd. US-Dollar erzielt werden (McKinsey 2009). Hohe Gewinne können mit Batterien erzielt werden, die Kosten und operative Vorteile haben und hohe Sicherheitsanforderungen erfüllen. Batterieproduzenten können sich derzeit noch als Nischenanbieter positionieren. Langfristig werden Batterien genau wie andere Automobilkomponenten zu Massenprodukten. Bis dahin ist es entscheidend, die Amortisationszeit neuer Entwicklungen durch ausreichenden Schutz der Kernkompetenzen zu sichern.

Langfristig wird nicht mehr die Chemie der Batteriezelle, sondern werden Batteriepacks bzw. -systeme und deren effizienter Betrieb durch entsprechende Steuerungssoftware in einem spezifischen Fahrzeug gefragt sein. Diese Entwicklung erfordert vorausschauende Kooperationen mit System- bzw. Modullieferanten, ohne den Verlust der Kernkompetenz zu riskieren.

## 4.2.2 Herausforderungen für Energieversorgungsunternehmen

Der Aufbau von Ladeinfrastrukturen ist die Voraussetzung für die Marktfähigkeit von Elektrofahrzeugen. Da Nutzer von Elektrofahrzeugen nur wenige Einschränkungen ihrer Mobilität akzeptieren, sind Ladestationen an öffentlich zugänglichen Standorten, am Arbeitsplatz und im privaten Bereich erforderlich. Die enge Koordination zwischen Energiedienstleistern, Ladestationen- und Stromnetzbetreibern ist entscheidend. Der erfolgreiche Markteintritt in diesem Wertschöpfungsbereich ist außerdem mit hohen Investitionen verbunden und hängt von einer frühen Positionierung ab. Große Energieversorgungsunternehmen werden durch ihre Kompetenz im Bereich des Netzbetriebs und teilweise auch der Stromverteilung wesentliche Teile dieses Wertschöpfungspotenzials für sich gewinnen können. Zunächst wird die Dominanz bei der Infrastrukturerichtung deshalb bei Energieversorgungsunternehmen liegen. Der zusätzliche Verkauf von Strom für Elektrofahrzeuge amortisiert allerdings nicht die hohen Investitionen



**Abb. 4.9** Wertschöpfung von Infrastrukturanbietern. *Quelle* Eigene Darstellung

in benötigte Infrastrukturen; Energieversorgungsunternehmen müssen deshalb erweiterte Wertschöpfungspotenziale identifizieren (Abb. 4.9). Zusätzlich zu der Bereitstellung und dem Betrieb von Netz- und Ladeinfrastrukturen können sich Energieversorger upstream an der Entwicklung, Produktion und dem Verkauf von Batteriesystemen beteiligen. Downstream kooperieren sie, um Mobilität anbieten zu können.

Eine Vertiefung der Wertschöpfung ist gerade im Bereich der Infrastruktur möglich. Mit der Etablierung intelligenter Stromnetze mit bilateraler Datenkommunikation (sog. „Smart Grids“) steigt bspw. das Interesse am Betrieb der Ladesäulen (vgl. Kap. 3.2). Ein großes Potenzial bietet auch die Stromrückspeisung aus Fahrzeugbatterien ins Netz (Vehicle-to-grid).

Autobatterien können so als bedarfsorientierte Ein- und Ausspeiser genutzt werden, um Spannungsspitzen im Netz auszugleichen. Nach einer Hochrechnung von PWC könnte ein Netzbetreiber so potenziell 20.000 Euro pro Tag einsparen (PWC 2010). Vorerst sind aber eine Reihe von regulativen Voraussetzungen zu schaffen, wie etwa einheitliche Konzessionsabgaben.

Restriktivere politische Regularien in Bezug auf Energieeffizienz, CO<sub>2</sub>-Ausstoß und Sicherheitsstandards bei gleichzeitig steigendem Wettbewerb führen zu sinkenden Margen bei Energieversorgungsunternehmen. Aufgrund des forcierten Einsatzes regenerativer Energieträger im Zusammenhang mit Elektromobilität und der notwendigen Investitionen in Netzerweiterungen steigen auch die Kosten pro kWh. Der Markt für Elektromobilität eröffnet völlig neue Chancen für eine Redefinition des Portfolios, d. h. der Wertschöpfungsarchitektur von Energieversorgungsunternehmen. Zusätzlich haben sie mit einer Positionierung im Elektromobilmarkt die Gelegenheit, sich als Unternehmen der nachhaltigen Energiewirtschaft zu positionieren, was eine positive Außenwirkung gegenüber dem Endkunden bedeutet.

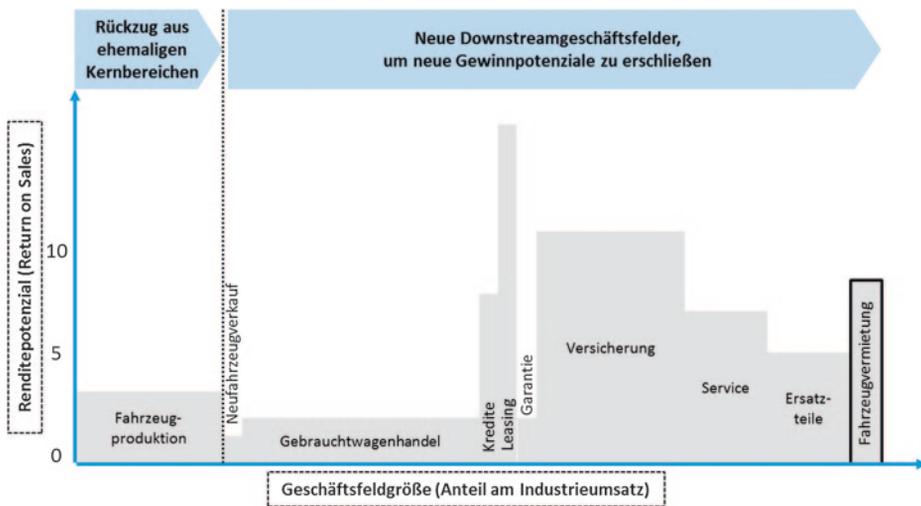
### 4.2.3 Herausforderungen für Dienstleistungsunternehmen

Neue Mobilitätskonzepte erleichtern den Markteintritt neuer Akteure oder die Möglichkeit, Wertschöpfungsanteile zu erweitern. Die Elektromobilität eröffnet rentable Geschäftsfelder aber auch für etablierte Akteure. Insbesondere im Finanzierungs- und

Leasinggeschäft sind aufgrund der nötigen Verteilung der Lebenszykluskosten von Elektrofahrzeugen innovative Angebote erforderlich, die ein hohes Renditepotenzial aufweisen. Viele Automobilproduzenten haben ihre Wertschöpfung in diesem Bereich diversifiziert. Aber auch für Versicherungsunternehmen und weitere Unternehmen der Dienstleistungsbranche zeigen sich neue Geschäftsfelder (s. Abb. 4.10).

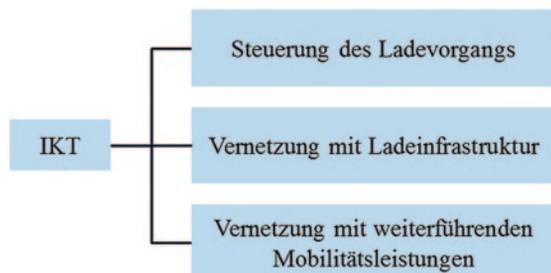
Eine wachsende Bedeutung erlangen im Bereich der kundennahen Wertschöpfung Unternehmen der Informations- und Kommunikationstechnologie. Sie ermöglichen eine Vernetzung des Elektrofahrzeugs mit seiner Umgebung und der Ladeinfrastruktur. So hat auch der Nutzer innerhalb dieses Netzes nahtlosen Zugang zu anderen Mobilitätsdienstleistern (Abb. 4.11).

Das Smartphone kann sowohl zur Steuerung des Ladevorgangs als auch zur Vernetzung mit der Ladeinfrastruktur genutzt werden (Informationen zur Reichweite, Verfügbarkeit und Lokation der Ladeinfrastruktur). Die Vernetzung mit anderen Mobilitätsdienstleistungen



**Abb. 4.10** Geschäftsfelder und Renditepotenziale im Downstream der elektromobilen Wertschöpfungskette (in Anlehnung an Throll und Rennhak 2009)

**Abb. 4.11** IKT als Plattform für Mobilität (in Anlehnung an PWC 2010)



schaft für den Nutzer schließlich eine integrierte Mobilitätsplanung. Die zentrale Bedeutung der Daten- und Informationsvernetzung bietet Unternehmen dieser Branche die Chance, sich als zentrale Akteure für Mobilitätsdienstleistungen zu positionieren.

#### 4.2.4 Das elektromobile Wertschöpfungssystem

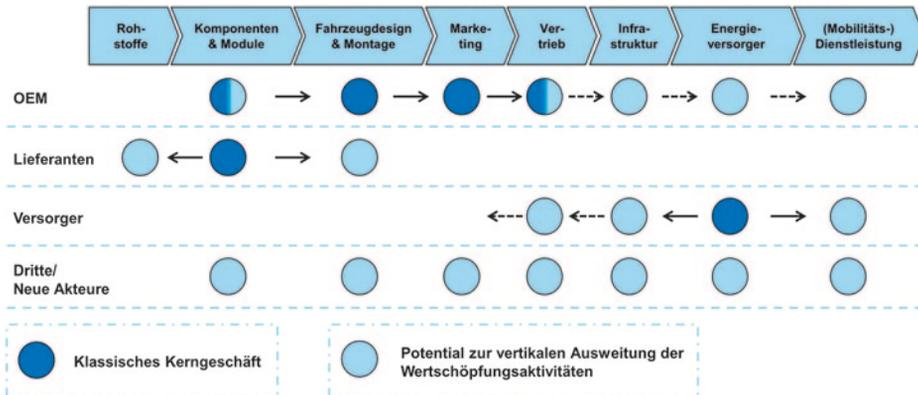
Die Umsetzung neuer Mobilitätskonzepte geht über die technologische Veränderung von Fahrzeugkomponenten weit hinaus. Die verschiedenen Akteure sind in einem interdependenten System verbunden. Mit den veränderten Mobilitätsbedürfnissen muss sich das automobile Wertschöpfungssystem eng an die Kunden mit ihren Bedürfnisstrukturen und ihrer Zahlungsbereitschaft orientieren.

Veränderte Mobilitätsbedürfnisse stellen den Nutzer in den Mittelpunkt der Aktivitäten. Damit der Nutzer mit seinem Elektroauto so uneingeschränkt mobil sein kann, wie er das von seinem heutigen Pkw gewohnt ist, müssen Automobilunternehmen und -zulieferer, Unternehmen der Energiewirtschaft und der Informations- und Kommunikationstechnologie sowie andere Dienstleister und Mobilitätsanbieter eng zusammenarbeiten.

Wesentlicher Baustein von Geschäftsmodellen muss es sein, dem Nutzer eine möglichst einfach in Anspruch zu nehmende Leistung anzubieten. Der Erfolg von Geschäftsmodellen der Elektromobilität wird also wesentlich davon abhängen, inwiefern die Mobilitätsbedürfnisse der Kunden antizipiert oder geformt werden. Die zukünftige Rollenverteilung von Akteuren im Downstream-Bereich, der elektromobilen Wertschöpfungskette kann völlig neu definiert werden, wie Abb. 4.12 zeigt.



**Abb. 4.12** Akteure im Downstream der elektromobilen Wertschöpfung. *Quelle* Eigene Darstellung



**Abb. 4.13** Vertikale Integrationsmöglichkeiten für Akteure im Markt für Elektromobilität. *Quelle* Eigene Darstellung in Anlehnung an Valentine-Urbschat und Bernhart (2009)

Gerade im endkundennahen Wertschöpfungsbereich haben Unternehmen der Informations- und Kommunikationstechnologie eine besondere Funktion, da sie für die Sammlung und Vernetzung der Daten und Informationen entscheidend sind. Ob sich, wie im Bereich der mobilen Kommunikation, Dienstleister wie etwa Tchibo im Energiehandel etablieren können, hängt wesentlich von den Marktbarrieren ab, die Energieversorger errichten können.

Die Desintegration der automobilen Wertschöpfungskette und gleichzeitige Integrationsnotwendigkeit neuer Mobilitätsdienstleistungen eröffnet für alle beteiligten Akteure Möglichkeiten der Wertschöpfungsverbreiterung (Abb. 4.13). Automobilproduzenten bewegen sich vertikal upstream und downstream. Nicht nur Kooperationen mit großen Zulieferern und Batterieherstellern, sondern auch Investitionen in regenerative Energieerzeugung sind Bestandteile des neuen Portfolios. Für Unternehmen der Energieversorgung ist eine Downstream-übergreifende Wertschöpfung naheliegend. Neue, innovative Akteure haben das Potenzial, einzelne Wertschöpfungsaktivitäten in die Tiefe zu entwickeln oder auch wertschöpfungsübergreifend tätig zu werden (bspw. Tesla).

### 4.3 Geschäftsmodelle der Elektromobilität

Durch die schrittweise Veränderung der Wertschöpfungskette werden insbesondere in kundennahen Bereichen neue Potenziale frei, die durch entsprechende unternehmerische Geschäftsmodelle kapitalisiert werden müssen. Die Kooperationspartnerwahl und die Intensität der Kooperation entscheiden über Erfolg und Misserfolg. Denn durch die Elektromobilität entstehen zunehmend mehr partnerschaftliche Verbindungen und Geschäftsmodelle zwischen bekannten und neuen Akteuren.

Zunächst gilt es in diesem Kapitel deshalb zu erörtern, welche Formen und Ausprägungen von Kooperationen es schon gibt und welche entstehen werden. Die daraus resultierenden, in erster Linie downstream orientierten Geschäftsmodelle sind Wertschöpfungskonfigurationen bestimmter Akteure und müssen die Kundenbedürfnisse im Bereich der Elektromobilität direkt oder indirekt bedienen. Deshalb werden darüber hinaus mögliche Orientierungsrichtungen von Geschäftsmodelloptionen für die fokalen Akteure der neuen Wertschöpfungsordnung aufgezeigt und bewertet.

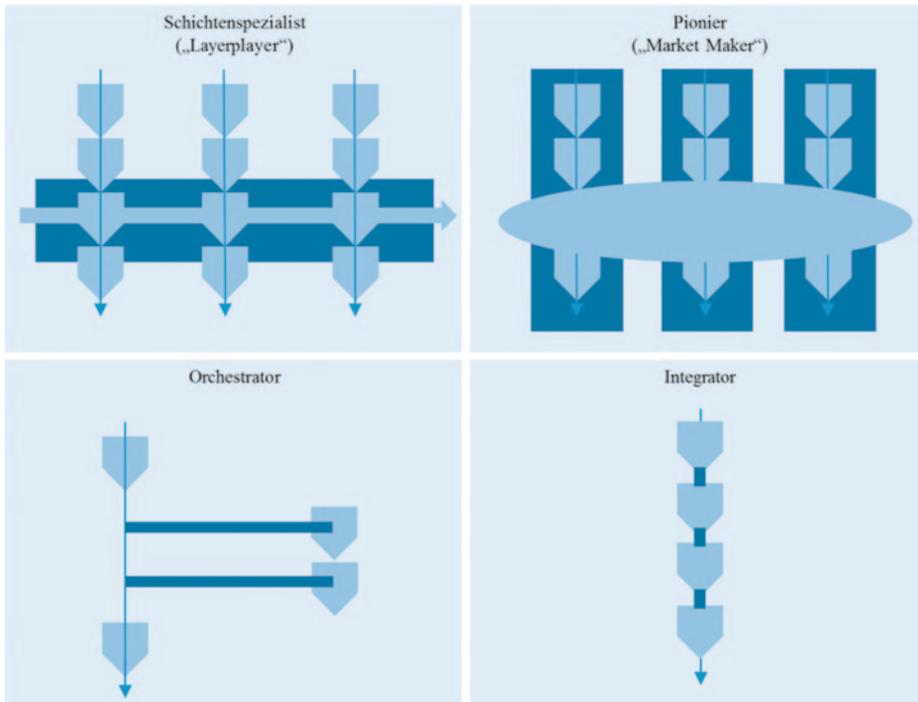
### 4.3.1 Bestandteile von Modellen der Wertschöpfungsgestaltung

Ein Modell ist die abstrakte Darstellung der Wirklichkeit, die sich aus Einzelementen und deren Verknüpfungen zusammensetzt. Ein Geschäftsmodell ist demnach eine abstrahierte Darstellung der Funktionsweise eines Geschäfts. Grundlage eines Geschäftsmodells ist das Wertschöpfungsmodell. Werden wie im Fall der Elektromobilität integrierte Wertketten dekonstruiert, lösen sich ehemals fest verbundene Elemente der Kette voneinander. An ihren Grenzen wird ein Übergang in neue Geschäftsfelder möglich (Müller-Stewens und Lechner 2003). Rekonstruktion der automobilen Wertschöpfungskette bedeutet, dass Unternehmen ihre Wertschöpfungsaktivitäten überprüfen und eine Entscheidung über die Komprimierung, Expansion oder völlige Rekonstruktion fällen. Diese Elemente der Wertschöpfung führen zu einer neuen Wertschöpfungsarchitektur.

Der Wettbewerb innerhalb klassischer Industriegrenzen verschiebt sich und mündet langfristig in einen Wettbewerb der Wertschöpfungsarchitekturen. Generell werden vier Typen unterschieden:

- Der *Schichtenspezialist* konzentriert sich auf eine oder wenige Wertschöpfungsstufen. Er löst diese aus dem Gesamtzusammenhang und nutzt Größen- und Wissensvorteile für eine Expansion in andere Industrien.
- *Pioniere* versuchen, zusätzliche Wertschöpfungsstufen in bestehende Wertketten zu integrieren und diese mit eigenen Standards zu besetzen. Eigene Innovationen werden möglichst in verschiedenen Industrien zur Nutzenstiftung eingesetzt.
- *Orchestratoren* konzentrieren sich auf einzelne Kernelemente der Wertkette (wie etwa Produktentwicklung, Marketing oder Vertrieb), durch die geschickte Koordination mit anderen Wertschöpfungsstufen gelingt ihnen aber ein zusätzlicher Mehrwert.
- *Integratoren* kontrollieren große Teile der Wertkette. Sie müssen einerseits auf jeder Stufe dem Schichtenspezialisten gewachsen sein, andererseits die Schnittstellen so optimal gestalten, dass sie den Orchestratoren nicht unterliegen (Müller-Stewens und Lechner 2003) (Abb. 4.14).

Eine Re-Konfiguration von Wertschöpfungsaktivitäten hängt von der Analyse der eigenen und der angrenzenden und verbundenen Branchen ab, um verbundene Wachstumsfelder



**Abb. 4.14** Wertschöpfungsarchitekturen (in Anlehnung an Müller-Stewens und Lechner 2003)

und Überlappungen mit bestehenden Wertschöpfungsaktivitäten zu erkennen. Kernfragen der in einem Geschäftsmodell abgebildeten abstrahierten Realität sind inhaltlich grundsätzlich strategisch orientiert. Relevant ist eine konkrete Operationalisierung von strategischen Teilaspekten, die eine Kapitalisierung des Wertschöpfungsmodells erlaubt, wie bspw.

- die Konfiguration und Durchführung der Wertschöpfungsaktivitäten, die zu einem Leistungsangebot führen, das den Bedürfnissen der identifizierten Kundengruppen entspricht (Leistungskonzept),
- die Bestimmung der Kooperationspartner und -mechanismen in Abhängigkeit von der Auswahl der Wertschöpfungsaktivitäten (Kooperationsstrategie),
- die Bestimmung und Entwicklung der Kernkompetenzen,
- das Ertragskonzept.

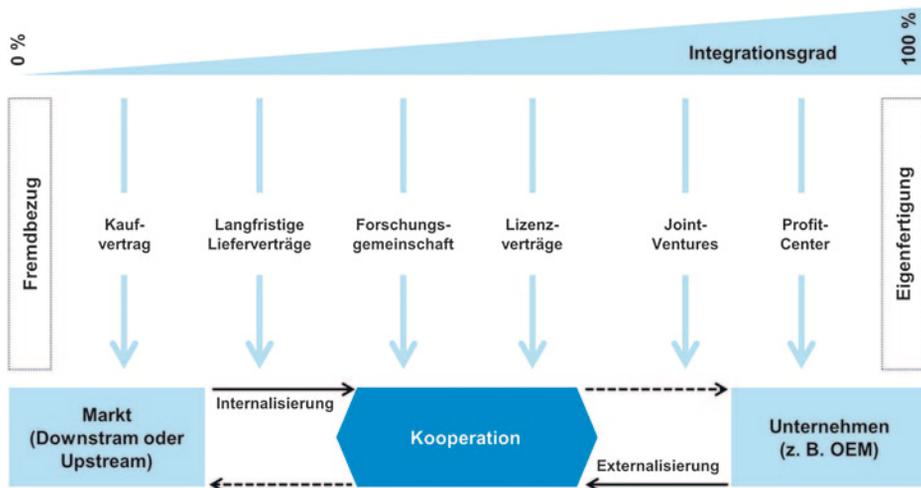
In der strategischen Wertschöpfungsgestaltung Elektromobilität ist die Entscheidung über die vertikale und horizontale Integration vs. Auslagerung (Desintegration) von enormer Bedeutung. Die Integration qualitativ gleichwertiger Wertschöpfungsaktivitäten verändert die Wertschöpfungsbreite, während die vertikale Integration die Wertschöpfungstiefe verändert. Die Auslagerung von Aktivitäten der klassischen Wertschöpfung ist besonders für

Automobilhersteller wichtig, da Mittel für Forschung und Entwicklung sowie horizontale Entwicklungen im Bereich Elektromobilität finanziert werden müssen. Die Auflösung der starren Wertschöpfungsbeziehungen in der elektromobilen Wertschöpfung und die systemischen Zusammenhänge treiben vertikale und horizontale Kooperationen dynamisch an.

Um einen möglichst großen Anteil der neuen Wertschöpfungskette Elektromobilität zu kapitalisieren, sind Unternehmen gezwungen, ihre Kompetenzen und ihr Kapital durch Kooperationen zu bündeln. So wird die Fähigkeit, verschiedenartige Kooperationen zu managen, gerade für etablierte Akteure der Automobilwirtschaft entscheidend sein, um moderne Mobilitätsangebote unter traditioneller Marke anzubieten. Über die Intensität der kooperativen Beziehung und damit die Kontrollmöglichkeit entscheidet die gewählte Kooperationsform (Abb. 4.15).

Entwicklungskooperationen und strategische Allianzen zwischen Unternehmen derselben Wertschöpfungsstufe (horizontale Kooperation) zielen meist auf die gemeinsame Entwicklung nicht-markenrelevanter Komponenten. Dabei sollen Verbund- und Skaleneffekte realisiert werden. Durch die Bündelung sich ergänzender Kompetenzen können dabei die vorgegebenen Entwicklungsziele effizienter erreicht werden. Diese Kooperationen sind meist zeitlich und inhaltlich klar definiert, um die Kernkompetenzen der kooperierenden Unternehmen zu schützen.

Ein höherer Formalisierungsgrad wird durch ein gemeinsam neu gegründetes Unternehmen erreicht (sog. Joint-Venture). In einem solchen Joint-Venture werden fachspezifische Kompetenzen meist unterschiedlicher Wertschöpfungsstufen oder Industrien zur gemeinsamen Entwicklung einer neuen Technologie zusammengeführt, die dann auch von diesem neuen Unternehmen vermarktet wird.



**Abb. 4.15** Formen und Grade der Integration (in Anlehnung an Glaum und Hutzschenreuter 2010)

### 4.3.2 Kompetenzgetriebene Kooperationen

Das Wertschöpfungssystem Elektromobilität erfordert eine Vernetzung des Elektrofahrzeugs mit der Batterie, der Ladeinfrastruktur und Mess- bzw. Abrechnungssystemen. Während diese Integration technologiegetrieben ist, vernetzen sich Dienstleistungsunternehmen, um integrierte Mobilitätsbedürfnisse zu befriedigen. Die verschiedenen Akteure kooperieren mit unterschiedlichen Zielsetzungen. Zum einen werden durch die Bündelung verschiedener Kompetenzprofile technologieorientierte Entwicklungen angestrebt. Sie reduziert den nötigen Kapitaleinsatz, kann die Entwicklungszeit verkürzen und externe Kompetenzträger an das eigene Unternehmen binden.

Zum anderen folgen Kooperationen in der Elektromobilität dem Ziel, endkundenorientierte Mobilitätsleistungen anbieten zu können. Das Zusammenspiel bisher unabhängiger Akteure erfordert koordinatives Lernen. In Pilotprojekten werden dafür Erfahrungen gewonnen, wie die Schnittstellen zwischen Automobilherstellern, Energieversorgern, Auto- und Telekommunikationsanbietern und anderen Akteuren optimal gestaltet werden können. Diese marktorientierten Kooperationen spiegeln entstehende Geschäftsmodelle wider. Die folgenden Ausführungen zu Kooperationen beschränken sich deshalb auf kompetenzgetriebene Kooperationen zur neuen Technologie- und Produktentwicklung.

#### 4.3.2.1 Kooperationen von Automobilherstellern

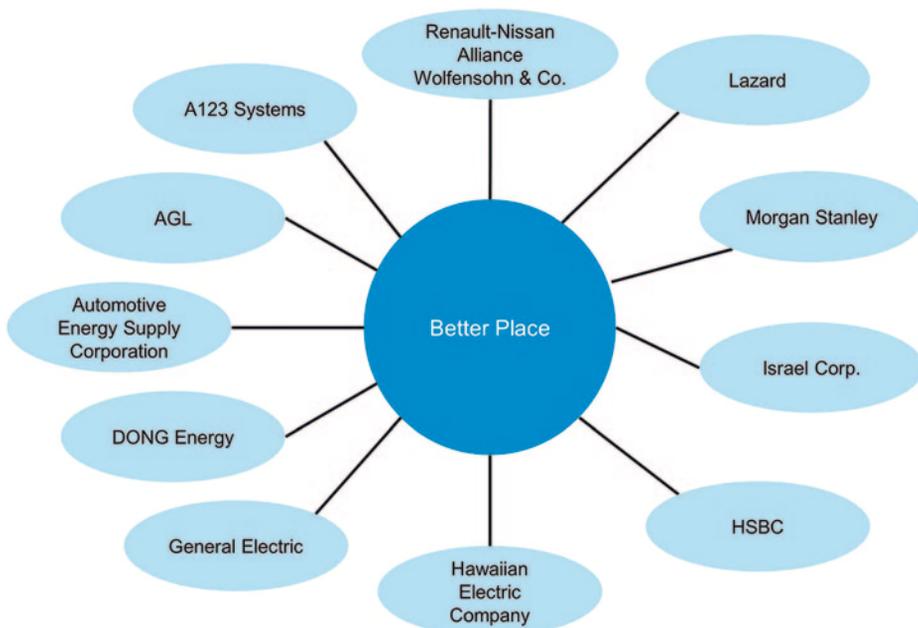
Automobilproduzenten bilden strategische Allianzen, um gemeinsam verbrauchsarme, optimierte, konventionelle und elektrifizierte Antriebe zu entwickeln. Diese horizontalen Kooperationen dienen in erster Linie der Realisierung von Skaleneffekten. Entwicklungsorientierte Kooperationen reduzieren Kapitalbedarf und Entwicklungszeiten, während in der Produktion Skaleneffekte erzielbar sind. Die gemeinsamen Entwicklungen konzentrieren sich auf die Kompaktklasse, sodass Kernkompetenzen für Premiumfahrzeuge erhalten bleiben. Die gewählten Kooperationsformen reichen in Abhängigkeit vom Kooperationsziel von strategischen Allianzen bis zu Gemeinschaftsunternehmen. BMW und PSA arbeiten seit Jahren im Bereich von Motoren zusammen. In einem gemeinsamen Unternehmen werden Teile für Hybridfahrzeuge entwickelt und gebaut (Hoch-Volt-Speicher, Elektromotoren, Generatoren). Daimler und Renault Nissan entwickeln gemeinsam Elektrofahrzeuge; Renault Nissan liefert den Elektromotor für den Smart, Daimler die Batterie. Mitsubishi und PSA entwickeln gemeinsam Elektroantriebe, die in kleineren Stadtfahrzeugen zum Einsatz kommen. Mit zunehmender Serienreife von Elektromotoren und Elektrofahrzeugen werden kooperative Entwicklungsaktivitäten von Automobilproduzenten eher zurückgehen. Anbieter werden dann versuchen, fahrzeugbezogene Vorteile des elektrischen Antriebsstrangs zu optimieren.

Automobilproduzenten können durch Kooperationen mit Zulieferern von deren Know-how etwa in der Batterietechnik, Elektromotorentechnik und im Leichtbau profitieren. Ziel ist die schnellere Markteinführung von Elektrofahrzeugen und eine Erweiterung der Wertschöpfung in Wachstumssegmente (insbesondere beim

Antriebsstrang). Außerdem ist der Verkauf der gemeinsam entwickelten Produkte an Dritte aus Sicht der Automobilbauer eine interessante Möglichkeit, ihr Geschäftsmodell auszuweiten. Aufgrund der strategischen Relevanz ist der Integrationsgrad solcher Kooperationen relativ hoch. Beispiele für Gemeinschaftsunternehmen liefern Daimler-Bosch, Daimler-Evonik, VW-Sanyo oder BMW-SGL Carbon. Probleme können sich durch die Wettbewerbsverschiebung als Folge geänderter Wertschöpfungsstrukturen ergeben; wenn Automobilproduzenten zukünftig selber als Tier-1-Zulieferer für andere Automobilproduzenten auftreten, ist eine Abgrenzung der Kernkompetenzen schwierig.

Beteiligungen an neuen Akteuren (bspw. bei Daimler an Tesla) werden initiiert, um deren Innovationskraft in den eigenen Ressourcenpool aufzunehmen. Zudem erleichtert eine Kooperation die Beobachtung der Anbieter von Elektrofahrzeugen, die ohne die Kompetenz großer Fahrzeugbauer auskommen. Diese Kooperationen gelingen meist nur über Beteiligungen, da innovative und junge Unternehmen neue Finanzquellen erschließen müssen.

Ein Beispiel für einen schnellen Eintritt in einen Markt mit hohen Markteintrittsbarrieren durch eine innovative Kooperationsstrategie liefert die Unternehmung „Better Place“. In nur drei Jahren ist das Unternehmen zu einem Paradebeispiel für ein innovatives Geschäftsmodell der Elektromobilität geworden. Das Unternehmen lädt auf seiner Homepage jegliche Art von Interessenten ein, sich an diesem Netzwerk zu beteiligen (Abb. 4.16).



**Abb. 4.16** Ausgewählte Kooperationspartner „Better Place“. *Quelle* Eigene Darstellung

### 4.3.2.2 Kooperationen von Automobilzulieferern

Große Zulieferer kooperieren mit bisher branchenfernen Unternehmen, um ihre Kompetenzen und ihre Marktposition im Bereich elektronischer Systeme und Batteriesysteme zu stärken. Da der Anspruch an die Fahrzeugtechnik und das Wertschöpfungspotenzial bei elektronischen Systemen und dem elektrifizierten Antriebsstrang zunimmt, können sie unabhängig von Fahrzeugproduzenten ihren Wertschöpfungsanteil verbreitern und vertiefen. Bosch und Samsung haben ein Gemeinschaftsunternehmen gegründet, das die Entwicklung, Fertigung und den Vertrieb von Lithium-Ionen-Batteriesystemen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen zum Ziel hat. Bosch hat in seinem Projekthaus Hybrid bereits umfassendes Know-how etwa in den Bereichen Leistungselektronik, Batteriemangement, elektrische Maschine, Getriebe oder Gleichspannungswandler aufgebaut. Samsung SDI Co. Ltd legt den Fokus auf die Weiterentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien. Das Unternehmen produziert diese bereits für viele Hersteller von Notebooks, Mobiltelefonen und Elektrowerkzeugen. Diese Kooperation zeigt die Chance, die eine Desintegration der klassischen Wertschöpfungskette für Automobilzulieferer eröffnet. Sie können sich durch kluge Kooperationen zu Schichtenspezialisten entwickeln (vgl. [Kap. 3.4.2](#)) und in andere Industrien vordringen. Gleichzeitig versucht Bosch durch die Kooperation mit Daimler und zwölf weiteren Automobilproduzenten, Massenslieferant von Batteriesystemen (oder Elektromotoren) zu werden. Aufgrund der geringen Komplexität und des hohen Innovationsgrades der Elektromaschine befindet sich diese Technologie noch in einer Experimentierphase. In dieser Phase ist das Erreichen größerer Stückzahlen und einer schnellen Lernkurve bei der Integration von Elektromaschinen in den Antriebsstrang vorrangiges Kooperationsmotiv.

Die Infineon Technologies AG und die RWE Effizienz GmbH, ein Tochterunternehmen der RWE AG, etablieren Ladestationen für Elektrofahrzeuge in Warstein, einem der Produktions- und Entwicklungsstandorte von Infineon. Hier entwickelt und fertigt das IT-Unternehmen innovative Leistungshalbleiter für industrielle und automobiler Anwendungen, u. a. auch für den Antriebsstrang von Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Halbleiterlösungen können helfen, die Kosten für Antrieb und Elektronik zu senken und die Energieeffizienz des Gesamtsystems zu erhöhen. Auch bei der Ladeinfrastruktur und für das Thema Smart Grid werden Halbleiterlösungen benötigt. Sensoren, Mikrocontroller und Leistungshalbleiter des Unternehmens spielen eine zentrale Rolle bei der Gewinnung, Übertragung und Einspeisung von Energie in die Batterien sowie der Rückspeisung ins Netz. Gleichzeitig gewinnt RWE so einen Kooperationspartner zur Entwicklung von Ladestationen und potenziell auch von Batterien. Die Kooperation ist als Projekt organisiert. Auf diese Weise haben Zulieferer die Möglichkeit, in das Infrastrukturgeschäft Elektromobilität einzusteigen.

### 4.3.2.3 Kooperationen von Energieversorgungsunternehmen

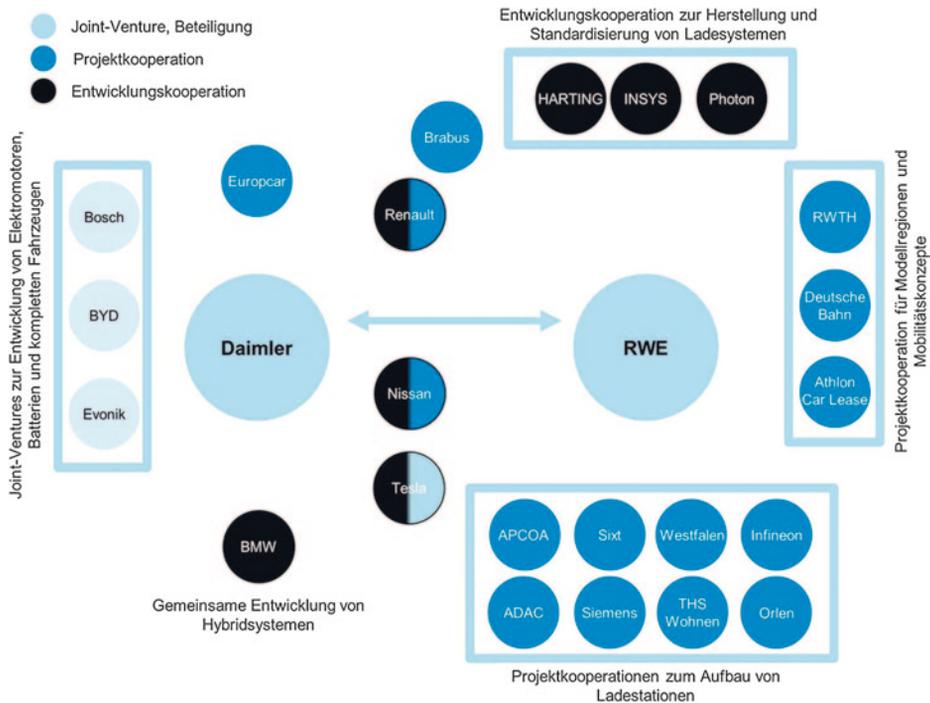
Unternehmen der Energieversorgung müssen ihre Wertschöpfung über die Bereitstellung der Infrastruktur hinaus erweitern, um kostendeckend bzw. mit Gewinn zu operieren. Im

Wesentlichen werden produkt- bzw. technologiebezogene Entwicklungskooperationen zur Herstellung und Standardisierung von Ladesystemen initiiert und Projektkooperationen zum Aufbau von Ladestationen geschlossen (wie etwa mit Infineon). RWE kooperiert bspw. mit einer Reihe unterschiedlicher Unternehmen, wie etwa Harting, INSYS und Photon, zum Aufbau von Ladestationen. In Deutschland kooperieren Energieversorgungsunternehmen darüber hinaus auch innerhalb der von der nationalen Plattform Elektromobilität geförderten Modellregionen (vgl. Kap. 3.3.7). Beispielsweise kooperiert E.ON in der Modellregion München mit Audi, den Stadtwerken München (SWM) und der Technischen Universität München (TUM). Die Partner werden etwa 20 Elektroautos betreiben und 200 Ladestationen in München etablieren (Projekt „eflott“). Hier geht es in erster Linie um Erkenntnisse bei der Datenübertragung zwischen Fahrer, Fahrzeug, Stromtankstelle und Stromnetz. Dabei wird der Einsatz von Smartphones als zentrale Mensch-Maschine-Schnittstelle getestet.

Kompetenzgetriebene Kooperationen werden von Automobilproduzenten und Unternehmen der Energieversorgung initiiert, um im Bereich elektromobilitätsorientierter Technologien wettbewerbsfähig zu sein. Dazu müssen Kompetenzträger möglichst früh mit dem eigenen Kompetenzportfolio koordiniert werden. Automobilproduzenten versuchen die zukünftig entfallenden Wertschöpfungsanteile rund um den Verbrennungsmotor durch andere Teile zu ersetzen. Gerade bei Kooperationen zwischen Automobil- und Batterieherstellern wird eine große Herausforderung der Schutz des geistigen Eigentums sein. Automobilhersteller kooperieren in diesem Bereich mit verschiedenen Zulieferern und umgekehrt. Gleichzeitig sind Automobilhersteller bestrebt, die Gesamtfahrzeugkompetenz zu behalten. Dazu müssen sie ihre Wertschöpfung aber auf endkundennahe Wertschöpfungsaktivitäten ausdehnen, wie etwa Autovermietung oder Finanzdienstleistungen.

Energieversorgungsunternehmen beschränken sich bisher weitgehend auf kompetenzgetriebene Kooperationen im Downstream der elektromobilen Wertschöpfungskette. Abbildung 4.17 zeigt ausgewählte Kooperationsbeziehungen von Daimler und RWE. Downstream stehen bei dieser Kooperation die Zusammenarbeit in den Modellregionen und der Aufbau integrativer Mobilitätskonzepte im Mittelpunkt.

Gemeinsame Wertschöpfung wird in der Fortentwicklung von Elektromobilität also in noch stärkerer Zusammenarbeit durchgeführt, als dies schon heute der Fall ist. Ein stark vernetztes Wertschöpfungssystem der Elektromobilität entsteht. Den Kernkompetenzen der verschiedenen Akteure entsprechend ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass Automobilproduzenten als sog. Mega-OEMs eine Systemintegration anstreben, sich also durch Kooperationen wertschöpfungsübergreifend positionieren. Energieversorgungsunternehmen versuchen, durch Kooperationen das Infrastrukturgeschäft für sich zu sichern und das Endkundengeschäft auszuweiten. Automobilzulieferer streben einerseits den weiteren Ausbau ihres Wertschöpfungsanteils an. Andererseits nutzen sie aber auch die entstehenden Chancen einer veränderten Wertschöpfungsstruktur, um sich als „Schichtenspezialisten“ mit anderen Industrien zu vernetzen und in diese vorzudringen.

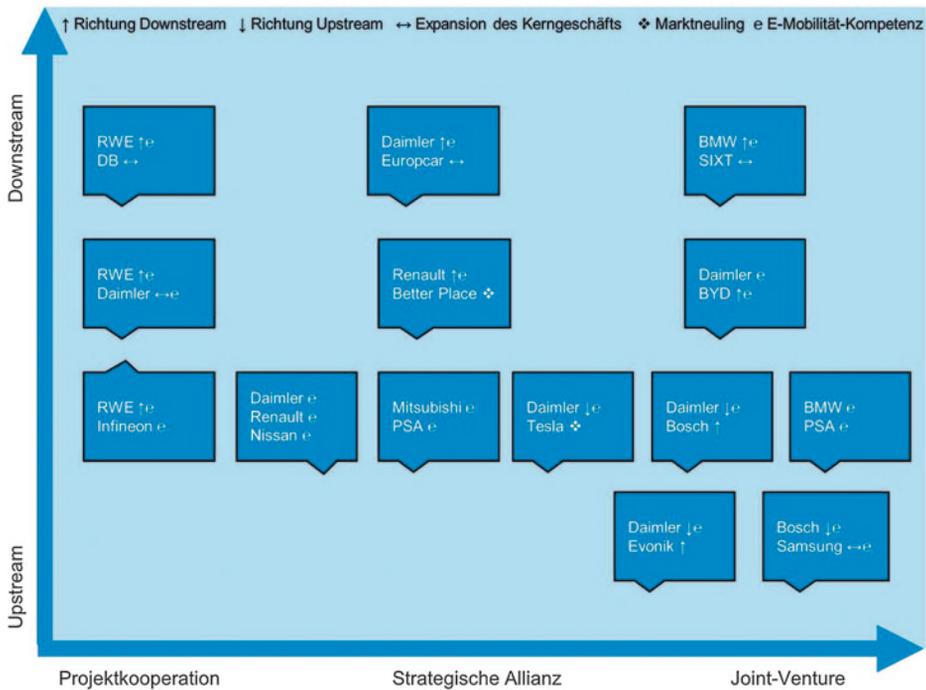


**Abb. 4.17** Kooperationsportfolio von Daimler und RWE. *Quelle* Eigene Darstellung

#### 4.3.2.4 Wertschöpfungs- und kompetenzgetriebenes Kooperationsraster

Die Motivation von Kooperationen liegt vornehmlich in den Bestandteilen Wertschöpfung, Gewinn und Eigenleistungskosten. Beteiligte einer Kooperation erhoffen sich, die eigene Kostenstruktur zu verbessern oder den Gewinn zu erhöhen. In der automobilen Wertschöpfungskette stellt sich dies upstream mit der Hoffnung auf Kostensenkungen und verkürzte Entwicklungszeiten dar. Ein Beispiel dafür sind die strategischen Kooperationen von Automobilproduzenten. Hier werden Synergiepotenziale gehoben und Entwicklungskosten geteilt. Ebenso gilt dies für Kooperationen über Wertschöpfungsstufen hinweg, wie etwa in Joint-Ventures von Hersteller-Zulieferer. Downstream rechtfertigen sich Kooperationen hauptsächlich mit Gewinnerzielungsabsichten. Bei der elektromobilen Wertschöpfungskette bilden diese Kooperationen neue partnerschaftliche Geschäftsmodelle. Meist ist das Ziel eine Expansion der eigenen Geschäftsfeldkompetenzen unter Ausnutzung von Synergieeffekten.

Nachfolgend sind Kooperationsformen entlang der Wertschöpfungskette aufgezeigt, die durch das Thema Elektromobilität entstanden sind. Gleichzeitig werden die Entwicklungsrichtungen der Kooperationspartner genannt und somit deren Wertschöpfungsorientierung.



**Abb. 4.18** Kooperationsraster Elektromobilität. *Quelle* Eigene Darstellung

Erkennbar ist in Abb. 4.18 dass neue, ungewohnte Kooperationsraster eher downstream der elektromobilen Wertschöpfungskette auftreten. Kooperationen wie etwa zwischen RWE und der Deutschen Bahn oder zwischen Fahrzeughersteller und Autovermietungen weisen darauf hin, dass die kapitalstarken Akteure der Elektromobilität versuchen, die endkundennahen Potenziale zu nutzen. Abgesehen davon, wie intensiv sich die Teilnehmer auf die Kooperation einlassen, wird deutlich, dass sich neue Geschäftsmodelle, die durch die Elektromobilität entstehen, in diesem Bereich der Wertschöpfungskette ausprägen. Dies ist auch Ansatz des folgenden Kapitels, das sich mit den veränderten, angepassten und neuen Geschäftsmodellen im Downstream-Bereich der Wertschöpfungskonfiguration beschäftigt.

### 4.3.3 Neue Geschäftsmodelle der Elektromobilität

Ein Geschäftsmodell ist die Kernantwort auf sich verändernde Märkte und muss speziell bei disruptiven Technologien frühzeitig entwickelt und evaluiert werden (Müller-Stewens und Lechner 2003). Außerdem lässt die zukünftige Kosten- und Wertschöpfungsstruktur der Automobilindustrie keinen Raum für veraltete

Modelle. Eher sind die Konfigurations- und Manövrierfähigkeit des Modells kritische Erfolgsfaktoren für ein Unternehmen im Zukunftsmarkt der Elektromobilität.

Die Sicherstellung des Endkundenzugangs zu Elektromobilität steht bei der Begründung der Geschäftsmodelle im Mittelpunkt. Die neuen Geschäftsmodelle müssen sich daran ausrichten und dies bedienen. Das neue ökonomische und ökologische Mobilitätsbewusstsein ist neben der Verfügbarkeits- und Reichweitensicherheit der wichtigste Einflussfaktor bei der Bildung neuer Modelle. Der Findungsprozess der für ein Unternehmen richtigen Wertschöpfungsarchitektur wird als Try-and-Error-Prozess verstanden. Um die Anzahl der Iterationen von Design und Rückkopplung zu minimieren, sind eine detaillierte Vorausplanung und eine kontinuierliche Erfolgskontrolle notwendig (Müller-Stewens und Lechner 2003). Dieser Prozess soll im Rahmen der Elektromobilität auch dazu genutzt werden, Kunden möglichst schnell mit der Technologie vertraut zu machen, denn auf einen höheren Bekanntheitsgrad folgt eine höhere Akzeptanz, sodass nicht nur „Early Adopters“ von der neuen Mobilität begeistert sind.

Obwohl die klassischen Geschäftsmodelle der Branche, wie bspw. Fahrzeugverkauf, -leasing oder -vermietung, bestehen bleiben, sollen sie hier nicht einzeln betrachtet werden. Im Fokus der Ausführungen stehen die endkundenbezogenen Geschäftsmodelle, die sich am Kundennutzen orientieren. Bereits bekannte Geschäftsmodelle erleben durch Elektromobilität Beschleunigung oder expandieren in andere Dimensionen.

#### **4.3.3.1 E-Carsharing**

Ein aufsteigendes Geschäftsmodell, um die Mobilitätsbedürfnisse der Kunden zu befriedigen, ist das Carsharing. Dabei steht die Fahrzeugnutzung und nicht der Fahrzeugbesitz im Vordergrund. Das E-Carsharing ist eine Weiterentwicklung des klassischen Geschäftsmodells mit Verbrennungsmotor. Mithilfe dieses Modells kann ein einfacher und günstiger Zugang zu einem neuen Fahrerlebnis in Ballungsgebieten gewährt werden, das gleichzeitig eine transportable Flexibilität der Nutzer erlaubt.

Beim E-Carsharing wird eine Elektrofahrzeugflotte einem organisierten Nutzerkreis auf Zeit zur Verfügung gestellt. Der Flottenbetreiber ist für Wartung, Pflege und evtl. anfallende Reparaturen zuständig. Des Weiteren trägt er die Steuern sowie Versicherungs-, Reparatur- und Stromkosten. Die Dienstleistung der zeitweiligen Nutzung des Fahrzeugs wird über ein Entgelt abgerechnet, das sich nach dem Pay-per-Use-Ansatz richtet. Im Vergleich zu einer vollständigen Fahrzeugfinanzierung fallen für den Kunden dadurch weniger individuelle Kosten an, insbesondere wenn er das Fahrzeug nur zu spontanen Mobilitätszwecken innerhalb eines Ballungsgebietes nutzt. Die flexible Kostenstruktur ermöglicht darüber hinaus, dass der Kunde durch einen Mobilitätsverzicht einen direkten monetären Nutzen hat. Das Konzept ähnelt dem Mietfahrzeuggeschäft, unterscheidet sich jedoch darin, dass vor jeder Anmietung ein langfristiger Rahmenmietvertrag anstatt eines zyklischen Vertrags geschlossen wird. Dadurch wird die kurzfristige Mietung realisierbar. Außerdem wird Carsharing in Halbstunden- oder Stundenintervallen abgerechnet, während ein Fahrzeugmietvertrag meist über einen längeren Zeitraum wie bspw. einen Tag abgeschlossen wird.

Für die Elektromobilität ist dieses Geschäftsmodell vor allem für Ballungsräume und Megastädte geeignet, denn für den Einsatz in urbanen Zentren reicht die Reichweite eines Elektrofahrzeugs. Die Elektrofahrzeuge werden an viel frequentierten Orten wie Flughäfen oder Hauptbahnhöfen auf festen Parkplätzen mit entsprechenden Ladeinstallationen bereitgestellt und können via Internet und Smartphone geortet, auf Verfügbarkeit geprüft und gemietet werden.

Klassische Geschäftsmodellbetreiber auf dem Markt für E-Carsharing sind Autovermietungen wie bspw. Sixt oder Europcar sowie schon existente Carsharing-Anbieter für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Ein Beispiel für einen solchen Anbieter ist das schon im Jahr 2000 gegründete US-amerikanische Unternehmen ZipCar. Nach der erfolgreichen Pilot-Einführung einer Plug-in-Hybrid-Flotte in ausgewählten Städten möchte ZipCar das ambitionierte Konzept auf weitere Städte in den USA ausweiten. Auch Expansionen durch Akquisitionen ins europäische Ausland sind geplant (Kalmbach et al. 2011). Dort sind zurzeit Automobilhersteller wie Daimler, Renault und VW mit ihren Carsharing-Angeboten präsent, die ihre Konzepte sukzessive in urbanen Zentren einführen. Erfolgsentscheidend auf dem europäischen Markt für Carsharing scheint zurzeit zu sein, wer sich als Erster in einem Ballungszentrum positionieren und dort zukünftig als monopolistischer Anbieter für Mobilität agieren kann. Im Geschäftsmodell des E-Carsharings konkurrieren also insbesondere etablierte Automobilhersteller mit ihren am Downstream orientierten Organisationseinheiten mit Dienstleistungsunternehmen wie Autovermietungen sowie spezialisierten neuen Akteuren.

#### **4.3.3.2 Neuartige Finanzierungs- und Leasingkonzepte**

Durch die komplexe Kostenstruktur bei Elektromobilen, in erster Linie verursacht durch die hohen Entwicklungs- und Produktionskosten der Traktionsbatterie, wird der Downstream-Wertschöpfungsteil der Finanzierungs- und Leasingkonzepte zu einem wichtigen Bestandteil innerhalb der neuen Geschäftsmodelle der Elektromobilität. Fahrzeugfinanzierung und -leasing sind klassische Vertriebswerkzeuge für Automobilhersteller, die durch Autobanken oder davon entkoppelte Finanzdienstleister wie etwa Leasinggesellschaften genutzt werden. Ein Beispiel für ein solches Geschäftsmodell ist, dass die Nutzungsrechte der teuren Traktionsbatterie losgelöst vom eigentlichen Fahrzeug über einen Leasingvertrag erworben werden. Der direkte Kundennutzen liegt dabei in der Risikominimierung, da der Leasinggeber rechtlicher Eigentümer der Batterie bleibt, somit auch Wartungs- und Reparaturleistungen übernimmt und für den evtl. Austausch und die Entsorgung der Batterie zuständig ist (Wallentowitz et al. 2010). Dieses Modell funktioniert auch in Kombination mit der Fahrzeugfinanzierung und dem Fahrzeugleasing. So kann ein Anbieter etwa ein Elektroauto zum Verkauf (bar oder finanziert) anbieten und gleichzeitig als Leasinggeber der Batterie auftreten. Die Kaufbarriere für den Konsumenten wird dadurch erheblich gesenkt, sodass eine breitere Kundenschicht angesprochen wird. Die Disaggregation der Gesamtfahrzeugkosten zu bezahlbaren Mobilitätseinheiten mit Elektroautos wird oft als das Geschäftsmodell „Better Place“

bezeichnet. Dabei soll der Kunde die Batterie an Wechselstationen schnell tauschen können, um sofort weiterzufahren. Die Ladeinfrastruktur wird durch das Unternehmen selbst gestellt, was einerseits ein enormes Investitionspotenzial bedingt und andererseits die Kunden zwingt, ihr Elektroautomobil an genau diesen Stationen aufzuladen. Ein innovatives Abrechnungssystem zählt, ähnlich wie in der Mobilfunkindustrie, nach gefahrenem Kilometer und nicht nach der Menge des aufgeladenen Stroms. Ein positiver Nebeneffekt des schnellen Austauschs der Batterie ist die virtuelle Reichweitenverlängerung, vorausgesetzt, entlang der gefahrenen Strecke liegen genug Wechselstationen.

Das Beispiel „Better Place“ zeigt, dass es prinzipiell für jedes Unternehmen möglich ist, im Downstream-Bereich in die automobilen Wertschöpfungskette einzugreifen und dort Geschäftsmodelle als Pionier zu kapitalisieren. Unternehmen wie dieses sind bisher zwar gänzlich unerfahren in der Automobilbranche, verfügen aber über ein intensives Verständnis für neue Geschäftsmodelle, die den Kundenwert erhöhen, frei von vorgegebenen Strukturen und Grenzen. Ihnen gelingt die Gewinnung von Kunden durch ein neuartiges Branding, das gezielt auf die neuen Bedürfnisse der sich verändernden Gesellschaft eingeht. Die Leitlinien des Projektes „Better Place“ etwa spiegeln dieses Verständnis wider. Sie orientieren sich an dem Streben nach der Adaption von Elektrofahrzeugen in einem nachhaltigen Transportsystem, der weltweiten Optimierung von Energiezugang und -nutzung und der integrierten Gesamtlösung für den Endkunden (Better Place 2011). Dem Kunden eine glaubhafte Strategie des Geschäftsmodells zu vermitteln, ist von zentraler Bedeutung und muss zum fokalen Instrument der etablierten Teilnehmer der Wertschöpfungskette Elektromobilität werden. Diese können auch die mit den risikobehafteten Geschäften einhergehenden hohen Investitionskosten tragen. Automobilherstellern oder Energieversorgungsunternehmen steht somit der Zugang zu den neuen Geschäftsmodellen im Dienstleistungsbereich der neuen Finanzierungs- und Leasingkonzepte offen. Nur muss der Weg dorthin durch entsprechendes Branding innovativ und kundenorientiert gestaltet werden.

#### **4.3.3.3 E-Flottenkonzept**

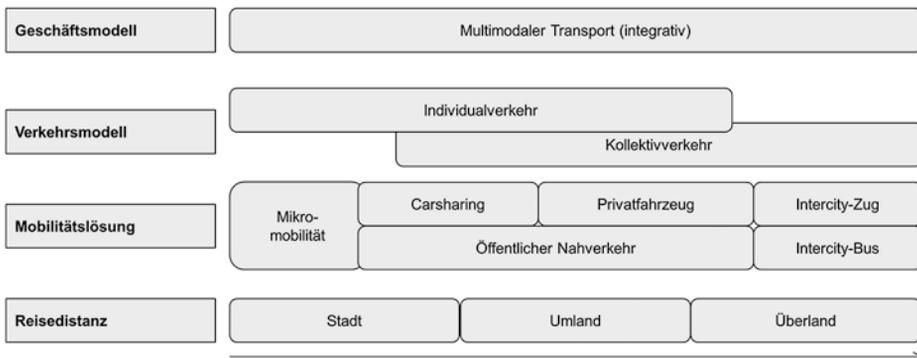
Auch das Flottenkonzept ist grundsätzlich ein Geschäftsmodell, das den Automobilherstellern downstream bekannt ist. Die Eignung dieses Modells für den Bereich der Elektromobilität erhöht sich durch die Tatsache, dass gerade das rein elektrisch betriebene Automobil für hoch frequentierte Fahrten mit geringer Reichweite innerhalb von Ballungszentren einsetzbar ist. Zielgruppen sind im gesamten Stadtverkehr insbesondere im Bereich der Nutzfahrzeuge zu finden. Innerstädtische Lieferdienste, Service- oder Handwerksbetriebe, kommunale Fuhrparks und Taxis gehören dazu. Eine Umrüstung oder Neugestaltung kommunaler Flotten sowie Taxis etwa wird die Sichtbarkeit in Städten erheblich erhöhen. Innovative Flottenkonzepte sollten sich darüber hinaus von Geschäftsmodellen mit Verbrennungsmotoren unterscheiden. So können Fuhrparks mit Elektromotoren bspw. dort eingesetzt werden, wo Fahrzeuge mit Geräusch- oder CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht eingesetzt werden können oder nicht erwünscht sind, so etwa in Hallen und Gebäuden, Naturschutzgebieten, Zoo- und Grünanlagen, auf Flughäfen, im Bergbau oder in Fußgängerzonen.

Außerdem muss ein effektives Flottenmanagement die Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Flexibilität im Sinne des Kundennutzens sicherstellen. Elektrofahrzeuge können diesen Bedarf im urbanen Raum durch ihre hohe Wartungsarmut decken. Als weiteren Kundennutzen kann der Imageeffekt für gewerbliche Fuhrparks angesehen werden. Durch eine Nutzung von E-Flottenfahrzeugen wird eine Unternehmensstrategie, die für Umweltschutz und Nachhaltigkeit steht, unterstützt.

Die klassischen Betreiber des Geschäftsmodells Flottenkonzept sind die Automobilhersteller selber sowie Fuhrparkbetreiber wie etwa Europcar oder Sixt, die gleichzeitig im Dienstleistungsbereich der Autovermietungen tätig sind. Elektrofahrzeugspezialisten können den gewerblichen Endkunden mit einem Full-Service-Gesamtflottenkonzept erreichen, indem sie kundenspezifische Lösungen bereitstellen, die dem Kunden die gewünschte Mobilität in dem von ihm gesteckten Rahmen bieten. Die Amortisationsdauer von viel genutzten Elektrofahrzeugen muss dabei unter der von Automobilen mit Verbrennungsmotor liegen. Dies setzt in erster Linie einen deutlich geringeren Preis pro Kilometer bei Elektrofahrzeugen voraus. Auch hier ist die Risikoübernahme durch einen Rahmenvertrag mit einem konstanten Preis pro Kilometer durchaus möglich. Die Finanzierungs- und Leasingkonzepte spielen demnach auch beim E-Flottenkonzept eine große Rolle bei der Entscheidung für oder gegen einen Fuhrpark mit Elektrofahrzeugen.

#### 4.3.3.4 Multimodaler Transport

Das Geschäftsmodell des multimodalen Transports zielt auf den integrierten Mobilitätsansatz als Bestandteil des öffentlichen Verkehrs in Ballungsräumen ab. Die Zielgruppe dieses Geschäftsmodells sind die „Multimodalen“, eine Nutzergruppe, die in der Mobilitätsforschung schon seit einigen Jahren definiert ist. Diese Personen kombinieren auf einer Wegstrecke oder auf mehreren Wegen im Laufe einer Woche verschiedene Verkehrsmittel (Canzler et al. 2007). Der multimodale Transport stellt dementsprechend das System für diese Form der integrierten Mobilität bereit. Eine Übersicht über die möglichen Verkehrsmittel in Abhängigkeit von der zurückgelegten Distanz ist in Abb. 4.19 dargestellt.



**Abb. 4.19** Integration von multimodalen Mobilitätslösungen. *Quelle* Eigene Abbildung

Der Nutzer eines multimodalen Transportsystems kann auf verschiedene Verkehrsmittel zugreifen und sie als Alternative und in Kombination zu dem ggfs. vorhandenen Privatauto auswählen (vgl. Kap. 3.1). Dabei schließt das E-Carsharing die Lücke im motorisierten Individualverkehr innerhalb urbaner Zentren und ist eine Ergänzung zum öffentlichen Nahverkehr. Die innerstädtischen Nutzungsszenarien der Verkehrsmittel kompensieren darüber hinaus die noch kurzen Reichweiten und langen Ladezeiten von Elektrofahrzeugen. Eine natürliche Reichweitenverlängerung wird durch den Einsatz von Intercity-Zügen und -Bussen garantiert. Bei der Mikromobilität wird eine Vergrößerung der Akzeptanz von Verkehrsmitteln wie Fahrrädern, Pedelecs und Elektromotorrollern erwartet (Kalmbach et al. 2011).

Langfristig gesehen vereint dieses Geschäftsmodell die meisten der angesprochenen Kundenbedürfnisse und bietet eine weitere Lösung für den grenzenlosen Einsatz von Elektrofahrzeugen innerhalb des Stadtverkehrs. Es orientiert sich an der Maxime, dass der Kunde ein Mobilitätsangebot aus einer Hand fordert. Das Benutzen eines Verkehrsmittels muss deshalb einen direkten finanziellen Gegenwert haben, den der Kunde im Vergleich zur entgegengenommenen Leistung (Transport von Standort zu Ziel) abwägen und bewerten kann (PWC 2010). Individuell muss er entscheiden können, welches Verkehrsmittel oder welche Kombination von Verkehrsmitteln er wählt. Aus diesem Grund geht das Geschäftsmodell des multimodalen Transports über das Angebot der Nutzung von Elektrofahrzeugen wie der Fahrzeugvermietung oder dem E-Carsharing hinaus. Durch die strategische Standortwahl der Fahrzeugparkplätze bzw. der Verleihplätze erfolgt eine Eingliederung in das gegebene Raum-, Energie- und Mobilitätskonzept der Stadt. Ziel ist es, das multimodale Transportmodell über den bestehenden Kundenkreis der „Multimodalen“ hinaus bekannt zu machen und die Schnittstelle zwischen Individual- und Kollektivverkehr zu bedienen. Ein Anreizsystem in urbanen Zentren ist etwa eine Verkürzung der Gesamtreisezeit durch die Verwendung von kostenlosen und konnektivitäts nahen Parkplätzen, die dem integrierten Verkehrsmodell angehören.

Als Betreiber dieses integrativen Geschäftsmodells kommen große Verkehrsbetriebe infrage wie etwa die Deutsche Bahn. Solche Unternehmen müssen als Mobilitätsdienstleister fungieren und haben den Vorteil, die Verkehrsmittel des Kollektivverkehrs schon zu kontrollieren. Eine Ausweitung auf Mobilitätsangebote des Individualverkehrs muss in urbanen Zentren unmittelbar erfolgen, um den Wettbewerbsvorteil zu erhalten. Denn auch andere Gewerbe, wie bspw. reine Carsharing-Dienstleister oder Automobilhersteller und Mietwagengesellschaften, werden sich in diesem Geschäftsmodell positionieren. Erfolgskritisch ist der mit dem Angebot verbundene telematische Service für den Kunden, der die vollständige Information über alle relevanten Infrastrukturdaten bereitstellt. Insbesondere die Wechselhürden zwischen den verschiedenen Verkehrsträgern müssen mithilfe des Internets und ausgereiften Kommunikations- und Buchungssystemen minimiert werden. So müssen gleichzeitig Applikationen für Mobiltelefone in das Angebot des Geschäftsmodells mit aufgenommen werden, die bspw. über Verfügbarkeit, Park- und Lademöglichkeiten

oder den angesprochenen Vergleich von Fahrtzeiten und Kosten von verschiedenen Verkehrswegen Auskunft geben. Die notwendige Existenz einer softwareunterstützten Vernetzung bringt auch Software- und Telekommunikationsunternehmen in das komplexe Modell mit ein. Sie können sich langfristig als Koordinator oder Systemintegrator dieses Geschäftsmodells positionieren.

#### 4.3.3.5 Optionale Bausteine eines integrierten Mobilitätsangebots

Nachdem die wichtigsten neuen Geschäftsmodelle der Elektromobilität vorgestellt wurden, soll nun auf einzelne optionale Bausteine für diese Geschäftsmodelle eingegangen werden. Diese resultieren größtenteils aus den spezifischen Anforderungen der Kunden an Angebote in Verbindung mit Elektromobilität.

Die parallele Weiterentwicklung des Wunsches nach grenzenloser und intelligenter Kommunikation und Information bietet Ansatzpunkte für Unternehmen der Telekommunikationsbranche. Der notwendige technische Fortschritt bei kundenfreundlichen, informationstechnischen Systemen impliziert Chancen für Unternehmen wie etwa Apple, Deutsche Telekom, SAP oder Siemens. Eine Übersicht über die Aufgaben und Charakteristika der mit der Elektromobilität verbundenen intelligenten Fahrzeug- bzw. Transportsoftware bietet Tab. 4.2.

Ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, wird die benötigte Software in drei Schlüsselbereiche unterteilt, welche die bilaterale Datenkommunikation der

**Tab. 4.2** Funktionsanforderungen an intelligente Fahrzeug- und Transportsoftware

Netzsoftware	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Messung und Management der Elektrizitätsnachfrage</li> <li>• Erfassung der Anzahl an Elektrofahrzeugen am Stromnetz</li> <li>• Unterstützung bei der Netzwerkplanung</li> <li>• Etc.</li> </ul>
Ladesoftware	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kommunikationsmanagement zwischen Elektrofahrzeug und Netz</li> <li>• Messung und Abgleich von Ladestatus und Netzauslastung</li> <li>• Regelung des konstanten Netzausgleichs und Rückspeisung in das Netz (Vehicle-to-Grid)</li> <li>• Messung von Stromkonsum</li> <li>• Abrechnung und Roaming</li> <li>• Etc.</li> </ul>
Kundensoftware	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ladefunktionen (Start/Stop, Status, Nachtstromnutzung)</li> <li>• Fahrzeuginformationen (Restreichweite, Navigation)</li> <li>• Verfügbarkeit, Lokalisierung und Reservierung von Ladeinfrastruktur oder Fahrzeugen</li> <li>• Reise-, Verkehrs- und Unfallinformationen</li> <li>• Elektronische Bezahlssysteme</li> <li>• Transitmanagement für multimodale Transportmöglichkeiten</li> <li>• Eco-Routing</li> <li>• Etc.</li> </ul>

Quelle Eigene Darstellung

Elemente der Wertschöpfungskette untereinander und mit dem Kunden zulässt. Neuartige Netz- und Ladesoftware sind Wegbereiter für ein intelligenteres Netz, *Smart Grid*, für Energieversorgungsunternehmen eine notwendige Voraussetzung für die wirtschaftliche, effiziente und sichere Integration von erneuerbaren Energien und damit für die Netzintegrität von Elektrofahrzeugen. Die Software unterstützt die Netzauslastungsplanung und -steuerung (bspw. via *Vehicle-to-Grid*) und das Kommunikationsmanagement zwischen Elektrofahrzeug und Stromnetz. Zusätzlich entstehen neuartige Energiemanagementsysteme nahe am Kunden, wie etwa *Smart Metering* (Messung des tatsächlichen Energieverbrauchs und Kostenanzeige) oder das *Smart Home System* (Einbindung eines intelligent gesteuerten Energiesystems in Haushalte). Die Kundensoftware bedient den informellen Nutzen, der weit über das Bedürfnis nach geringen Kosten und Risiken oder nachhaltiger Mobilität hinausgeht. So muss das Fahrzeug in den öffentlichen Transport integriert werden. Eine Softwareplattform, bspw. auf dem Mobiltelefon oder innerhalb des Fahrzeugs selbst, stellt dem Kunden alle Informationen rund um den effektiven Gebrauch, die Bezahlung und die Verfügbarkeit bereit. Art und Umfang der Kundensoftware sind grundsätzlich keine Grenzen gesetzt und müssen sich deutlich am Nutzungsverhalten der Kunden orientieren. Die Unternehmen der Telekommunikations- und Mobilfunkbranche haben in diesem Bereich schon viel Erfahrung sammeln können. Kurze Produktentwicklungszyklen machen den Try-and-Error-Prozess von Geschäftsmodellen in der IT im Gegensatz zur Einführung eines Elektrofahrzeugkonzeptes wesentlich einfacher. Trotzdem sind diese Modelle grundlegende Voraussetzung für Existenz und Funktionsfähigkeit von Elektromobilität im urbanen Raum.

Auch innovative Tarif- und Abrechnungssysteme werden als Bausteine eines integrierten Mobilitätsangebots identifiziert. So existieren Abrechnungsmodelle wie etwa das des Green Service, das ein Elektrizitätstarifpaket für den Privathaushalt und das Elektrofahrzeug aus Ökostrom anbietet. Unternehmensübergreifende Abrechnungsmodelle müssen bei der Elektromobilität genauso gut operieren wie in der Mobilfunkbranche, die auch hier wieder eine Vorreiterfunktion übernimmt. Bei der Nutzung von verschiedenen Netzen über kommunale und nationale Grenzen hinweg muss die Fakturierung trotzdem gebündelt geschehen. Dies wird über das sog. E-Roaming ermöglicht. Die Einrichtung von Roamingzonen und -gebühren muss über die Einrichtung von Clearinggesellschaften erfolgen. Sie sorgen gegen Gebühr für einen automatischen Austausch von E-Roaming-Daten zwischen Abrechnungsstellen. Betreiber eines Clearingmodells arbeiten nah an der Schnittstelle Energieversorgungsunternehmen und Kunde. Deshalb sind es typischerweise die kommunalen und regionalen Energieversorger selbst oder ein Dienstleister, der den Wissensvorteil aus der Mobilfunkbranche mitbringt.

Optionale Bausteine von Geschäftsmodellen sind folglich in Energiemanagementsystemen, spezifischen IT-Diensten, Green Services oder in Verbindung mit innovativen Abrechnungssystemen wie etwa E-Roaming zu finden. Sie befriedigen die erweiterten Kundenbedürfnisse an den Nahtstellen eines integrativen Angebots für Elektromobilität und sind daher ein wesentlicher Bestandteil der meisten kundennahen, kooperativen Geschäftsformen.

#### 4.3.3.6 Eigenschaften der Geschäftsmodelle

Die vorgestellten Geschäftsmodelle sind zum einen klassische Geschäftsmodelle im endkundennahen Bereich, die sich durch die neuen Rahmenbedingungen und die Elektrifizierung des Antriebsstrangs verändern bzw. anpassen müssen. Zum anderen wurden die sog. optionalen Bausteine eines integrierten Konzeptes vorgestellt. Sie sind bei der vollständigen Umsetzung und Integration von Elektromobilität in den Mobilitätsalltag weit mehr als nur unterstützend notwendig.

Im Zentrum der Geschäftsmodelle steht immer der Kundennutzen. Dieser wurde bereits vorher identifiziert. Relevant ist das Preisbewusstsein des Kunden, denn das Fahren eines Elektrofahrzeugs darf in einer wahrgenommenen Kosten-Nutzen-Rechnung nie schlechter abschneiden als eine Fahrt mit einem Automobil mit Verbrennungsmotor. Außerdem sind die Kosten insbesondere der Batterie noch erheblich. Finanzierungs- und Leasingkonzepte können zur Risikominimierung beitragen. Des Weiteren muss die Mobilität des Kunden stets gewährleistet sein. Deshalb spielen Verfügbarkeits- und Versorgungssicherheit eine Rolle für den Kunden – bei gleichen bzw. gehobenen Flexibilitätsansprüchen. Ein weiterer wichtiger Kundennutzen resultiert aus der Weiterentwicklung von Informationssystemen: das Bedürfnis nach Kommunikation und Information sowie die Systemsicherheit und -stabilität.

Bei der Vorstellung der Geschäftsmodelle wurde auch darauf eingegangen, wer die aktuell wichtigen Akteure in dem jeweiligen Geschäftsmodellbereich sind bzw. welche Marktteilnehmer bisher typische Anbieter dieses Modells waren. Ihnen schließen sich im Bereich der Elektromobilität weitere Wettbewerber an, die bisher noch keine Erfahrungen in dem Geschäftsfeld sammeln konnten.

Eine Übersicht über die Geschäftsmodelle und die damit verbundenen direkten bzw. indirekten Nutzen für den Endkunden folgt in Abb. 4.20. In der Darstellung werden zusätzlich potenzielle Wettbewerber identifiziert, die neben den etablierten und für das spezifische Modell als sinnvoll erachteten fokalen Organisationen gute Chancen haben, das entsprechende Geschäftsmodell auszuführen und sich zu positionieren.

#### 4.3.3.7 Integration am Beispiel von Modellregionen

Aus den vorgestellten Geschäftsmodellen ist erkennbar, dass sich eine Integration von verschiedenen Verkehrsträgern in Ballungszentren anbietet, motiviert durch die veränderten Kundenbedürfnisse. Aus diesem Grund soll nun am Beispiel urbaner Modellregionen skizziert werden, wie sich die Ausprägung solcher Geschäftsmodelle in Clustern gestaltet. Als Cluster werden Kooperationen mit geringer geografischer Reichweite zwischen verschiedenen Kompetenzträgern einer Wertschöpfungskette bezeichnet (Strebel 2007). Solche Zentren sind prädestiniert für den Einsatz von Elektrofahrzeugen. Der Clusteransatz wird als geeignete Referenz genutzt, die neuen Wertschöpfungsarchitekturen und Kooperationschancen zu verifizieren.

Von der deutschen Bundesregierung werden im Rahmen des Ausbaus und der Marktvorbereitung der Elektromobilität acht Modellregionen gefördert. Unterschiedlichste Akteure der Elektromobilität arbeiten in verschiedenen Konstellationen zusammen, um

Geschäftsmodell	Direkter oder indirekter Kundennutzen	Fokale Organisation	Potenzielle Wettbewerber
E-Carsharing	Preisregulativ, Transportflexibilität	Automobilhersteller, etablierte Carsharing-Dienstleister	Verkehrsunternehmen, Airlines, Park&Ride, Kommunen
Neuartige Finanzierungs- und Leasingkonzepte	Risikominimierung, Preisregulativ	Finanzdienstleister, Miet- und Leasinggesellschaften	Autobanken, Spezialisten
E-Flottenkonzept	Preisregulativ, Wartungsarmut, flexible Einsatzbereiche	Automobilhersteller, etablierte Flottenbetreiber	Fahrzeugspezialisten, Verkehrsunternehmen
Multimodaler Transport	Versorgungs-, Verfügbarkeits-sicherheit, Transportflexibilität	Verkehrsunternehmen, ÖPNV, Airlines, Park&Ride	Automobilhersteller
Energiemanagementsysteme	Energiekostensenkung, -stabilität, Versorgungssicherheit	Große und kommunale Energieversorger	Zulieferer, IKT-Unternehmen, große Softwareunternehmen
Spezifische IT-Dienste	Informations-, System- und Verfügbarkeits-sicherheit	IT- und Telekommunikations-unternehmen, Zulieferer	Automobilhersteller, Energieversorger, Dienstleister
Green Services	Versorgungs- und Verfügbarkeits-sicherheit, Preisstabilität	Große und kommunale Energieversorger	Automobilhersteller, Dienstleister
E-Roaming	Versorgungs- und Verfügbarkeits-sicherheit	Clearinggesellschaften, Dienstleister	Energieversorger

**Abb. 4.20** Übersicht Geschäftsmodelle. *Quelle* Eigene Abbildung

**Abb. 4.21** Projektbeteiligte Modellregionen Elektromobilität. *Quelle* Eigene Abbildung



Referenzregionen für den Einsatz von Elektrofahrzeugen zu schaffen und Fahrzeugnutzer mit der neuen Antriebsart vertraut zu machen (Abb. 4.21).

Zu den Projektbeteiligten gehören neben den Beteiligten der klassischen automobilen Wertschöpfungskette, wie etwa Fahrzeughersteller oder Zulieferer, auch öffentliche und wissenschaftliche Einrichtungen sowie Unternehmen der Energiewirtschaft und Dienstleister. Neben gemeinsamen Forschungsprojekten zu verschiedensten Fragen der Elektromobilität ist es das Anliegen der Beteiligten, Erfahrungen in Bezug auf Infrastrukturbedarf und -aufbau, Abrechnungssysteme und Betrieb verschiedener Elektrofahrzeuge (Hybridbusse, Elektromobile, Elektrofahräder) zu gewinnen. Zusätzlich lernen die beteiligten Akteure, ihre Kompetenzen in den Kooperationsbeziehungen zu bündeln und Schnittstellen zuzuordnen. Außerdem werden innerhalb dieses Rahmens die wertschöpfungsübergreifenden Kooperationen erprobt, um zukünftige Geschäftsmodelle zu verifizieren. Der lokale Clusteransatz wird dabei als Erfolg versprechend angesehen, da lokale und globale Mitwirkende an einem Ort gemeinsam agieren. Zugleich wird durch die einzelnen Cluster der Wettbewerb zwischen Kommunen und verdichteten Regionen gefördert sowie die

Basis für Ladeinfrastrukturen gesetzt. Eine weitere positive Begleiterscheinung ist das Bekanntmachen von Elektromobilität in der breiten Bevölkerung, um die erforderliche Akzeptanz der Antriebstechnik beim Kunden zu erreichen.

Als erstes Beispiel für ein regionales Cluster soll die Modellregion Berlin dienen. Das Projekt „BeMobility“ konzentriert sich auf Carsharing-Konzepte zur Integration im öffentlichen Verkehr. Innovative Mobilitätsangebote in Form von Elektroautos, -rollern oder Pedelecs sollen es dem Kunden ermöglichen, an wichtigen Knotenpunkten des öffentlichen Verkehrs und Tourismus auf alternative Fortbewegungsmittel umzusteigen (NOW GmbH 2010). Als reiner Mobilitätsdienstleister steht die Deutsche Bahn mit dem Produkt „Flinkster“ im Mittelpunkt. Der Bahnhof ist für die Stadt Schnittstelle zum Fernverkehr und somit der Ort, an dem alternative Weiterfahrten angeboten werden können. Schon heute erfüllen Mobilitätsangebote wie das der Deutschen Bahn an vielen Verkehrsknotenpunkten wie Hauptbahnhöfen oder Flughäfen die Flexibilitätserfordernisse des Kunden (PWC 2010). Die Kundenvorteile eines dynamisierten E-Carsharings sind nachvollziehbar und wurden bereits erläutert. Bei einem Preisvergleich für die Strecke Frankfurt-Flughafen bis Frankfurt-Innenstadt zwischen den Alternativen E-Carsharing, ÖPNV und Taxi lohnt sich das E-Carsharing-Konzept für den Kunden ab zwei Personen. Aus Anbietersicht lohnt sich dieses Modell schon ab drei Fahrten (PWC 2010).

Im Raum Berlin kooperiert die Deutsche Bahn mit RWE, Daimler, dem Batteriehersteller SBLiMotive, dem Netzbetreiber Vattenfall, dem Parkplatzbetreiber Contipark sowie diversen Forschungseinrichtungen, um ein integriertes Carsharing-Konzept voranzutreiben. Das Geschäftsmodell beschränkt sich bei der Deutschen Bahn auf das Anbieten von Elektromobilität innerhalb des multimodalen Transports. Die Kernkompetenzen anderer Projektteilnehmer werden dabei nicht berührt.

In der Modellregion Berlin wird außerdem ein zweites Projekt unter dem Namen „e-mobility“ von der Bundesregierung gefördert. Im Rahmen einer Kooperation von Daimler und RWE werden Elektroautos von ausgewählten Flotten-, Geschäfts- und Privatkunden getestet. Daimler hat 50–60 Smart ed zur Verfügung gestellt, RWE installierte knapp 100 Ladesäulen. Die Fahrzeugflotte wurde durch A-Klasse-E-Cell-Modelle mit einer Batterie aus dem Joint-Venture „Deutsche ACCUotive GmbH & Co KG“ zwischen Daimler und Evonik erweitert. Zu erwerben sind die Fahrzeuge zukünftig durch eine Full-Service-Mietrate. Demnach wird ein Mobilitätskonzept angestrebt, das das Elektrofahrzeug mit benötigter Infrastruktur und Abrechnungsmodell integriert, wobei die Fahrzeugkompetenz (inklusive Batterie) bei Daimler bleibt und die Infrastrukturkompetenz bei RWE. Auf der Fahrzeugseite spielen die Ladekontrolle und an der Ladesäule Bedienung, Abrechnung und Informations- und Energiemanagement eine wesentliche Rolle. Das Daten- und das Abrechnungssystem bilden die dafür benötigte technologische Schnittstelle. Der Kooperationsinhalt ist also in erster Linie durch die Schnittstellenentwicklung geprägt. Beide Partner werden die gewonnenen Erkenntnisse auf andere regionale Cluster übertragen und dadurch einen spezifischen Wissensvorsprung haben.

Auch in München dient die Gemeinschaftsunternehmung „eCharged“ zwischen BMW, Siemens und den Stadtwerken der Erprobung von Elektrofahrzeugen und dem

Aufbau einer bedarfsgerechten Infrastruktur zum Laden der Fahrzeuge aus erneuerbaren Energien. Vierzig Mini-E von BMW sind mit Batterien von SB LiMotive ausgestattet, einem Joint-Venture zwischen dem deutschen Zulieferer Bosch und dem südkoreanischen Mischkonzern Samsung. Gleichzeitig kooperiert BMW mit E.ON Energie und setzt eine Flotte von 15 BMW Mini-E ein, um Erfahrungen mit Elektrofahrzeugen, Infrastruktur und Abrechnungssystemen zu gewinnen. Die Stadtwerke München werden etwa 200 Ladestationen aufbauen, an denen Audi etwa 20 A1 e-tron testen kann. E.ON plant zudem, ganze Flotten der Leasinggesellschaft Athlon Car Lease Germany mit Elektroautos auszustatten und zu elektrifizieren. Ziel ist es, gewerblichen Kunden ein Komplettangebot nach dem Geschäftsmodell des E-Flottenkonzeptes zu bieten. Das Fahrzeug wird durch die Leasinggesellschaft konditioniert, während E.ON alle Dienstleistungen in Bezug auf den Betrieb des Elektroautos übernimmt. Auch Energieversorgern kann es demnach gelingen, ein elektrifiziertes und integriertes Mobilitätskonzept anzubieten, ohne wertschöpfungsorientierte Kooperationen mit einem Automobilproduzenten im Bereich Elektromobilität einzugehen.

Wie an den Beispielen zu Modellregionen deutlich wurde, bieten sich für die einzelnen wertschöpfungsbeteiligten Unternehmen innerhalb urbaner Ballungszentren diverse Gelegenheiten, sich durch neue Geschäftsmodelle an den Downstream-Wertschöpfungsaktivitäten zu beteiligen. Es kommt darauf an, sich innerhalb der Regionen zu positionieren und die gemachten Erfahrungen in Modellregionen dazu zu verwenden, eine breite Kundschaft anzusprechen und das integrierte Mobilitätsangebot in Städten vom Kollektiverlebnis auf den Individualnutzen zu übertragen.

### **4.3.4 Konkrete Geschäftsmodelloptionen**

Nachdem einzelne Geschäftsmodelle vorgestellt und die Kooperationsmöglichkeiten einzelner Teilnehmer, der elektromobilen Wertschöpfungskette aufgezeigt wurden, folgt nun die Erörterung konkreter Richtungen und Ausprägungen von Geschäftsmodelloptionen innerhalb der Wertschöpfungskonfiguration.

Der fokale Akteur wird der große Automobilhersteller sein, da er als Einziger eine Vollintegration, d. h. eine Integration nahezu aller Wertschöpfungssteile, realisieren kann. Vor allem beim verfügbaren Kapital und der Systemintegration werden sie als zentrale Schlüsselspieler mit dem größten Veränderungspotenzial gesehen. Automobilzulieferer sowie Energieversorger sind durch die aktuellen Entwicklungen in ihren spezifischen Kompetenzfeldern limitiert, als Vollintegrator aufzutreten.

#### **4.3.4.1 Integrative Geschäftsmodelloptionen aus Sicht der Automobilhersteller**

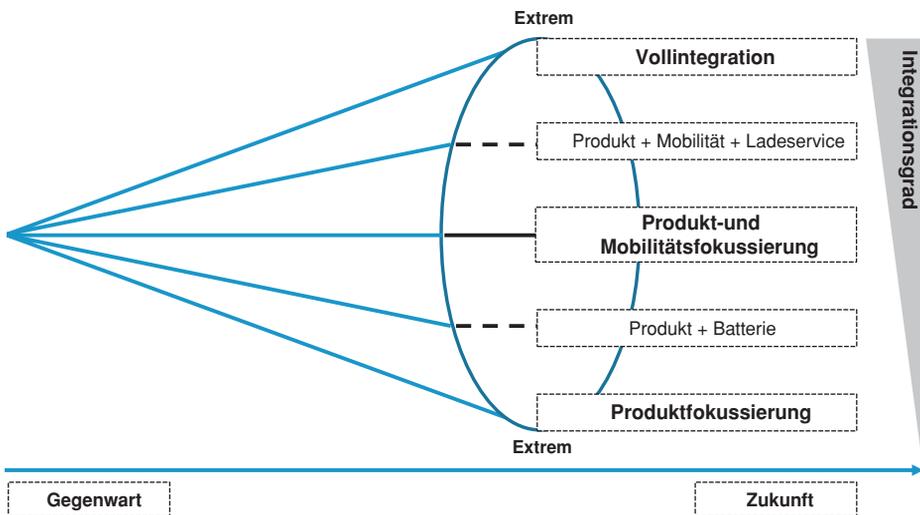
Festgestellt wurde, dass der klassische Automobilhersteller seine Kooperationen mit dem elektromobilen Wertschöpfungsumfeld anpassen muss. In diesem Kapitel werden deshalb Szenarien dargestellt, wie sich die Risiken und Potenziale für den OEM

entwickeln könnten, wenn er in andere, bisher unbekannte Wertschöpfungsaktivitäten der Elektromobilität vordringt und sich dort etablieren möchte.

Um eine Risiko- und Potenzialeinschätzung der elektromobilen Geschäftsmodellentwicklungen der Wertschöpfung in Bezug auf den OEM durchzuführen, wird eine zukunftsorientierte Szenariotechnik angewendet. Dafür werden zunächst zwei Extremszenarien festgelegt. Diese beiden Pole dienen der Eingrenzung möglicher Handlungsoptionen des Automobilherstellers. Eine Darstellung der eingegrenzten Wertschöpfungsszenarien findet sich in der folgenden Abb. 4.22.

Wenn die klassischen Grenzen der Wertschöpfungsaktivitäten weitestgehend bestehen bleiben, folgt der OEM dem Szenario der Produktfokussierung. Dabei steht er der Elektromobilität besonders konservativ gegenüber. Auf der anderen Seite steht das Extrem der Vollintegration durch den Automobilhersteller. Der OEM hat in diesem Fall sämtliche Aktivitäten der Wertschöpfungskette Elektromobilität in seine Unternehmensgrenzen integriert und ist sowohl bei der Erstellung des vollständigen Produktes inklusive Batterie als auch bei Infrastrukturversorgung und lokalen Mobilitätsdienstleistungen involviert. Innerhalb der beiden Extreme bewegt sich das Portfolio an Handlungsmöglichkeiten für den OEM und somit auch die Szenarioanalyse. Im Folgenden wird näher auf die in Abb. 4.22 dargestellten drei großen Szenarien eingegangen. Auch werden die damit verbundenen Teilabwandlungen untersucht, um Risiken und Potenziale für den Automobilhersteller ableiten zu können. Dazu dient die Übersicht in Abb. 4.23.

Bei der *Produktfokussierung* konzentriert sich der Automobilhersteller weiterhin auf seine Kernkompetenzen und agiert als Systemintegrator an den Grenzen zu Zulieferern, Versorgern und Mobilitätsanbietern. In diesem Szenario handelt der OEM



**Abb. 4.22** Wertschöpfungsszenarien für Automobilhersteller. *Quelle* Eigene Abbildung

Szenario	Produktfokussierung	Produkt- und Mobilitätsfokussierung	Vollintegration
	Fahrzeug ohne Batterie	Fahrzeug mit/ohne Batterie + Mobilitätsdienstleistung	Fahrzeug mit Batterie + Mobilitätsdienstleistung + Infrastruktur
<b>Potenziale</b> (+)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geringer Veränderungsgrad</li> <li>Wenig Investitionen nötig</li> <li>Hochtechnologische Kompetenz</li> <li>Batterierisiko wird nicht vom OEM getragen</li> <li>Erhöhte Fahrzeugnachfrage in BRIC-Staaten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kundennähe</li> <li>Markenpräsenz (Mobilitätsmarke)</li> <li>Erschließung neuer Kunden und Märkte</li> <li>Höheres Wertschöpfungspotential</li> <li>Potenziale der lokalen Marktführerschaft</li> <li>Mobilitätskonzepte auch unabhängig von Elektromobilität nutzbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Schnelle Reaktion auf Veränderungen möglich</li> <li>Hohe Markenpräsenz sowie Kundennähe</li> <li>First-Mover-Vorteile</li> <li>Höchstes Wertschöpfungspotenzial</li> <li>Schnelle Ausbreitung in andere Märkte möglich</li> </ul>
<b>Risiken</b> (i)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wenig Wertschöpfungspotenzial erfasst</li> <li>Aufgrund von Margendruck eher für Premiumals für Volumenhersteller geeignet</li> <li>Abnehmender Kundenkontakt durch aufkommende integrierte Mobilitätsdienste</li> <li>Umorientierung des Kunden</li> <li>Rückläufige Nachfrage in der Triade</li> <li>Hohe Markteintrittsbarrieren bei spätem Eintritt in den Markt der Elektromobilität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Komplexeres Geschäftsmodell</li> <li>Mobilitätskonzepte müssen lokal angepasst und dadurch flexibel sein</li> <li>Mobilitätsangebote gehen noch am Vertrieb vorbei</li> <li>Drittanbieter mit hoher Geschäftsfeldkompetenz + neue Wettbewerber (Energieversorger)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Höchst komplexes Geschäftsmodell</li> <li>Höherer Veränderungsgrad</li> <li>Aufwendige Koordination</li> <li>Hohe Investitionen nötig</li> <li>Abhängig von anhaltender Nachfrage in jedem Teilbereich</li> <li>Unsicherheiten der Elektromobilität</li> <li>Batterierisiko</li> </ul>

**Abb. 4.23** Übersicht Potenziale und Risiken für den Automobilhersteller. *Quelle* Eigene Darstellung

sehr zurückhaltend und ist auf seine Technologie beschränkt. Mit dem geringen Veränderungsgrad geht jedoch auch der geringere Investitionsaufwand für bspw. Batteriekapazitäten upstream oder der Aufbau der Ladeinfrastruktur downstream einher. Der OEM könnte ein Fahrzeug unter eigener Elektromobilitätsmarke einführen, was das Risiko minimieren würde, bei einem Scheitern das Image der Stammmarke negativ zu beeinflussen.

An der Upstream-Schnittstelle finden sich Zulieferer oder reine Batteriehersteller, mit denen Kooperationen zur Batteriefertigung geschlossen werden. Diese Erweiterung der Wertschöpfungstiefe ist insbesondere für Premiumhersteller möglich. So sind Unternehmen wie BMW und Daimler bereits Joint-Ventures eingegangen, um die Kompetenz der Batterie ins Unternehmen zu integrieren. Volumenhersteller wie bspw. Peugeot oder VW gehen das Risiko der Partnerschaft noch nicht ein und beziehen Batterien von bisher auf andere Industrien spezialisierten Batterieproduzenten wie etwa Sanyo oder Toshiba. Das Problem in der Triade ist, dass der Automobilhersteller zwar das Batterierisiko, wie etwa Leistungs- oder Lebensdauerbeschränkung, nicht tragen muss, die Umorientierung des Kunden aufgrund des Wertewandels jedoch auch das Image des Produktfokussierers bestimmt. Dies kann zum Verlust der Käuferschaft führen. Darüber hinaus beugt die Eigenfertigung der Traktionsbatterien bzw. eine enge Kooperation mit einem entsprechend starken Zulieferer dem Schnittstellenproblem zum Fahrzeug vor. Die richtige Partnerschaft kann auch zu Differenzierungsvorteilen führen, da es auf diesem Gebiet bisher noch keinen einheitlichen Standard gibt.

Auf der Downstreamseite hingegen besteht die Gefahr von Absatzeinbußen, da neue Marktteilnehmer die Wünsche der Kunden besser bedienen können. Durch

zunehmendes Engagement von Mobilitätsdienstleistern wird der Absatzmarkt weiter eingeschränkt. Die rückläufige Nachfrage nach konventionellen Fahrzeugen in der Triade kann bei einem global agierenden Automobilhersteller zwar durch den steigenden Absatz in BRIC-Staaten gedeckt werden, trotzdem werden auch die dortigen Kunden mehr und mehr umweltbewusste Elektrofahrzeuge nutzen wollen.

Dieses Szenario ist aufgrund der abnehmenden Kundennähe auf der einen und durch bisher fehlende Technologiekompetenz auf der anderen Seite nur für Spezialisten oder wenige große Premiumhersteller geeignet. Letztere können es sich wegen des starken finanziellen Hintergrunds leisten, als Second-Mover in einen gereiften Markt einzutreten, um den Unsicherheiten der Elektromobilität zunächst aus dem Weg zu gehen. Dafür müssten sie jetzt ein hochtechnologisches Gesamtkonzept entwickeln, das sich bei Markteinführung von den Konzepten der anderen Hersteller wesentlich unterscheidet. BMW macht es mit dem Projekt i vor. Während andere Hersteller bestehende Fahrzeugkonzepte anpassen, wie bspw. beim Peugeot iOn oder Nissan Leaf, entwickelt der Premiumhersteller mit dem Mega-City-Vehicle ein langfristig ausgelegtes Gesamtkonzept. Doch insgesamt scheint die reine Produktfokussierung aufgrund des Kostendrucks zu eng gefasst. Deshalb müssen sich auch Premiumhersteller Möglichkeiten verschaffen, das erweiterte Mobilitätsbedürfnis der Kunden zukünftig decken zu können.

Dem Produktfokussierer gegenüber steht der *Vollintegrator*. Der Fahrzeughersteller wird bei einer vollen Integration der gesamten Wertschöpfungskette Elektromobilität zum Systemanbieter und deckt das komplette Spektrum der Produktherstellung, der Services rund um das Automobil und Ladungsmöglichkeiten sowie das des Mobilitätsdienstleisters ab. Ein solches Modell enthält viele Wertschöpfungspotenziale, da alle Bereiche der Elektromobilität berührt sind und dem Markt ein entsprechendes Volumen für die Zukunft zugesprochen wird. Dem Vollintegrator obliegt es, bei Veränderungen schnell auf die unsichere Umgebung zu reagieren und somit sein Leistungsspektrum flexibel anzupassen. Durch die Erschließung vieler Märkte ist eine ausdauernde Markenpräsenz gegeben, die die Kunden dazu veranlassen kann, diesem OEM mehr Vertrauen zuzusprechen als anderen. Insbesondere kann er es als First-Mover schaffen, Kunden mit hoher geografischer Reichweite zu erschließen. Die Verbreitung des Gesamtkonzeptes ist jedoch mit einigen Risiken und Schwierigkeiten verbunden. Der hohe Veränderungsgrad für einen OEM und das komplexere Geschäftsmodell machen eine große Koordinationskompetenz notwendig. Außerdem sind hohe und sehr unsichere Investitionen unerlässlich. Weiterhin ist der Einstieg in manche Teilgebiete der Wertschöpfungskette nicht ohne Weiteres möglich, wie das Beispiel der Energieerzeugung zeigt. Die Energiewirtschaft hat großes Interesse an einem intelligenten Stromnetz, wird sich in diesem Bereich breit positionieren und dem Automobilhersteller mittelfristig keine Chance lassen, in dieses Marktfeld einzutreten. Auch Dritte sind in vielen Bereichen eine Gefahr, denn sie schaffen es, mit innovativen Geschäftsmodellen gerade in lokalen Märkten wie etwa einer Megastadt die Wünsche der Kunden zu treffen, während die breit angelegte Strategie des Vollintegrators immer wieder an regionale Aspekte angepasst werden

muss und stark von einer nachhaltig ansteigenden Nachfrage in allen Teilbereichen der Elektromobilität abhängig ist.

Auch muss der OEM bereit sein, das Batterierisiko zu tragen. Ein Beispiel für einen solchen Integrator ist das Unternehmen BYD, das durch einschlägige Erfahrungen in der Batteriefertigung das Batterierisiko übernehmen kann und will. BYD möchte der weltweit führende Konzern für Elektroautos werden und unternimmt viel, um dieses Ziel zu erreichen. Um intensive Investitionen tätigen zu können, werden Kapitalerhöhungen sowie die anhaltende Rückendeckung der chinesischen Regierung als Bestandteil der Wachstumspläne des Unternehmens angestrebt (Mayer-Kuckuk 2010). Die Ausweitungen auf die Automobilmärkte der Triade werden im Bereich der Elektromobilität zunächst durch Kooperationen mit Energieversorgern wie RWE getätigt. Um in diesen Märkten eine lokale Akzeptanz von BYD zu erreichen, fehlt noch der Baustein Mobilitätskonzept. Der Einstieg in diesen Markt ist jedoch noch abhängiger von lokalen Gegebenheiten als etwa bei Ladestationen oder der Energieversorgung und erscheint deshalb für BYD in Deutschland erst nach der europäischen Markteinführung der Produkte möglich. Andere Automobilhersteller haben beim Teilssegment der Mobilitätsdienstleistung in Europa auf kurze Sicht mehr Chancen, wie das nächste Szenario zeigt.

Das Szenario der *Produkt- und Mobilitätsfokussierung* beschreibt den Mittelweg zwischen den beiden erläuterten Extremszenarien. In den Bereichen Ladeinfrastruktur und Energieversorgung werden Energieversorgungsunternehmen mittelfristig die Marktführerschaft beibehalten. Jedoch muss die dadurch auftretende Erhöhung der regionalen Kundennähe und -akzeptanz verstärkt in Betracht gezogen werden. Für den Automobilhersteller besteht das Risiko, dass Energieversorger gerade im Bereich der Mobilitätsdienstleistungen intensiv tätig werden, weil eine Zusammenführung von Ladevertrag und einem Nutzungsvertrag für ein Elektrofahrzeug sehr nahe liegt. Die Markenpräsenz spielt bei nachlassendem oder stagnierendem Fahrzeugverkauf in Deutschland eine wesentliche Rolle. Deswegen sollte auch die Mobilitätsdienstleistung, insbesondere das E-Carsharing, im Interessensbereich des Automobilherstellers liegen. Des Weiteren wird durch das Betreiben einer solchen Dienstleistung mit Elektrofahrzeugen explizit auf die veränderte Werteansicht der Kunden reagiert. Dadurch werden neue Kundentypen und Märkte erschlossen, die bisher nicht im Profil des zu betrachtenden Herstellers lagen. Gewiss beinhaltet das Modell der Mobilitätsdienstleistung eine Veränderung des bisherigen Geschäftsmodells, diese muss aber zunächst nicht zwangsläufig abhängig von Elektromobilität sein, sondern kann vorübergehend auch mit konventionellen Antrieben durchgeführt werden, wie etwa beim Geschäftsmodell des Carsharings. Dabei kann sich der OEM entweder der ergänzenden Partnerschaft mit etablierten Mobilitätsdienstleistern bedienen oder selbst als Dienstleister in den profitablen Markt einsteigen, so wie Daimler oder Peugeot mit ihren Carsharing-Angeboten. Die gezielte Auswahl der regionalen Standorte ist aufgrund von Pionier Vorteilen ein kritischer Erfolgsfaktor. Es erfordert aber auch eine gewisse Flexibilität des Geschäftsmodells, da in jedem urbanen Raum andere Rahmenbedingungen gegeben sind. Um Drittanbietern oder Energieversorgern mit nennenswerter Geschäftsfeldkompetenz nicht zu viel Spielraum

zu lassen, ist es darüber hinaus wichtig, Know-how und Mitbestimmung im Preis- und Abrechnungsmodell an den Ladestationen zu erlangen, um die Konkurrenz in einem weiteren Schritt innerhalb der Wertschöpfungskette unter Druck zu setzen. Auf der einen Seite muss deshalb das Downstreamsegment der Finanzdienstleistungen rund um das Elektrofahrzeug (Batterieleasing oder -tausch, Fahrzeugleasing und Finanzierung) durchdringend an die neuen Umstände angepasst werden. Dabei ist darauf zu achten, dass Mobilitätsmodelle nicht am klassischen Vertrieb des Fahrzeugherstellers vorbeigehen dürfen. Auf der anderen Seite muss durch den Hersteller in der Wertschöpfungskette Elektromobilität eine Entwicklung hin zu einem integrierten Ladeservice vollzogen werden, damit eine langfristige Marktführerschaft und Ausbreitung des Energieversorgers eingeschränkt werden kann und die führende Position in der automobilen Wertschöpfungskette durch den Automobilhersteller gehalten wird. Diese Entwicklung zu mehr Integration im Downstreamteil der Wertschöpfungskette kommt selbstverständlich auch daher, dass die Integration der Batterieherstellung im Upstreambereich abhängig ist von der finanziellen Stärke und dem Batterie-Know-how. Somit werden Wertschöpfungsanteile auf dieser Seite eher verloren als gewonnen.

Zusammenfassend sind die Erfolgsfaktoren dieses realistischen Szenarios der Produkt- und Mobilitätsfokussierung zum Ersten die verstärkte Nutzung des Mobilitätsservices durch die Kunden, zum Zweiten innovative Preis- und Abrechnungsmodelle, die sich geografisch flexibel zunächst an die Privatkunden richten und zum Dritten die gezielte regionale Auswahl der urbanen Zentren und deshalb die frühe Positionierung an diesen Standorten.

Die Mobilitätsdienstleistung ist also Wegbereiter in Richtung Wertschöpfungserweiterung durch Elektromobilität auf der Downstreamseite des OEM und kann zu einer integrierten Wertschöpfung führen, die durch mehr Kundennähe die Risiken und Unsicherheiten der momentanen Entwicklungen auffangen kann. Neue lokale Märkte und Kunden werden durch den zusätzlichen Service adressiert, wodurch mehr Wertschöpfungsanteile für den Automobilhersteller nutzbar gemacht werden.

#### **4.3.4.2 Geschäftsmodelloptionen aus Sicht der Automobilzulieferer**

Die produkttechnologische Kompetenz für Elektromobilität liegt zum großen Teil im Bereich der klassischen Automobilzulieferer. Der Wegfall, die Neueinführung und die Veränderung von Komponenten lassen die Systemkompetenz von Tier-1-Komponenten- und Modulherstellern hervortreten. Ein erfahrener Zulieferer kann sich dadurch als Portfolioanbieter der Elektromobilität mit Ambition zur Technologieführerschaft positionieren. Zu einem Geschäftsmodell für Automobilzulieferer gehört auch die Batterieproduktion, deren technologische Kompetenz heute hauptsächlich bei asiatischen Zellenherstellern liegt. Eine Integration von reinem Batteriewissen ist bei Zulieferern hoch im Kurs und beweist den Willen und die Stärke, dem Automobilhersteller auch in diesem Bereich spezialisierte Gesamtlösungen anbieten zu können. Dabei wird sich derjenige Spieler mit der größten Schnittstellenwirksamkeit durchsetzen und sich als Standardsetter etablieren können. Ein Standard, der sich bei den typischen Komponenten

eines Elektrofahrzeugs behaupten kann, wird außerdem den Kundennutzen positiv beeinflussen, da sich dieser durch hohe Stückzahlen preismindernd auswirkt.

Eine durchgängige Systemkompetenz von Zulieferern für Elektromobilitätskomponenten lässt die Einordnung dieses Modells in die Wertschöpfungsarchitektur des Schichtenspezialisten zu. Auch der angestrebte Weg zu einem umweltorientierten und hoch vernetzten Unternehmen unterstreicht den Übertrag von Geschäftsmodellkompetenzen in andere Industrien. Insbesondere im Bereich der vernetzten Informations- und Kommunikationstechnologie scheint der Hebel sinnvoll. Die größte Konkurrenz bilden bestehende Softwareunternehmen. Diesen muss der breite Einstieg in den Markt durch Erfahrung und automobiler Systemkompetenz verwehrt werden, ansonsten werden sich Unternehmen wie Apple oder SAP schnell im Kommunikationsmarkt positionieren. Große Automobilzulieferer müssen entsprechend in die Entwicklung des vernetzten Automobils investieren. Informationstechnologische Strukturen in der Mensch-Maschine-Kommunikation halten auch in Zukunft Telekommunikationsunternehmen. Dabei wird das Mobiltelefon die Schnittstelle zwischen Mensch und Ladesäule bzw. Elektrofahrzeug sein.

Die fehlende Kompetenz zur Ausprägung und zum Aufbau einer Marke wird an der Schnittstelle zum Automobilhersteller weiterhin bedeuten, dass Marken prägende Teile des Automobils vom Hersteller selbst entwickelt und produziert werden. Jedoch kann das neue zentrale Element des Traktionsmotors als Systemmodul mit einheitlichen Schnittstellen an den Fahrzeugproduzenten vertrieben werden. Insbesondere wenn große Tier-1-Zulieferer eine extensive Batteriekompetenz aufbauen, können sie sich als Systemanbieter für entsprechende Module branchenwertschöpfungsübergreifend positionieren. Das Wettbewerbsdenken in diesem Bereich ist durch die momentane asiatische Technologieführerschaft aber sehr intensiv. Auf lange Sicht werden diese Anbieter aufgrund der fehlenden Systemkompetenz für Automobile eine untergeordnete Rolle spielen.

Es bleibt festzustellen, dass Automobilzulieferer keine expliziten endkundennahen Geschäftsmodelle verfolgen werden. Weder wollen noch können sie zum Vollintegrator innerhalb der elektromobilen Wertschöpfungskette avancieren. Außerdem fordern die kapitalintensiven Investitionen in Forschung und Entwicklung elektrifizierter Komponenten eine Konzentration auf die bestehende Wertschöpfungsschicht in Verbindung mit deren Vernetzung. Aktivitäten, die downstream angesiedelt sind, werden von anderen Akteuren, wie etwa dem fokalen Akteur Automobilhersteller oder den Energieversorgern, geleistet.

#### **4.3.4.3 Geschäftsmodelloptionen aus Sicht der Energieversorger**

Energieversorger verfügen über ein breites Kompetenzspektrum. Insbesondere im Bereich der Stromnetzintegrität und der Bereitstellung einer Elektrizitätsinfrastruktur haben diese Unternehmen eine hohe Geschäftsfeldkompetenz. Um jedoch an der Wertschöpfung der Elektromobilität zu partizipieren, müssen sie Ballungsgebiete mit kapitalintensiven Ladeinfrastrukturen versorgen. Diese Investition wird teilweise durch die Einnahmen aus der über die Ladestationen verkauften Elektrizität rückfinanziert. Deshalb ist es von entscheidender Bedeutung, wer sich innerhalb der urbanen Zentren als Erster positionieren und sich einen lokalen Pioniervorteil

verschaffen kann. Auch haben die Energieversorgungsunternehmen langjährige Erfahrung in Abrechnungsmodellen mit Privatkunden. Dieses Konzept kann durch die Unternehmen sehr gut adaptiert werden. Hausstromverträge in Kombination mit Ladestrom für Elektrofahrzeuge werden ebenfalls ein Mittel sein, um die Kunden an den Versorger zu binden. Der positive Außenwirkungseffekt, der durch den Vertrieb von erneuerbaren Energien für Elektroautos auftritt, bleibt ein Nebeneffekt.

Das eigentliche Ziel der Energiewirtschaft ist die Nutzung der Batterien in Elektrofahrzeugen als dezentraler Energiespeicher innerhalb eines intelligenten Netzes. Dadurch ist Elektromobilität ein kleiner, aber wichtiger Bestandteil der langfristigen Netzplanung der Energieversorger. Der Verbraucher wird ein aktiver Bestandteil der Energieversorgung und kann seine individuellen Kosten senken, indem er in kleinem Maß Elektrizität zu geringen Preisen erwirbt und durch die Bidirektionalität zu einem geringfügig höheren Preis zurückspeisen kann. Das Vehicle-to-Grid-Prinzip wird deshalb ein wichtiger und akzeptabler Bestandteil werden, um den restriktiven energiepolitischen Regularien entgegenzuwirken. Die Energieknappheit und unausgewogene Belastung der Netze führt dazu, dass die Effizienz überregional und über Grenzen hinweg gesteigert werden muss. Hinzu kommt, dass Elektrizität aus erneuerbaren Energien zu bestimmten Abnehmersenken transportiert werden muss. Ein Smart Grid wird die dezentrale Speicherung möglich machen. Im Investitionsportfolio eines Energieversorgungsunternehmens ist folglich nicht nur Elektromobilität thematisiert. Im großen Maß müssen diese sich finanziell in den Aufbau von transregionalen Stromverteilungs- und Stromspeichersystemen, in verbesserte Messmöglichkeiten und -services (Smart Metering), den Ausbau von überregionalen Abrechnungssystemen (E-Roaming) und in die Kommunikation der Einheiten auf allen Ebenen (wie auch die zwischen Fahrzeug und Ladesäule) einbringen.

Zunächst werden sich die Energieversorger folglich auf die aktuellen Themen konzentrieren, die in Verbindung mit dem Kernkompetenzfeld der Elektrizitätserzeugung und -verteilung stehen. Bei der Elektromobilität werden sich die Geschäftsmodelle für die Energieversorger weiter an der Ladeinfrastruktur und neuartigen Abrechnungsmodellen orientieren. Größte Herausforderung wird hier die Technologie zur Kommunikation zwischen Netz, Ladestation und Fahrzeug sein. Eine Integration in Richtung Elektrofahrzeugherstellung wird aus den genannten Gründen vorerst nur durch strategische Kooperationen stattfinden. Die Unternehmen nehmen folglich die Rolle von Orchestratoren ein. Eine Vollintegration innerhalb der Wertschöpfungskette ist durch fehlende Kompetenzen in der Automobilproduktion und den größten Akteur in diesem Bereich, den Automobilhersteller, der einen hohen finanziellen Rückhalt hat, nicht möglich.

---

## 4.4 Zusammenfassung

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs und die veränderten Kundenbedürfnisse gegenüber Mobilität und Nachhaltigkeit führen zu einer veränderten Wertschöpfungskette upstream und downstream. Insbesondere bei disruptiven Veränderungsprozessen

muss die Antwort auf die Veränderungen frühzeitig entwickelt und evaluiert werden. Zur Konfiguration der Wertschöpfung in unterschiedliche Richtungen werden dazu Geschäftsmodelle der Elektromobilität verwendet. Dabei müssen je nach Endkundenorientierung bisherige Geschäftsmodelle verändert, angepasst oder neu kreiert werden. Sowohl für schon bestehende Akteure der Automobilbranche als auch für Dritte bieten sich in diesem Geschäftsfeld viele Herausforderungen, aber auch neue Potenziale. Intelligente Kooperationen sind entscheidend, um die Ertragspotenziale des Systems Elektromobilität zu erschließen.

Automobilproduzenten haben durch systemübergreifende Koordinationskompetenz die Chance, sich wertschöpfungsübergreifend zu positionieren (sog. Mega-OEM). Derzeit schließen sie upstream Kooperationen mit anderen Automobilproduzenten, um Risiken zu teilen und Entwicklungszeiten zu verkürzen. Die Kooperation mit Zulieferern eröffnet Lern- und Gewinnpotenziale im Bereich des elektrifizierten Antriebsstrangs. Automobilzulieferer kooperieren insbesondere mit bisher industriefernen Partnern, um als „Schichtenspezialisten“ in andere Märkte vorzudringen. Große Zulieferer kooperieren mit Batterieproduzenten, um zukünftig Batteriesysteme optimieren zu können. Große Ertragspotenziale der Elektromobilität eröffnen sich aufgrund eines sich verändernden Mobilitätsverständnisses im Downstreambereich der Wertschöpfungskette. Mit innovativen Geschäftsmodellen können neue Mobilitätsbedürfnisse bedient und gesteuert werden. Die zukünftigen Rollen der Akteure in diesem dienstleistungsnahen Geschäft werden derzeit entwickelt.

---

## Literatur

- Becker H (2006) High noon in the automotive industry. Springer, München
- Better Place (2011) Europe-wide Green eMotion Initiative to pave the way for electromobility. <http://www.betterplace.com/the-company-pressroom-pressreleases-detail/index/id/europe-wide-green-emotion-initiative-to-pave-the-way-for-electromobility>. Zugegriffen: 10. Juli 2012
- Canzler W et al (2007) DB Mobility – Beschreibung und Positionierung eines multimodalen Verkehrsdienstleisters. Innovationszentrum für Mobilität und gesellschaftlichen Wandel. <http://www.innoz.de/fileadmin/INNOZ/pdf/Bausteine/innoz-baustein-01.pdf>. Zugegriffen: 10. Juli 2012
- Deloitte (2009) Konvergenz in der Automobilindustrie: Mit neuen Ideen Vorsprung sichern. [http://www.deloitte.com/assets/DcomGermany/LocalAssets/Documents/de\\_mfg\\_studie\\_konvergenz-automobilindustrie.pdf](http://www.deloitte.com/assets/DcomGermany/LocalAssets/Documents/de_mfg_studie_konvergenz-automobilindustrie.pdf). Zugegriffen: 20. Mai 2011
- Glaum M, Hutzschenreuter T (2010) Mergers & Aquisitions: Management des externen Unternehmenswachstums. Kohlhammer, Stuttgart
- Kalmbach R et al (2011) Automotive landscapes 2025: opportunities and challenges ahead. Roland Berger Strategy Consultants
- Mayer-Kuckuk F (2010) Börsengang in China: Daimler-Partner BYD verfolgt ehrgeizige Wachstumspläne. Handelsblatt. <http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/boersengang-in-china-daimler-partner-byd-verfolgt-ehrgeizige-wachstumsplane;2641276>. Zugegriffen: 10. Dez 2010
- McKinsey (2009) Electrifying cars: how three industries will evolve. McKinsey Q 3:87–96
- McKinsey (2011) Boost! Transforming the powertrain value chain – a portfolio challenge

- Müller-Stewens G, Lechner C (2003) Strategisches Management: wie strategische Initiativen zum Wandel führen, der St. Galler General Management Navigator. Schäffer-Poeschel, Stuttgart
- Nationale Plattform für Elektromobilität (2010a) Bericht der AG-2 – Batterietechnologie für den Zwischenbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Service/publikationen,did=370824.html>. Zugegriffen: 10. Juli 2012
- Nationale Plattform für Elektromobilität (2010b) Bericht der AG-1 – Antriebstechnologie und Fahrzeugintegration für den Zwischenbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität: <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Service/publikationen,did=370858.html>. Zugegriffen: 10. Juli 2012
- NOW GmbH (2010) Steckbrief Modellregion Berlin/Potsdam. [http://www.now-gmbh.de/uploads/media/steckbrief\\_berlin.potsdam\\_01.pdf](http://www.now-gmbh.de/uploads/media/steckbrief_berlin.potsdam_01.pdf). Zugegriffen: 23. Mai 2011
- PWC (2010) Elektromobilität Herausforderungen für Industrie und öffentliche Hand, Frankfurt am Main
- Strebel H (2007) Innovations- und Technologiemanagement. WUV Universitäts-Verlag, Wien
- Throll M, Rennhak C (2009) Der Wandel der Wertschöpfungskette im Bereich der Hersteller. In: Rennhak C (Hrsg) Die Automobilindustrie von morgen: Wie Automobilhersteller und -zulieferer gestärkt aus der Krise hervorgehen können. Ibidem-Verlag, Stuttgart
- Valentine-Urbschat M, Bernhart W (2009) Powertrain 2020 – the future drives electric. Roland Berger. [http://www.rolandberger.ch/media/pdf/Roland\\_Berger\\_Powertrain\\_2020\\_20091001.pdf](http://www.rolandberger.ch/media/pdf/Roland_Berger_Powertrain_2020_20091001.pdf). Zugegriffen: 10. Juli 2012
- VDA (2008) Position zur Elektromobilität. [www.vda.de/files/abt\\_umwelt\\_elektromobilitaendfassung.pdf](http://www.vda.de/files/abt_umwelt_elektromobilitaendfassung.pdf). Zugegriffen: 20. Mai 2011
- Wallentowitz H et al (2010) Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges: Technologien, Märkte und Implikationen. Vieweg + Teubner, Wiesbaden
- Wyman O (2010) Elektrofahrzeugen gehört die Zukunft. [http://www.oliverwyman.com/de/pdf/files/Oliver\\_Wyman\\_Automotivemanager\\_I\\_2010\\_DE.pdf](http://www.oliverwyman.com/de/pdf/files/Oliver_Wyman_Automotivemanager_I_2010_DE.pdf). Zugegriffen: 20. Mai 2011

Dirk Morche, Fabian Schmitt, Klaus Genuit, Olaf Elsen,  
Achim Kampker und Bernd Friedrich

---

## 5.1 Fahrzeugklassen

Dirk Morche

### 5.1.1 Zulassungspflicht und Typgenehmigung

Jedes Kraftfahrzeug mit einer Bauart bedingten Geschwindigkeit von mehr als 6 km/h, das im öffentlichen Straßenverkehr betrieben wird, unterliegt einer

---

D. Morche (✉) · F. Schmitt · O. Elsen  
StreetScooter GmbH, Hüttenstra. 1-9, 52068 Aachen, Deutschland  
e-mail: morche@streetscooter.eu

F. Schmitt (✉)  
e-mail: schmitt@streetscooter.eu

O. Elsen (✉)  
e-mail: elsen@streetscooter.eu

K. Genuit (✉)  
Head Acoustics GmbH, Ebertstraße 30a, 52134 Herzogenrath, Deutschland  
e-mail: Klaus.Genuit@head-acoustics.de

A. Kampker (✉)  
Werkzeugmaschinenlabor (WZL), RWTH Aachen University, Steinbachstraße 19,  
52074 Aachen, Deutschland  
e-mail: a.kampker@wzl.rwth-aachen.de

B. Friedrich (✉)  
IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, RWTH Aachen University,  
Intzestrasse 3, 52072 Aachen, Deutschland  
e-mail: bfriedrich@ime-aachen.de

gesetzlichen Zulassungspflicht. Die Notwendigkeit einer solchen Zulassung ist in § 3 der Fahrzeugzulassungsverordnung 2011 (FZV) festgeschrieben.

In § 3 Absatz 1 FZV heißt es: Fahrzeuge dürfen auf öffentlichen Straßen nur in Betrieb gesetzt werden, wenn sie zum Verkehr zugelassen sind. Die Zulassung wird auf Antrag erteilt, wenn das Fahrzeug einem genehmigten Typ entspricht oder eine Einzelgenehmigung erteilt ist. Das bedeutet: Jedes Fahrzeug muss ein Typprüfungsverfahren oder eine Homologation durchlaufen. Der Umfang der Typprüfung richtet sich nach der sog. Fahrzeugklasse und der späteren Produktionsstückzahl. Voraussetzung für die Zulassung ist entweder eine Typp Genehmigung (EU oder national), eine Allgemeine Betriebserlaubnis (ABE) oder ein Gutachten eines amtlich anerkannten Sachverständigen für den Kraftfahrzeugverkehr zur Erlangung einer sog. Einzelbetriebserlaubnis (EBE).

Eine Typp Genehmigung ist das Verfahren, nach dem ein Mitgliedstaat bescheinigt, dass ein Typ eines Fahrzeugs, eines Systems, eines Bauteils oder einer selbstständigen technischen Einheit den einschlägigen Verwaltungsvorschriften und technischen Anforderungen entspricht (2007/46/EG 2007a).

Maßgeblich für die Typzulassung von Fahrzeugen innerhalb der EU und somit auch der Bundesrepublik Deutschland ist das europäische Rechtssystem. Die Einführung der EG-Fahrzeuggenehmigungsverordnung 2011 (EG-FGV) erfolgte zum 29. April 2009 und löst damit die nationale STVZO (Straßenverkehrszulassungsordnung 2009) zukünftig ab. Grundlage für die Einführung der EG-FGV ist die Richtlinie 2007/46/EG vom 5. September 2007 (2007/46/EG 2007a).

Ziel der damit befassten EU-Gremien war es, die Zulassung, den Verkauf und die Inbetriebnahme zu genehmigender Fahrzeuge innerhalb der EU zu erleichtern. Mit Einführung der EG-FGV gibt es keine Trennung mehr zwischen der Regelung in § 21 StVZO (Betriebserlaubnis für Einzelfahrzeuge) und der neuen durchzuführenden Einzelgenehmigung nach § 13 EG-FGV. Aus diesem Grund wurde auch § 21 StVZO entsprechend angeglichen. Die Anforderungen des § 13 EG-FGV für die Erfassung der Daten, nach denen amtlich anerkannte Sachverständige ihr Gutachten erstellen, wurden in den § 21 StVZO übernommen.

### **5.1.1.1 Technische Prüfstellen und Technische Dienste**

Neben den Sachverständigen der Technischen Prüfstellen können jetzt auch Sachverständige der beim Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) akkreditierten Technischen Dienste Gutachten nach § 13 EG-FGV erstellen. Diese Gutachten haben innerhalb der gesamten EU Gültigkeit.

Eine Begutachtung nach § 21 StVZO (Vollgutachten) bleibt jedoch weiterhin ausschließlich den Sachverständigen der Technischen Prüfstellen (TP) vorbehalten, die auch Gutachten nach § 13 EG-FGV erstellen dürfen. Dieser § 21 StVZO regelt die Betriebserlaubnis für Einzelfahrzeuge, Vollgutachten sind Pflicht für Fahrzeuge, die länger als 7 Jahre außer Betrieb gesetzt wurden.

### **5.1.1.2 Zulassungsarten**

Die unterschiedlichen Zulassungsarten sind geregelt in der Richtlinie 2007/46/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und

Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge. Die Vorschrift ersetzte mit Wirkung vom 29. April 2009 die Richtlinie 70/156/EG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Betriebserlaubnis für Kraftfahrzeuge und Kraftfahrzeuganhänger (70/156/EWG 1970).

Die neue Richtlinie gilt für die Typgenehmigung von Fahrzeugen, die in einer oder mehreren Stufen zur Teilnahme am Straßenverkehr konstruiert und gebaut werden, sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten, die für derartige Fahrzeuge konstruiert und gebaut sind. Sie schafft einen harmonisierten Rahmen mit den Verwaltungsvorschriften und allgemeinen technischen Anforderungen für die Genehmigung aller in ihren Geltungsbereich fallenden Neufahrzeuge und der zur Verwendung in diesen Fahrzeugen bestimmten Systeme, Bauteile und selbstständigen technischen Einheiten. Außerdem gibt sie Vorschriften für den Verkauf und die Inbetriebnahme von Teilen und Ausrüstungen für Fahrzeuge, die nach der Richtlinie genehmigt wurden.

Spezielle Anforderungen für den Bau und den Betrieb von Fahrzeugen sind in derzeit 58 Einzelrichtlinien festgelegt. Diese betreffen bspw. Grenzwerte für Schadstoffemissionen und den Geräuschpegel. Anhang IV von 2007/46/EG enthält eine Auflistung dieser Rechtsakte.

### 5.1.1.3 Einzelbetriebserlaubnis

Für die Zulassung eines Neufahrzeugs ohne EG-Typgenehmigung oder EG-Kleinserien-Typgenehmigung ist eine Einzelgenehmigung nach § 13 EG-FGV erforderlich. Mit Inkrafttreten der Richtlinie 2007/46/EG kann diese Genehmigung nur noch erteilt werden, wenn das Neufahrzeug den Anhängen IV oder XI der Richtlinie entspricht oder alternativ die Anforderungen der StVZO erfüllt, die vergleichbare Vorgaben an Verkehrssicherheit und Umweltschutz enthalten. Trotz der Regelungen des § 13 Abs. 3 EG-FGV (Genehmigung von Anträgen auf Einzelgenehmigung (Einzelbetriebserlaubnis)) bleibt das bisherige Einzelbetriebserlaubnisverfahren nach § 21 StVZO weiterhin bestehen, wurde aber dem Typgenehmigungsverfahren, insbesondere beim Prüf- und Nachweisverfahren, angepasst (Abs. 2–5). Dazu wurde § 21 StVZO (Betriebserlaubnis für Einzelfahrzeuge) im Zusammenhang mit der Genehmigung von Einzelbetriebserlaubnissen geändert.

Weiteres Ziel der EU ist es, die Zahl der Einzelgenehmigungen bundesweit zu verringern. Der Fahrzeughersteller muss ab einer bestimmten Anzahl jährlich hergestellter Fahrzeuge diese im Wege der Kleinserien-Typgenehmigung in den Verkehr bringen. Die Anzahl der mit Einzelgenehmigung zugelassenen Pkw (M1-Fahrzeuge) baugleichen Typs wird damit auf 20 % der für die Kleinserien-Typgenehmigung zulässigen Höchstzahl begrenzt.

Die Einführung einer Kleinserien-Typgenehmigung ist ebenfalls für weitere Fahrzeugklassen (bspw. N1, kleine Nutzfahrzeuge) geplant. Die Aufschlüsselung der davon betroffenen Fahrzeugtypen findet sich in § 2 FZV. Es handelt sich um Kraftfahrzeuge und Anhänger, für die Typgenehmigungen im Sinne folgender Verordnung erforderlich sind:

- Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007
- Richtlinie 2002/24/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. März 2002 für zwei- und dreirädrige Fahrzeuge und ihre Teile
- Richtlinie 2003/37/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Mai 2003 für land- und forstwirtschaftliche Fahrzeuge und ihre Teile

## 5.1.2 Fahrzeugklassen

### 5.1.2.1 Internationale Regelung der Fahrzeugklassen

Als Referenz für die Einteilung der Fahrzeugklassen gilt in nahezu allen Ländern weltweit die Richtlinie ISO 3833:1977 Road vehicles – Types – Terms and Definitions (ISO 3833:1977). Diese Richtlinie ist der ISO-Standard für Straßenfahrzeuge, deren Typen, Begriffe und Definitionen. Die Richtlinie definiert Begriffe im Zusammenhang mit den Arten von Straßenfahrzeugen nach bestimmten Konstruktionsmerkmalen und technischen Eigenschaften. Sie gilt für alle Fahrzeuge, die für den Straßenverkehr bestimmt sind. Ausgenommen sind landwirtschaftliche Zugmaschinen, die nur gelegentlich für die Beförderung von Personen oder Gütern auf der Straße eingesetzt werden.

### 5.1.2.2 Europäische und nationale Regelung der Fahrzeugklasse

Das jährlich vom KBA herausgegebene „Verzeichnis zur Systematisierung von Kraftfahrzeugen und ihren Anhängern“ umfasst folgende Gliederung (KBA 2009)

- Teil A 1A EU Fahrzeugklassen
- Teil A 1B Fahrzeug- und Aufbauarten (national)
- Teil A 2 Emissionsklassen
- Teil A 3 Kraftstoffarten und Energiequellen

In Teil B dieses Verzeichnisses werden jeweils analog zur Gliederung die auslaufenden Bezeichnungen gelistet. Er basiert auf der Richtlinie 2007/46/EG (ergänzt durch die Verordnung der Kommission Nr. 678/2011 vom 14. Juli) (2007/46/EG 2011) und unterteilt Kraftfahrzeuge und deren Anhänger in vier große Hauptklassen mit jeweiligen Untergruppen, wovon die ersten drei Klassen in Tab. 5.1 aufgeführt sind.

### 5.1.2.3 Fahrzeugunterklassen

Fahrzeugunterklassen beschreiben Fahrzeuge, die vom Aufbau oder dem Bestimmungszweck her nicht eindeutig einer der vier Hauptklassen zugeordnet werden können.

**Tab. 5.1** Übersicht der Fahrzeugklassen M, N und O

Klasse	Beschreibung
<b>M</b>	<b>Vorwiegend für die Beförderung von Fahrgästen und deren Gepäck ausgelegte und gebaute Kraftfahrzeuge.</b>
M 1	Fahrzeuge der Klasse M mit höchstens acht Sitzplätzen zuzüglich des Fahrersitzes, Fahrzeuge der Klasse M1 dürfen keine Stehplätze aufweisen. Die Anzahl der Sitzplätze kann dabei auf einen einzigen (d. h. den Fahrersitz) beschränkt sein. – EG-Kleinserientypgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 22: max. 1.000 Einheiten/Jahr – Nationale Typgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 23: max. 75 Einheiten/Jahr
M 2	Fahrzeuge der Klasse M mit mehr als acht Sitzplätzen zuzüglich des Fahrersitzes und mit einer Gesamtmasse von höchstens 5 Tonnen. – EG-Kleinserientypgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 22: 0 Einheiten/Jahr – Nationale Typgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 23: max. 250 Einheiten/Jahr
M 3	Fahrzeuge der Klasse M mit mehr als acht Sitzplätzen zuzüglich des Fahrersitzes und mit einer Gesamtmasse von mehr als 5 Tonnen. – EG-Kleinserientypgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 22: 0 Einheiten/Jahr – Nationale Typgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 23: max. 250 Einheiten/Jahr
<b>N</b>	<b>Vorwiegend für die Beförderung von Gütern ausgelegte und gebaute Kraftfahrzeuge.</b>
N 1	Fahrzeuge der Klasse N mit einer Gesamtmasse von höchstens 3,5 Tonnen. – EG-Kleinserientypgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 22: 0 Einheiten/Jahr – Nationale Typgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 23: max. 500 Einheiten/Jahr
N 2	Fahrzeuge der Klasse N mit einer Gesamtmasse von mehr als 3,5 Tonnen und höchstens 12 Tonnen. EG-Kleinserientypgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 22: 0 Einheiten/Jahr Nationale Typgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 23: max. 250 Einheiten/Jahr
N 3	Fahrzeuge der Klasse N mit einer Gesamtmasse von mehr als 12 Tonnen. – EG-Kleinserientypgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 22: 0 Einheiten/Jahr – Nationale Typgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 23: max. 250 Einheiten/Jahr
<b>O</b>	<b>Anhänger, die sowohl für die Beförderung von Gütern und Fahrgästen als auch für die Unterbringung von Personen ausgelegt und gebaut sind.</b>
O 1-2	Anhänger der Klasse O 1–2 mit einer Gesamtmasse von bis zu 3,5 Tonnen. – EG-Kleinserientypgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 22: 0 Einheiten/Jahr – Nationale Typgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 23: max. 500 Einheiten/Jahr
O 3-4	Anhänger der Klasse O 3–4 mit einer Gesamtmasse von bis zu 3,5 Tonnen. – EG Kleinserientypgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 22: 0 Einheiten/Jahr – Nationale Typgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 23: max. 250 Einheiten/Jahr

### *Geländefahrzeug*

Es handelt sich um ein Fahrzeug, das entweder der Klasse M oder N angehört und spezifische technische Merkmale aufweist, die seine Verwendung im Gelände ermöglichen.

### *Fahrzeug mit besonderer Zweckbestimmung*

Dieses Fahrzeug zählt zur Klasse M, N oder O und weist spezifische technische Merkmale auf, mit denen eine Funktion erfüllt werden soll, für die spezielle Vorkehrungen bzw. eine besondere Ausrüstung erforderlich sind. Beispielklassen hierfür sind: SA (Wohnmobile), SB (beschussgeschützte Fahrzeuge) und SC (Krankentransportwagen).

### **5.1.2.4 Fahrzeugklasse L**

Eine Besonderheit stellt die Fahrzeugklasse L dar. Grundlage dafür ist die Richtlinie 2002/24/EG vom 18. März 2002 über die Typgenehmigung für zweirädrige oder dreirädrige Kraftfahrzeuge und zur Aufhebung der Richtlinie 92/61/EWG. Durch diese Richtlinie wird die vollständige Anwendung des Typgenehmigungsverfahrens erstmals auch für diese Fahrzeugklasse möglich. Die Fahrklasse(n) L gelten gemäß dieser Richtlinie für zwei-, drei- und vierrädrige Kraftfahrzeuge. Aufgrund der besonderen Rahmenbedingungen dieser Fahrzeugklasse können hier leicht Fahrzeuge mit Elektroantrieb realisiert werden (Tab. 5.2).

**Tab. 5.2** Übersicht der Fahrzeugklasse L

Klasse	Beschreibung
L 1e	Zweirädrige Kleinkrafträder mit einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von bis zu 45 km/h und einem Hubraum von bis zu 50 cm <sup>3</sup> bei Verbrennungsmotoren oder einer maximalen Nenndauerleistung von bis zu 4 kW bei Elektromotoren.
L 2e	Dreirädrige Kleinkrafträder mit einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von bis zu 45 km/h und einem Hubraum von bis zu 50 cm <sup>3</sup> bei Verbrennungsmotoren oder einer maximalen Nutzleistung von bis zu 4 kW bei Elektromotoren.
L 3e	Krafträder, d. h. zweirädrige Kraftfahrzeuge ohne Beiwagen mit einem Hubraum von mehr als 50 cm <sup>3</sup> bei Verbrennungsmotoren und/oder einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von mehr als 45 km/h.
L 4e	Krafträder mit Beiwagen
L 5e	Dreirädrige Kraftfahrzeuge, d. h. mit drei symmetrisch angeordneten Rädern ausgestattete Kraftfahrzeuge mit einem Hubraum von mehr als 50 cm <sup>3</sup> bei Verbrennungsmotoren und/oder einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von mehr als 45 km/h.
L 6e	Vierrädrige Leichtkraftfahrzeuge mit einer Leermasse von bis zu 350 kg, ohne Masse der Batterien im Falle von Elektrofahrzeugen, mit einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von bis zu 45 km/h und einem Hubraum von bis zu 50 cm <sup>3</sup> bei Verbrennungsmotoren oder einer maximalen Nutzleistung von bis zu 4 kW bei Elektromotoren. Diese Fahrzeuge müssen den technischen Anforderungen für dreirädrige Kleinkrafträder der Klasse L 2e genügen, sofern in den Einzelrichtlinien nichts anderes vorgesehen ist.
L 7e	Vierrädrige Kraftfahrzeuge, die nicht unter Klasse L 6e fallen, mit einer Leermasse von bis zu 400 kg (550 kg im Falle von Fahrzeugen zur Güterbeförderung), ohne Masse der Batterien im Falle von Elektrofahrzeugen, und mit einer maximalen Nutzleistung von bis zu 15 kW.

### 5.1.3 Fahrzeugklassen für Elektrofahrzeuge

Die FZV definiert keine eigene Fahrzeugklasse für Elektrofahrzeuge. Die heute am Markt erhältlichen Elektrofahrzeuge sind daher bislang hauptsächlich in den „klassischen“ Fahrzeugklassen M1 für Pkw zu finden (bspw. Mitsubishi iMiEV) oder in der Klasse N1 für kleine Nutzfahrzeuge bis 3,5 t (bspw. EcoCarrier).

Mit den Klassen L 5e bis L 6e wurden nun Fahrzeugklassen geschaffen, die erstmals explizit die Möglichkeit eines Elektroantriebs mit einer maximalen Nutzleistung von bis zu 15 kW erwähnen. Sind leichte zwei- oder dreirädrige Kleinkrafträder mit bis zu 4 kW elektrischer Antriebsleistung im Rahmen der Bestimmungen der Fahrzeugklassen L 1e und L 2e noch recht problemlos und zuverlässig zu realisieren, so stößt man bei den Fahrzeugklassen L 5e/L 7e doch schnell an technische Grenzen bei der passiven Sicherheit.

Besonders kritisch ist die Fahrzeugklasse L 7e, die nur eine Begrenzung der Fahrzeugmasse (Leergewicht ohne Batterien 400 bzw. 550 kg) und der Motorleistung (15 kW) kennt, aber keine Begrenzung der Höchstgeschwindigkeit. Geht man bspw. von einer Lithium-Ionen-Batterie mit 10 kWh Leistung aus, ergibt sich für ein solches Fahrzeug bei einem Batteriegewicht von rund 100 kg zuzüglich Fahrer (75 kg) eine Gesamtfahrzeugmasse (Gesamtgewicht) von unter 600 kg. Bei einer Motorleistung von 15 kW kann dieses Fahrzeug innerhalb von 5–6 Sekunden auf 50 km/h beschleunigen und leicht eine Höchstgeschwindigkeit von über 100 km/h erreichen.

Diese Fahrzeuge gelten gemäß der Richtlinie trotzdem nur als dreirädrige Kraftfahrzeuge und müssen daher nur den technischen Anforderungen der Klasse L 5e genügen, sofern in den Einzelrichtlinien nichts anderes vorgesehen ist. Die Prüfumfänge und -nachweise für solche L 5e/L 7e-Fahrzeuge sind im Vergleich zu einem klassischen Pkw (Fahrzeugklasse M1) deutlich geringer. Deshalb versuchen speziell chinesische Fahrzeughersteller, über diese Fahrzeugklassifizierung auf dem europäischen Markt Fuß zu fassen. So stammen über 90 % der sog. „Quads“ aus chinesischer Produktion.

Auch für Elektrofahrzeuge zeigt sich der Trend, die Fahrzeuge so zu designen bzw. auszulegen, dass sie noch in die Kategorie L 7e fallen. Beispiele dafür finden sich in Europa wie der AIXEM-Mega und der MUTE (TU München) oder der Tazzari-ZERO. Da an diese L 5e/L 7e-Fahrzeuge keine gesetzlichen Anforderungen für Crashesicherheits-Nachweise gestellt werden, bedeutet die mögliche Unfallkonstellation: „Frontalzusammenstoß L 7e-Fahrzeug mit einem deutlich schwereren Pkw“ im Hinblick auf die inkompatiblen Fahrzeugmassen (600 kg vs. 1.500–2.000 kg) bei gleichzeitig fehlenden Airbags unfalltechnisch einen „worst case“. Deshalb fordert die Unfallforschung der Versicherer, dass die Sicherheitsstandards von Leichtkraftfahrzeugen an die von Pkws angepasst werden müssen. Leichtfahrzeuge sollten darüber hinaus serienmäßig mit aktiven und passiven Sicherheitselementen ausgerüstet werden (GDV 2006).

## 5.2 Entwicklungsprozess

Fabian Schmitt

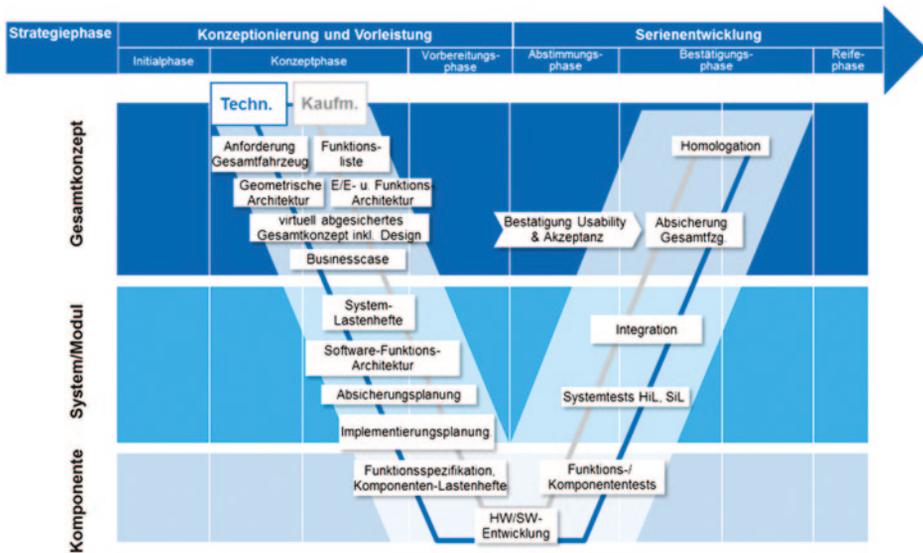
Seit seiner Erfindung vor mehr als 125 Jahren hat sich das grundlegende Konzept des Automobils nicht signifikant geändert und die Weiterentwicklung war eher evolutiv-natur. Der Entwicklungsprozess eines Automobils jedoch war dramatischen Änderungen unterworfen. Was früher die Arbeit eines (einzelnen) herausragenden Ingenieurs über viele Jahre war, ist heute ein hochkomplexes, vernetztes Zusammenspiel von Spezialisten aus verschiedensten Disziplinen.

Die Synchronisation der dezentralen (Sub-)Prozesse der Entwicklung sowie deren komplexe gegenseitige Wechselwirkungen müssen auf einem relativ hoch aggregierten Level zentral gesteuert werden. Hierfür existiert keine generelle Lösung und die Planung und Kontrolle der Entwicklung bis in die untersten Prozessebenen bleibt aufgrund des steten Wandels des Prozesses, der Entwicklungspartner, der technischen Weiterentwicklungen der Komponenten und Systeme, der Märkte, der Kundenanforderungen und des stets verbleibenden Restrisikos noch nur teilweise realisierbar. Auf der operativen Ebene des Entwicklungsprozesses, selbst bei den effizientesten OEMs, läuft die Entwicklung zu einem überraschend hohen Anteil auf einem Ad-hoc-Prozess. Dieser basiert eher auf den individuellen Erfahrungen der Mitarbeiter und der zu dem Zeitpunkt gegebenen Notwendigkeiten als auf einem methodisch sauber erstellten Entwicklungsplan (Weber 2009).

Die Entwicklung eines Purpose-Design-Elektrofahrzeugs differenziert sich schon aufgrund seiner eigenständigen Architektur gegenüber dem konventionellen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Darüber hinaus halten mit Elektro- und Hybridfahrzeugen zahlreiche „neue“ Komponenten und komplexe Systeme, vor allem im Bereich des Antriebsstrangs, Einzug in das Fahrzeug. Für diese fehlen z. T. Erfahrungswerte bei der Entwicklung, Fahrzeugintegration, Testing, Produktion, Montage sowie den Serviceanforderungen, was eine verlässliche Planung zusätzlich erschwert. Darüber hinaus erfordert die Entwicklung eines Elektrofahrzeugs ein interdisziplinäres System-Know-how und Expertise in den neuartigen Komponenten, die in den derzeitigen Strukturen eines OEMs zur Entwicklung eines konventionellen Fahrzeugs nicht bzw. nur unzureichend vorhanden sind.

Das etablierte Prozessmodell zur Entwicklung, das V-Modell in Abb. 5.1, erlaubt ein tieferes Verständnis des Zusammenspiels der verschiedenen Prozesse im Laufe der Fahrzeugentwicklung. Die Spezifikation des zu entwickelnden Fahrzeugs mit seinen gewünschten Eigenschaften bildet die Ausgangsbasis auf Gesamtfahrzeuglevel. Entlang des ersten Zweigs des V-Modells erfolgt auf der Ebene des Systems bis hin zur Komponente – ausgehend vom Gesamtfahrzeuglastenheft – die Spezifikation der Teilsysteme und deren simulative Überprüfung der Auslegung bis hin zum Einzelkomponentenlastenheft, die Konstruktion und Evaluation der Teile.

Auf dem zweiten aufsteigenden Ast des V-Modells erfolgt analog zum ersten Ast hierarchisch, nur diesmal in umgekehrter Reihenfolge, die Validierung der Einhaltung



**Abb. 5.1** V-Modell zur Produktentwicklung

der Lasten, ausgehend von der Komponentenebene über die Systemtests bis hin zur Integration in das Gesamtfahrzeug. Der automobiler Entwicklungsprozess erfordert mehrere Stufen der Validierung in Prototypen unterschiedlichster Reifegrade. Jeder dieser Reifegrade repräsentiert einen eigenen kleinen Entwicklungsprozess in sich selbst, daher setzt sich das V-Modell für die Entwicklung von Fahrzeugen aus vielen untergeordneten V-Modellen zusammen (Rausch und Broy 2008).

Neben dem rein technischen methodischen Ansatz des V-Modells ergeben sich weitere Anforderungen und Herausforderungen an einen modernen Entwicklungsprozess, die ständigen Änderungen unterliegen bzw. in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen haben:

- Effiziente, virtuelle, konzernintegrierte Entwicklungsumgebung
- (Zeit, Kosten, Qualität, Usability, Interoperability ...)
- Datenkonformität und -integrität
- Integrationsmanagement
- Komplexitätsmanagement
- Einsatz von Multi-CAD
- CAE-Datenintegration
- Datensicherheit
- Projektplanung und -management (Zeit, Kosten, Qualität, Risiko ...)
- Digitale Prozessdefinitionen, Workflow-Management
- Modulare Produktarchitektur
- Variantenmanagement

- Gleich- und Normteilemanagement
- Softwaremanagement
- Compliance
- Kommunikationsmanagement
- Procurementmanagement
- Einhaltung weltweiter legal Requirements
- ...

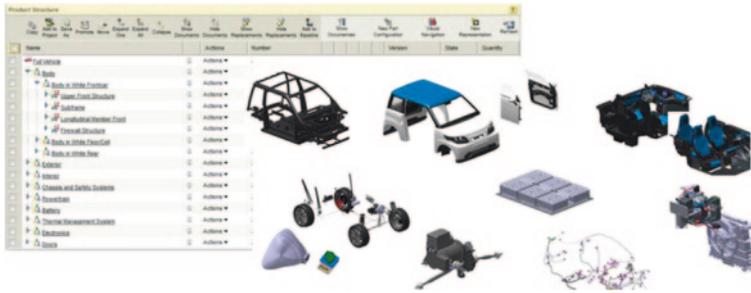
Besonders der Bereich der virtuellen Entwicklung und Absicherung von Fahrzeugen hat in den letzten zwei Jahrzehnten eine dramatische Entwicklung genommen. Während anfänglich 3-D-CAD-Programme nur benutzt wurden, um später 2-D-Fertigungszeichnungen abzuleiten, sind die Anforderungen an eine integrale Architektur für eine gemeinsame virtuelle Entwicklungsumgebung als zentrale Kommunikationsplattform in den letzten Jahren massiv gestiegen und stellen viele OEMs vor die Aufgabe, ihre Strukturen anzupassen (s. Abb. 5.2).

Die virtuelle Entwicklungsumgebung bzw. die Software Product Life Cycle Management (PLM) verbindet mit der Bill of Material (BOM) als zentrale Struktur des Systems (s. Abb. 5.3) alle relevanten Informationen und erleichtert die Überwachung und das Datenmanagement in der Entwicklung:

- Spezifikationen
- Test- und Validierungsdaten
- Life-Cycle-Informationen
- Workflows
- Compliance-Informationen



**Abb. 5.2** Definition einer integralen Architektur zur gemeinsamen virtuellen Entwicklung. *Quelle* PTC 2012



**Abb. 5.3** BOM als Struktur der virtuellen Entwicklungsumgebung

- E/E- und Software-Informationen und -Daten
- Multi-CAD-Integration
- Digital Mock-up
- CAE-Daten
- Variantenmanagement und Produktkonfiguration
- Suppliermanagement
- Kosteninformationen
- Produktionsplanung
- Service-Informationen
- ...

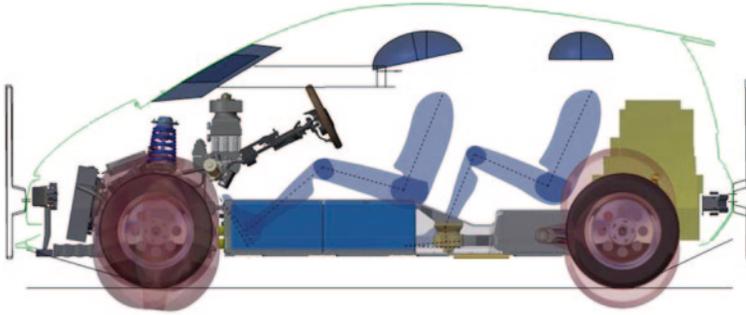
### 5.3 Package für Elektrofahrzeuge

Fabian Schmitt

Das Package organisiert und harmonisiert die Anforderungen an die Bauräume, die Ergonomie und die Gesamteigenschaften eines Fahrzeugs und begleitet dieses von der Idee bis zum Serienanlauf. Dabei ist die Verwaltung der Gesamtfahrzeuggeometriedaten und die Sicherstellung ihrer Aktualität in jeder Entwicklungsphase ebenfalls Aufgabe des Packages (Abb. 5.4).

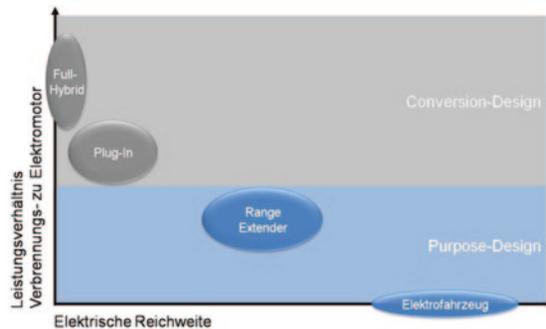
Da primär das Äußere und das Innere eines Fahrzeugs die Blicke der Kunden auf sich zieht, Emotionen weckt und letztlich mit über den Kauf entscheidet, wird eine Designtrendbestimmung auf der Basis der ersten CAD-Modelle durchgeführt. Die Herausforderung liegt darin, möglichst ideale Proportionen nicht nur anzustreben, sondern auch innerhalb der technischen, finanziellen und dimensionellen Vorgaben umzusetzen (Grabner und Nothhaft 2006).

Die ersten CAD-Modelle des Packageentwurfs werden maßgeblich bestimmt durch die Abmaße, die durch die Marktpositionierung des Fahrzeugs vorgegeben



**Abb. 5.4** Future Steel Vehicle 3-D-Package. *Quelle* Future Steel Vehicle (o. J.)

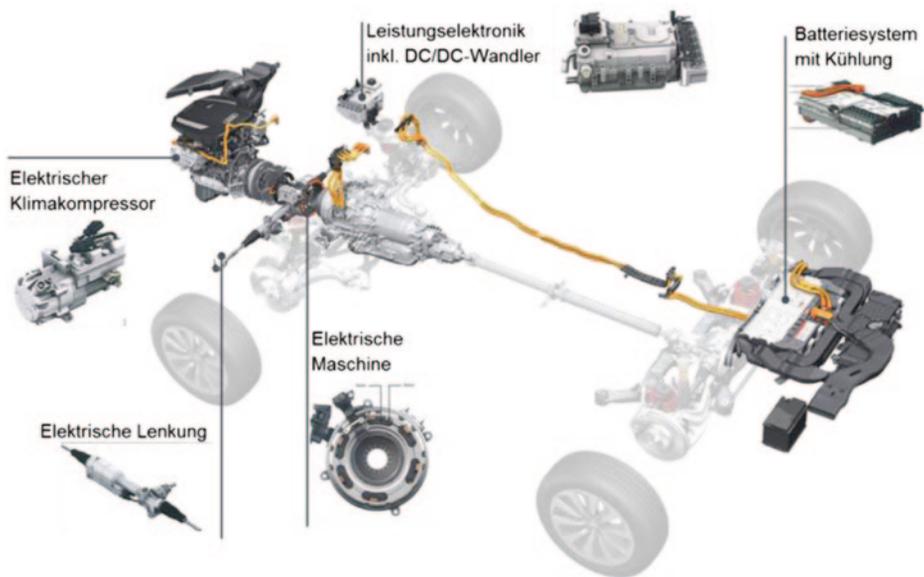
**Abb. 5.5** Mit zunehmender Elektrifizierung des Antriebsstrangs steigt der Bedarf eines eigenständigen Purpose-Design-Packageentwurfs für Elektrofahrzeuge. *Quelle* Eigene Darstellung



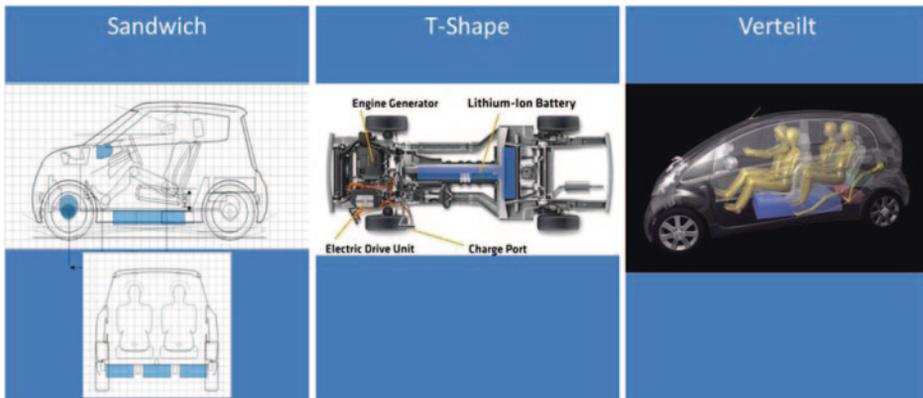
sind, die rechtlichen Bestimmungen sowie Komfort- und Sichtanforderungen des Seating-Packages, den Strukturentwurf sowie die Komponenten und die Topologie des Antriebsstrangs und des Fahrwerks. Durch den Wandel bzw. die (teilweise) Ersetzung dieser Komponenten gegenüber dem „klassischen“ Packageentwurf des Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor verändert sich auch grundsätzlich der Packageentwurf für ein reines Elektrofahrzeug. Abbildung 5.5 verdeutlicht den Bedarf der Anpassung des Packageentwurfs gegenüber dem konventionellen Entwurf mit zunehmender elektrischer Reichweite, ausgehend vom Full- und Plug-in-Hybrid über das Range-Extender-Fahrzeug hin zum reinen Elektrofahrzeug.

Besonders die neuen bzw. geänderten Komponenten des Antriebsstrangs, Batteriesystem, elektrischer Motor, Umrichter, Ladeinfrastruktur, Hoch-Volt-Bordnetz und Thermomanagement eines Elektrofahrzeugs sowie deren sichere Integration in das Fahrzeug machen ein gegenüber dem konventionellen Fahrzeug neuartiges und unkonventionelles Package notwendig. Abbildung 5.6 zeigt die packagebestimmenden Komponenten in einer eher konventionellen Anordnung mit geringer elektrischer Reichweite.

Hierbei ist vor allem das Batteriesystem neben dem Seating-Package die bestimmende Komponente für die Auslegung des Packageentwurfs. Die Positionierung des Batteriesystems im (Unter-)Boden des Fahrzeugs (s. Abb. 5.7) ist aufgrund der Größe



**Abb. 5.6** Packagebestimmende Komponenten der Elektromobilität. *Quelle* Audi AG (2012)



**Abb. 5.7** Unterschiedliche Ansätze des Batteriepackages im Fahrzeugboden. *Quelle* RWTH Aachen (2009), Adam Opel AG (2012), Honda und Yoshida (2007)

und des Gewichts des Systems aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und besonders unter sicherheitstechnischen Aspekten der zu bevorzugende Bauraum. Hierbei kann man zwischen drei Integrationsstrategien in den Boden unterscheiden:

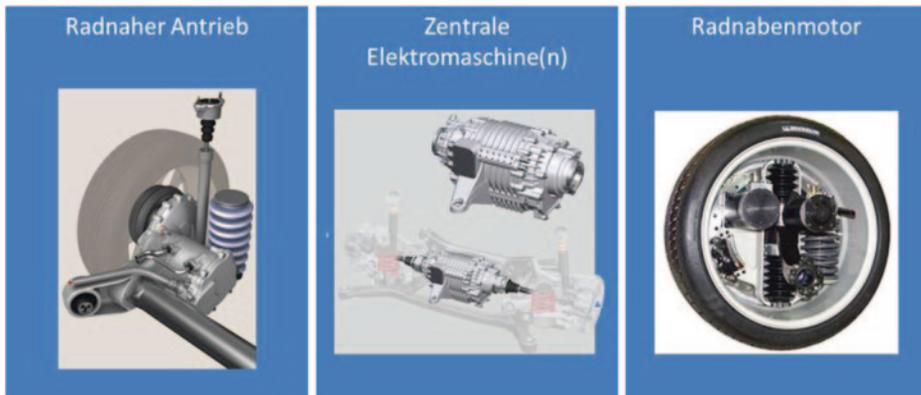
- Sandwichbodenintegration (bspw. StreetScooter)
- T-Shape (bspw. Opel Ampera)
- Verteilte (Split-)Anordnung (bspw. Mitsubishi iMiev)

Bei der Integration in den Fahrzeugboden kann durch einen Sandwich-Boden und unter Berücksichtigung der Crashstrukturen die maximale Fläche zur sicheren Integration des Batteriesystems genutzt werden. Weiterhin bietet dieser Ansatz das höchste Potenzial zur Ausnutzung von Synergieeffekten zwischen den Baureihen bzw. die kundenindividuelle Skalierung des Batteriesystems durch eine (geometrisch einfache Form der) Modularisierung des Batteriesystems. Gerade weil das Batteriesystem mit zu den größten Kostentreibern im Fahrzeug gehört und die Stückzahlen derzeit noch begrenzt sind, ist dieser Ansatz gegenüber einer gesplitteten Anordnung der Batterien unter den Sitzen der Frontpassagiere und der Rücksitzbank (Packageraum für das Tanksystem bei konventionellen Fahrzeugen) bzw. der T-Anordnung (Getriebetunnel und unter der Rücksitzbank) der zielführende Ansatz für ein reines Elektrofahrzeug im Purpose-Design. Gegenüber der T-Shape- und der verteilten Anordnung der Batterie induziert die Sandwichbauform ein leicht höheres Fahrzeug, das bei der Umsetzung der Fahrzeugproportionen zu berücksichtigen ist.

Gleich bei allen drei Anordnungen ist die Auslegung auf den Seitencrash (besonders Pfahlaufprall) des Fahrzeugs. Ziel hierbei ist, eine Beschädigung des Batteriesystems im Crashfall zu vermeiden. Daher sehen alle Anordnungen eine ausreichend große Deformationszone mit Crashelementen und einer steifen Querabstützung vor.

Ein weiterer Vorteil der zentralen Anordnung des Energiespeichers sowie weiterer Hoch-Volt-Komponenten ist die Flexibilität der Antriebstopologie, die einen Front-, Heck- oder kombinierten Antrieb des Fahrzeugs mit 1–4 Maschinen mit kurzen Anbindungslängen des Hoch-Volt-Netzes erlaubt. Die derzeit häufigste Topologie ist eine Zentralmaschine mit Reduktionsgetriebe und mechanischem Differential im Front- bzw. Heckantrieb. Fahrdynamisch weist der Heckantrieb Vorteile gegenüber dem Frontantrieb auf, hat aber meistens einen kleineren Kofferraum zur Folge. Ebenfalls einen besonderen Einfluss auf das Package haben der Maschinentyp und die Realisierung des Differentials. Die zentrale Maschine mit mechanischem Differential beansprucht hierbei den größten Bauraum. Durch den Einsatz von zwei Elektromotoren an einer Achse kann auf ein mechanisches Differential verzichtet und deutlich kompakter gebaut werden. Weitere Packagevorteile können realisiert werden, wenn die Elektromaschinen baulich geteilt in Richtung Rad als radnaher Antrieb ausgelegt werden. Der Freiheitsgrad im Package wird maximiert durch die vollständige Integration des Antriebs (und des Fahrwerks) in das Rad als Radnabenantrieb (Abb. 5.8).

Durch die Ausnutzung der neuen Gestaltungsmöglichkeiten des Packages für Elektrofahrzeuge ergeben sich somit (zukünftig) neue Designmöglichkeiten. Die vollständige Integration des Antriebs (Batteriesystem, Motor, Umrichter, Fahrwerk, ...) in die Bodengruppe scheint realisierbar und wird besonders bei der Modularisierung des Fahrzeugs als auch bei der Erschließung neuer Innenraumkonzepte dem Elektrofahrzeug neue Wege ebnen.



**Abb. 5.8** Beispiel für die unterschiedliche Integration der Elektromaschine. *Quelle* ZF Friedrichshafen AG (2001), Audi AG (2012), Michelin (2004)

## 5.4 Funktionale Auslegung

### 5.4.1 Noise, Vibration, Harshness (NVH)

Klaus Genuit

#### 5.4.1.1 NVH – Aufgaben in den vergangenen Jahren

Die Akustik in Verbindung mit wahrnehmbaren Schwingungen, im Automobilbereich unter dem Sammelbegriff NVH (Noise Vibration Harshness) zusammengeführt, hat sich als ein wesentlicher Baustein erfolgreicher Fahrzeugentwicklung etabliert. Mit der sukzessiven Verringerung der verbrennungsmotorbedingten Innengeräusche in den letzten Jahrzehnten stieg ihre Bedeutung weiter an. Mit Fahrzeuginnengeräuschen werden Leidenschaft und Emotion vermittelt, die allgemeine Wertanmutung gesteigert und mitunter ein ganzes Produktimage inszeniert. Diese Möglichkeiten erkannten Automobilhersteller frühzeitig und entwickelten entsprechende Methoden und Werkzeuge zur NVH-Optimierung. Denn positive Erlebnisse sind die Basis für Kundenzufriedenheit und Markentreue.

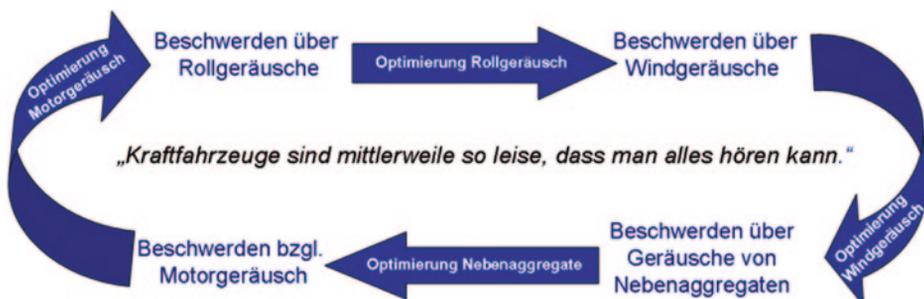
Im Allgemeinen interessieren sich Kunden nicht für Normen und Vorschriften im Bereich des Komforts, er wird während der Fahrt multisensuell empfunden, bewertet und Attribute wie „billig“, „exklusiv“, „sportlich“ oder „luxuriös“ dem Produkt zugeordnet. Dabei ist für den akustischen Komfort nicht nur die Wechselwirkung von Hören und Schwingungsempfindung wichtig, sondern gleichfalls müssen der Kontext, die Erwartungshaltung der Zielgruppe, das Produktimage und die generellen Produktassoziationen mit einbezogen werden.

Anfänglich bestand die wesentliche Arbeit der Akustikingenieure darin, die akustische Belastung durch das Motorengeräusch für die Insassen zu verringern und auf ein

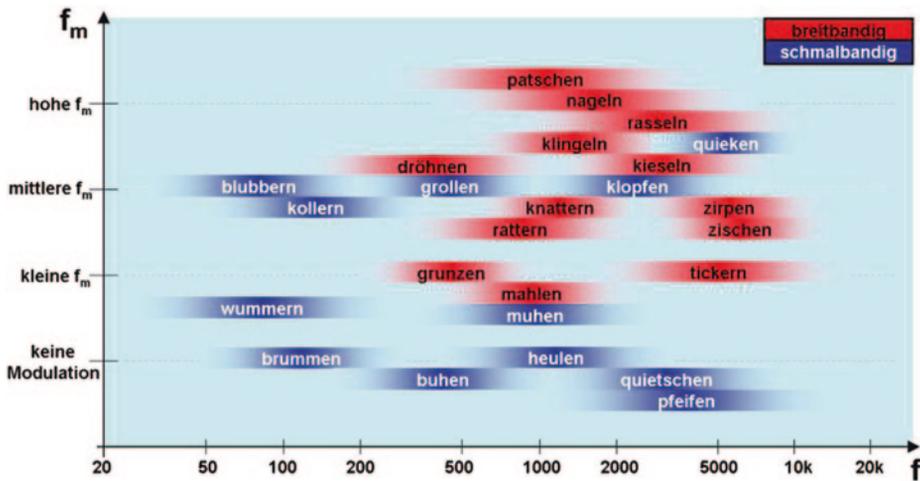
zumutbares Geräuschniveau zu bringen, d. h., den Schalldruckpegel am Insassenohr deutlich zu reduzieren.

Das Thema Geräuschqualität rückte dann Anfang der 1980er Jahre vermehrt in den Fokus. Den Automobilherstellern wurde bewusst, dass Sound-Design mehr bedeutet, als nur den Schalldruckpegel zu reduzieren. Letztendlich musste konstatiert werden, dass viele Geräuschphänomene nicht mit einem Messmikrofon und reinen Schalldruckpegelbetrachtungen identifiziert werden können. Die binaurale Messtechnik zur gehörrichtigen Aufnahme und Wiedergabe wurde damit ein fester Bestandteil im Prozess der Fahrzeugentwicklung (Genuit 2010). Ebenfalls hielt die Psychoakustik Einzug in die Fahrzeugakustik, mit deren Hilfe gehörbezogene Geräuschbewertungen vorgenommen wurden. Denn Geräuschphänomene wie Pfeifen, Brummen, Poltern, Wummern, Quietschen, Nageln können nicht auf der Grundlage zeitlich gemittelter Schalldruckpegel behandelt werden. Diese Geräusche beeinflussen ungeachtet ihres geringen energetischen Beitrags wesentlich die Gesamtbeurteilung des Fahrzeuginnengeräusches. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden umfangreiche Studien zur Geräuschqualität durchgeführt, in denen Aspekte der menschlichen Signalverarbeitung und der analytisch-physikalischen Bestimmung von Geräuschqualität unter zunehmender Berücksichtigung der Psychoakustik behandelt wurden. Dass das Thema auch zukünftig diskutiert werden muss, wie Abb. 5.9 schematisch verdeutlicht, liegt nicht nur an der Komplexität des Untersuchungsgegenstandes. Das menschliche Gehör ist adaptiv und kann sich dem aktuellen Geräuschniveau anpassen. Es weist eine hohe Sensitivität für zeitliche und spektrale Muster nahezu ungeachtet des Schalldruckpegels auf.

Nachteilige Geräusche wie das Hinterachsheulen wurden bereits vor mehr als einem Jahrzehnt erfolgreich um einige dB reduziert. Damit konnte erreicht werden, dass das Geräusch durch andere Geräuschquellen maskiert und nicht mehr beanstandet wurde. Das Problem schien gelöst. Nachdem allerdings die Optimierung der Geräuschqualität im Fahrzeug fortschritt und verschiedene Geräuschquellen permanent optimiert wurden, resultierend in einem leiseren Gesamtgeräusch, ist das Geräuschphänomen Hinterachsheulen wieder verstärkt wahrzunehmen und verlangt nach neuer Optimierung.



**Abb. 5.9** Prozess der Fahrzeuggeräuschoptimierung



**Abb. 5.10** Typische Störgeräusche im Bereich NVH und deren charakteristische Eigenschaften (Bandbreite, Modulationsfrequenz, spektrale Ausprägung)

Dies gilt für alle Geräuschphänomene im Fahrzeuginnenraum. Die Reduzierung des akustischen Beitrags einer Geräuschquelle führt zur Hörbarkeit anderer Geräuschquellen, die unter Umständen dann ebenfalls der Optimierung bedürfen. Auf vorhandene ungewollte Geräusche zu reagieren und diese mittels „Troubleshooting“ zu minimieren bzw. zu beseitigen, prägte die Arbeit der Akustikingenieure in den letzten Jahrzehnten (s. Abb. 5.10). Aktuelle Anforderungen im Bereich des akustischen Komforts verlangen allerdings auch nach gestalterischen Überlegungen, es muss aktiv am resultierenden Geräuscherlebnis im Fahrzeug gearbeitet werden.

### 5.4.1.2 NVH in der Zukunft

Obwohl die Prävention und Behandlung von Störgeräuschen nach wie vor zu den Kernaufgaben des Akustikingenieurs zählt, rückt das aktive Gestalten der Akustik vermehrt in den Vordergrund. Durch den Wegfall des Verbrennungsmotors bei alternativen Antrieben ist das Potenzial gegeben, signifikant die Lautstärke des Fahrzeuginnengeräusches zu reduzieren. Dadurch könnten sich auch die Anforderungen an das Sound-Engineering dramatisch ändern: Die sukzessive und stetige Optimierung des Verbrennungsmotors wird abgelöst. Das Fahrzeuginnengeräusch muss nun aktiv „komponiert“ und akustische Feedbacks müssen vollkommen neu gestaltet werden. Der Übergang von klassischen Aufgaben in den Bereichen akustischer Komfort, NVH und Sound-Design zu neuen Herausforderungen und Konzepten ist dabei fließend (Genuit und Fiebig 2011).

Grundsätzlich erfordern strengere EU-Abgasbestimmungen bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung im Spannungsfeld hoher Umweltverträglichkeit eine enge Zusammenarbeit mit Motorenherstellern (Pletschen 2010). Gefordert werden

Downsizing, kleinere, leichtere Fahrzeuge, hoch aufgeladene Motoren, Hybridantrieb und vollständige Elektrotraktion. Alle diese Entwicklungen werden neue NVH-Konfliktsituationen hervorrufen. So kann bspw. die parallele Existenz des elektrischen und verbrennungsmotorischen Antriebs in Hybrid-Fahrzeugen zu Geräusch- und Schwingungsproblemen führen, die aus herkömmlichen Automobilen nicht bekannt sind. Betriebsgeräusche der elektrischen Antriebskomponenten und das Betriebsverhalten des Verbrennungsmotors mit plötzlichem Starten und Abschalten sind ungewohnt. Insgesamt sollte ein harmonisches, unauffälliges Zusammenspiel dieser Geräuschquellen realisiert werden, das auch die Betrachtungen von Vibrationsanregungen umfasst (Genuit und Fiebig 2007). Wichtig dabei ist, dass stets als integrativer Bestandteil der Mess- und Analyseketten das Hören eingebunden wird. Nur so lässt sich sicherstellen, dass Maßnahmen und Modifikationen tatsächlich die intendierte Wirkung entfalten. Daher ist der Einsatz binauraler Mess- und Wiedergabetechnik unverzichtbar. Daneben werden psychoakustische und weitere gehörbezogene Analysen benötigt, die wichtige Informationen über Intensität, Charakter, spektrale Verteilung und zeitliche Struktur spezieller Geräuschphänomene bereitstellen.

Für die Ableitung zielgerichteter konstruktiver Maßnahmen ist es zwingend erforderlich, Geräuschquellen und Übertragungswege detailliert zu kennen. Hier findet das Verfahren der Transferpfadanalyse Anwendung (Genuit et al. 1997). Durch die Trennung von Quelle und Übertragungsweg wird nicht nur eine zuverlässige Identifikation der Ursachen für akustische Konflikte ermöglicht, sondern sogar mithilfe der binauralen Transferpfadsynthese (BTPS) ist eine gehörmäßige Abschätzung des Potenzials simulierter Modifikationen möglich. Damit lässt sich sicherstellen, dass vorgeschlagene Modifikationen hörbar die gewünschte Wirkung erzielen. Erfolgreiches NVH und Sound-Design sind also nur zu erreichen, wenn vorhandene Methoden und Werkzeuge aufeinander abgestimmt und im Hinblick auf das Erlebnis des Gesamtfahrzeugs eingesetzt werden.

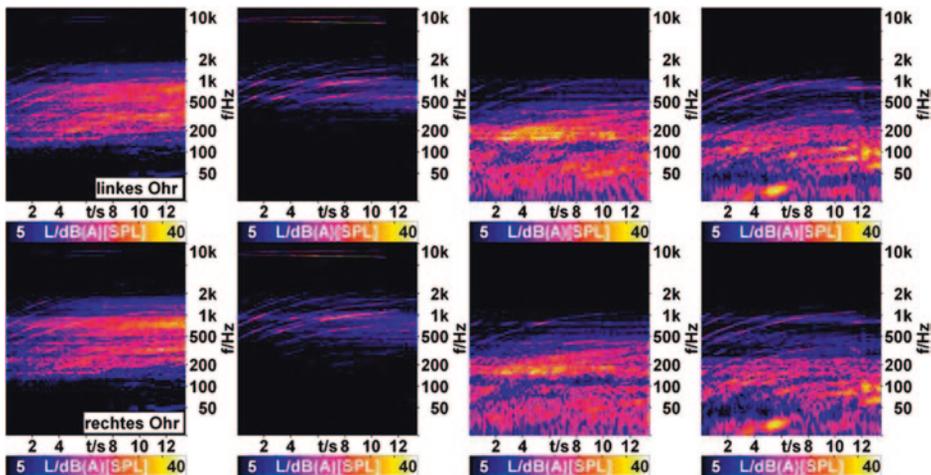
### 5.4.1.3 Fahrzeuginnengeräusche

Trotz der deutlichen Reduzierung des Innengeräuschpegels beim Elektrofahrzeug aufgrund des Wegfalls eines Verbrennungsmotors können zahlreiche akustische Konfliktsituationen auftreten. So sind bspw. störende Stromrichtergeräusche im hochfrequenten Bereich zu befürchten, deren Hörerlebnis im Kontext von Fahrzeuginnengeräuschen ungewohnt ist. Neben der konstanten Schaltfrequenz des Stromrichters entstehen drehzahlabhängige Seitenbänder. Der resultierende Sound ist unangenehm und lästig.

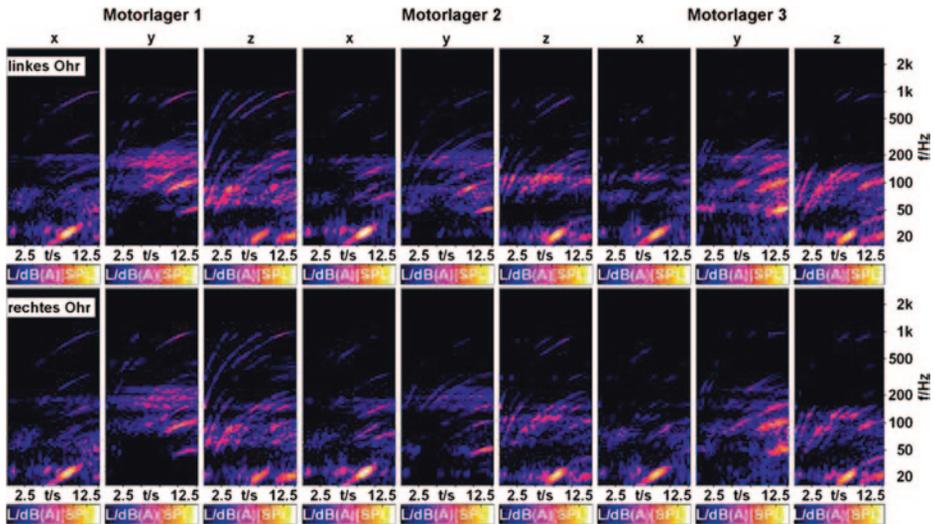
Ferner werden der Elektromotor und das Getriebe als wesentliche Geräuschquellen akustisch optimiert werden müssen. Die elektromagnetischen Ordnungen des Elektromotors können deutlich wahrnehmbar sein (engl. whine noise). Dies wird oft mit dem Sound einer Straßenbahn verglichen, aus der eben jenes Geräuschmuster hinreichend bekannt ist. Dass diese Phänomene nicht isoliert betrachtet werden dürfen, soll im Folgenden verdeutlicht werden.

Zur exemplarischen Illustration zukünftiger NVH-Themen werden die Ergebnisse aus einer Untersuchung an einem Hybridfahrzeug-Prototyp kurz vorgestellt. Mithilfe diverser Prüfstandsmessungen wurde ein integriertes Transferpfadmodell vom untersuchten Fahrzeug erstellt, in dem die einzelnen Geräuschpfade durch Übertragungsfunktionen beschrieben und die entsprechenden Geräuschbeiträge durch Filterung im Betrieb gemessener Quellsignale synthetisiert wurden. Auf diese Weise lassen sich die Geräuschanteile der einzelnen Quellen und die Übertragungswege separat analysieren. Das Transferpfadmodell wurde um die Synthetisierung von Vibrationen an den wesentlichen Kontaktstellen erweitert, um die Problematik von Geräusch- und Schwingungskonflikten bei Hybridfahrzeugen angemessen zu berücksichtigen und realistische Simulationen im Fahrsimulator zu ermöglichen.

Abbildung 5.11 zeigt ein Teilergebnis der binauralen Transferpfadanalyse in einer *FFT-über-Zeit*-Darstellung. Die Fast-Fourier-Transformation (FFT) erlaubt die Transformation aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich. Die ermittelten Frequenzspektren können, wie in Abb. 5.11 gezeigt, über der Zeit dargestellt werden, wobei die Amplituden der Frequenzen farbkodiert werden. Zu sehen sind die Anteile des Elektroantriebs für den Luft- und Körperschall am Innengeräusch. Die Spektrogramme verdeutlichen bereits, dass die durch Magnetkräfte verursachten höheren Ordnungen vom Elektromotor zwischen 500 Hz und 2 kHz nicht nur als Körperschall, sondern auch als Luftschall übertragen werden (Sellerbeck und Nettelbeck 2010). Darüber hinaus ist erstaunlicherweise zu konstatieren, dass derartige Geräuschkomponenten ebenfalls vom Umrichter abgestrahlt werden, zusätzlich zu den zu erwartenden Schaltfrequenzen.



**Abb. 5.11** Spektrogramme von den Geräuschanteilen des Elektroantriebs am Innengeräusch bei einer Beschleunigung von 0 auf 50 km/h. Von links nach rechts: Luftschallbeitrag des Elektromotors, Luftschallbeitrag des Umrichters, Körperschallbeitrag der Antriebswellen, Körperschallbeitrag des Elektromotors, FFT über Zeit

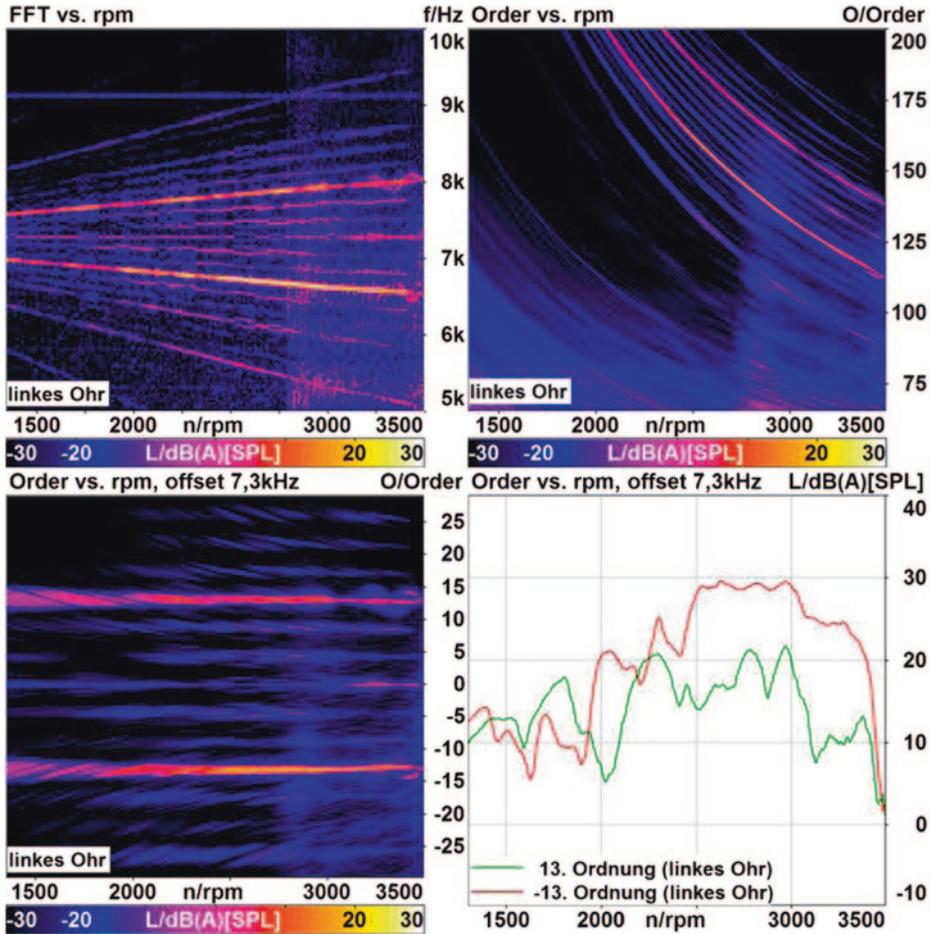


**Abb. 5.12** Spektrogramme von den Geräuschanteilen des Elektromotors (Körperschall über Motorlager) am Innengeräusch (Beschleunigung von 0 auf 50 km/h), FFT über Zeit

Nähere Untersuchungen am Fahrzeug ergaben, dass das Verbindungskabel zwischen Umrichter und Elektromotor eine wesentliche Körperschallbrücke war. Dadurch wirkte das Umrichtergehäuse als „Lautsprecher“ für die Elektromotorgeräusche. Durch den Einsatz eines weniger steifen Kabels könnte diese Geräuschübertragung reduziert werden.

Mithilfe der in Abb. 5.11 skizzierten Analysen können bereits erste Anforderungen für Maßnahmen zur Optimierung der Geräuschqualität abgeleitet werden. Die Geräuschanteile lassen sich für die Erarbeitung detaillierter Modifikationsvorschläge weiter spezifizieren. Abbildung 5.12 schlüsselt bspw. die Geräuschanteile des Elektromotors, die über Körperschall in den Innenraum gelangen, für die entsprechenden Motorlager für die x-, y- und z-Richtung auf. Der Vorteil ist, dass die relevanten Geräuschmuster unmittelbar einzelnen Pfaden bzw. Koppelstellen zugeordnet werden können. Es kann bspw. abgeleitet werden, dass die störenden höherfrequenten Ordnungen des Elektromotors (whine noise) hauptsächlich über das Motorlager 1 übertragen werden. Ferner wird ein auffälliger Schalleintrag um 50 Hz über die y-Richtung übertragen. Ein tieffrequentes Brummen wird im Bereich um 20–30 Hz in x- und z-Richtung übertragen, womit auf eine Nickbewegung des gesamten Aggregats um die y-Achse geschlossen werden kann.

Weiterhin wird es im zukünftigen Sound-Engineering erforderlich sein, sich detailliert mit dem akustischen Beitrag des Umrichters auseinanderzusetzen, um einen hohen akustischen Komfort gewährleisten zu können. Abbildung 5.13 zeigt links oben den akustischen Hauptbeitrag des Umrichters am Fahrerohr. Die erste Ordnungsanalyse verdeutlicht, dass für das Umrichtergeräusch der einfache Bezug zur Motordrehzahl nicht adäquat ist. Die fächerförmigen Ordnungen (Seitenbänder) um die Schaltfrequenz des Umrichters sind gut zu erkennen, sie stellen letztlich ein Nebenprodukt der Pulsweitenmodulation dar.



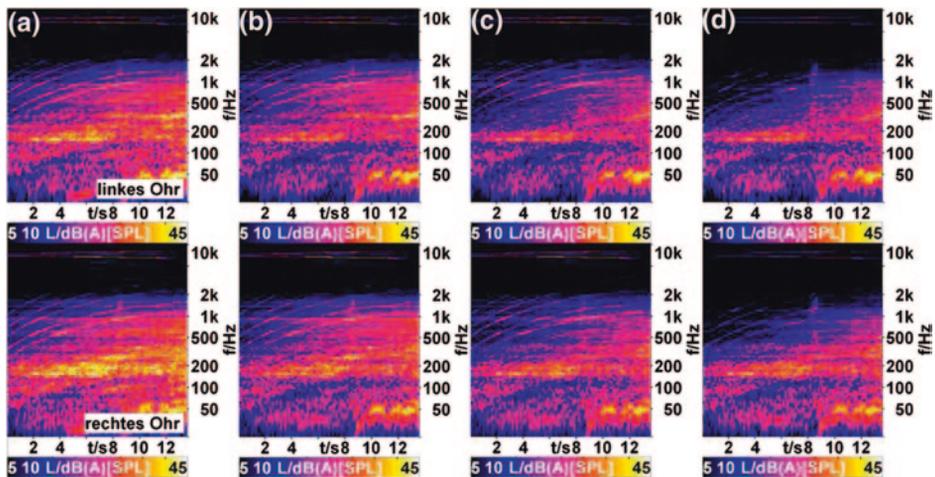
**Abb. 5.13** Spektrogramme vom originalen Innengeräusch (Zoom in den höherfrequenten Bereich) für das linke Ohr; von oben links nach unten rechts: FFT über Drehzahl, Ordnungsspektrum über Drehzahl, Ordnungsspektrum mit Frequenzversatz (7,3 kHz) über Drehzahl, Ordnungspegel über Drehzahl (mit Frequenzversatz von 7,3 kHz)

Die Ordnungen des Umrichters verlaufen nicht proportional zur Motordrehzahl ( $n \cdot \text{Drehzahl}/60$ ), sondern stellen sich als geschwungene Kurvenverläufe im konventionellen Ordnungsspektrum dar. Mithilfe einer Ordnungsanalyse, bei der die Schaltfrequenz des Umrichters als „Frequenzversatz“ eingestellt wird, lässt sich eine weitere sinnvolle Ordnungsanalyse durchführen. Die Ordnungen können im Gegensatz zur Betrachtung ohne Versatz nun auch negativ sein, da einige Ordnungen mit steigender Drehzahl eine Abnahme der Frequenz aufweisen. Das Ordnungsspektrum mit einem Frequenzversatz von 7,3 kHz zeigt unmittelbar, dass die (um die Schaltfrequenz des Umrichters verschobenen) 13. Ordnungen am auffälligsten sind. Der Abstand der Seitenbänder (26 Ordnungen) entspricht

der Polpaarzahl des verwendeten Elektromotors, d. h., pro Umdrehung werden 26 Polpaare durchlaufen. Die Darstellung der relevanten Ordnungspegel ermöglicht schließlich eine detaillierte Einschätzung der Bedeutung dieser akustischen Beiträge.

Die Vorteile eines umfangreichen Transferpfadmodells liegen in der direkten technisch-analytischen sowie hörbaren Abschätzung der Auswirkungen bestimmter Modifikationen. Abbildung 5.14 zeigt eine sukzessive virtuelle Optimierung, in der zuerst die Entkopplung des Elektromotors unter Einbeziehung der Lager- und Struktursteifigkeiten verbessert wurde. Dadurch ließ sich bereits eine höhere Isolation in einem weiten Frequenzbereich erreichen. Ferner wurden Luftschallkapselungen von dem Elektromotor und nachfolgend vom Umrichter simuliert. Obwohl die Kapselung des Umrichters (Änderung von *c* zu *d*) nur zu einer Schalldruckpegelabnahme von 1 dB führte, zeigt das Spektrogramm die deutliche Reduzierung des Stromrichtergeräusches um 7 kHz, verbunden mit einer erheblichen hörbaren Verbesserung der Geräuschqualität (Genuit und Fiebig 2011).

Eine Herausforderung im Bereich des akustischen Komforts bei alternativen Antrieben ist es, Analysen zu entwickeln, die eine zuverlässige Identifikation von perzeptiv auffälligen spektralen und zeitlichen Mustern erlauben. Da der Schalldruckpegel im Innenraum leiser Fahrzeuge weiter als akustischer Indikator an Bedeutung verlieren wird, werden psychoakustische Größen benötigt, die eng mit dem Geräuschqualitätsempfinden verbunden sind. Diese werden als Zielgrößen im Fahrzeugentwicklungsprozess stärkere Anwendung und Verbreitung finden. Gerade die adäquate Analyse wahrgenommener Tonhaltigkeit wird aufgrund der höherfrequenten Beiträge von Elektromotor, Umrichter oder von auffälligen Getriebegeräuschen besonders relevant sein.



**Abb. 5.14** Spektrogramme vom originalen Innengeräusch **a** und von simulierten Optimierungsmaßnahmen (**b**: Optimierte Lagerung des Elektromotors, **c**: **b** und eine zusätzliche Luftschallkapselung des Elektromotors, **d**: **b**, **c** und eine zusätzliche Luftschallkapselung des Umrichters) für eine Beschleunigung von 0 auf 50 km/h, FFT über Zeit

Neben der beschriebenen Vorgehensweise zur Verbesserung der Innengeräusche von Hybrid- und Elektrofahrzeugen, in denen Störgeräusche und unerwünschte Geräuschkombinationen reduziert werden, bedarf es zur Optimierung des akustischen Komforts grundsätzlich konzeptioneller Überlegungen. Gerade die konzeptionelle Gestaltung und Auslegung von Innengeräuschen von Elektrofahrzeugen erscheint noch vollkommen offen. Wie können Image und Markenkennwerte akustisch vermittelt werden? Sollte nur der vorhandene Elektromotorsound akustisch optimiert werden?

Eine einfache Aufrechterhaltung des vorhandenen Elektromotorsounds greift zu kurz. Markendifferenzierung, Emotionalisierung und Fahrfreude lassen sich damit nur bedingt forcieren. Die Verwirklichung von Konzepten, die vom konstruktionsbedingt gezielten Einbringen von speziellen Sounds und Geräuschkomponenten bis hin zur vollständig künstlichen Erschaffung eines Fahrgeräusches reichen können, ist grundsätzlich denkbar. Derartige Entwicklungen werden stärker denn je an intendierte Leitmotive gekoppelt werden, kreierte Geräuschkulissen im Spannungsfeld von Komfort und Emotion. Fahr simulatoren, wie in Abb. 5.15 exemplarisch dargestellt, müssen zur Ermittlung der gewünschten Innengeräusche eingesetzt werden (Genuit 2008).

Um eine geeignete Geräuschkulisse für zukünftige Automobile erarbeiten zu können, bedarf es neben der Anwendung verschiedener Simulationswerkzeuge auch der Anwendung kontext-sensitiver Methoden, die der Komplexität des Untersuchungsgegenstandes gerecht werden. Beispielsweise erlaubt das Verfahren Explorative-Vehicle-Evaluation (EVE) eine kontext-sensitive Datenerhebung sowie eine Ableitung von kundenorientierten Zielgeräuschen (Schulte-Fortkamp et al. 2006). Hierbei findet die Datenerhebung im realistischen Umfeld Fahrzeug statt und Versuchsteilnehmer können frei und spontan Eindrücke, Impressionen, Empfindungen und Assoziationen äußern. Verbalisierte Urteile werden mit den dazugehörigen fahrzeug-technischen und akustischen Daten aufgezeichnet und zusammen mit weiteren Informationen aus zusätzlichen Interviews ausgewertet (Fiebig et al. 2005).

Letztendlich können geeignete Sounds für zukünftige Fahrzeuge aber nur mit gezielter interdisziplinärer Zusammenarbeit gefunden und erfolgreich realisiert werden.



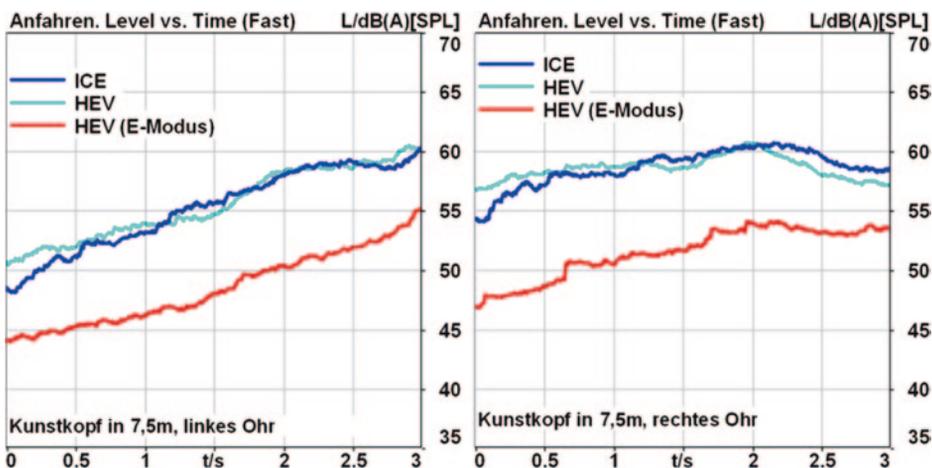
**Abb. 5.15** Fahr simulatoren; links: stationärer Fahr simulator (mit Videoprojektion), rechts: mobiler Fahr simulator (auf der Straße)

#### 5.4.1.4 Fahrzeugaußengeräusche

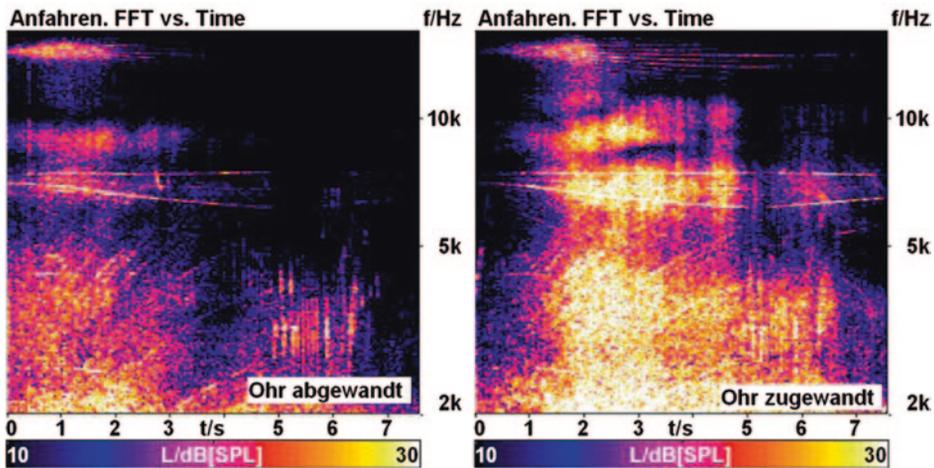
Die Thematik zukünftiger Außengeräusche ist Bestandteil kontroverser Diskussionen und gesellschaftlich weitreichender Debatten. Grundsätzlich ist mit einer zunehmenden Elektrifizierung des Individualverkehrs bzw. dem Aufkommen neuer alternativer Antriebskonzepte die Hoffnung verbunden, innerstädtischen Straßenverkehrslärm erheblich und nachhaltig zu reduzieren. Abbildung 5.16 zeigt, dass bei geringen Geschwindigkeiten von einer Verringerung der akustischen Emission aufgrund des elektrischen Antriebs ausgegangen werden kann. Der Schalldruckpegelverlauf verdeutlicht, dass bei dem gemessenen Hybridfahrzeug (HEV) bei Wegfall des verbrennungsmotorischen Antriebs eine Pegelreduktion bis zu 10 dB möglich ist. Bei höheren Geschwindigkeiten verringert sich die Reduzierung erheblich, da das Reifen-Fahrbahngeräusch dominant wird. Bei Geschwindigkeiten von über 30 km/h ist die Verringerung des Schalldruckpegels bereits zu vernachlässigen.

Allerdings ist mit der Pegelreduktion des Außengeräusches nicht automatisch von einer erheblichen Reduzierung der Lästigkeit von Straßenverkehrsgeräuschen auszugehen. Einerseits ist eine tatsächliche Pegelverringerung nur für geringe Geschwindigkeiten zu erwarten. Andererseits sind im Außengeräusch des Elektrofahrzeugs auffällige Geräuschkomponenten zu konstatieren, die lästig und störend sind. Abbildung 5.17 zeigt das Außengeräusch eines Serienfahrzeugs für eine Anfahrtsituation. Deutlich sind die durch die Magnetkräfte des Elektromotors bedingten höheren Elektromotor-Ordnungen im Frequenzbereich zwischen 2–4 kHz zu erkennen.

Darüber hinaus ist ein sehr störendes Stromrichtergeräusch um 7 kHz festzustellen. Hier laufen die Ordnungen auseinander, wodurch eine permanente Änderung der Modulation stattfindet. Dieses akustische Muster wiederholt sich um 14 kHz.



**Abb. 5.16** Vorbeifahrtmessung einer Anfahrtsituation, Schalldruckpegel über Zeit



**Abb. 5.17** Vorbeifahrtmessung einer Anfahrtsituation eines Elektrofahrzeugs (Serienfahrzeug), FFT über Zeit

Ein diffiziles und heftig diskutiertes Thema im Bereich des Außengeräusches zukünftiger Kraftfahrzeuge betrifft die vermeintliche Gefahr des Überhörens leiser Fahrzeuge. Ein erhöhtes Gefahrenpotenzial für Kollisionen mit Fußgängern ermittelte die US-amerikanische NHTSA, die über den Zeitraum von 2000–2007 Unfallstatistiken auswertete (NHTSA 2009). Auf der Grundlage dieser Studie werden zur Gefahrenvermeidung akustische Warnsignale befürwortet. Die tatsächliche Aussagekraft dieser viel zitierten Studie wird allerdings kontrovers diskutiert und deren methodische Schwächen vielfach angemahnt (siehe Sandberg et al. 2010). Ungeachtet dessen planen die USA und Japan bereits Gesetze zur Gewährleistung von Mindestgeräuschpegeln. Auch die UNECE empfiehlt die Entwicklung eines Warnsystems zur besseren Hörbarkeit von leisen Fahrzeugen (UNECE 2011). Das primäre Ziel ist es, dem Wunsch der generellen Vermeidung von Verkehrstoten erheblich näher zu kommen. Dennoch müssen effiziente Lösungen erarbeitet werden, die ein Minimum an unnötigem Lärm verursachen. Denn aktuelle Studien der WHO führen aus, dass jedes Jahr in Folge von gesundheitsschädlichen Auswirkungen durch Verkehrslärm in Europa eine Mio. Lebensjahre „verloren“ gehen und 1,8 % aller Herzinfarkte Verkehrslärm zuzurechnen seien (WHO 2011). Daher bedarf es der Entwicklung seriöser Konzepte und intelligenter Lösungen fernab eines überstürzten Aktionismus, die weit über die einfache Emission von akustischen Signalen im Bereich niedriger Geschwindigkeiten hinausgehen müssen (Genuit 2011).

#### 5.4.1.5 Ausblick

Akustikingenieure sehen sich mit neuen Herausforderungen bei steigenden Komfortansprüchen und zunehmendem Wettbewerbsdruck konfrontiert. Neben den notwendigen Bemühungen zur Emissionsreduktion im Prozess der Fahrzeugentwicklung

wird weiterhin die Erfüllung emotionaler Bedürfnisse von potenziellen Kunden einen besonderen Stellenwert einnehmen. Dabei spielen der empfundene akustische Komfort und das Thema NVH eine außerordentlich essentielle Rolle. Geräusche werden permanent bewusst oder unbewusst registriert und interpretiert und erste Empfindungen manifestieren sich unmittelbar in einem schwer zu korrigierenden Qualitätseindruck. Daher wird aktives Sound-Design zunehmend erforderlich werden: konzeptionell die Akustik gestalten, anstatt nur auf ungewollte Geräusche zu reagieren. Denn ein Fahrzeug wird nicht nur gefahren, es wird – auch oder gerade bei zukünftigen neuartigen, alternativen Antrieben – multisensorisch erlebt und danach bewertet. Es geht nicht allein darum, die Geräusche des Elektromotors, Umrichters oder Getriebes zu optimieren, vielmehr muss die Gesamtkomposition harmonisch abgestimmt werden. Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.

Vor diesem Hintergrund stehen die Ingenieure im Automobilbereich vor einer besonderen Revolution in der Aufgabenstellung. Nach einer über 120-jährigen kontinuierlichen Entwicklung im Automobilbereich, in der der Verbrennungsmotor schrittweise optimiert wurde, kommen neue Antriebs- und Energieversorgungskonzepte auf sie zu, die neuer Betrachtungsweisen bedürfen.

## **5.4.2 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)**

Olaf Elsen

### **5.4.2.1 Einführung**

Für die Entwicklung von Elektrofahrzeugen ist der Aspekt der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) von großer Bedeutung. Neben dem konventionellen Bordnetz müssen Systeme zur Speicherung der elektrischen Energie, Steuerung und elektrischer Antrieb auf einer wesentlich höheren Spannungsebene in das Fahrzeug integriert werden. Die Kopplung zwischen den verschiedenen Netzwerken im Fahrzeug sowie der weiteren Umgebung führt zu anspruchsvollen Herausforderungen bei der Realisierung der EMV.

Ein Elektroantrieb enthält bspw. einen leistungsstarken Umrichter, der EMV-Probleme verursachen kann, sowie einen Energiespeicher, der diese Leistung bereitstellen kann. Dieser Energiespeicher (bei Elektro- und Hybridfahrzeugen) ist die Hoch-Volt-Batterie, nach heutigem Entwicklungsstand ein Lithium-Ionen-Batteriepaket mit einer Nenngleichspannung zwischen 100 und 650 Volt.

Erfahrungen im Umgang mit derart hohen Gleichspannungen liegen bei den Entwicklern konventioneller Fahrzeuge, die mit Bordspannungen von 12/14 Volt (Pkw) bzw. 24/28 Volt (Nutzfahrzeuge) arbeiten, noch nicht vor. In Elektrofahrzeugen können daher hohe elektrische Feldstärken auftreten, die evtl. andere Systeme beeinflussen. Noch gravierender sind die zu erwartenden magnetischen Felder, die durch die hohen, von leistungsstarken elektrischen Antriebsmotoren hervorgerufenen Ströme entstehen.

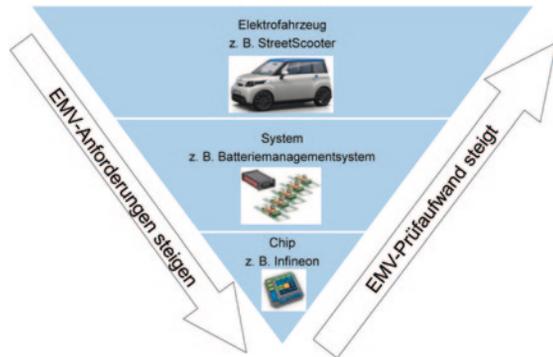
Bei Antriebsleistungen von 20–200 kW sind Ströme von bis zu 400 Ampere zu erwarten. Da die hiermit geschalteten elektrischen Leistungen um Größenordnungen über den bisher im Auto auftretenden Leistungen liegen, verursachen sie auch wesentlich größere Störungen, die bei fehlerhaften Entwicklungen oder Prüfungen von Komfortfunktionen bspw. das Infotainmentsystem beeinflussen können. Riskanter wären diese Störungen bei Steuergeräten mit Sicherheitsfunktionen wie dem ABS/ESP. Ohne geeignete EMV-optimierte Maßnahmen besteht die Gefahr, dass die gesetzlich zulässigen Grenzwerte, u. a. für den Personenschutz, überschritten werden. Zusätzlich ist ein hohes Störpotenzial zu erwarten, das von den für die Ansteuerung der Antriebsmotoren erforderlichen leistungsstarken Frequenzumrichtern ausgeht, die die von der Fahrzeugbatterie gelieferte Gleichspannung in eine für die Antriebsmotoren geeignete Wechsellspannung umwandeln. Ferner sind Gleichspannungswandler erforderlich, die die Batteriespannung von 100–650 Volt in eine konventionelle 12/14-Volt-Bordnetzspannung transferieren, über die die Fahrzeugkomponenten versorgt werden. Nicht zu vergessen sind die geschirmten Leistungsleitungen, die eine kapazitive Kopplung zur Fahrzeugmasse über den Schirm darstellen. Weitere Störquellen sind Spannungswandler im Fahrzeug für das 1- bis 3-phasige induktive (leitungsgebundene) Laden der Hoch-Volt-Batterie bis hin zu induktiv gekoppelten Ladegeräten. Zudem gibt es außerhalb vom Fahrzeug induktive Wechsellspannungs- und Gleichspannungsladestationen.

Die internen Taktfrequenzen der Frequenzumrichter und Gleichspannungswandler sind Quellen für potenzielle elektromagnetische Störungen. Daher benötigt die Störfestigkeit gegen elektromagnetische Störstrahlung große Aufmerksamkeit. Derzeit liegen keine Erfahrungen vor, inwieweit kompakt aufgebaute Lithium-Ionen-Batteriepakete empfindlich auf elektromagnetische Strahlung reagieren. Bekannt ist, dass bspw. sehr nah an den Leistungsleitungen verbaute Elektronik besonders gegen Störstrahlungen geschützt werden muss.

Aufgrund der hohen Komplexität, einer deutlich höheren Spannungsebene gegenüber den konventionellen Bordnetzen und schnelleren Schaltvorgängen von leistungselektronischen Systemen mit höheren Strömen können die EMV-Anforderungen des Gesamtsystems im Fahrzeug nur erfüllt werden, wenn man diese vorerst auf Komponenten- bzw. Systemebene detailliert und die EMV-Eigenschaften auf diesen Ebenen gezielt entwickelt. Die Einhaltung der EMV muss bei der Integration in das Gesamtfahrzeug erhalten bleiben.

Die Verantwortung dafür, dass das Fahrzeug in der elektromagnetischen Umgebung bestimmungsgemäß funktioniert, liegt beim Hersteller. Moderne elektronische Systeme machen Kraftfahrzeuge daher immer komfortabler und sicherer. Voraussetzung ist allerdings, dass sich die vielen elektronischen Einrichtungen, wie ABS, ESP, e-Gas, Navigationssystem, Abstandkontrollsystem oder Airbagsteuerung, nicht gegenseitig in ihrer Funktion beeinflussen. Das reibungslose Zusammenwirken elektronischer Systeme im Kfz stellt sehr hohe Ansprüche an die EMV. Aus diesem Grund verlangen die Automobilkonzerne sehr oft von den Zulieferern die Prüfung ihrer elektrischen/elektronischen Unterbaugruppen nach wesentlich schärferen Prüfkriterien als für die

**Abb. 5.18** EMV-Anforderungen steigen mit dem Integrationsgrad



Typenzulassung (e1, CE) vorgeschrieben ist. Die Zulieferer wiederum geben den Druck an die Bauteillieferanten, wie bspw. Halbleiterhersteller, weiter und fordern von den verwendeten ICs, die sehr oft als Ursache für Störungen gesehen werden, ein hohes Maß an Störfestigkeit und gleichzeitig eine geringe Störemission (Abb. 5.18).

Für die EMV-Prüfung von ICs (Integrierten Schaltungen) werden zwei Normen, IEC 61967 und IEC 62132, zur Messung der Störemission bzw. der Störfestigkeit herangezogen.

Für die Typgenehmigung sind jedoch nur die gesetzlichen Mindestanforderungen nachzuweisen. Aus Gründen der Produkthaftung des Herstellers gegenüber dem Endkunden werden in den Pflichtenheften der Automobilhersteller Prüffeldstärken gefordert, die ein Vielfaches über jenen der Richtlinie 2006/28/EG liegen.

Der Nachweis der Erfüllung der EMV-Anforderungen erfolgt in der Kraftfahrzeugentwicklung vorzugsweise auf Labor- und Fahrzeugebene. Die Komponenten werden einerseits in einer Fahrzeugnachbildung und andererseits im realen Fahrzeug getestet. Dies hat für elektrisch getriebene Fahrzeuge zur Folge, dass Mess- und Prüfverfahren, Messaufbauten zur Nachbildung der Fahrzeugumgebung und ggfs. Messgeräte neu spezifiziert werden müssen. Außerdem sind EMV-relevante Betriebszustände des Antriebssystems zu ermitteln. Als weiteres Hilfsmittel dient die Modellierung und Simulation der Komponenten und des Gesamtsystems. Abschirmungs- und Filtermaßnahmen verursachen enorme Kosten für die Automobilhersteller. Neu entwickelte Simulationsmodelle helfen, im Vorfeld mögliche Koppelpfade und Störquellen zu identifizieren und zielgerichtet geeignete Maßnahmen wie Materialauswahl und Filterung zu ergreifen. Mit Hilfe von virtuellen Untersuchungen können Entwicklungsentscheidungen in der Konzeptphase getroffen werden. Offene Fragen werden sehr früh analysiert und Parameterstudien „kostenlos“ durchgeführt. Bei den Berechnungen können große Ungenauigkeiten auftreten. Daher sind alle Ergebnisse auf ihre Sinnhaftigkeit zu hinterfragen.

Auf diese Weise wird sichergestellt, dass das Fahrzeug mit größtmöglicher Wahrscheinlichkeit bei allen im praktischen Betrieb zu erwartenden Einwirkungen elektromagnetischer Störbelastungen (Smartphones, WIFI-Hot-Spots, Rundfunk-/Fernsehsender) keine Funktionsstörungen zeigt.

Elektrofahrzeuge weisen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor gravierende, bisher nicht zu berücksichtigende EMV-Aspekte auf, eine verschärfte Herausforderung für die Entwickler. Der Fokus liegt dabei auf zwei Arbeitsfeldern: Störaussendung und Störfestigkeit der Elektrofahrzeuge selbst sowie die Störaussendung und Störfestigkeit von induktiven (leitungsgebundenen) und induktiven Ladestationen (kontaktlose Ladetechnik). Neben der Notwendigkeit, spezifisches neues Know-how aufzubauen und die Weiter- und Fortbildung in diesem Bereich auszubauen, sind erhebliche Investitionen in die Entwicklung einer an die neuen Anforderungen angepassten EMV-Prüfumgebung unumgänglich.

Anforderungen der Störabstrahlung und Störeinstrahlung sind nicht nur für ein Elektrofahrzeug und damit auch für ein Hybridfahrzeug gültig, sondern bestehen im gleichen Maß für alle beteiligten Systemkomponenten. Nur wenn man diese Anforderungen erfüllt, kann die elektromagnetische Verträglichkeit dieser Fahrzeuge gewährleistet werden.

#### 5.4.2.2 Historische Entwicklung

Seit den Anfängen des Automobils ist die Anzahl der Steuer- und elektronischen Geräte im Fahrzeug ständig gestiegen und in der Folge die Höhe des Störpegels und die Wahrscheinlichkeit, eine Störung zu finden. Zudem ist die Größe der elektronischen Geräte immer weiter gesunken und damit die elektrische Packungsdichte gestiegen (s. Abb. 5.19). Dadurch rücken die Störsenken immer näher an die Störquellen heran und die geringere Leistungsaufnahme erhöht die Empfindlichkeit gegenüber Störungen.



**Abb. 5.19** Erhöhung der Packungsdichte am Beispiel des elektronischen Bremssystems

**Tab. 5.3** Elektrische Highlights aus der Fahrzeugentwicklungsgeschichte

Jahr	Entwicklung
1958	Bendix erstes elektronisches Einspritzsystem (USA)
1967	Bendix erstmals im Einspritzsystem des VW 1600 E übernommen von Bosch (D-Jetronic)
1973	K-Jetronic von Bosch im Porsche 911
1974	L-Jetronic im Opel Manta GTE
1978	Serienstart des ersten ABS 2 bei Mercedes-Benz und kurz darauf bei BMW
1979	Motronic, Zusammenführung von Zünd- und Einspritzsystem
1986	Elektronisches Gaspedal hält Einzug
1991	Teilvernetzung beim Serienstart W 140
1995	Serienstart des Elektronischen Stabilitäts-Programms ESP®
1997	Vollvernetzung Class A und Class B CAN Bus im W 210 (E-Klasse)
1997	Serienstart von Hoch-Volt und elektrischer Antriebsmaschine im Toyota Prius Hybridfahrzeug
2002	Serienstart VW Phaeton mit mehr als 2.100 Einzelleitungen und 3.800 m Länge Bordnetz und mehr als 60 Steuergeräten an 3 Bussystemen mit mehr als 2.500 Signalen
2008	Serienstart des Tesla Roadster Elektrosportwagens mit 215 kW elektrischer Antriebsleistung
2009	Serienstart des Mitsubishi i-MIEV mit 49 kW elektrischer Antriebs- und bis zu 50 kW DC-Ladeleistung
2010	Serienstart des Nissan Leaf mit 80 kW elektrischer Antriebs- und bis zu 50 kW DC-Ladeleistung

Auch die Taktfrequenz wurde ständig weiter erhöht und mit der Einführung von Digitaltechnik auch die Flankensteilheit. Daraus ergeben sich ein höherfrequenterer Störpegel und die Erhöhung des Störbandes (breitbandiger).

Bei den elektrischen Einbauten ins Fahrzeug bis 1970 ging es im Wesentlichen um die Entstörung von Zündung und Elektromotoren. Weitere elektrische Highlights aus der Fahrzeugentwicklungsgeschichte skizziert Tab. 5.3.

Durch den VDE wurden 1934 Leitsätze der Funkentstörung eingeführt. Richtlinien zur Störfestigkeit folgten erst Mitte der 1960er Jahre. In Abb. 5.20 ist die geschichtliche Entwicklung der EMV-Gesetzgebung aufgelistet.

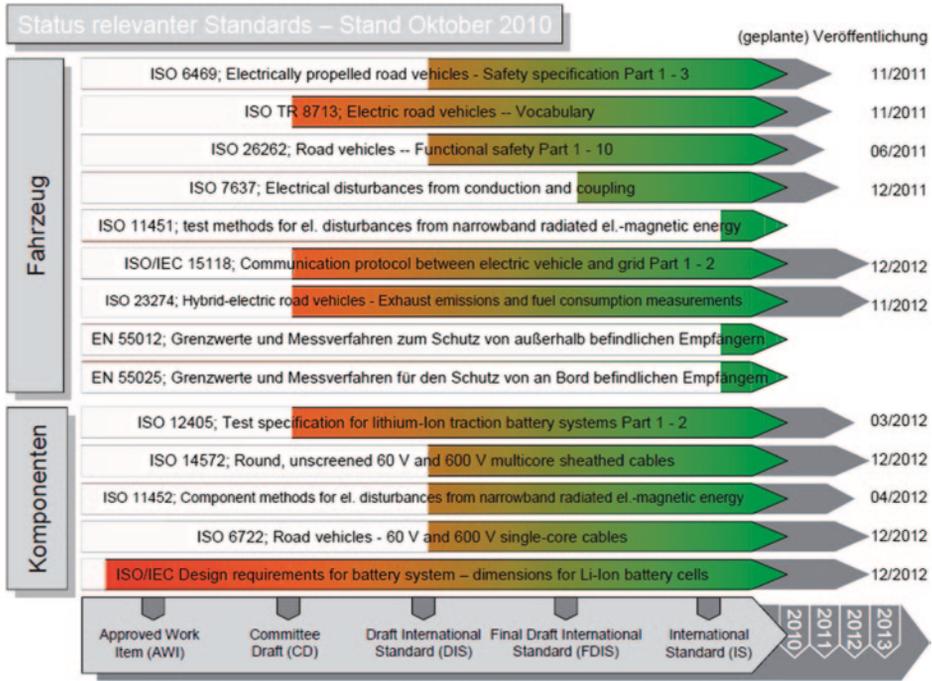
Mit der zukünftigen EMV-Entwicklung und der daraus resultierenden Normierung und Prüfung speziell für die Elektrofahrzeugentwicklung beschäftigt sich die Nationale Plattform für Elektromobilität (NPE) in ihren Arbeitskreisen. Sie hat eine Roadmap für die Anpassung der Normen bis 2014 für die Themen innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs (s. Abb. 5.21 und 5.22) zusammengestellt und wird diese umsetzen. Verantwortlich für die Umsetzung ist u. a. die DKE.

**Abb. 5.20** Geschichtliche Entwicklung der EMV-Gesetzgebung

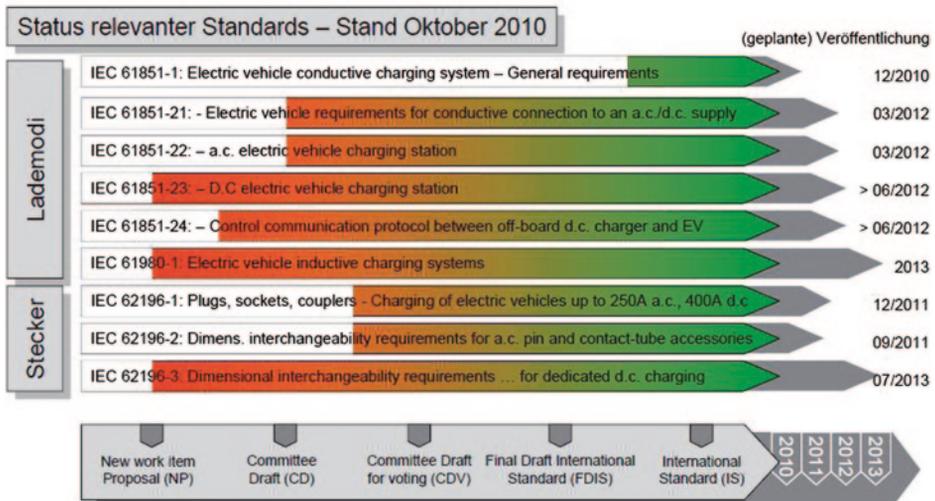
Standard	Organisation	Fahrzeug relevant	Einführung
ECE R10	EG	Ja	1958
72/245/EWG	EG	Ja	1972
89/336/EWG	EG	Ja	1989
95/54/EG	EG	Ja	1995
95/56/EG	EG	Nein	1995
ECE R10 Rev. 2	EG	Ja	1997
97/24/EG	EG	Ja	1997
2000/2/EG	EG	Ja	2000
2002/24/EG	EG	Ja	2002
2003/77/EG	EG	Ja	2003
2004/104/EG	EG	Ja	2004
2005/49/EG	EG	Ja	2005
2005/83/EG	EG	Ja	2005
2006/28/EG	EG	Ja	2006
ISO 7637	ISO	Nein, Komponente	1995–2004
ISO 10605	ISO	Ja	2008
ISO 11451	ISO	Ja	2005–2007
ISO 11452	ISO	Nein, Komponente	1997–2007
ISO 10605	ISO	Ja	2008
CISPR-12	IEC	Ja	2007
CISPR-25	IEC	Ja	2008
SAE J551	SAE	Ja	1995–2003
SAE J1113	SAE	Ja	1995–2002

EMV wird im Kontext von Normung nur auf Antriebs- und auf Gesamtsystemebene betrachtet – dies schließt die Batterie ein. Handlungsbedarf wird darin gesehen, die Prüfung unter definierten Lastzuständen durchzuführen und die Anforderungen an Störfestigkeit und Feldstärke an den technischen Fortschritt anzupassen.

In diesem Zusammenhang sind auch EMV-Normen zu beachten, die zusammen mit der CISPR behandelt werden. Ein Teil dieser Normen muss um neue Normteile ergänzt werden. Besonderheiten sind entsprechend den Fahrzeugkategorien zu beachten, bspw. bei Kategorie M3.



**Abb. 5.21** Status der wichtigsten Normungsprojekte von Elektrofahrzeugen. *Quelle* NPE (2010)



**Abb. 5.22** Status der wichtigsten Normungsprojekte von Ladestationen. *Quelle* NPE (2010)

### 5.4.2.3 EMV-Design

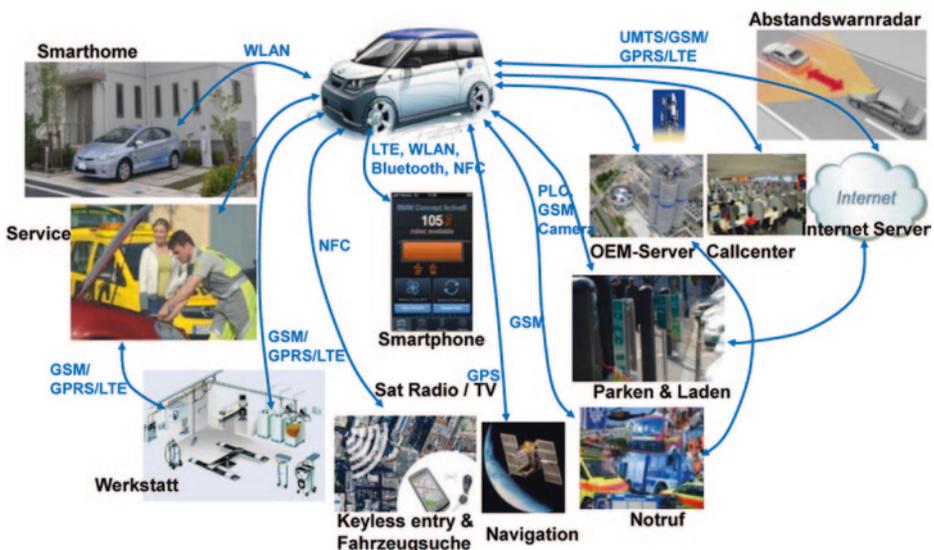
Innerhalb der Elektromobilität werden immer mehr elektrische und elektronische Komponenten (elektrischer Antrieb, Frequenzumrichter, Hoch-Volt-Batterie) mit immer höherer Leistung auf immer kleinerem Raum konzentriert. Gleichzeitig steigen die Taktfrequenzen von Steuergeräten und Antriebselektronik. Das Risiko der gegenseitigen Beeinflussung und der damit verbundenen Funktionsbeeinträchtigungen steigt.

Das übliche Störkopplungsmodell geht wie eben beschrieben von den Begriffen Störquelle, Kopplungspfad und Störsenke aus. Die Störungen erzeugenden Fahrzeugkomponenten oder solche aus der Umgebung wie Funkmasten werden als Störquelle und die beeinflusste Komponente als Störsenke bezeichnet (s. Abb. 5.23). Damit es zu einer Beeinflussung der Senke durch die Quelle kommen kann, muss die Störung zur Senke gelangen. Den Weg zwischen Quelle und Senke nennt man Kopplungspfad. Kriterium der Güte einer Signalübertragung ist in der EMV der Störabstand (s. Abb. 5.24).

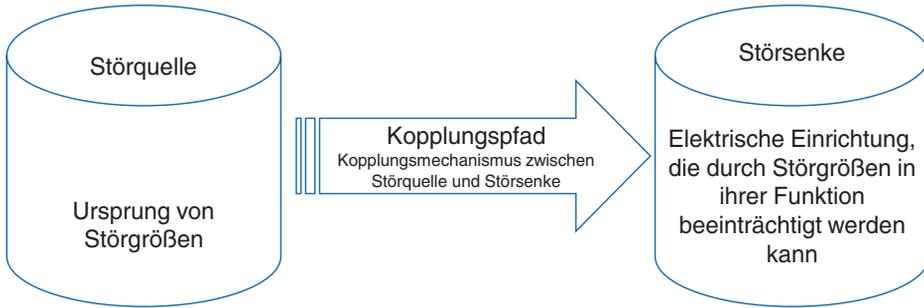
Damit eine Störung entstehen kann, müssen grundsätzlich drei Voraussetzungen erfüllt sein:

- es muss eine Störquelle geben
- es muss eine Störsenke geben
- es muss einen Kopplungspfad zwischen den beiden geben

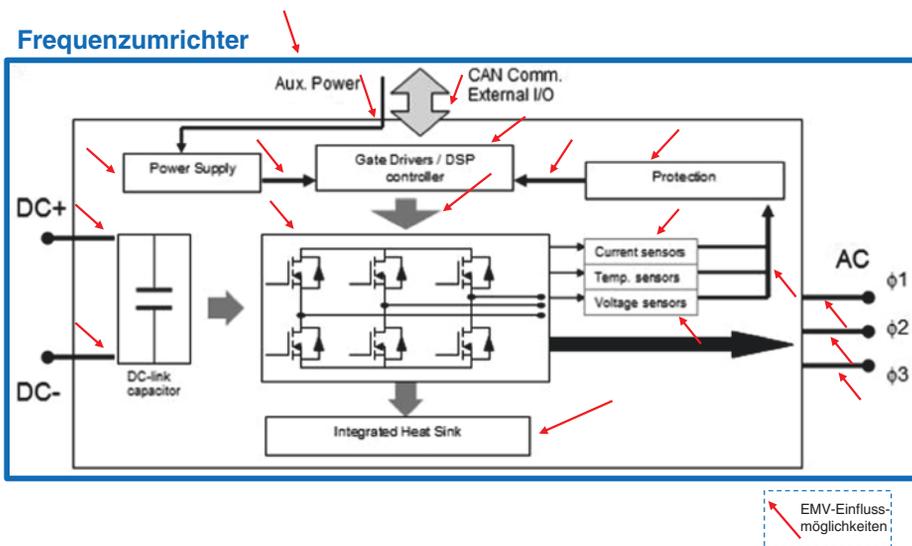
Auch wenn die oben genannten Bedingungen erfüllt sind, kommt es erst dann zu einer Störung, wenn die Beeinflussung die Störfestigkeit einer Komponente überschreitet. Die „elektromagnetische Beeinflussung“ hat größtenteils erst bei höheren Frequenzen



**Abb. 5.23** Elektromagnetische Umwelt im Kraftfahrzeug



**Abb. 5.24** EMV-Beeinflussungsmodell



**Abb. 5.25** Umrichter, Regelkreis und EMV-Einflussmöglichkeiten

Auswirkungen. Dies bedeutet, dass die sachgemäße Funktion eines Elektrofahrzeugs nur dann erreicht werden kann, wenn der Einbau ins Fahrzeug neben den betriebstechnischen Anforderungen auch die Anforderungen der Hochfrequenz (bspw. Erdung, Schirmung, Filterung) erfüllt. Mögliche EMV-Beeinflussungen in einem Fahrzeugsystem sind in Abb. 5.25 zu sehen.

Die folgende Liste nennt EMV-Werte, die im Fahrzeug vorkommen können, in Verbindung mit elektromagnetischen Wechselwirkungen fahrzeugeigener Systeme. Außerdem sind gewollte Ausstrahlungen von Sendegeräten im eigenen Fahrzeug enthalten, die Störimpulse auf dem Fahrzeugbordnetz bzw. bei den Sensorleitungen verursachen. Es muss also ein EMV-Schutz von Empfängern im eigenen Fahrzeug (Nahbereichsstörung) vor diesen Sendern implementiert werden.

- Störimpulse: bis 160 V
- Empfängerempfindlichkeit: 250 nV
- Störfeldstärken: bis 85 V/m
- Elektrostatische Entladungen: bis 30 kV

### 5.4.2.4 Kopplungsarten

Die Spannungsversorgung der Fahrzeugsysteme erfolgt aus einem gemeinsamen 12/14-Volt-Bordnetz. Die Leitungen der einzelnen Systeme werden meist in einem gemeinsamen Kabelbaum geführt. Dabei kann es über galvanische, kapazitive, induktive oder elektromagnetische Kopplungen zu Störbeflüssen benachbarter Systeme kommen (Abb. 5.26).

Vor allem die Ermittlung der Kopplungsmechanismen und -pfade ist sehr schwierig, da es sich oft um parasitäre Übertragungswege (Streukapazitäten, Streuinduktivitäten) handelt. In der Regel liegen mehrere Kopplungspfade gleichzeitig vor.

In der EMV wird zwischen verschiedenen Kopplungsarten wie den leitungsgeführten und abgestrahlten Störungen unterschieden (vgl. Tab. 5.4).

Die gestrahlten Störungen werden bspw. als elektromagnetisches Feld auf die Störquelle übertragen und dort bspw. von einem als Antenne fungierenden Leiter empfangen. Auch kapazitive und induktive Beeinflussungen elektrischer bzw. magnetischer Felder werden als feldgebundene Störungen bezeichnet.

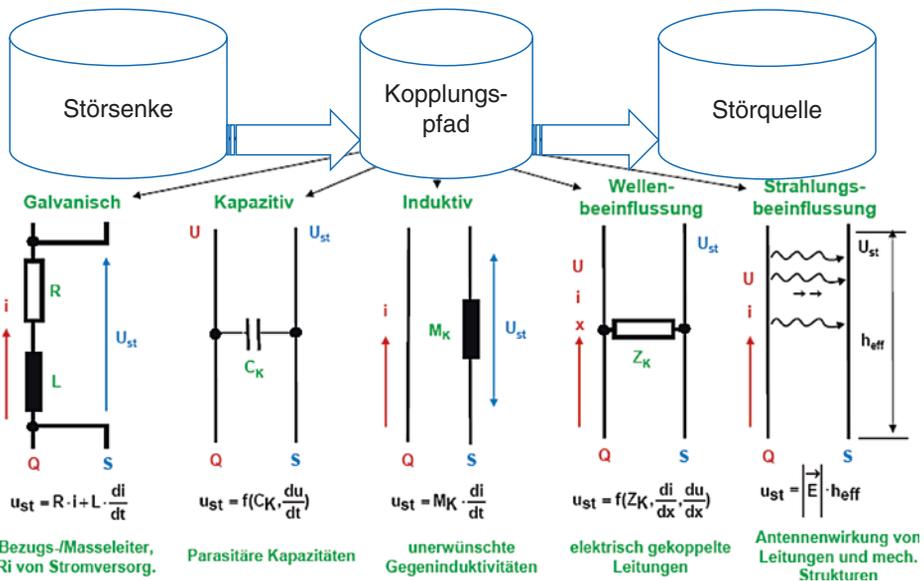
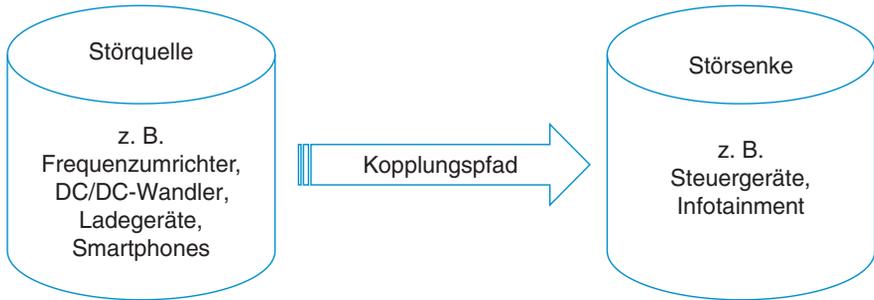


Abb. 5.26 Die verschiedenen Kopplungsmechanismen der Koppelpfade

**Tab. 5.4** Störungsphänomene

Kopplungs-mechanismus	Störfestigkeit	Störaussendung
Abgestrahlt	Hochfrequente Feldeinkopplung (V/m)	Nahentstörung (dB $\mu$ V)
		Fernentstörung (dB $\mu$ V)
Leitungsgeführt	Störimpulsfestigkeit (V)	Störimpulsaussendung (V)
	Elektrostatische Entladung ESD (kV)	



Kontrolle von Störungen  
(Störaussendung)  
mögliche Maßnahmen:  
- Pegel reduzieren  
- Ausbreitung verhindern

Kontrolle der Empfindlichkeit  
(Störfestigkeit)  
mögliche Maßnahmen:  
- Einkopplung reduzieren  
- Immunität erhöhen

**Abb. 5.27** Störquellen und Maßnahmen

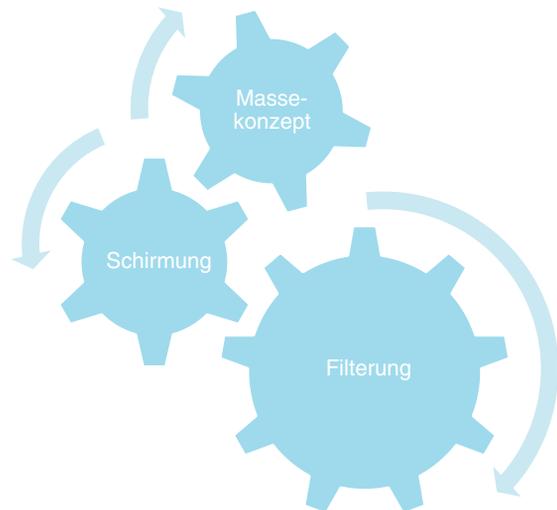
Ein Beispiel für eine feldgebundene Störung ist die Einkopplung einer GSM-Mobiltelefon-Übertragung in eine Audioeinrichtung, bspw. in ein Autoradio. Grund dafür kann ein nicht ausreichend geschirmter Lautsprecher oder ein Kabel sein. Weiterhin ist der Einfluss der Varianten auf die EMV relevant: Varianten wie Sonnendach, Materialien in den Scheiben, unterschiedliche Thermosysteme wie HV-PTC-Heizer, Wärmepumpe, unterschiedliche Reifen-Leitfähigkeit, Scheibenenteisungssysteme und unterschiedliche Bordnetze haben großen Einfluss auf das EMV-Verhalten des Gesamtsystems (Abb. 5.27).

Zur Vermeidung von Störungen dient eine EMV-gerechte Auslegung von Systemen. Zu den bekannten Maßnahmen zählen die richtige Auswahl von Materialien und Bauteilen, die Schirmung von Gehäusen und Leitungen, die Filterung elektrischer Schaltungen sowie interner und externer Leitungen, das Verdrillen, die Verwendung symmetrischer Signale und eine EMV-gerechte Leitungsführung, bspw. die räumliche Trennung von Hoch-Volt- und Signalleitungen oder die Überschneidung solcher Leitungen nur im rechten Winkel. Häufig lassen sich Störungen durch eine geeignete Massegebung und die Vermeidung weitläufiger

Störstromschleifen auf einer Platine vermeiden. Weiterhin sollten in EMV-kritischen Systemen Löt pads für spätere Filterbauteile vorgehalten werden. Wirksam ist je nach Störsituation entweder das Unterbrechen oder das Zusammenschließen elektrischer Massen, etwa zur Vermeidung der o. g. galvanischen Kopplungen. Analoge Größen sind störanfälliger als digitale, daher sollte zur Reduzierung analoger Störeinflüsse eine Digitalisierung dieser Größen durch hohe Integration an der Quelle, bspw. direkt am Sensor, vorgenommen werden. Durch die Auswahl geeigneter und reduzierter Taktfrequenzen lassen sich Störeinflüsse auf nahe liegende bandbegrenzte Funkempfänger vermeiden, da die Taktfrequenz quadratisch in die Störaussendung eingeht (Abb. 5.28).

Zusätzlich sollen die EMV-Maßnahmen immer an oder in der Quelle beginnen. Sie müssen in einem frühen Stadium der Entwicklung implementiert werden, also ein Hineinentwickeln und kein Hineinprüfen, was zu einem späten Zeitpunkt einen hohen Zeit- und Kostenaufwand bedeutet. Tabelle 5.5 zeigt die frühzeitige Festlegung EMV-relevanter Spannungswerte zur Zeit der Lastenhefterstellung von Hoch-Volt-Komponenten im Elektrofahrzeug. Auch die Definition der notwendigen Transferimpedanz/Kopplungsimpedanz bzw. Schirmdämpfung von Hoch-Volt-DC- und AC-Leitungen (Schirmungsart und Schirmaufbau) muss frühzeitig im Projekt definiert werden.

**Abb. 5.28** Maßnahmen zur Sicherstellung der EMV



**Tab. 5.5** Spannungspegel für Hoch-Volt-Komponenten im Fahrzeug

Parameter	Einheit	Spannung < 200 V
Spannungsdynamik erzeugt durch eine HV-Komponente	V/ms	±20
Anliegende Spannungsdynamik	V/ms	±25
Maximale Spannungswelligkeit bei verbundener HV-Batterie	V pk	±10
Spannungswelligkeit bei getrennter HV-Batterie	V pk	±15

Nach DIN EN 50289-1-6 ist die Transferimpedanz der Quotient der Längsspannung, die in den äußeren Kreis (Umgebung) induziert wird, zum Strom im inneren Kreis (Kabel) oder umgekehrt, bezogen auf die Längeneinheit. Weitere Festlegungen sind die Definitionen des Signalspannungsbereichs, des Signalstroms, der Kurzzeitunterbrechungen, der Schwellen für digitale Eingänge, der Eingangsbandbreite, möglicher eingekoppelter Störungen am Eingang (HF, Transiente, ESD), möglicher Kurzschlüsse nach GND/Plus, von Bauteiltoleranzen sowie Temperaturtoleranzen. Daher ist auf den Einsatz von Schirmleitungen mit niedriger Transferimpedanz und hoher Schirmdämpfung zu achten. Außerdem sollte durchgängig vom Chip über die Komponenten und Systeme bis zum Gesamtfahrzeug auf die Anwendung von ISO/CISPR- und IEC-Normen sowie EMV-Untersuchungen auf Systemebene zurückgegriffen werden. Bei Fahrzeugmessungen werden von der Gesetzgebung bis zu 100 V/m verträgliche Mindest-Störfeldstärken vorgeschrieben, wobei viele OEM bis zum 6-Fachen dieses Wertes ihre Fahrzeuge prüfen, was Werten aus der Flugzeugindustrie entspricht.

Auch wenn die technologische Entwicklung und hohe Stückzahlen für EMV-Maßnahmen, bspw. Filter für die Antriebselektronik, weitere Produktivitätssteigerungen und damit geringere Kosten bedeuten, bleiben Maßnahmen zur Einhaltung der EMV-Anforderungen ein beträchtlicher Mehraufwand bei der Entwicklung leistungselektronischer Systeme. Dieser Mehraufwand ist notwendig und darf keineswegs nur als leicht nachzurüstende Kosmetik verstanden werden. Bei Geräten mit nennenswerten Stückzahlen ist es erforderlich, die EMV schon zu Beginn einer Systementwicklung zu berücksichtigen, um den Aufwand insgesamt zu minimieren. Außerdem ist zu beachten, dass durch eine zu hohe Variantenvielfalt die zu prüfenden Kombinationen in die Millionen gehen können, was nicht mehr zu beherrschen ist. Ob man nun EMV-Experten zusätzlich zu Systementwicklern in den Prozess einbezieht oder die Systementwickler zum Thema kostengünstiger EMV-Entwurf schult – Mehrkosten von 2–5 % des Systempreises, wie sie im Zusammenhang mit der Einführung des EMV-Gesetzes häufig geäußert wurden, dürften für die Antriebstechnik eine Wunschvorstellung bleiben.

---

## 5.5 Leichtbau

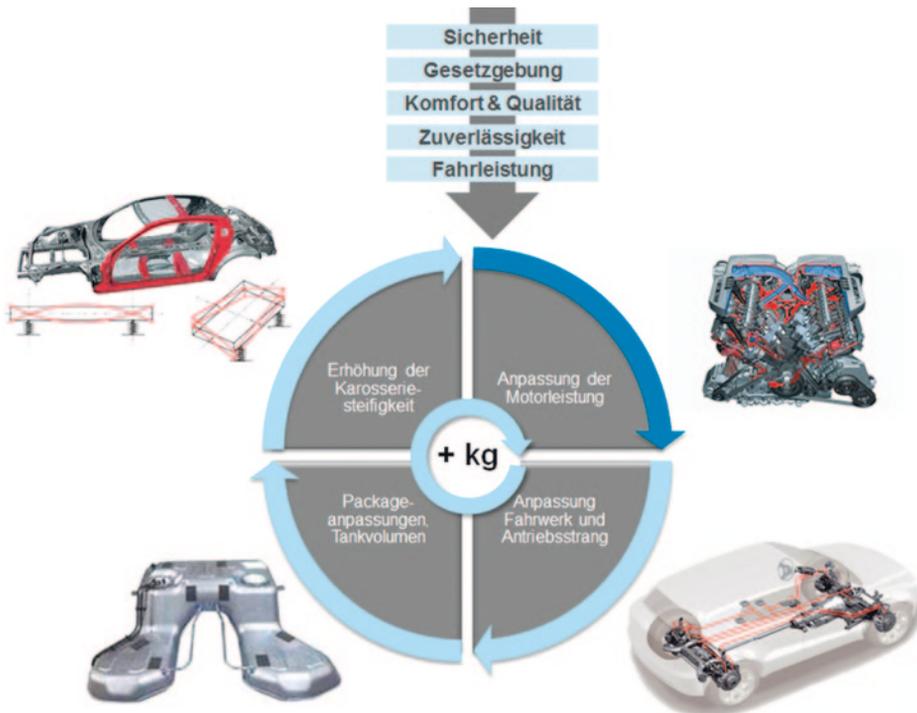
Fabian Schmitt

Leichtbau in konventionellen Fahrzeugen ist vornehmlich durch die beiden zentralen Aspekte Senkung des Energieverbrauchs und Steigerung der Fahrdynamik motiviert. Die Senkung des Energieverbrauchs hat sowohl für den Kunden (geringere Betriebskosten) als auch für den Fahrzeughersteller (geringerer CO<sub>2</sub>-Flottenausstoß) einen wirtschaftlichen Vorteil, während sich die Steigerung der Fahrdynamik nicht unmittelbar

wirtschaftlich bewerten lässt. Ersteres gewinnt sowohl für den Kunden als auch den Hersteller an Bedeutung, da mit der sinkenden Fahrzeugmasse und der damit möglichen Reduktion des Energiespeichers die Wirtschaftlichkeit des Fahrzeugs insgesamt stark verbessert werden kann.

Der signifikante Anstieg der Fahrzeugmasse bei konventionellen Fahrzeugen, bedingt durch gewachsene Anforderungen an die Komfort- und Interieurfunktionen (+37 % Zuwachs von Golf I zu Golf V), die Qualität (+8 %) und die Sicherheit (+30 %) des Fahrzeugs, sowie gestiegene legislative Anforderungen (+25 %) haben dazu geführt, dass das Thema Leichtbau in den letzten Jahren wichtiger wurde (Goede et al. 2005). Die Gewichtsspirale in Abb. 5.29 verdeutlicht, dass durch die genannten Treiber eine Zunahme der Fahrzeugmasse induziert wird. Zur Kompensation der Zusatzmassen sind Leichtbaumaßnahmen erforderlich.

Umfangreiche Leichtbaumaßnahmen wurden in Fahrzeugen des Oberklasse-Segments deutlich früher eingesetzt als in preiswerteren Fahrzeugen, da dort der Mehrpreis, der mit dem erhöhten Einsatz von Leichtbaumaßnahmen einhergeht, durch den höheren Verkaufspreis kompensiert werden kann. Dass sich diese

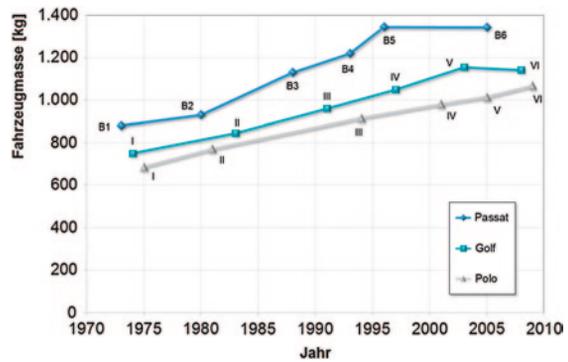


**Abb. 5.29** Gewichtsspirale konventioneller Fahrzeuge (Eckstein et al. 2010)

Leichtbaumaßnahmen mittlerweile bis in das Kompakt-Segment durchsetzen, zeigt Abb. 5.30 am Beispiel der Leergewichtsentwicklung eines Volkswagen Polo, Golf und Passat über die einzelnen Baureihen. Im Mittelklasse-Segment ist bereits eine Stagnation bzw. Verringerung der Fahrzeugmasse mit der Einführung des Passat B5 im Jahr 1996 zu erkennen, wohingegen dies im Kompakt-Segment erst mit dem Golf VI vollzogen wird. Im Kleinwagen-Segment (bspw. Volkswagen Polo) sind bisher noch keine signifikanten Leichtbaumaßnahmen in der Entwicklung der Fahrzeugmasse zur Kompensation des steigenden Mehrgewichts über die Baureihen erkennbar.

Leichtbaumaßnahmen werden besonders im Bereich des Antriebs, des Exterieurs und der Karosserie angewandt, da diese Baugruppen einen Großteil der Gesamtfahrzeugmasse ausmachen. Abbildung 5.31 stellt bisherige und potenzielle zukünftige Leichtbaumaßnahmen in

**Abb. 5.30** Entwicklung der Fahrzeugmasse verschiedener Fahrzeugsegmente (Eckstein et al. 2010)



**Abb. 5.31** Leichtbaumatrix für konventionelle Fahrzeuge (Eckstein et al. 2010)



konventionellen Fahrzeugen als Matrix dar. Dabei wird einerseits zwischen den prinzipiellen Ebenen werkstofflicher, konstruktiver und konzeptioneller Leichtbau unterschieden, andererseits zwischen den Fahrzeugintegrationsebenen Komponente, System bzw. Modul und Gesamtfahrzeug.

Der Haupthinderungsgrund für den Einsatz weitreichender Leichtbaumaßnahmen sind deren Mehrkosten. Die derzeit akzeptierten Mehrkosten je eingespartem Kilogramm Fahrzeugmasse durch Leichtbaumaßnahmen liegen je nach Fahrzeugsegment und OEM bei etwa 5 Euro (Deinzer 2009). Aufgrund der Begrenzung des CO<sub>2</sub>-Flottenausstoßes sowie steigender Kraftstoffpreise werden diese akzeptierten Leichtbaukosten zukünftig weiter steigen.

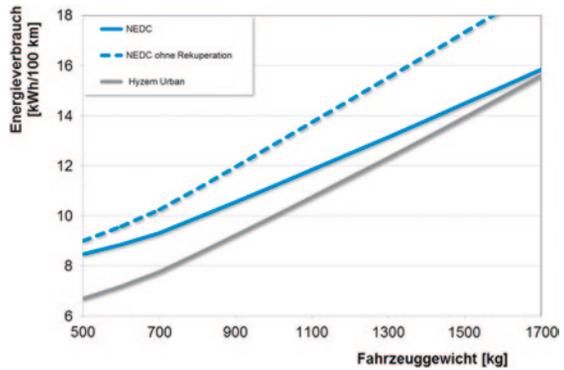
Aktuelle Forschungsergebnisse zum Thema Leichtbau benennen das Potenzial zukünftiger Gewichtseinsparungen. Exemplarisch sei an dieser Stelle auf das Projekt „SuperLight-Car“ (SLC) hingewiesen. Am Beispiel eines Golf V wurde ein Leichtbaupotenzial von 37 % gegenüber der Body-in-White-Masse (BIW) nachgewiesen. Die dadurch verursachten Leichtbaumehrkosten von 112 % gegenüber der Basis sind jedoch nicht wirtschaftlich darstellbar. Analog zum Gewichtsreduktionspotenzial in der Karosserie gibt Lotus in einer Studie das Potenzial für das Gesamtfahrzeug (ohne Antriebsstrang) ebenfalls mit bis zu 38 % an (NN 2010a).

Um den Zusammenhang zwischen Leichtbaumaßnahmen und -kosten für das Elektrofahrzeug beschreiben zu können, wird der Energieverbrauch in Abhängigkeit von der Fahrzeugmasse analysiert. Der Energieverbrauch eines Elektrofahrzeugs ist bei der Auslegung des Batteriesystems eine der entscheidenden Größen und bestimmt maßgeblich die Kapazität und die Kosten der zu installierenden Batterie. Er resultiert aus den Fahrwiderständen in Form von Roll-, Luft-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstand sowie der Bereitstellung von elektrischer Energie für die Nebenverbraucher, welche nicht am Antrieb des Fahrzeugs beteiligt sind. In Abhängigkeit von der Güte der Energiewandlung durch das Antriebsmodul und die Batterie folgt aus diesem Energiebedarf der Energieverbrauch des Fahrzeugs.

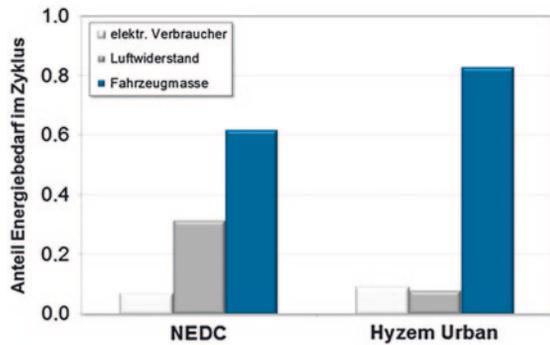
Als Basis für eine Untersuchung wird ein batterie-elektrisches Fahrzeug aus dem Kleinwagensegment mit einer Fahrzeugmasse von 1.100 kg ausgewählt und in den Simulationsrechnungen bis zu einer Minimalfahrzeugmasse von 500 kg und einer Maximalmasse von 1.700 kg variiert. Unter Berücksichtigung der geforderten Fahrleistungen (Beschleunigungen und Höchstgeschwindigkeit) wird die Leistung des elektrischen Antriebsstrangs der Fahrzeugmasse angepasst.

Der Energieverbrauch ist im Bereich von 700–1.700 kg in den Fahrzyklen NEDC und dem Hyzem-Urban-Zyklus nahezu linear abhängig von der Fahrzeugmasse (s. Abb. 5.32). Die Steigung und der Achsenabschnitt dieser Funktionen sind dabei abhängig vom gewählten Zyklus und der Auslegung der Antriebskomponenten. Der y-Achsenabschnitt dieser Funktion bei einer virtuellen Fahrzeugmasse von 0 kg beschreibt den Grundverbrauch und ist abhängig vom Luftwiderstand des Fahrzeugs sowie von den Verlusten des Antriebsstrangs und der elektrischen Verbraucher. Mit Hilfe der Steigung und des y-Achsenabschnitts dieser Funktionen können Batteriekapazität und -masse für

**Abb. 5.32** Einfluss der Fahrzeugmasse auf den Energieverbrauch



**Abb. 5.33** Anteil der Fahrzeugmasse am Energieverbrauch (Eckstein 2010)



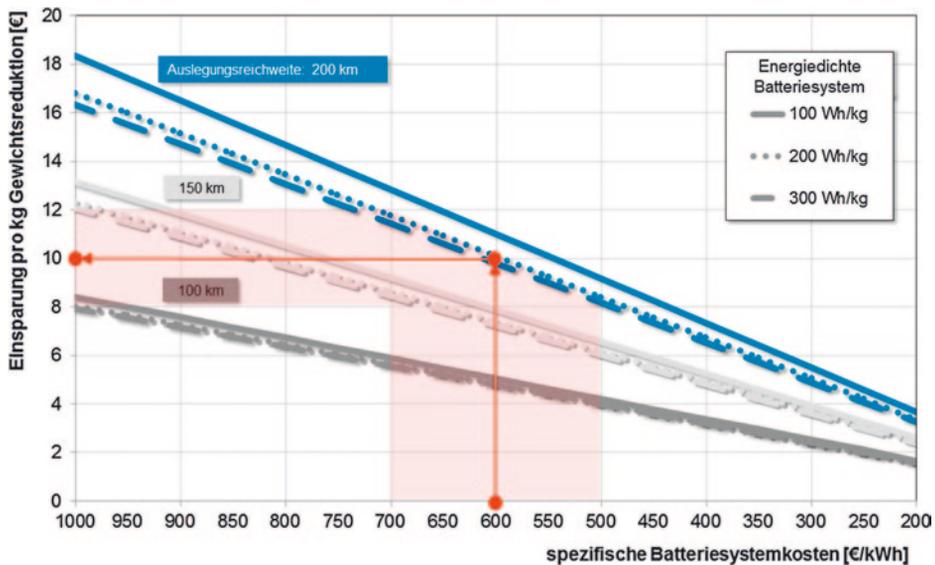
das Fahrzeug entsprechend der Auslegungsreichweite und unter Annahme verschiedener Parameter für das Batteriesystem berechnet werden (Abb. 5.33).

Die Analyse ergibt, dass die erforderliche Batteriemasse linear abhängig von der Fahrzeugmasse ist. Somit beeinflusst die Fahrzeugmasse neben der Auslegungsreichweite und den Batterieparametern die Dimensionierung der Batterie maßgeblich.

Dieser funktionale Zusammenhang ermöglicht im nächsten Schritt die Quantifizierung der Kosteneinsparpotenziale durch Leichtbau in Abhängigkeit vom betrachteten Zyklus, der Auslegungsreichweite und der nutzbaren spezifischen Energiedichte des Batteriesystems.

Der signifikante Einfluss der Fahrzeugmasse auf den Energieverbrauch und die elektrische Reichweite sowie die hohen Batteriesystemkosten lassen ein großes Potenzial von Leichtbaumaßnahmen im Elektrofahrzeug vermuten. Um dieses Potenzial zu evaluieren, bedarf es der Quantifizierung der eingesparten Batteriesystemkosten durch Leichtbaumaßnahmen je reduziertem Kilogramm Fahrzeugmasse (s. Abb. 5.34).

Bei heutigen Batteriesystemkosten von ca. 1.000 Euro/kWh (NN 2010b) und ansonsten konstanten Herstellkosten für das Gesamtfahrzeug sind je nach Auslegungsreichweite im NEDC Kosteneinsparungen von 8–18 Euro je eingespartem Kilogramm Fahrzeugmasse

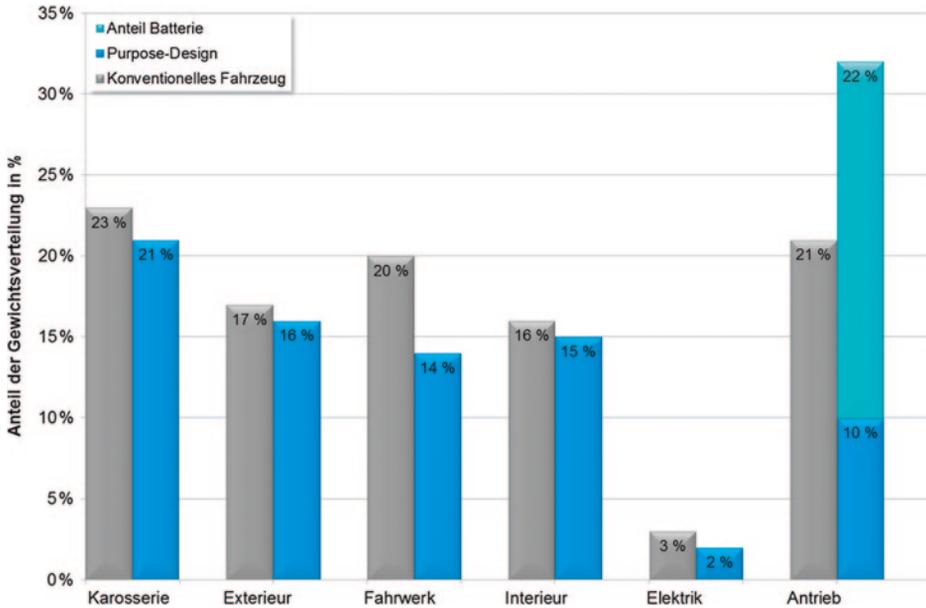


**Abb. 5.34** Quantifizierung von wirtschaftlichen Leichtbaumaßnahmen durch Einsparungen im Batteriesystem (Eckstein et al. 2010)

zu erwarten. Dies beruht auf einer dann möglichen Reduktion der Batteriesystemgröße. Für eine mittelfristige Entwicklung der spezifischen Batteriesystemkosten auf ca. 600 Euro/kWh (Sauer und Lunz 2010) ergeben sich ca. 10 Euro Kosteneinsparung pro reduziertem Kilogramm Fahrzeugmasse. Bei zukünftig zu erwartenden spezifischen Batteriesystemkosten von 200–300 Euro/kWh (Sauer und Lunz 2010) reduziert sich dieser Betrag auf ca. 2–5 Euro/kg.

Im Gegensatz zum konventionellen Fahrzeug, bei dem Kosten für Leichtbau investiert und somit akzeptiert werden, zeigen die ermittelten Werte, dass im Elektrofahrzeug Leichtbaumaßnahmen im Bereich zwischen 2 und 18 Euro/kg kostenneutral dargestellt werden können. Der Einsatz von Technologien und Materialien, die im konventionellen Fahrzeugbau als zu kostenintensiv eingestuft werden, kann im Elektrofahrzeug in Abhängigkeit vom Einsparpotenzial durchaus sinnvoll sein. Dieser Wandel in der Bedeutung von Leichtbaumaßnahmen für Elektrofahrzeuge macht eine neue Bewertung der anzuwendenden Materialien und Technologien vor dem Hintergrund der Fahrzeuggesamtkosten und der Reichweite notwendig.

Zur Identifikation der potenzialträchtigsten Baugruppen und Systeme für diese Leichtbaumaßnahmen bedarf es einer gezielten Betrachtung der sich aufgrund der „neuen“ elektrofahrzeugspezifischen Komponenten einstellenden Verteilung der Fahrzeugsystemmassen. Abbildung 5.35 skizziert hierzu den Vergleich eines konventionellen Fahrzeugs des Kleinwagen-Segments mit einem Purpose-Design-Elektrofahrzeug derselben Fahrzeugklasse mit 200 km Reichweite und einer spezifischen Energiedichte



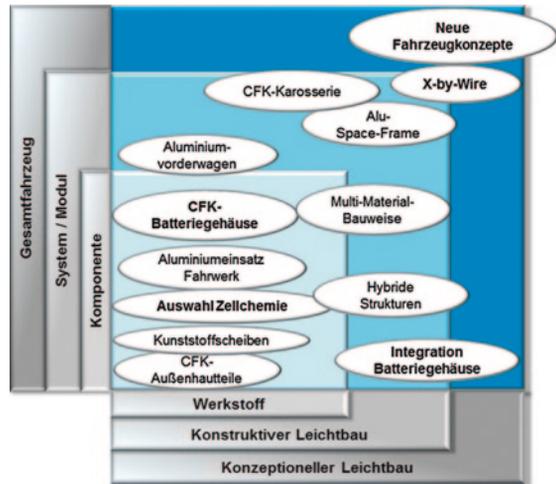
**Abb. 5.35** Massenverteilung Vergleich Elektrofahrzeug und konventionelles Fahrzeug nach Fahrzeugsystemen (Eckstein et al. 2010)

des elektrochemischen Speichers von 130 Wh/kg. Deutlich zu erkennen ist der gestiegene Anteil des Antriebsstrangs an der Fahrzeugmasse, hierbei besonders der Traktionsbatterie, gegenüber den anderen Fahrzeugsystemen.

Das Verhältnis der anderen Fahrzeugsysteme zueinander ändert sich im Elektrofahrzeug nicht signifikant gegenüber der bisherigen Verteilung. Daher liegt es nahe, in diesen Fahrzeugsystemen die bereits erarbeiteten Leichtbaumaßnahmen aus konventionellen Fahrzeugsystemen (Karosserie, Exterieur und Fahrwerk), deren bisherige Umsetzung an den Leichtbaumehrkosten scheiterte, im Elektrofahrzeug anzuwenden. Wichtig ist hierbei die wahrnehmungsneutrale Umsetzung der Maßnahmen ohne Funktionsverlust des Systems, um eine hohe Kundenakzeptanz zu gewährleisten. Abbildung 5.36 enthält die Leichtbaumatrix für Elektrofahrzeuge mit Beispielen von neuen und bereits bekannten Leichtbaumaßnahmen, die potenziell zum Einsatz in Elektrofahrzeugen kommen können.

Nachdem bereits heute bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen regelmäßig werkstofflicher Leichtbau auf Komponentenebene betrieben wird (bspw. Türen und Klappen aus Kunststoff oder Aluminium), gilt es im nächsten Schritt, die spezifischen Vorzüge von Leichtbauwerkstoffen konstruktiv auf System- bzw. Modulebene zu erschließen. Ein naheliegender Ansatz ist die werkstoffgerechte, ein weiterer die Integration mehrerer Funktionen in ein Bauteil (Funktionsintegration). Als Beispiel sei eine Motorhaube aus einem dreidimensional geflochtenen faserverstärkten

**Abb. 5.36** Leichtbaumatrix von Elektrofahrzeugen (Eckstein et al. 2010)

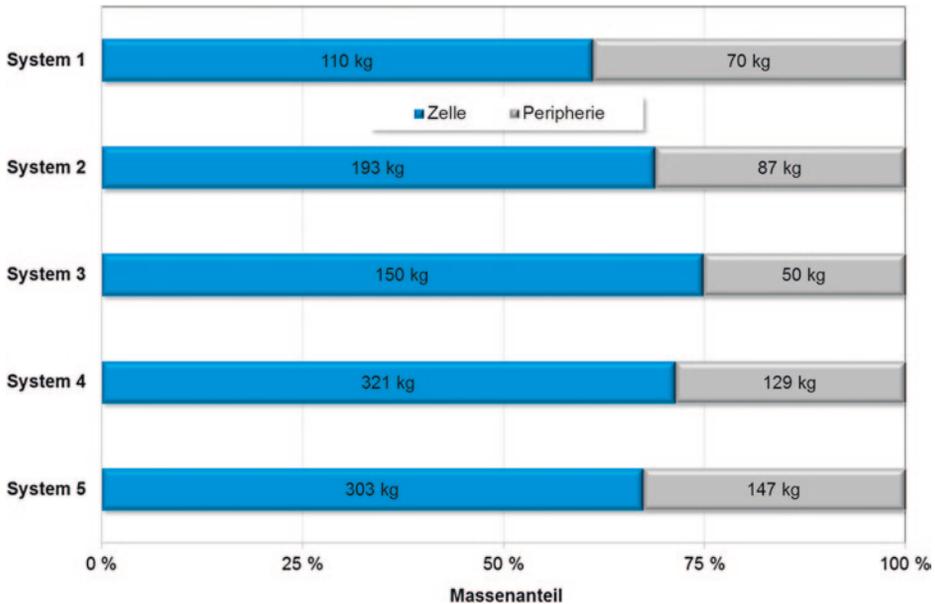


Kunststoff angeführt, die zusätzliche Funktionen wie Fußgängerschutz oder Schall- und Wärmedämmung übernehmen kann. Weiteres Potenzial kann realisiert werden, indem Leichtbaumaßnahmen nicht nur systemspezifisch, sondern auch systemübergreifend (bspw.: X-by-Wire, Integration Batteriegehäuse und Karosseriestruktur) umgesetzt werden.

Eine besondere Rolle spielt wiederum das Batteriesystem. Es bietet auf Zell- und Systemebene ein großes Leichtbaupotenzial. Auf Zellebene kann die Energiedichte durch Auswahl und Kombination der Materialien für Kathode, Anode, Separator und Elektrolyt erhöht werden und zur Reduzierung der Batteriemasse beitragen. Durch die Weiterentwicklung bekannter Materialien und die Verwendung neuer Zellen erscheinen Energiedichten von 300 Wh/kg in Zukunft als realistisch (Sauer und Lunz 2010), wodurch die Masse der Zellen bei konstanter Auslegungsreichweite um den Faktor 1,5–3 reduziert werden könnte. Im Vergleich zu einem heutigen System mit einer Energiedichte auf Zellebene von maximal 200 Wh/kg würde sich die Masse der Zellen um ca. 110 kg auf 190 kg reduzieren (Schmitt 2011; Eckstein et al. 2010).

Zu einem vollständigen Batteriesystem für den Einsatz im Fahrzeug zählt neben den Batteriezellen auch die Peripherie, bestehend aus Zell- und Modulverbinder, Kühlsystem, Elektronik und Gehäuse. Sie ermöglicht erst den sicheren und kontrollierten Betrieb, erhöht andererseits aber die Masse des Systems. Eine Übersicht der Massenanteile von Zelle und Peripherie verschiedener Batteriesysteme aktueller Elektrofahrzeuge (Serien- und Prototypenfahrzeuge) liefert Abb. 5.37.

Aus der Abbildung geht hervor, dass 25–40 % der Gesamtmasse des Batteriesystems der Peripherie zugesprochen werden können. Die großen Unterschiede resultieren hauptsächlich aus der Auslegung, Gestaltung und Komplexität des Kühl- und Heizkonzeptes der verschiedenen Systeme. Neben einer bedarfsgerechten und gewichtsoptimierten Auslegung des Kühlsystems stellt die Reduzierung der Gehäusemasse, bspw. durch die

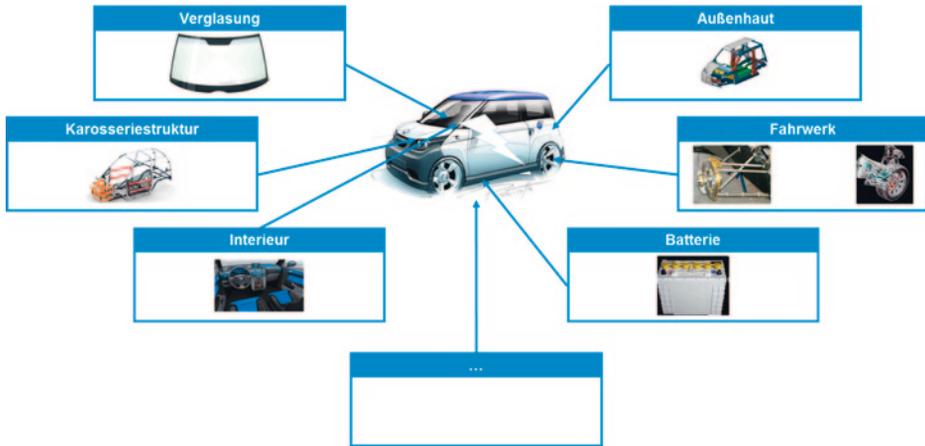


**Abb. 5.37** Vergleich Massenanteile Zelle und Peripherie von Batteriesystemen (Eckstein et al. 2010)

Verwendung von CFK-Werkstoffen für den Aufbau des Gehäuses oder die Integration des Batteriegehäuses in die Karosseriestruktur des Fahrzeugs, eine weitere mögliche Maßnahme dar, um die Peripherie leicht ausführen zu können (Eckstein et al. 2010).

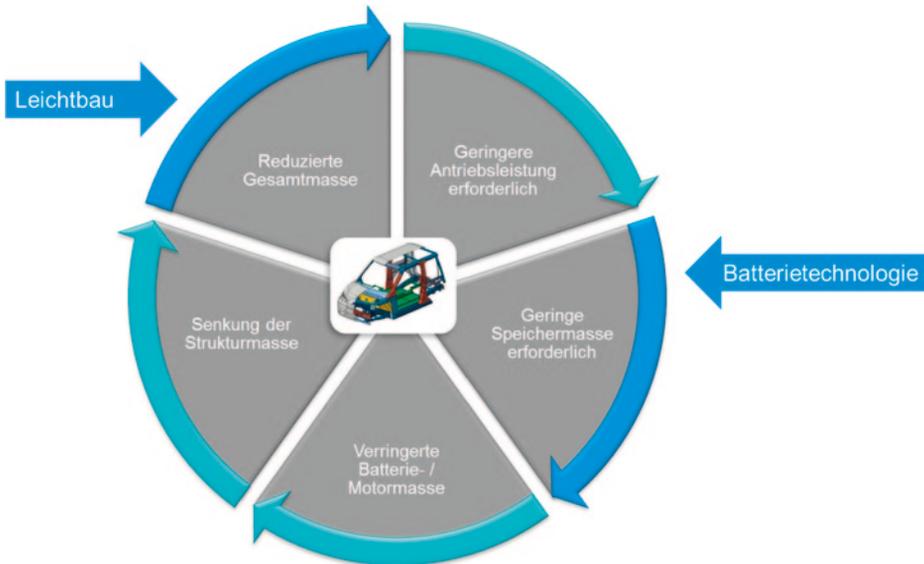
Schließlich gilt es, auf Gesamtfahrzeugebene konzeptionellen Leichtbau zu betreiben. Nur so kann eine Fahrzeugmasse deutlich unterhalb der 1.000-kg-Marke realisiert werden, ohne bei der Fahrzeugsicherheit Zugeständnisse zu machen. Dazu müssen etablierte Systemgrenzen und Auslegungskriterien hinterfragt werden. Der erste Schritt ist eine Anforderungsfokussierung, bspw.: Was ist eine sinnvolle Auslegungsgeschwindigkeit, welche maximale Antriebsleistung ist zu berücksichtigen? In einem weiteren Schritt gilt es zu analysieren, wie die definierten Zieleigenschaften durch das Zusammenwirken mehrerer Systeme effizient und kostengünstig dargestellt werden können. Für die Fahrzeugsicherheit bedeutet dies bspw., dass aktive und passive Sicherheit gemeinsam betrachtet und optimiert werden müssen, denn durch die Vernetzung von Fahrwerksregelsystemen, Fahrerassistenzsystemen und Systemen der passiven Sicherheit können besonders kritische Situationen und Lastfälle von vornherein weitestgehend vermieden werden. Abbildung 5.38 fasst die einzelnen Fahrzeugsysteme mit großem Leichtbaupotenzial noch einmal kompakt zusammen.

Die aufgezeigten Einsparpotenziale für Energieverbrauch und Kosten durch Leichtbau bei Elektrofahrzeugen ermöglichen gegenüber dem konventionellen Fahrzeug den Einsatz von bisher durch die akzeptierten Leichtbaumehrkosten ausgeschlossenen Maßnahmen in den Anwendungsbereichen Karosserie, Exterieur und Fahrwerk auf



**Abb. 5.38** Potenziale Leichtbau im Elektrofahrzeug

System- bzw. Modulebene. Außerdem kommt der Reduktion der Batteriemasse auf Zell- und Systemebene eine besondere Bedeutung zu. Durch den quantifizierten kostenneutralen Einsatz von Leichtbau ist eine signifikante Reduktion der Elektrofahrzeugmasse möglich, die eine Leichtbauspirale induziert (s. Abb. 5.39). Im Vergleich zur Gewichtsspirale verstärken sich die Leichtbaumaßnahmen und führen zu einer weiteren Reduktion der Fahrzeugmasse.



**Abb. 5.39** Leichtbauspirale für Elektrofahrzeuge

Durch die Einführung von weiterführenden, im Elektrofahrzeug kostenneutral darstellbaren Leichtbaumaßnahmen erscheint der zukünftige Einsatz dieser Maßnahmen auch im konventionellen Fahrzeug möglich und somit nicht nur ein Anhalten der Gewichtsspirale, sondern eine Umkehr hin zur Leichtbauspирale. Zur Ausschöpfung des vollen Potenzials von Leichtbau sind jedoch noch stärker konzeptionelle Maßnahmen auf der Gesamtfahrzeugebene notwendig. Dies ist nur durch völlig neue Fahrzeugkonzepte erreichbar, die den Zielkonflikt zwischen Effizienz, Sicherheit und Fahrerlebnis auf andere Weise lösen, als es bislang bei konventionellen Fahrzeugen der Fall war.

---

## 5.6 Industrialisierung

Achim Kampker, Mateusz Swist und Andreas Maue

Die Industrialisierung der Elektromobilproduktion beschreibt den Weg von der Produktidee bis zur Serienproduktion. Sie umfasst die Phasen der Produkt- und Prozessentwicklung und des Anlaufmanagements unter ständiger Berücksichtigung aktueller Normen und Standards.

Die Produkt- und Prozessentwicklung beginnt mit der ersten Produktidee und deren Planung und endet mit dem Beginn der Serienproduktion. Sie strukturiert die einzelnen Phasen der Entstehung eines neuen Produktes.

Die Phase des Anlaufmanagements startet erst mit der Fertigstellung eines Produkt-Prototyps und beschäftigt sich mit den Herausforderungen des Serienanlaufs auf dem Weg zur Serienproduktion.

Normen und Standards begleiten den gesamten Entwicklungs- sowie Anlaufprozess und dienen als Regelwerk für sicherheitstechnische Festlegungen und Prüfbedingungen.

### 5.6.1 Normen und Standards

Neben der Straßenfahrzeugtechnik, der Energieversorgung und der erforderlichen Informations- und Kommunikationstechnologie ist das Einhalten von Normen und Standards eine zentrale Voraussetzung für den Erfolg der Elektromobilität. Insbesondere im Bereich der Normung und Standardisierung ist eine enge Zusammenarbeit der bisher weitgehend getrennt betrachteten Domänen Automobiltechnik, Elektro- und Energietechnik sowie Informations- und Kommunikationstechnik notwendig (Nationale Plattform für Elektromobilität 2010a). Außerdem dienen Normen und Standards dazu, Rahmenbedingungen festzulegen, die den Herstellern ein gewisses Maß an Investitionssicherheit bieten (Nationale Plattform für Elektromobilität 2010a).

Um vom Kunden akzeptiert zu werden, muss ein Elektrofahrzeug die gleiche Sicherheit und Mobilität wie ein konventionelles Fahrzeug bieten – und das zu einem angemessenen Preis. Daher werden im Folgenden neben der Zulassung die Themen

Sicherheit, Ladeinfrastruktur, individuelle Mobilität und Systemkomponenten anhand der derzeit wichtigsten Normen und Standards behandelt. Eine aktuelle Übersicht aller relevanten Normen und Standards zur Elektromobilität liefert die deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität – Version 1.

### 5.6.1.1 Zulassung

Die Fahrzeughomologation ist ein überstaatliches System für die Zulassung von Fahrzeugen und Fahrzeugteilen (vgl. [Kap. 5.1](#)). Sie basiert auf dem „Übereinkommen von 1958“, das im Rahmen der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE) geschlossen wurde. Die Vertragsparteien des ECE-Abkommens sind dazu berechtigt, Vorschriften für die Genehmigung von Fahrzeugen, Ausrüstungsgegenständen und Teilen von Kraftfahrzeugen zu erlassen ([Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung](#)). Gleichmaßen gibt es die Verpflichtung, die Typgenehmigungen aller Vertragsparteien anzuerkennen (StVZO § 21a). Die technischen Vorschriften beziehen sich auf die Themen aktive und passive Sicherheit, Umweltschutz und Kraftstoffverbrauch von Radfahrzeugen (Nationale Plattform für Elektromobilität [2010b](#)). Nach dem Beitritt der Europäischen Gemeinschaft 1998 beteiligte sich diese aktiv an den Verhandlungen zu einem zweiten internationalen Übereinkommen (Beschluss 97/836/EG). Das sog. „Parallelübereinkommen“ unterscheidet sich vom Übereinkommen von 1958 darin, dass es keine gegenseitige Anerkennung von Genehmigungen vorschreibt (Beschluss [2000/125/EG](#)). Es bietet Ländern die Möglichkeit, sich an der Ausarbeitung globaler technischer Regelungen zu beteiligen, ohne die Verpflichtungen der gegenseitigen Anerkennung zu übernehmen (Zusammenfassungen der EU-Gesetzgebung).

Elektrofahrzeuge müssen weitestgehend die gleichen Vorschriften wie Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor erfüllen. Außerdem bestehen zusätzliche Vorschriften, die nur für Kraftfahrzeuge mit elektrischem Antrieb gelten. Dafür wurden einige ECE-Regelungen, wie bspw. die ECE-R 85 zur Ermittlung der Motorleistung oder die ECE-R 100 für die Sicherheitsbedingungen, überarbeitet bzw. weiterentwickelt (Nationale Plattform für Elektromobilität [2010b](#)).

### 5.6.1.2 Produkt- und Betriebssicherheit

Die Produkt- und Betriebssicherheit ist ein wichtiges Thema in der Elektromobilproduktion. Vor allem hier müssen allgemein akzeptierte Regeln und Prüfverfahren die Sicherheit für den Anwender gewährleisten. Vorrangig behandelt werden die Themen elektrische Sicherheit, im Hinblick auf die Herausforderung durch die Hoch-Volt-Technik, und die funktionale Sicherheit (Nationale Plattform für Elektromobilität [2010a](#)).

### 5.6.1.3 Elektrische Sicherheit

In § 62 der StVZO heißt es: „Elektrische Einrichtungen von elektrisch angetriebenen Kraftfahrzeugen müssen so beschaffen sein, dass bei verkehrsüblichem Betrieb der Fahrzeuge durch elektrische Einwirkung weder Personen verletzt noch Sachen beschädigt werden können.“

Deshalb wird in den meisten Elektrofahrzeugen zur Versorgung der Hoch-Volt-Verbraucher ein vollständig isoliertes Gleichspannungssystem (Hoch-Volt-System) installiert. Als Hoch-Volt bezeichnet man die Spannungsklasse B mit Spannungen größer 30 V AC bis einschließlich 1.000 V AC bzw. größer 60 V DC bis einschließlich 1.500 V DC. Ähnlich einem IT-Netz (frz. Isolé terre) zeichnet sich das Hoch-Volt-Netz durch seine erhöhte Ausfall- und Unfallsicherheit bei Fehlern der Isolation aus. Der Vorteil besteht darin, dass ein erster Isolationsfehler zwischen einem Leiter und dem Gehäuse bzw. der Karosserie keine schädlichen Auswirkungen hat, sodass das elektrische System des Fahrzeugs nicht abgeschaltet werden muss. Ein Isolationsüberwachungsgerät (ISO-Wächter) kontrolliert den Isolationszustand regelmäßig oder permanent und meldet dem Fahrer den Fehler, der umgehend behoben werden sollte, da ein Isolationsfehler des zweiten Leiters zu einem Kurzschluss führen würde (Sagawe 2010).

Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag haben, wie eingangs erwähnt, oberste Priorität. Die ISO 6469-3 – gültig für das fahrende und stehende Fahrzeug – soll den Schutz gegen direktes und indirektes Berühren des Elektrofahrzeugs gewährleisten (Hofheinz 2010). Dazu gehören u. a. die Basisisolierung aller spannungsführenden Teile und der Potenzialausgleich von Karosserieteilen. Bei der Isolationskoordination sind außerdem die Mindestabmessungen für Luft- und Kriechstrecken zu beachten (DIN IEC 60664).

Für die Typprüfung ist die ECE-R 100 bereits verbindlich vom Gesetzgeber vorgeschrieben. Es sind allerdings noch nicht alle Sicherheitsmaßnahmen zur Hoch-Volt-Technik darin erfasst.

#### **5.6.1.4 Funktionale Sicherheit**

Derzeit ist die ISO 26262 „Functional safety – Road vehicles“ für Straßenfahrzeuge nicht zulassungsrelevant. Der Automobilhersteller ist jedoch aus Produkthaftungsgründen dazu verpflichtet, die Sicherheitserwartungen zu erfüllen, die der Verbraucher nach dem Stand der Technik erwarten darf. Dieser Stand wird durch Normen festgelegt. Seit Juli 2009 liegt die ISO 26262 als DIS (Draft International Standard – internationaler Standardentwurf) vor. Mitte 2011 wurde sie als internationaler Standard veröffentlicht und löste damit die IEC 61508 für den Automobilbereich ab. Die IEC 61508 regelte die Entwicklung von sicherheitsrelevanten elektrischen, elektronischen und programmierbaren elektronischen Systemen. Jedoch war dieser Standard für den modernen Automobilbereich nicht spezifisch genug. Daher entwickelte man unter Beteiligung der Automobilindustrie die ISO 26262.

Momentan beschränkt sich ihr Geltungsbereich auf Personenkraftwagen bis 3,5 t zulässiges Gesamtgewicht. In der Automobilindustrie werden Systeme durch den Plattformgedanken auch in anderen Fahrzeugklassen verwendet. Beispielsweise unterscheiden sich Fensterheber in einem Pkw kaum oder gar nicht von denen in einem Nutzfahrzeug. Somit ist es grundsätzlich sinnvoll, die ISO 26262 auf alle Klassen von Straßenfahrzeugen anzuwenden (Sauler und Kriso 2009).

### 5.6.1.5 Systemkomponenten

Die Etablierung des Elektroautos wird sich innerhalb von Jahren vollziehen. Daraus resultieren flache Anlaufkurven in der Produktion. Um preislich dennoch konkurrenzfähig zu bleiben, ist eine unnötige Variantenvielfalt zu vermeiden und die Kompatibilität der Systemkomponenten in und außerhalb des Elektrofahrzeugs zu gewährleisten (E-Mobility 2011).

### 5.6.1.6 Kabel und Steckverbindungen

Kabel und Steckverbindungen in Elektrofahrzeugen bieten ein enormes Potenzial zur Kostenreduzierung durch Standardisierung. Neben der Erarbeitung kompatibler Schnittstellen untereinander werden hohe Ansprüche an die Qualität und Leistungsfähigkeit gelegt (Nationale Plattform für Elektromobilität 2010a). Im Gegensatz zu einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor wird die Energie im Elektrofahrzeug über Kupfer- und Aluminiumkabel transportiert. Neben den sicherheitsrelevanten Aspekten ist auch die elektromagnetische Verträglichkeit, insbesondere im Hinblick auf die sich stark weiterentwickelnden Kommunikationstechnologien und Unterhaltungselektronikanteile, zu beachten. In den Steckverbindungen werden zusätzlich zu den Hauptstromkontakten voreilende Signalkontakte integriert, um eine Unterbrechung der Signalleitung zu erkennen und ggfs. eine Bordnetztrennung durchzuführen. Dadurch können beim Trennen von stromführenden Steckverbindungen Lichtbögen vermieden werden, was nicht nur die Sicherheit, sondern auch die elektromagnetische Verträglichkeit erhöht (Hauck o. J.). Deutschland und Frankreich haben bereits einen Vorschlag zur Erweiterung der ECE-R 10 „Elektromagnetische Verträglichkeit“ eingereicht (Nationale Plattform für Elektromobilität 2010a).

Die ISO 6722 legt zwei Spannungsklassen (60 V und 600 V) für Leitungen im Elektrofahrzeug fest. Für die Zukunft werden noch höhere Spannungsklassen angestrebt, da diese kleinere Ströme und somit auch kleinere Kabelquerschnitte ermöglichen. Der Vorteil liegt in der Material- und Gewichtsersparnis.

Weiteres Potenzial zur Kostenreduzierung bietet die Erhaltung des 14-V-Bordnetzes. So können viele der heute effizient hergestellten Komponenten auch im Elektrofahrzeug verwendet werden. Das 42-V-Bordnetz wird für Nebenaggregate genutzt, die bspw. mechanisch arbeitende Systeme ersetzen können oder aufgrund ihrer Leistungsaufnahme wirtschaftlicher mit 42 V betrieben werden (42-V-Bordnetz – 42 V on-board power supply).

### 5.6.1.7 Ladeinfrastruktur

Die Schnittstelle Elektrofahrzeug-Smart Grid und die dazugehörige Infrastruktur sind ein weitreichendes Themenfeld. Schließlich geht es hierbei nicht nur um das Aufladen aus der Steckdose. Neben den verschiedenen Ladeorten spielen der Energiefluss und die Kommunikation eine wichtige Rolle (Nationale Plattform für Elektromobilität 2010a).

Für ein langsames Laden des Privatwagens über Nacht in der heimischen Garage ist die Infrastruktur bereits gegeben. Dafür sind 220 V Haushaltsstrom völlig ausreichend. Die Langstreckennutzung von Elektrofahrzeugen gestaltet sich jedoch ungleich schwieriger. Eine Möglichkeit ist das induktive Laden auf Parkplätzen. Allerdings ist der Aufbau eines flächendeckenden Netzes fraglich und teuer. Daher wird dem induktiven Laden in naher Zukunft weniger Bedeutung beigemessen, weshalb dafür zurzeit lediglich ein Normungsvorschlag vorliegt (IEC 61980-1). Eine weitere Möglichkeit wären Batteriewechselstationen. Auch hier gibt es viele technische Herausforderungen und noch keine Ansätze zur Standardisierung (Bille et al. 2011). Auf dem Gebiet der Redox-Flow-Betankung besteht noch Forschungsbedarf, bevor es zu Normvorschlägen kommen kann (Nationale Plattform für Elektromobilität 2010a).

Am weitesten vorangeschritten sind die Normungsaktivitäten zum kabelgebundenen Laden, vor allem bei den mechanischen und elektrischen Kennwerten sowie der Signalisierung (Nationale Plattform für Elektromobilität 2010a). Hervorzuheben ist hier die bereits bestehende Norm IEC 62196, die u. a. das leitungsgebundene Laden von Elektrofahrzeugen bis 250 A Wechselstrom und 400 A Gleichstrom spezifiziert. Bei den Lademodi unterscheidet man zwischen Haushaltsstrom (bis 16 A) und Gerätestrom (bis 32 A) an der Standardsteckdose und Schnellladungen an speziellen Ladestationen bis zu 63 A.

Der dritte zentrale Aspekt der Ladeinfrastruktur ist die Kommunikation. Zum einen soll der Nutzer den Stromlieferanten selbst auswählen und zum anderen auch über den Lademodus bestimmen können. Vorstellbar ist, dass Personen ihren Wagen zu Hause und am Arbeitsplatz, der bspw. in einem anderen Netzgebiet liegt, laden. Solche Szenarien stellen die Entwicklung von Abrechnungssystemen vor große Herausforderungen. Des Weiteren soll eine Rückspeisung des Stroms möglich sein. Für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien können dadurch Phasen mit geringer Einspeisung überbrückt werden. Zu beachten sind hierbei u. a. die Norm IEC 62351 und die aktuell noch in Arbeit befindliche Norm ISO/IEC 15118 (Nationale Plattform für Elektromobilität 2010a).

## 5.6.2 Produkt- und Prozessentwicklungsprozess

Der Prozess der Produkt- und Prozessentwicklung beschreibt, welche Aufgaben nötig sind, um von einem Entwurf zu einem marktreifen Serienprodukt zu gelangen, und definiert die Verantwortlichkeiten (Seidel 2005).

Ein herkömmliches Auto besteht aus 10.000–20.000 Teilen (Heß 2008). Die Entwicklung eines dieser Teile besteht aus einem ausgeprägten und funktionsübergreifenden Prozess.

Darum ist es unumgänglich, neue Produkte und Prozesse verzahnt und integriert zu entwickeln und frühzeitig Expertengruppen aus Marketing, Entwicklung, Forschung, Produktion, Finanzabteilung, Top-Management, Rechtsabteilung sowie Verkauf und Serviceabteilung einzubinden (Schäppi et al. 2005).



**Abb. 5.40** Übersicht Produktentwicklungsprozess (in Anlehnung an Schäppi et al. 2005)

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden die einzelnen Phasen dieses Prozesses beschrieben. Es handelt sich um Planung, Konzeptentwicklung, Systemgestaltung, Detailgestaltung sowie Test und Optimierung. Der Produktionsstart ist der abschließende Teil und wird in [Kap. 3.8](#) erläutert (Laufenberg 1996) (Abb. 5.40).

### 5.6.2.1 Planung

Die erste Phase ist die Planung. Hier werden die grundsätzlichen Ziele der Neuentwicklungen und der grobe Projektablauf konzipiert. Die Ergebnisse werden in einem Businessplan festgehalten. Federführend ist in dieser ersten Phase das Marketing. Es müssen zunächst die Chancen für Elektromobile am Markt untersucht und die Marktsegmente definiert werden, um daraus die entsprechenden Produkte zu identifizieren. In dieser Phase werden auch die Zielgruppen und daraus resultierende Produkthanforderungen festgelegt. Bei Elektrofahrzeugen geht man derzeit vor allem von drei Hauptnutzerguppen im privaten Bereich aus (Peters und Hoffmann 2011):

- Kunden, die sich von neuen Technologien begeistern lassen
- Kunden, die einen Beitrag zum Umweltschutz leisten wollen
- Kunden, die Wert auf Individualität und Fahrspaß legen

Die Planung der Produktplattform durch die Entwicklungsabteilung und die Bewertung der neuen Technologien sind ebenfalls Teil dieser Phase (Schäppi et al. 2005).

Unmittelbar danach müssen bereits in der Produktion die entsprechenden Anforderungen identifiziert werden, um von Beginn an bei der Planung des Produktes mitzuwirken und die Supply-Chain-Strategien zu bestimmen. Im Bereich der Forschung müssen die verfügbaren Technologien demonstriert werden, um deren Nutzen und Möglichkeiten genauer abschätzen zu können. Dies ist besonders wichtig, wenn man ganz neue Bereiche wie die der Elektromobilität erschließt, da die technischen Möglichkeiten noch nicht abschließend bekannt sind. Die Finanzabteilung stellt Planungsziele zur Verfügung, damit bereits zu Beginn bekannt ist, welche finanziellen Ziele verfolgt werden. In dieser frühen Phase ist auch das Management entscheidend eingebunden, um die Projektressourcen sinnvoll zuzuteilen und die Zuständigkeiten vom ersten Projektschritt an eindeutig zuzuordnen. Dadurch werden Kompetenzüberschreitungen vermieden (Schäppi et al. 2005).

Besondere Aufmerksamkeit benötigen in der Elektromobilität die entscheidenden Schlüsseltechnologien: der Elektromotor als Energiewandler und die Batterie als Energiespeicher (Wallentowitz et al. 2010).

### 5.6.2.2 Konzeptentwicklung

Während der Konzeptentwicklung erfasst das Marketing die Kundenbedürfnisse. Nur so kann sichergestellt werden, dass das zu entwickelnde Elektromobil auch Akzeptanz beim Kunden findet. In einem weiteren Schritt müssen die wichtigsten Kundengruppen identifiziert werden, um von Beginn an die Hauptzielgruppe direkt ansprechen zu können. So muss rechtzeitig bestimmt werden, ob zu der Hauptzielgruppe von Elektrofahrzeugen neben bereits beschriebenen Privatkunden auch Gewerbekunden wie Pflege- oder Lieferdienste zählen (Peters und Hoffmann 2011). Außerdem bedarf es einer ständigen Recherche und Kontrolle, was von Mitbewerbern entwickelt wurde bzw. aktuell entwickelt wird. So ist eine ständige Überprüfung der eigenen Marktposition möglich. In der Entwicklung wird geprüft, welche Produktkonzepte realisierbar und technisch umsetzbar sind. Aus dieser Überprüfung folgt die Entscheidung, welche Prototypen letztendlich entwickelt werden sollen. Die Produktion muss möglichst genau die Herstellkosten abschätzen und grundsätzlich die Produktionsmöglichkeiten bewerten. Nur so ist es möglich, einen genauen Überblick über die anfallenden Kosten der Herstellung zu haben und die Wirtschaftlichkeit des gesamten Produktes von Anfang an abschätzen zu können. Die Finanzabteilung leistet Unterstützung bei der ökonomischen Analyse und verfeinert so die Berechnungen. Die Rechtsabteilung muss sich frühzeitig mit Fragen rund um die entsprechenden Patente beschäftigen. Oft wird dieser Punkt nicht ausreichend früh und intensiv genug beachtet. Dadurch können z. T. erhebliche Zusatzkosten entstehen (Schäppi et al. 2005).

Ein wichtiger Ansatz, um die teilweise sehr hohen Kosten der Elektromobilität, die vor allem durch die Batterien entstehen, zu senken, ist die Modularisierung (Matthies et al. 2010).

Göpfert beschreibt sie folgendermaßen: Die Bauteile sind möglichst unabhängig voneinander und nur durch wenige Schnittstellen miteinander verbunden, um die Systemkomplexität zu reduzieren (Göpfert und Steinbrecher 2000). So lassen sich äußerst komplexe Systeme beherrschen und deutlich schneller entwickeln. Mit der Modularisierung der Bauteile können die einzelnen Komponenten unabhängig und damit gleichzeitig entwickelt werden und nicht wie sonst üblich abhängig voneinander und somit nacheinander. Die Modularisierung verlangt allerdings einen deutlichen Mehraufwand an Organisation. Da die Komponenten gleichzeitig entwickelt werden, müssen ständig Absprachen getroffen werden. Dies wird noch erschwert, da im Zuge der Globalisierung die einzelnen Entwicklungsstandorte oft räumlich voneinander getrennt sind.

Zuständigkeiten und Entscheidungsträger sollten deutlich voneinander getrennt sein, um Überschneidungen zu vermeiden.

Um ein Optimum an Kosten und Durchlaufzeit zu erreichen, müssen auch die Organisationsstrukturen modularisiert werden. Die einzelnen Entwicklungsprojekte müssen stets abgeglichen und überprüft werden. Hierbei wäre eine zu starre Organisationsform hinderlich. Stattdessen muss zu jeder Zeit gewährleistet sein, dass man immer passend auf die neuen Situationen reagieren kann.

Ist die modularisierte und standardisierte Organisationsstruktur geschaffen, kann sie bei möglichen Änderungen schnell erweitert und entsprechende Module können ausgewählt werden.

Durch die Modularisierung ist es möglich, eine Vielzahl von mittelständischen Unternehmen in die Elektromobilproduktion einzubinden, da es diesen aufgrund ihrer geringen Kapazitäten oft nicht möglich ist, ihre guten Ideen und Lösungen für die hohen Stückzahlen der Serienproduktion bereitzustellen.

Die Modularisierung hat neben dem organisatorischen Mehraufwand weitere Nachteile. So können zwar schnell neue Produkte entwickelt werden, da man sich jetzt nur noch aus dem Modulbaukasten „bedienen“ muss, aber oft sind diese Lösungen nicht optimal aufeinander abgestimmt, das volle Potenzial wird nicht ausgeschöpft.

Außerdem wird es durch die vielen standardisierten Teile zunehmend schwerer, das eigene Produkt von den anderen abzugrenzen.

Sind die Schnittstellen zwischen den einzelnen Modulen standardisiert, können problemlos einzelne Module ausgetauscht und erweitert werden.

Es gibt aber auch Schnittstellen zwischen der technischen und der organisatorischen Modularität. So wird bspw. stets ein organisatorischer Aufwand benötigt, wenn zwei Module über die Schnittstellen miteinander verbunden werden, da diese in der Regel in unterschiedlichen Projektteams oder Abteilungen entwickelt werden (Göpfert 1998).

### 5.6.2.3 Systemgestaltung

In der dritten Phase der Systemgestaltung werden Produktfamilien erstellt, also die verschiedenen Modellvarianten der Elektromobile. Hier wird das gesamte Produktportfolio entwickelt, das dem Kunden angeboten wird. Außerdem werden für die einzelnen Produkte die Zielpreise festgelegt. Im Bereich der Entwicklung werden alternative Produktarchitekturen und Schnittstellen erarbeitet (Neuhausen 2002). Die Produktion befasst sich nun näher mit den Lieferanten der Schlüsseltechnologien der Elektromobilität. Diese Zusammenarbeit wird immer wichtiger, da eine Vielzahl von Komponenten bereits als ganze Baugruppen von den Lieferanten geliefert werden. Darüber hinaus wird inzwischen viel Entwicklungsarbeit direkt von den Lieferanten durchgeführt (Eversheim 2006). Ein Beispiel ist die Kooperation zur Entwicklung von Elektromotoren der Daimler AG mit der Robert Bosch GmbH (Krust 2011) (vgl. Kap. 3.3). Parallel wird das Montageschema entwickelt und die genauen Bedarfsmengen werden bestimmt (Schuh 2006). In diesem Zusammenhang werden mithilfe der Finanzabteilung Make-or-Buy-Entscheidungen getroffen. Zu diesem Zeitpunkt befasst sich auch der Service mit dem Produkt. Es werden zu erwartende Wartungs- und Reparaturintervalle geplant und dafür benötigte Ressourcen bereitgestellt. Eine entsprechende Schulung der Mitarbeiter für die jeweiligen Produkte ist ebenfalls notwendig. Zudem muss bei Elektromobilen darauf geachtet werden, dass nun auch Hoch-Volt-Techniker und Elektroniker sowohl für die Produktion als auch für die Wartung gebraucht werden.

Insgesamt werden also in dieser Phase der Produktumfang und das Sourcing- und Montagekonzept erstellt.

#### 5.6.2.4 Detailgestaltung

In dieser Phase ist vorrangig die Entwicklungsabteilung tätig, um ausgereifte Daten weitergeben zu können. Dazu definiert sie die Teilgeometrien und Toleranzen (Ulrich und Eppinger 2000).

Zeitgleich wird ein Marketingplan erstellt. Es wird genau festgelegt, wie, wo und wann geworben wird und wie hoch der dafür vorgesehene Etat ist.

Außerdem werden die zu verwendenden Materialien ausgewählt. Dabei müssen mehrere Punkte beachtet werden: Die Materialien müssen funktionsorientiert sein und die geforderte Anwendung erfüllen, denn es werden wirtschaftliche Entscheidungen aufgrund einer Kombination aus kostengünstigem Material und entsprechenden Verarbeitungsverfahren erwartet. Außerdem muss eine preisgünstige Demontage gewährleistet sein, die eine umweltbewusste Entsorgung ermöglicht (Czichos und Hennecke 2004). Um bei Elektromobilen das hohe Gewicht der Batterien kompensieren zu können, muss der Leichtbau fokussiert werden. Auch muss das Industriedesign (Produktdesign) komplett dokumentiert werden, um jederzeit darauf zugreifen zu können. In der Produktion werden die genauen Produktions- und Qualitätssicherungsprozesse erarbeitet, Überprüfungsintervalle, Messmethoden und Messtoleranzen müssen festgelegt werden. Besonders zu überprüfen sind angelieferte Zukaufteile darauf, ob sie den internen Qualitätsanforderungen genügen. Es muss eine Liste der benötigten Werkzeuge erstellt werden. Sind diese noch nicht vorhanden, müssen sie entweder selber hergestellt oder eingekauft werden (Schäppi et al. 2005).

#### 5.6.2.5 Test und Optimierung

In der anschließenden Phase „Test und Optimierung“ werden die Produktmerkmale, Strategien und Prozesse kontrolliert und angepasst.

Dies umfasst zum einen die Entwicklung von Markteinführungsstrategien mit entsprechenden Werbematerialien und die Unterstützung von Feldtests. Hierbei ist es wichtig, dass man einen Überblick darüber erhält, wie das Elektrofahrzeug von den Kunden angenommen wird, um ggfs. noch Optimierungen durchzuführen. In der Entwicklung werden sämtliche benötigten Tests über Verlässlichkeit, Leistung und Lebensdauer durchgeführt (Neuhausen 2002). Dies kann u. a. mit realen Versuchen – bei Fahrzeugen für die Unfallsicherheit durch Crashtests – erfolgen. Heutzutage werden eine Vielzahl dieser Tests durch Computersimulationen erbracht. Diese Simulationen sind z. T. erheblich kostengünstiger als Prototypenversuche. Bisher wurden keine Sicherheitsbedenken bei Elektrofahrzeugen durch Crashtests festgestellt (Brieter 2011). Außerdem müssen alle Genehmigungen vorliegen, geprüft und letzte Designänderungen erbracht werden.

In der Produktion werden nun die genauen Fertigungs- und Montagevorgänge erarbeitet, um einen stabilen Anlaufprozess sicherstellen zu können. Die beteiligten Mitarbeiter werden durch Schulungen auf ihre bevorstehenden Arbeitsvorgänge bestmöglich vorbereitet. Für die Elektromobilproduktion wird Fachpersonal der Hoch-Volt-Technik

gebraucht. Schlussendlich müssen nun die exakten Qualitätssicherungsstandards feststehen (Ulrich und Eppinger 2000).

Vom Vertrieb wird der Verkauf genau geplant, um bei der Markteinführung das Elektromobil zielgenau dem Kunden präsentieren und anbieten zu können.

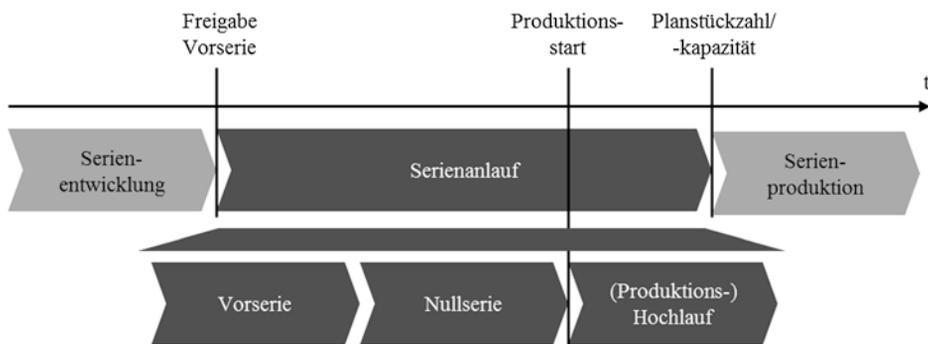
### 5.6.3 Vom Prototyp zur Serienfertigung – Anlaufmanagement in der Elektromobilproduktion

Aufgrund diverser Unsicherheitsfaktoren bei den Kundenerwartungen, Marktanforderungen, der Wettbewerbssituation und der zu produzierenden Stückzahlen benötigt der Serienanlauf in der Elektromobilproduktion viel Aufmerksamkeit. Dabei steht die Skalierbarkeit der Produktion im Mittelpunkt (Schönfelder et al. 2009; Hüttel et al. 2010).

Es gibt zahlreiche Parallelen zum Serienanlauf der konventionellen Automobilproduktion, aber neue Herausforderungen bedingen angepasste Handlungsspielräume und -schwerpunkte (Hüttel et al. 2010). Maßgeblich für den Erfolg oder Misserfolg des Produktes ist das Management des Serienanlaufs vor dem Hintergrund von Time-to-Market und Time-to-Volume sowie von Kosten, Qualität und Produktkomplexität (Straube 2004).

Der Serienanlauf kennzeichnet zugleich die Phase der Überführung einer abgeschlossenen Prototypentwicklung bis hin zur Serienproduktion bei voller Kapazitätserreichung und beinhaltet damit auch den Produktionsstart (Wiesinger und Housein 2002). Er wird in drei Hauptphasen unterteilt (s. Abb. 5.41).

In der Vorserie werden unter möglichst seriennahen Bedingungen Prototypen hergestellt, aber noch nicht alle Teile mit Serienwerkzeugen produziert. Diese Phase dient hauptsächlich der Problemfrüherkennung, der Prozessverbesserung und der Mitarbeiterqualifikation (Schuh et al. 2008).



**Abb. 5.41** Phasen des Serienanlaufs (in Anlehnung an Gentner 1994; Wangenheim 1998)

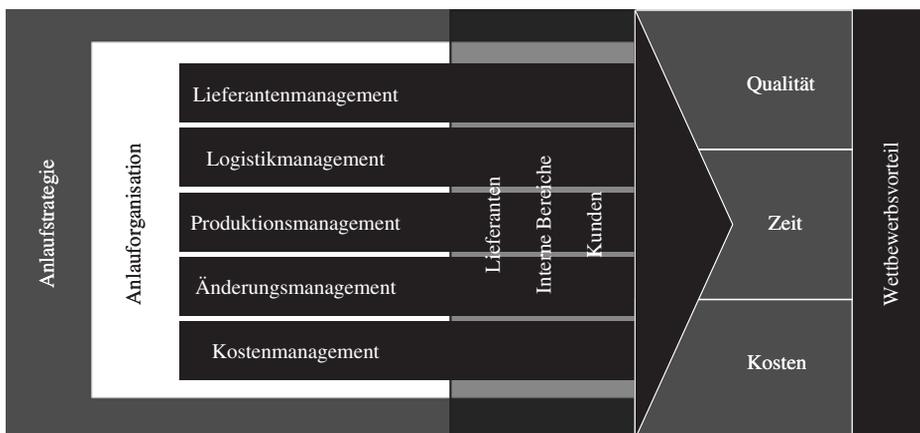
Die Nullserie stellt eine seriennahe Produktion dar, weil alle verwendeten Teile den späteren Serienwerkzeugen entstammen und auch Zulieferer bereits unter Serienbedingungen fertigen. Spätestens mit Beginn der Nullserie müssen sämtliche Komponenten, auch die der zugekauften Teile, vollständig definiert sein und eine detaillierte Kostenabschätzung muss vorliegen. Der Beginn der Nullserie wird auch als Launch approval bezeichnet. Vor- und Nullserie werden oftmals aufgrund des erheblichen Aufwands zu einer Pilotserienproduktion zusammengefasst (Baumgarten und Risse 2001; Schuh et al. 2008; Wangenheim 1998).

Mit der Freigabe für die Serie beginnt der Produktionsstart und somit der Produktionshochlauf. Er ist beendet (und damit auch der Serienlauf), wenn eine stabile Produktion erreicht ist und geplante Stückzahlen unter Serienbedingungen gefertigt werden (Wangenheim 1998; Baumgarten und Risse 2001).

Der Serienanlauf als Verbindungselement von Serienentwicklung und Serienproduktion hat ein enormes Optimierungspotenzial, da in dieser Phase zahlreiche Handlungsfelder und Stellhebel zur Komplexitätsreduktion, Verbesserung und Einsparung existieren. Deshalb ist für die Beherrschung dieser kritischen Phase ein ganzheitliches und kontinuierliches Anlaufmanagement zentral (Schuh et al. 2005; Kuhn et al. 2002).

Gleichzeitig wird vor dem Hintergrund neuer, teils noch unbekannter Herausforderungen der Elektromobilproduktion die Anwendung eines integrierten Anlaufmanagementmodells empfohlen. Es besteht aus drei Kernkomponenten: den Akteuren, den Managementdimensionen sowie den Zieldimensionen und deren Wirkzusammenhängen (s. Abb. 5.42) (Schuh et al. 2008).

Im Folgenden wird auf die sieben erfolgskritischen Managementdimensionen Anlaufstrategie, Anlauforganisation, Lieferantenmanagement, Logistikmanagement, Produktionsmanagement, Änderungsmanagement und Kostenmanagement eingegangen



**Abb. 5.42** Integriertes Anlaufmanagementmodell (in Anlehnung an Schuh et al. 2008)

und es werden Besonderheiten und Unterschiede der Elektromobilproduktion im Vergleich zur konventionellen Automobilproduktion diskutiert.

### 5.6.3.1 Anlaufstrategie

Die Anlaufstrategie ist ein übergeordnetes Regelwerk für sämtliche Anläufe eines Unternehmens an allen Standorten sowie Handlungsgrundlage für am Serienanlauf beteiligte Unternehmen. Zugleich operationalisiert sie die Ziele der Unternehmensstrategie auf den Serienanlauf (Schuh et al. 2008).

Unternehmensstrategien konventioneller Automobilhersteller zielen auf einen „First-Mover“-Strategieansatz ab, der zur Generierung nachhaltiger Wettbewerbsvorteile durch Monopolrenten („Pioniergewinne“) führen kann (Wiesinger und Housein 2002). Er ist für die noch wenig standardisierte Produktion von Elektrofahrzeugen besonders interessant. Der Wettstreit um eine Vormachtstellung in der Elektromobilproduktion hängt somit auch von einer geeigneten Anlaufstrategie und einem erfolgreichen Anlaufmanagement ab.

Eine auf Wettbewerbsvorteil ausgelegte Anlaufstrategie muss die drei Zieldimensionen Zeit, Kosten und Qualität integriert betrachten und gleichzeitig Bindeglied zu vor- und nachgelagerten Entwicklungs- und Produktionsprozessen sein (Schuh et al. 2008). Sie übernimmt damit die phasen- und funktionsübergreifende Koordination innerhalb eines Unternehmens und stellt die Anschlussfähigkeit der Funktionen und Bereiche weiterer Produktionsstandorte sowie sämtlicher am Anlauf beteiligten Unternehmen sicher (Pfohl und Gareis 2000; Schuh et al. 2008).

Für die Formulierung einer Anlaufstrategie stehen die Konzepte des strategischen Flexibilitäts-, Komplexitäts-, Qualitäts- und Kostenmanagements zur Verfügung, die in den Managementdimensionen des integrierten Anlaufmanagementmodells verankert sind. Für einen erfolgreichen und reibungslosen Serienanlauf sind die Flexibilitätssteigerung und die Komplexitätsreduktion wichtige Eckpfeiler einer Anlaufstrategie, da sie deutlich zu einer verbesserten Anlaufperformance beitragen (Schuh et al. 2008).

### 5.6.3.2 Anlauforganisation

Die Anlauforganisation dient der funktions- und unternehmensübergreifenden Abstimmung und Integration im Serienanlauf und verringert Effizienz- und Effektivitätsverluste an diesen Schnittstellen. Sie strukturiert die beteiligten Bereiche des Serienanlaufs räumlich und formal in einer Anlauf-Aufbauorganisation und legt in einer Anlauf-Ablauforganisation ihre zeitlichen und logischen Beziehungen zueinander fest (Schuh et al. 2008).

Die Aufbauorganisation gibt die strukturellen Rahmenbedingungen vor, während die Ablauforganisation die Arbeits- und Informationsprozesse regelt (Frese 1998; Schmidt 1994). Zur ablauforganisatorischen Strukturierung und Unterstützung der Serienanläufe werden standardisierte Regelwerke und Methoden wie bspw. das Gateway-Konzept eingesetzt. Dies gilt für die konventionelle Automobilproduktion und auch für die

Elektromobilproduktion. Es definiert die für alle Anlaufbeteiligten wichtigsten Phasen und Meilensteine und weist eindeutig Verantwortlichkeiten und Arbeitsumfänge zu (Schuh et al. 2008).

Zudem gibt es verschiedene Grundtypen von Anlauforganisationen, von temporären Projektorganisationen über spezielle Anlaufteams bis hin zu Linienorganisationen, die nach Unternehmensvoraussetzungen und -bedürfnissen ausgewählt werden müssen. Hinsichtlich der noch unbekanntes Stückzahlen von Elektrofahrzeugen und der Wettbewerbssituation hat bei der Auswahl einer geeigneten Anlauforganisation die Skalierbarkeit der Produktion hohe Priorität.

Ohne eine klar definierte Anlauforganisation und -struktur sind Verantwortlichkeiten, Rollenverständnisse und Schnittstellen unzureichend geregelt. Dies führt zu Kompetenzmangel, fehlender Kooperationsbereitschaft und Ressourcenkonflikten (Schuh et al. 2008).

Zur Anlauforganisation gehört auch die Definition des Aufbaus, der Aufgaben und der Kompetenzen von Anlaufteam und Anlaufmanager. Die Arbeit dieser Akteure startet mit dem Beginn der Nullserienproduktion und endet mit der stabilen Serienproduktion. Aufgrund der interdisziplinären Zusammensetzung des Anlaufteams aus unterschiedlichen Funktionsbereichen eines Unternehmens und der dadurch konzentrierten fachlichen und methodischen Kompetenz kann das Anlaufteam Probleme schnell und effizient lösen. Der Anlaufmanager trägt die Verantwortung für die erfolgreiche Durchführung des Serienanlaufs und koordiniert dessen Planung, Steuerung und Kontrolle. Er ist mit Weisungsbefugnis ausgestattet, hat ein ausgeprägtes technisches Produkt- und Prozesswissen und verfügt zudem über sehr gute Kunden- und Lieferantenkontakte (Fitzek et al. 2004; Schuh et al. 2008).

### 5.6.3.3 Lieferantenmanagement

Das Lieferantenmanagement ist in der konventionellen Automobilproduktion eine der wichtigsten Managementaufgaben, um die Qualitäts-, Zeit- und Kostenziele des Anlaufmanagements zu erreichen. In der Elektromobilproduktion hat es eine Schlüsselrolle. Aufgrund des höheren Outsourcing-Grades und der daraus resultierenden sinkenden Fertigungstiefe der OEMs ist die Kooperation mit internen und externen Partnern von signifikanter Bedeutung (McKinsey 2003). Komplexe Module und Systeme werden von Lieferanten selbstständig als sog. „Black box“ entwickelt und geliefert (Schuh et al. 2008). So ist bspw. in der konventionellen Automobilproduktion der Motor die entscheidende Kernkompetenz, die in der Regel beim OEM liegt. Bei der Elektromobilproduktion ist die Batterie eine entscheidende Kernkompetenz, die beim Lieferanten liegt und als fertiges Modul geliefert wird. Dies zeigt, dass der OEM vermehrt zu einer koordinierenden Instanz in einem Lieferantennetzwerk wird. Dadurch gewinnt die frühzeitige Identifikation und Integration anlaufkritischer Lieferanten an Relevanz (Schuh et al. 2008).

Gleichzeitig liegen wichtige Determinanten des ökonomischen Erfolgs nicht mehr in unmittelbaren, internen Einflussbereichen des Unternehmens, sondern werden im Zuge der Verlagerung von Wertschöpfungsanteilen auf die Lieferanten übertragen (Stölzle und Kirst 2006). Darüber hinaus durchlaufen einige Kaufteile wie bspw.

Batterie oder Elektromotor ebenfalls eine Anlaufphase und stellen dadurch ein erhöhtes Risiko dar. Aus diesen Gründen muss das Lieferantenmanagement eine frühzeitige Lieferanteneinbindung, besonders von anlaufkritischen Lieferanten wie den Batterieproduzenten, fokussieren (Schuh et al. 2008; Hahn und Kaufmann 2002).

#### **5.6.3.4 Logistikmanagement**

Die Logistik gilt aufgrund ihres integrativen Charakters als zentrale Koordinationsinstanz im Unternehmen (Schuh et al. 2008). Die Phasen der Produktentwicklung müssen zeitnah bzw. simultan einen aktiven Einfluss auf die jeweilige Phase der Prozessentwicklung haben. Zugleich sollte ein reger Informationsrückfluss zwischen den einzelnen Phasen herrschen, um Mängel frühzeitig zu identifizieren und zu korrigieren. Die hohe logistische Komplexität des Serienanlaufs impliziert den Bedarf nach stabilen und standardisierten Logistikprozessen. Als Instrumente tragen integrative Logistikkonzepte dazu bei, Produktionsstörungen noch vor dem Serienanlauf zu identifizieren und zu vermeiden (Witt 2006). Insbesondere die Absicherung des Materialflusses sowie die Reduzierung innerbetrieblicher Logistikstörungen zwischen Abladestelle und dem Verbauort stehen hier im Fokus (Fitzek 2006; Kirst 2006).

#### **5.6.3.5 Produktionsmanagement**

Neuartige, nicht ausgereifte Prozesse und starke Kapazitätsschwankungen durch unbekannte Stückzahlen fordern ein hohes Maß an Flexibilität im Serienanlauf der Elektromobilproduktion. Vor diesem Hintergrund befasst sich das Produktionsmanagement hauptsächlich mit den Aspekten der Werkstruktur und der Betriebsmittelplanung sowie der Produktionsstandardisierung und der Befähigung der Mitarbeiter (Schuh et al. 2008). Ziel ist es, die Vielzahl an ungeplanten und unvermeidbaren Störungen im Anlauf zu reduzieren und die prozessbeteiligten Mitarbeiter zu befähigen, mit Störungen lösungsorientiert umzugehen (Schuh et al. 2008). In Kap. 1 wurde bereits gezeigt, dass Normen und Standards in der Elektromobilproduktion notwendig sind, um Schwierigkeiten im Serienanlauf – bedingt durch den Neuigkeitsgrad der Prozesse und Produktionsmittel – beherrschbar zu machen. Elektromotoren besitzen eine geringere Komplexität als Verbrennungsmotoren, daher sind Anlaufprozesse evtl. robuster. Die Batterieproduktion stellt aber derzeit noch ein Risiko dar (Hüttl et al. 2010), dessen Ausmaß für den Serienanlauf noch ungewiss ist.

#### **5.6.3.6 Änderungsmanagement**

Änderungen sind definiert als alle nachträglichen Anpassungen von freigegebenen, d. h. verbindlich festgelegten Arbeitsergebnissen (Zanner et al. 2002). Im Serienanlauf stellen Änderungen maßgebliche Kosten- und Zeittreiber dar, deshalb ist es Ziel des Änderungsmanagements, die Termintreue der Prozesse im Serienanlauf sicherzustellen und gleichzeitig Durchlaufzeiten zu reduzieren. Mittel dafür sind präventive Maßnahmen der Änderungsplanung sowie die Implementierung und Nutzung von Standardänderungsprozessen (Schuh et al. 2008).

Der Zeitpunkt von Änderungen spielt eine große Rolle. In den ersten Phasen des Produktentwicklungsprozesses sind Änderungen mit dem geringsten Aufwand zu realisieren (Jania 2004). Doch schon allein in der Entwicklungs- und Konstruktionsphase beanspruchen Änderungen bis zu 40 % der Gesamtressourcen (Lindemann und Reichwald 1998). Auf der anderen Seite sind Änderungen nicht nur als Störgröße zu sehen, da sie auch zu Qualitätssteigerungen und Kostenreduzierung bei Produkten und Prozessen führen. Es darf also nicht allein die Anzahl der Änderungen minimiert werden, sondern der Zeitpunkt dafür muss in die frühe Phase des Produktentwicklungsprozesses verlagert werden (Schuh et al. 2008).

Das Ausmaß von Änderungen ist ebenfalls unterschiedlich. Einerseits gibt es Änderungen, die nur unternehmensintern koordiniert werden müssen, Änderungen in Entwicklungspartnerschaften hingegen unter sämtlichen beteiligten Partnern (Schuh et al. 2008). Diese Entwicklungspartnerschaften spielen in der Elektromobilproduktion eine größere Rolle als noch in der konventionellen Automobilproduktion (vgl. Kap. 4.3.2). Dies muss bei der unternehmensübergreifenden Koordination von Änderungen im Änderungsmanagement berücksichtigt werden.

Gleichzeitig steigen durch teilweise neuartige Prozesse und unbekanntere Stückzahlen die Eintrittswahrscheinlichkeit und Bedeutung von Änderungsvorhaben während der Produktentstehung. Deshalb ist die Implementierung von Standardänderungsprozessen von großer Signifikanz (Schuh et al. 2008).

### 5.6.3.7 Kostenmanagement

Dem Kostenmanagement im Serienanlauf kommen die Aufgaben der Kostensteuerung und der Identifikation von Kostentreibern zu, um die Profitabilität des Gesamtserienanlaufs sicherzustellen (Stölzle et al. 2005; Schuh et al. 2008). Dabei beeinflussen die weiteren Zieldimensionen Zeit und Qualität über ihre Auswirkungen auf den kompletten Produktlebenszyklus und die damit entstehenden Folgekosten bzw. Erlösausfälle den Erfolg und die Gewinnmarge des Produktes (Wiesinger und Housein 2002). Sowohl Terminverzögerungen wie auch Qualitätsmängel haben Auswirkungen auf die direkten und indirekten Kosten des Serienanlaufs (Möller 2002; Schneider und Lücke 2002). Häufig impliziert ein verschobener Verkaufsstart den finanziellen Misserfolg eines Produktes am Markt (Kuhn et al. 2002). Deshalb müssen Instrumente zum Einsatz kommen, die möglichst alle Zieldimensionen abdecken und deren Wechselwirkungen beachten (Möller 2002). Instrumente zur Kostensteuerung im Anlauf sind Frontloading-Konzepte wie bspw. die digitale Simulation oder Design for Manufacturing and Logistics, bei denen Probleme frühzeitig im Entwicklungsprozess identifiziert werden, um Folgekosten zu minimieren (Thomke und Fujimoto 2000; Wildemann 2006).

Für die Elektromobilproduktion spielen die Kosten eine äußerst wichtige Rolle, um sich im Wettbewerb gegenüber der konventionellen Automobilproduktion zu etablieren. Maßgeblicher Kostentreiber ist weiterhin die Batterie. Kapazität und Lebensdauer sind noch beschränkt und Herstellprozesse nicht ausgereift und zugleich kostenintensiv (Hüttl et al. 2010).

### 5.6.3.8 Produktionsstart

Die letzte Phase ist der Produktionsstart. Alle Bedingungen müssen erfüllt sein, um die Serienproduktion starten zu können. Das gesamte Produktionssystem läuft an. Die Produktion beginnt mit den Schlüsselkunden. Die Entwicklung muss die erste Produktionsserie genau analysieren und überprüfen, um Probleme auszuschließen. Andernfalls müssen Änderungsmaßnahmen anhand des Standardänderungsprozesses getroffen werden (Schäppi et al. 2005).

---

## 5.7 Recycling als Teil der Wertschöpfungskette

Bernd Friedrich, Matthias Vest, Tim Georgi-Maschler und Honggang Wang

### 5.7.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Die ursprüngliche Rechtsvorschrift für das Batterierecycling in Europa ist mit der Richtlinie 91/157/EEC der Europäischen Gemeinschaft vom 18. März 1991 in Kraft getreten (EG-Richtlinie 1991). Die ersten Überarbeitungen dieser sog. EU-Batteriedirektive sind mit den Richtlinien 93/86/EEC vom 4. Oktober 1993 und 98/101/EC vom 22. Dezember 1998 erfolgt (EG-Richtlinie 1993; EG-Richtlinie 1998a, b). Die aktuell gültige Neufassung ist die Richtlinie 2006/66/EC vom 6. September 2006 (EG-Richtlinie 2006), sie hat die ursprüngliche Richtlinie 91/157/EEC außer Kraft gesetzt. Auch die aktuelle Neufassung ist bereits zwei Mal mit den Richtlinien 2008/12/EC vom 11. März 2008 und 2008/103/EC vom 10. November 2008 überarbeitet worden (EG-Richtlinie 2008).

Laut Artikel 1 der EU-Batteriedirektive enthält die Richtlinie „Vorschriften für das Inverkehrbringen von Batterien und Akkumulatoren, insbesondere das Verbot, Batterien und Akkumulatoren, die gefährliche Substanzen enthalten, in Verkehr zu bringen, und spezielle Vorschriften für die Sammlung, die Behandlung, das Recycling und die Beseitigung von Altbatterien und Alttakkumulatoren, die die einschlägigen Abfallvorschriften der Gemeinschaft ergänzen und ein hohes Niveau der Sammlung und des Recyclings der Altbatterien und -akkumulatoren fördern. Sie zielt darauf ab, die Umweltbilanz der Batterien und Akkumulatoren sowie der Tätigkeiten aller am Lebenszyklus von Batterien und Akkumulatoren beteiligten Wirtschaftsakteure, d. h. Hersteller, Vertreiber und Endnutzer, und insbesondere der Akteure, die direkt an der Behandlung und am Recycling von Altbatterien und -akkumulatoren beteiligt sind, zu verbessern“ (EG-Richtlinie 2006).

Die EU-Batteriedirektive schreibt für die Mitgliedstaaten u. a. die Mindestsammelquoten für Altbatterien und -akkumulatoren von 25 % bis zum 26. September 2012 und 45 % bis zum 26. September 2016 vor. Zudem wird für Lithium-Ionen-Batterierecyclingprozesse eine Mindestrecyclingeffizienz von 50 % der durchschnittlichen Batterieschrottmasse vorgeschrieben (EG-Richtlinie 2006).

Eine einheitliche Methode zur Bestimmung bzw. Berechnung der Recyclingeffizienz von Batterierecyclingprozessen wird jedoch nicht durch die EU-Batteriedirektive vorgegeben. Demzufolge werden gegenwärtig mögliche Berechnungsmethoden in der Batterierecyclingindustrie sehr kontrovers diskutiert, dies betrifft vor allem die Einbeziehung bzw. Nichteinbeziehung bestimmter Batterieinhaltsstoffe wie Wasser, Sauerstoff und Kohlenstoff in die Recyclingeffizienzberechnung. Einige Batterierecyclingunternehmen fordern, dass diese Inhaltsstoffe als wiedergewonnen zu betrachten sind, da sie entweder über Prozessaustragsströme der Umwelt direkt wieder zugeführt werden oder eine stoffliche bzw. energetische Umsetzung erhalten, die für den Recyclingprozess notwendig ist.

Weitere Diskussionspunkte sind die für die Effizienzberechnung zugrunde gelegte Batterieschrottmasse sowie die Berücksichtigung von Schlacken, die in schmelzmetallurgischen Recyclingprozessen anfallen. Bei der Eingangsschrottmasse stellt sich die Frage, ob diese nur Batterieeinzelzellen oder auch komplette Batteriepacks enthalten darf, da Letztere neben den eigentlichen Batteriezellen auch aus Verschaltungselektronik- und Gehäusekomponenten bestehen. Die generelle Ablehnung anfallender Schlacken als Recyclingprodukte wird kritisiert, da sie unter bestimmten Voraussetzungen bspw. im Straßenbau eingesetzt und somit als Recyclingprodukt bewertet werden können. Schließlich kommen in vielen Recyclingprozessen Zusatz-/Hilfsstoffe zum Einsatz, die in die Recyclingprodukte übergehen können und dadurch zu einer Erhöhung der Produktmasse beitragen. Hier stellt sich die Frage, ob diese Zusatzstoffe für die Effizienzberechnung wieder von der Produktmasse abgezogen werden müssen.

Im Bereich Recycling sind neben den vorgeschriebenen Mindestsammelquoten und -recyclingeffizienzen die Definitionen der Begriffe „Behandlung“ und „Recycling“ sowie deren Abgrenzung voneinander von besonderem Interesse. Laut Artikel 3 Punkt 10 (EG-Richtlinie 2006) umfasst die Behandlung „alle Tätigkeiten, die an Altbatterien und -akkumulatoren nach Übergabe an eine Anlage zur Sortierung, zur Vorbereitung des Recyclings oder zur Vorbereitung der Beseitigung durchgeführt werden“. Zudem muss laut Anhang III Teil A Punkt 1 „die Behandlung mindestens die Entfernung aller Flüssigkeiten und Säuren erfassen“. Dem gegenüber wird das Recycling in Artikel 3 Punkt 8 als „die in einem Produktionsprozess erfolgende Wiederaufarbeitung von Abfallmaterialien für ihren ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke, jedoch unter Ausschluss der energetischen Verwertung“ definiert (EG-Richtlinie 2006).

Mit der im März 1998 in Kraft getretenen und im Juli 2001 neugefassten „Verordnung über die Rücknahme und Entsorgung gebrauchter Batterien und Akkumulatoren“ (BattV) erfolgte die deutschlandweite Umsetzung der EU-Batteriedirektive. In der BattV werden den Herstellern, Vertreibern und Endverbrauchern bestimmte Pflichten auferlegt. Hierdurch sollen eine Rücknahme und eine entsprechend den Vorschriften des 1996 in Kraft getretenen „Gesetzes zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen“ (KrW-/AbfG) ordnungsgemäße und schadlose Verwertung

bzw. gemeinwohlverträgliche Beseitigung sichergestellt werden. Gemäß der BattV dürfen Batterien nur dann in Verkehr gebracht werden, wenn von Herstellern und Vertreibern gewährleistet wird, dass diese vom Endverbraucher wieder zurückgegeben werden können. Gleichzeitig ist der Endverbraucher dazu verpflichtet, Altbatterien beim Vertreter oder bei den von den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern eingerichteten Erfassungsstellen abzugeben. Eine Entsorgung im Hausmüll ist für alle Batterietypen verboten. Die Hersteller und Vertreter sind wiederum zu einer unentgeltlichen Batterierücknahme vom Endverbraucher verpflichtet (BattV 1998; KrW-/AbfG 1994).

Zu diesem Zweck wurde ein laut der BattV vorgeschriebenes gemeinsames Rücknahme- und Entsorgungssystem eingerichtet, dessen Organisation und Verwaltung der „Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien“ (GRS) obliegt. An der GRS beteiligen sich seit 1998 die Hersteller von ca. 80 % der im deutschen Markt abgesetzten Batterien. Gegründet wurde die GRS von den Batterieherstellern Duracell, Energizer, Panasonic, Philips, Saft, Sanyo, Sony, Varta und dem Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e. V. (ZVEI). Ende 2008 haben insgesamt 991 Hersteller und Importeure von Gerätebatterien und -akkumulatoren die Serviceleistungen der GRS genutzt. Die GRS ist als gemeinnützige Organisation zu verstehen und hat über 170.000 Sammelstellen zur Rücknahme verbrauchter Batterien eingerichtet. Die Altbatterien werden in regelmäßigen Abständen abgeholt, nach Batteriesystemen sortiert und schließlich entsorgt bzw. verwertet. Zudem ist die GRS für eine Abfallberatung und eine Information der Öffentlichkeit verantwortlich. Zusätzlich wird den Bundesländern ein jährlicher Erfolgsbericht vorgelegt, der Auskunft über die in Verkehr gebrachte Batteriemasse, die zurückgenommene Batteriemasse, die qualitativen und quantitativen Entsorgungsergebnisse sowie die gezahlten Preise für Entsorgungsleistungen gibt (BattV 1998; Döhring-Nisar et al. 2001; Fricke 2009; Bundesministerium 2001).

Im Dezember 2009 trat das „Gesetz zur Neuregelung der abfallrechtlichen Produktverantwortung für Batterien und Akkumulatoren“ (BattG) in Kraft und ersetzt damit die bisher gültige BattV. Ergänzend zu den bereits in der BattV geltenden Regelungen wurden gemäß der EU-Richtlinie Mindestanforderungen (Recyclingeffizienz) an Recyclingverfahren verankert (Gesetz über das Inverkehrbringen 2009).

## 5.7.2 Generelles zu Batterierecyclingverfahren

Prinzipiell können Lithium-Ionen-Batterien auf hydrometallurgischem Weg (nasschemische Prozesse bei niedrigen Temperaturen) oder auf pyrometallurgischem Weg (Einsatz von Schmelzaggregaten bei hohen Temperaturen) recycelt werden; auch eine Kombination aus pyro- und hydrometallurgischen Prozessschritten ist möglich. Die grundsätzlichen Vor- und Nachteile dieser beiden metallurgischen Verfahrensmöglichkeiten für das Recycling lithiumhaltiger Batterien werden in Tab. 5.6 aufgelistet.

**Tab. 5.6** Vor- und Nachteile des hydro- bzw. pyrometallurgischen Recyclings lithiumhaltiger Batterien (in Anlehnung an Georgi-Maschler 2011)

	hydrometallurgischer Prozess	pyrometallurgischer Prozess
Vorteile	+ Wiedergewinnung der unedlen Metalle, der organischen Komponenten sowie des Kohlenstoffs auch ohne Vorbehandlung möglich	+ Nutzung der unedlen Metalle, der organischen Komponenten und des Kohlenstoffs als Reduktionsmittel bzw. als Energieträger
	+ geringe Abgasmengen	+ absatzfähige Metalle als Recyclingprodukte
	+ hohe Selektivität	+ hohe Raum-Zeit-Ausbeute
Nachteile	– Umgang mit großen Mengen an Chemikalien (Laugen, Säuren, Fällungsmittel usw.)	– große Mengen an Brennstoffen oder elektrischer Energie notwendig
	– geringe Raum-Zeit-Ausbeute	– aufwendige Abgasreinigung notwendig
	– große Mengen an Abwasser und Schlämmen	

Für Lithium-Ionen-Batterien müssen sowohl beim Transport als auch beim Recycling spezielle Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden. Der Grund liegt in der hohen Brand- bis hin zur Explosionsgefahr, hervorgerufen durch äußere oder innere Kurzschlüsse. Diese Gefahren sind zwar bei Lithium-Primärbatterien größer aufgrund des enthaltenen metallischen Lithiums, aber auch Lithium-Ionen-Batterien werden oftmals speziellen Behandlungsschritten zur „Deaktivierung“, d. h. Unschädlichmachung der Batteriezellen vor dem eigentlichen Recyclingprozess, unterzogen (Miller und McLaughlin 2001; Krebs 2005).

Als Vorbehandlungsmethoden sind eine mechanische Aufbereitung und/oder eine Pyrolyse sinnvoll. Bei der mechanischen Aufbereitung werden die Batteriezellen mittels Brechern und Schreddern unter Schutzgas zerkleinert, in speziellen Fällen wird auch eine Tieftemperaturzerlegung durchgeführt. Anschließend findet eine Materialtrennung mittels klassischer Trenntechniken wie bspw. Magnetscheiden, Schwerentrennen, Windsichten und Sieben statt. Während der Pyrolyse werden die Batteriezellen auf einige hundert Grad erhitzt. Dabei verflüchtigen oder verbrennen die organischen Batteriekomponenten und der Pyrolyserückstand wird weiter behandelt. Neben der Deaktivierung lithiumhaltiger Batteriezellen zur Minimierung der Gefahrenpotenziale verfolgen die Vorbehandlungen das weitere Ziel, weitestgehend einzelne, möglichst sortenreine Materialfraktionen zu gewinnen, die anschließend in getrennten Prozessschritten weiterverarbeitet werden können.

Seit Inkrafttreten der EU-Batteriedirektive sind eine Reihe von Batterierecyclingverfahren entwickelt worden, die oftmals speziell auf die einzelnen chemischen Batteriesysteme zugeschnitten sind. Daneben besteht aber auch die Möglichkeit,

Lithium-Ionen-Batterieschrott als Sekundärrohstoff in die Primärgewinnungsrouten von Metallen wie Kobalt und Nickel oder in die Recyclingroute von Stahl einzubringen. Diese Möglichkeit zielt jedoch nur auf einzelne Metallinhalte ab, sodass die übrigen Batteriekomponenten verloren gehen und das Erreichen der derzeit vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Recyclingeffizienz von 50 Maß.-% für Lithium-Ionen-Batterien infrage zu stellen ist.

### 5.7.3 Stand der Technik von Forschung und Entwicklung

Für Lithium-Ionen-Batterien sind in den letzten 15 Jahren eine Vielzahl von Recyclingverfahren im Labormaßstab veröffentlicht worden. Zudem sind eine Reihe von Patenten angemeldet worden, die sich ebenfalls hauptsächlich auf Untersuchungen im Labormaßstab stützen (Patent div.). Diese Recyclingverfahren basieren überwiegend auf hydrometallurgischen Prozessschritten, also nasschemischen Lösungs- und Fällungsreaktionen, und konzentrieren sich hauptsächlich auf die Elektrodenmaterialien. Somit zielen alle Verfahren in erster Linie auf die Wiedergewinnung des Kobalts und des Lithiums ab. In einigen wenigen Veröffentlichungen ist ein zusätzlicher Pyrolyseschritt vorgesehen.

Um die Batterien laugen zu können, müssen sie zunächst aufgebrochen werden. Danach werden sie entweder direkt über Zeiträume zwischen 1–2, mitunter sogar über mehrere Stunden hinweg bei Temperaturen von maximal 100 °C und teilweise unter Einsatz eines Rührers gelaugt oder es findet vor der Laugung eine Materialtrennung mittels Sieben und Magnetscheiden statt, sodass nur die anfallende Feinfraktion der Laugung unterzogen wird. Letztere Verfahrensweise hat den Vorteil, dass die Laugungszeit erheblich, d. h. bis auf ca. 10 Minuten, verkürzt werden kann. Den restlichen Materialfraktionen, die hauptsächlich die metallischen Batteriekomponenten enthalten, wird zumeist keine große Beachtung geschenkt. Hier wird entweder auf den Verkauf an Metallrecyclingunternehmen verwiesen oder die gesamte Restfraktion wird einer Pyrolyse unterzogen, um nichtmetallische Bestandteile zu verbrennen. Der Pyrolyserest, der teilweise sogar mit den Sammelbegriffen „Metal Alloy“ oder „Steel“ bezeichnet wird, ist wiederum für den Verkauf an Metallrecyclingunternehmen vorgesehen (Castillo et al. 2002; Contestabile et al. 2001; Shin et al. 2005; Nan et al. 2006).

Da sich  $\text{LiCoO}_2$  kaum in herkömmlichen Lösungsmitteln löst, sind verschiedene Untersuchungen zur Bestimmung geeigneter Lösungsmittel durchgeführt worden. Als Laugungsmedien kommen bspw. Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ), Oxalsäure ( $\text{C}_2\text{O}_4\text{H}_2$ ), Salzsäure ( $\text{HCl}$ ), Hydroxylaminhydrochlorid ( $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ ), schweflige Säure ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ) oder Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) zum Einsatz, teilweise auch unter Zugabe von Wasserstoffperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Die Untersuchungen haben ergeben, dass Mischungen aus Schwefelsäure und Wasserstoffperoxid sowie Salzsäure oder Salpetersäure die besten Laugungsergebnisse liefern (Sohn et al. 2006; Zhang et al. 1998).

Nach der Laugung findet eine Filtration zur Abtrennung der unlöslichen Bestandteile statt. Der Filtrerrückstand enthält alle metallischen Batteriekomponenten, die während

der Laugung nicht aufgelöst werden, und soll entweder direkt weiterverkauft oder vorher noch einem Pyrolyseschritt zur Entfernung von Kohlenstoff und organischen Komponenten unterzogen werden. Es besteht somit kein Unterschied zu der Verfahrensweise, bei der bereits vor der Laugung eine Materialtrennung stattfindet (Castillo et al. 2002; Contestabile et al. 2001).

Für die Lauge sind zwei verschiedene Weiterbehandlungsverfahren untersucht worden. Der erste Verfahrensvorschlag sieht eine direkte Zugabe eines Fällungsreagenz zur Ausfällung einer Kobaltverbindung vor, bspw. Natronlauge (NaOH) zum Ausfällen von Kobalhydroxid ( $\text{Co}(\text{OH})_2$ ). Dieses wird abfiltriert, bevor ein zweites Fällungsmittel, bspw. Natriumkarbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), zum Ausfällen einer Lithiumverbindung, zumeist Lithiumkarbonat ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ), zugegeben wird (Castillo et al. 2002; Contestabile et al. 2001; Zhang et al. 1998; Afonso 2006; Hurtado 2005; Sohn 2003).

Der zweite Verfahrensvorschlag zielt auf die metallische Gewinnung von Kobalt und evtl. enthaltenem Nickel durch eine Gewinnungselektrolyse ab. Um in der Elektrolyse störende Begleitelemente aus der Hauptlösung zu entfernen, wird eine Solvent-Extraktion durchgeführt. Dazu werden gängige Solvent-Extraktionsmittel wie Cyanex 272 (Bis-2,4,4-Trimethylpentyl-Phosphinsäure), D2EHPA (Bis-2-Ethylhexyl-Phosphorsäure) oder PC-88A (2-Ethylhexyl-Phosphorsäure-Mono-2-Ethylhexyl-Ester) eingesetzt (Nan et al. 2006; Zhang et al. 1998; Dorella und Mansur 2007; Lupi und Pasquali 2003; Lupi et al. 2005; Rosenberg 2004; Ellar und Liwat 1987). Auf diese Weise verbleibt das Lithium in der Hauptlösung und kann später als Lithiumverbindung ausgefällt werden. Wenn der Kupfergehalt und/oder der Nickelgehalt hoch sind, wird vor der Kobalt-Solvent-Extraktion noch eine Kupfer- bzw. Nickel-Solvent-Extraktion durchgeführt.

Besonders interessante Recyclingüberlegungen finden sich in Untersuchungen zur direkten Herstellung von neuen aktiven Kathodenmaterialien aus Lithium-Ionen-Batterieschrott. Durch Laugen der Elektrodenmaterialien wird eine Ausgangslösung erstellt, die je nach aktivem Kathodenmaterial Lithium, Kobalt, Nickel und Mangan enthält. Dafür wird das Elektrodenmaterial wie in den bereits beschriebenen Verfahren durch kombinierte mechanische Aufbereitungs- und Pyrolyseschritte separiert. Der Ausgangslösung wird dann zur gezielten Einstellung des Stoffmengenverhältnisses von Lithium zu Kobalt eine Lithiumnitrat-Lösung ( $\text{LiNO}_3$ ) zugegeben. Aus der so hergestellten Prekursor-Lösung wird anschließend durch Zugabe von Zitronensäure eine gelartige Substanz erzeugt, die bspw. zur Herstellung von  $\text{LiCoO}_2$  bei einer Temperatur von 950 °C über 24 Stunden kalziniert wird (vgl. Lee und Rhee 2007; Li et al. 2007).

Eine weitere Möglichkeit stellt die Trennung der gesamten Kathoden, bestehend aus  $\text{LiCoO}_2$ , Binder- und Kohlenstoffkomponenten sowie Aluminiumfolie, von den Lithium-Ionen-Alt-Batterien dar. Die kompletten Kathoden werden anschließend unter Verwendung einer fünf molaren Lithiumhydroxidlösung ( $\text{LiOH}$ ) als Laugungsmittel in einem Autoklaven separat gelaugt. Das Verfahren basiert auf einem einzigen Lösungs- und Fällungsschritt. Durch gezielte Einstellung der Prozessparameter kann direkt nach der Laugung wieder neues Kathodenmaterial ausgefällt werden, das neben  $\text{LiCoO}_2$  bis zu 13,7 Mass.-% an Verunreinigungen enthält. Jedoch soll es sich bei diesen

Verunreinigungen hauptsächlich um Binder- und Kohlenstoffkomponenten handeln, die dem  $\text{LiCoO}_2$  vor dem Aufbringen auf die Aluminiumfolie ohnehin wieder beigefügt werden müssen. Der Prozess wird bei einer Temperatur von  $200\text{ }^\circ\text{C}$  über einen Zeitraum von 20 Stunden durchgeführt (vgl. Kim et al. 2003).

Alle Untersuchungen zur direkten Herstellung von Elektrodenmaterialien aus Lithium-Ionen-Batterieschrott liefern aktive Kathodenmaterialien mit brauchbaren elektrochemischen Eigenschaften für den erneuten Einsatz in Batterien. Es sind aber nicht die gleichen guten Eigenschaften von herkömmlichen kommerziellen Kathodenmaterialien erreicht worden. Zudem fokussieren die Untersuchungen nur auf die Wiedergewinnung der Kathodenmaterialien, d. h., alle anderen Batteriekomponenten bleiben unberücksichtigt.

#### 5.7.4 Stand der Technik industrieller Recyclingverfahren

Industrielle Recyclingverfahren für lithiumhaltige Batterien sind in erster Linie in Nordamerika, Europa und Japan anzutreffen, wo vom Gesetzgeber vorgeschriebene bzw. organisierte Rücknahme- und Entsorgungssysteme bestehen, welche die notwendige Grundlage für ein umweltgerechtes Batterierecycling darstellen. Das Fehlen dieser organisierten Systeme führt bspw. in China und Indien zu einer speziellen Form des Batterierecyclings. Dort werden Altbatterien von der ärmeren Bevölkerung in Hinterhöfen manuell aufgebrochen und in einzelne Materialfraktionen separiert (s. Abb. 5.43).

Die Materialfraktionen werden an Metallschrotthändler weiterverkauft oder z. T. sogar in selbst konstruierten kleinen Schmelzaggagaten eingeschmolzen, da die umgeschmolzenen Metalle höhere Erlöse erzielen. Diese Form des Batterierecyclings ist nicht nur aus umwelttechnischer Sicht problematisch, sondern auch in hohem Maß gesundheitsgefährdend für die Menschen sowie ressourcenineffizient.

Im Folgenden werden Prozessbeispiele für industrielle Lithium-Ionen-Batterierecyclingverfahren der Unternehmen Batrec, Toxco, Inmetco, Xstrata (ehemals



**Abb. 5.43** Beispiel für händisches Batterierecycling in China (links) und Indien (rechts). *Quelle* BAN (2009), Süddeutsche Zeitung (2007)

Falconbridge) und Umicore als typische Vertreter ihrer Verfahrenskategorien beschrieben. Neben diesen Prozessbeispielen gibt es eine Reihe weiterer Unternehmen, die sich mit dem Recycling von Lithium-Ionen-Batterien befassen. Dies sind u. a. Recupyl (Frankreich), S.N.A.M. (Frankreich), AEA Technology (Großbritannien), Metal-Tech (Israel), Sony-Sumitomo (Japan) und Onto Technology (USA) (vgl. Lain 2001; Lupi et al. 2005; Rosenberg 2004; Espinosa et al. 2004; Rentz et al. 2001; Rosenberg 2001; Recupyl S.A.S. 2009; Tedjar 2006; European Commission 2009; Tedjar 2008; Tedjar 2003; S.N.A.M. 2009; David 1999; Wiaux 2002; Sloop 2008; Onto Technology LLC 2009; Butler 2004). Alle Recyclingverfahren dieser Unternehmen lassen sich in die hier vorgestellten Verfahrenskategorien einordnen, weshalb auf deren detaillierte Prozessbeschreibung verzichtet wird.

#### **5.7.4.1 Batrec-Prozess als Beispiel für mechanische Aufbereitung von Batterieschrott**

Die zur Veolia-Gruppe gehörende Batrec Industrie AG in Wimmis (Schweiz) verarbeitet als einziges Batterierecyclingunternehmen in der Schweiz alle Arten von Primärbatterien, quecksilberhaltige Abfälle und Altkatalysatoren. Dementsprechend sind die Hauptrecyclingprodukte eine Ferromanganlegierung, Zinkmetall und Quecksilber. Des Weiteren verfügt Batrec über eine spezielle Anlage zur mechanischen Aufbereitung von Lithium-Ionen-Batterien unterschiedlichster Zellengrößen. Die Batterien werden über eine je nach Anforderung beheiz- oder kühlbare Förderschnecke in die Anlage eingetragen und dort zur Minimierung der Brand- und Explosionsgefahr unter CO<sub>2</sub>-Atmosphäre aufgebrochen. Batrec bezeichnet dies als „Neutralisation“ der Batterien. Der leicht flüchtige Elektrolyt verdampft währenddessen und wird als nicht weiterverwertbares Kondensat aufgefangen. Anschließend findet unter Luftatmosphäre eine Trennung der einzelnen Batteriekomponenten in zwei Metallfraktionen, eine Plastikfraktion und eine Feinfraktion statt, die das kobalt- und lithiumhaltige Elektrodenmaterial beinhaltet. Die einzelnen Metallfraktionen (Nichteisenmetalle und Nickel-Stahl) werden an Recyclingunternehmen der Metallindustrie abgegeben. Die Feinfraktion wird an die Kobalt- und Nickelhersteller Xstrata und Umicore verkauft. Die Plastikfraktion wird z. T. dem Pyrolyseprozess für Primärbatterien zugeführt und das Kondensat in der eigenen Abwasseraufbereitungsanlage weiterbehandelt. Den Aufbereitungsprozess sowie die dabei entstehenden Materialfraktionen zeigt Abb. 5.44. Zurzeit verarbeitet die Anlage ca. 300 t lithiumhaltige Batterien pro Jahr, wobei auch Lithium-Primärbatterien in geringeren Mengen dem Prozess zugeführt werden können (vgl. Krebs 2005; Espinosa et al. 2004; Rentz et al. 2001; Batrec Industrie AG 2009; Metallurgische Exkursion des IME 2008; Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern 2009; Wissman 2008; Krebs 2002, 2003, 2006).

#### **5.7.4.2 Toxco-Prozess als Beispiel für hydrometallurgisches Batterierecycling**

In Nordamerika betreibt das zur Kinsbursky Brothers Inc. gehörende Unternehmen Toxco Inc., British Columbia, seit 1993 einen industriellen Recyclingprozess für



**Abb. 5.44** Mechanische Aufbereitung bei Batrec. *Quelle* Batrec Industrie AG (2009)

Lithiumbatterien, der auf einer Tieftemperaturzerlegung basiert und ursprünglich für Lithium-Primärbatterien entwickelt worden ist.

Das Verfahren eignet sich für alle Typen von lithiumhaltigen Batterien, d. h. sowohl für alle unterschiedlichen chemischen Zellsysteme als auch für alle Batteriegrößen von klassischen Gerätebatterieformaten bis hin zu Spezialbatterien für militärische Anwendungen mit Gewichten von über 250 kg. Dabei werden laut Toxco Recyclingeffizienzen von bis zu 80 % realisiert. Zur Vermeidung von Unfällen werden ca. 90 % der Arbeitsschritte ferngesteuert durchgeführt.

Die angelieferten Lithiumbatterien werden zunächst nach System und Größe sortiert und anschließend in Betonbunkern bis zur Weiterverarbeitung sicher gelagert. Im Fall von Lithium-Primärbatterien werden die Batterien zur Herabsetzung der Reaktionsfähigkeit des metallischen Lithiums und anderer Bestandteile in ein Bad mit flüsigem Argon ( $T_b = -186 \text{ °C}$ ) oder Stickstoff ( $T_b = -196 \text{ °C}$ ) eingetaucht, je nach Größe bis zu 24 Stunden. Das Aufbrechen der Batterien findet in einer Natriumhydroxid- oder Lithiumhydroxid-Lösung (NaOH bzw. LiOH) statt, um saure Komponenten zu neutralisieren und die Wasserstoffbildung zu minimieren. Je nach Größe werden bis zu zwei weitere Zerkleinerungs- und Reaktionsstufen durchgeführt, um eine vollständige Reaktion der reaktiven Bestandteile zu gewährleisten. Der bei der Reaktion entstehende Wasserstoff reagiert kontrolliert an der Badoberfläche mit aufschwimmendem Lithium. Im Fall von Lithium-Ionen-Batterien findet direkt nach dem Aufbrechen eine Materialtrennung statt, wobei eine Leichtfraktion („Li-Ion-Fluff“), ein Kupfer-Kobalt-Produkt sowie ein lithium- und kobalthaltiger Schlamm anfallen. Es ist anzunehmen, dass es sich bei dem Kupfer-Kobalt-Produkt um Kupfer-Elektrodenfolien mit anhaftendem Elektrodenmaterial handelt. Aus dem Schlamm wird das Lithium herausgelöst und die Lösung in die Aufarbeitungsrouten für Lithium-Primärbatterien gegeben, wo später ein Lithiumkarbonat mit einer Reinheit von 90–97 % ausgefällt wird. Der verbleibende Filterkuchen („Cobalt Filter Cake“) enthält das Kobalt und wird zur Gewinnung einer Kobaltverbindung mit einer Reinheit von 99 % getrennt weiterverarbeitet. Wie dies geschieht, ist nicht bekannt; es ist jedoch wahrscheinlich, dass es sich dabei ebenfalls um gezielte Lösungs- und Fällungsschritte handelt. Das gewonnene Lithiumkarbonat kann direkt an die Batterieindustrie verkauft werden, was dem Ziel eines Closed-Loop-Recyclings sehr nahe kommt. Beispielsweise produziert das Tochterunternehmen Lithchem International seit 1996 aus dem von Toxco wiedergewonnenen Lithiumkarbonat u. a. Salze und Elektrolyte zur Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien. Im Prozessverlauf anfallende Metallfraktionen werden an Metallrecyclingunternehmen abgegeben (vgl. Miller und McLaughlin 2001; Espinosa et al. 2004; Rentz et al. 2001; Gavinet 1999; Coy 2001; Coy 2006).

### 5.7.4.3 Inmetco-Prozess als Beispiel für pyrometallurgisches Batterierecycling

Das US-amerikanische Unternehmen Inmetco Inc. in Ellwood City (Pennsylvania) ist ein Tochterunternehmen von Vale Inco und hat sich hauptsächlich auf das Recycling von Reststoffen aus der Stahlproduktion (Krätzen, Walzzunder, Flugstäube usw.) zur Herstellung von Direct Reduced Iron (DRI) in einem Drehherdofen spezialisiert (Prozesstemperatur ca.  $1.350 \text{ °C}$ ). Daneben verarbeitet Inmetco auch nickel- und chromhaltige Reststoffe aus der Galvanikindustrie. Seit 1995 betreibt Inmetco eine Anlage zum Recycling von NiCd-Batterien. Heute werden neben NiCd-Batterien auch quecksilberfreie Zink-Kohle-Batterien sowie NiMH- und Lithium-Ionen-Batterien recycelt. Während das Recycling von NiCd-Batterien in einer speziellen Anlage stattfindet, werden Zink-Kohle-, NiMH- und Lithium-Ionen-Batterien dem DRI-Hauptrecyclingprozess an geeigneten Stellen zugeführt. Zink-Kohle- und NiMH-Batterien können zusammen



**Abb. 5.45** Legierungsabstich aus dem LBO bei Inmetco. *Quelle* Inmetco Inc. (2009)

mit den Reststoffen aus der Stahlproduktion direkt im Drehherdofen eingesetzt werden. Das entstandene DRI wird anschließend in einem Lichtbogenofen (LBO) zur Herstellung einer NiCoCrFe-Legierung eingeschmolzen (s. Abb. 5.45). Das Kobalt stammt aus Lithium-Ionen-Batterieschrott, der in den LBO zuchargiert wird. Das Verfahren zielt somit nur auf die Wiedergewinnung der Kobalt- und Nickelinhalte aus den Lithium-Ionen-Batterien ab. Alle organischen, unedlen und leicht flüchtigen Bestandteile dienen entweder als Reduktionsmittel oder werden verschlackt bzw. über den Abgasstrom abgetragen. Insofern stellt der Inmetco-Prozess kein speziell auf Lithium-Ionen-Batterien zugeschnittenes Recyclingverfahren dar (vgl. Espinosa et al. 2004; Rentz et al. 2001; Inmetco Inc. 2009; Hardies 2008; Thompson 2004).

#### **5.7.4.4 Xstrata-Prozess als Beispiel für Batterierecycling durch Einbringen in Primärgewinnungsrouten**

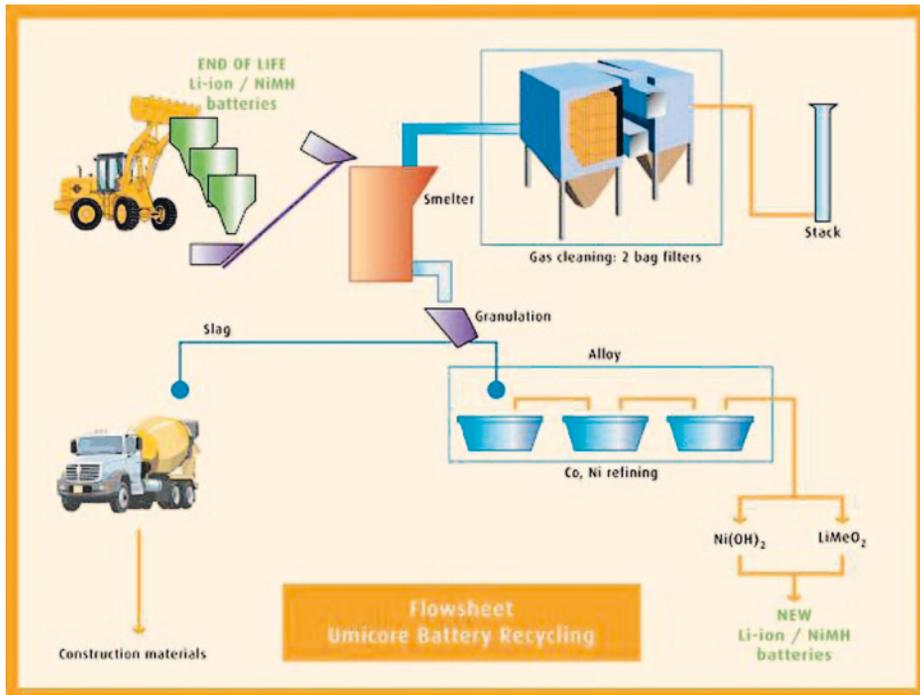
Lithium-Ionen-Batterien können auch durch Einbringen in die Primärgewinnungsrouten von Kobalt und Nickel recycelt werden. Da diese beiden Metalle zumeist im Erz vergesellschaftet sind, ist deren Gewinnung sehr eng miteinander verknüpft. Durch die Übernahme von Falconbridge Ltd. im Jahr 2006 verfolgt der Kobalt- und Nickelhersteller Xstrata Plc. seit 2001 das Prinzip, kobalt- und nickelhaltigen Batterieschrott sowie Produktionsschrotte von Elektrodenmaterialherstellern in die einzelnen Prozessstufen seiner Primärgewinnungsrouten von Kobalt und Nickel einzubringen. Laut Xstrata besteht ein großer Vorteil dieser Recyclingmethode darin, dass die Chargierung von

wertmetallhaltigem, aber schwefelfreiem Batterieschrott im Vergleich zum Erz eine Energieeinsparung mit sich bringt, da der Schwefelanteil im Abgas deutlich herabgesetzt wird. Dadurch kann die Abgasbehandlung minimiert werden. Ebenfalls gibt Xstrata eine Reduzierung des Energieverbrauchs um 75 % durch den Einsatz von kobalthaltigen Sekundärrohstoffen im Vergleich zum Erz an. Bis 2008 ist der Batterieschrott je nach Zusammensetzung in den Röster, in den Elektroöfen oder in den Peirce-Smith-Konverter chargiert worden. Durch das direkte Chargieren der kompletten Batterien ist jedoch ebenfalls eine große Feuchtemenge über den Elektrolyten in den Prozess eingebracht worden, was neben Energieverlusten zum Zusetzen bzw. Verkleben von Anlagenteilen geführt und folglich die Zuchargierung von Batterien massenmäßig begrenzt hat. Seit 2008 betreibt Xstrata daher einen Drehrohrofen-Prozess zur Vorbehandlung von kobalt- und nickelhaltigen Sekundärrohstoffen bei Temperaturen von 750–900 °C. Der trockene Materialaustrag aus dem Drehrohrofen wird anschließend zusammen mit den Primärrohstoffen aus dem Röster in den LBO chargiert. Entsprechend zielt diese Recyclingmethode in erster Linie auf die Kobalt- und Nickelinhalte der Batterien ab. Alle übrigen Materialinhalte werden entweder energetisch verwertet oder dienen als Reduktionsmittel und werden verschlackt bzw. über den Abgasstrom ausgetragen. Erzeugt wird eine kobalt- und nickelhaltige Steinphase, die im weiteren Prozessverlauf granuliert und einem Laugungsschritt sowie einer Solvent-Extraktion unterzogen wird. Mittels Gewinnungselektrolysen wird letztendlich reines Kobalt- bzw. Nickelmetall erzeugt. Die Gewinnung der Steinphase erfolgt in Kanada (Sudbury), während die Elektrolyse zur Metallgewinnung in Norwegen (Kristiansand) stattfindet. Bis 2008 hat das Unternehmen eine Recyclingeffizienz von mindestens 60 Mass.-% angegeben, jedoch unter Miteinberechnung der chemisch umgesetzten (teilweise verschlackten) und daher nicht wiedergewonnenen unedlen Elemente Eisen, Aluminium und Kohlenstoff. Das wird begründet durch die für den Prozess erforderlichen reduzierenden Eigenschaften dieser Elemente (vgl. Henrion 2004; Henrion 2008a, b; Tollinsky 2009). Laut der EU-Batteriedirektive gelten diese Anteile aber nicht als recycelt und sind somit irrelevant für die Berechnung der Recyclingeffizienz.

#### **5.7.4.5 Umicore-Prozess als Beispiel für kombiniertes hydro- und pyrometallurgisches Batterierecycling**

Umicore hat im September 2011 eine Pilotanlage zum Recycling von Lithium-Ionen-, Lithium-Polymer- und NiMH-Batterien in Hoboken, Belgien, eingeweiht. Diese Anlage ist für 7.000 t Batterieschrotte ausgelegt.

In Hoboken werden ganze Zellen in einen pyrometallurgischen Ofen chargiert und eingeschmolzen. Dabei wird eine CoNiCuFe-Metalllegierung erzeugt. Lithium, Aluminium, der Elektrolyt, der Separator und der Graphit verbrennen bzw. werden teilweise als Reduktionsmittel genutzt, reichern sich in der Schlacke an oder verlassen den Prozess mit dem Abgas. Die gewonnene Schlacke kann als Baumaterial im Straßenbau veräußert werden. Die CoNiCuFe-Legierung wird granuliert und im Umicore-Werk in Olen, Belgien, hydrometallurgisch weiterverarbeitet. Das Granulat wird gelaugt. Die gewonnene

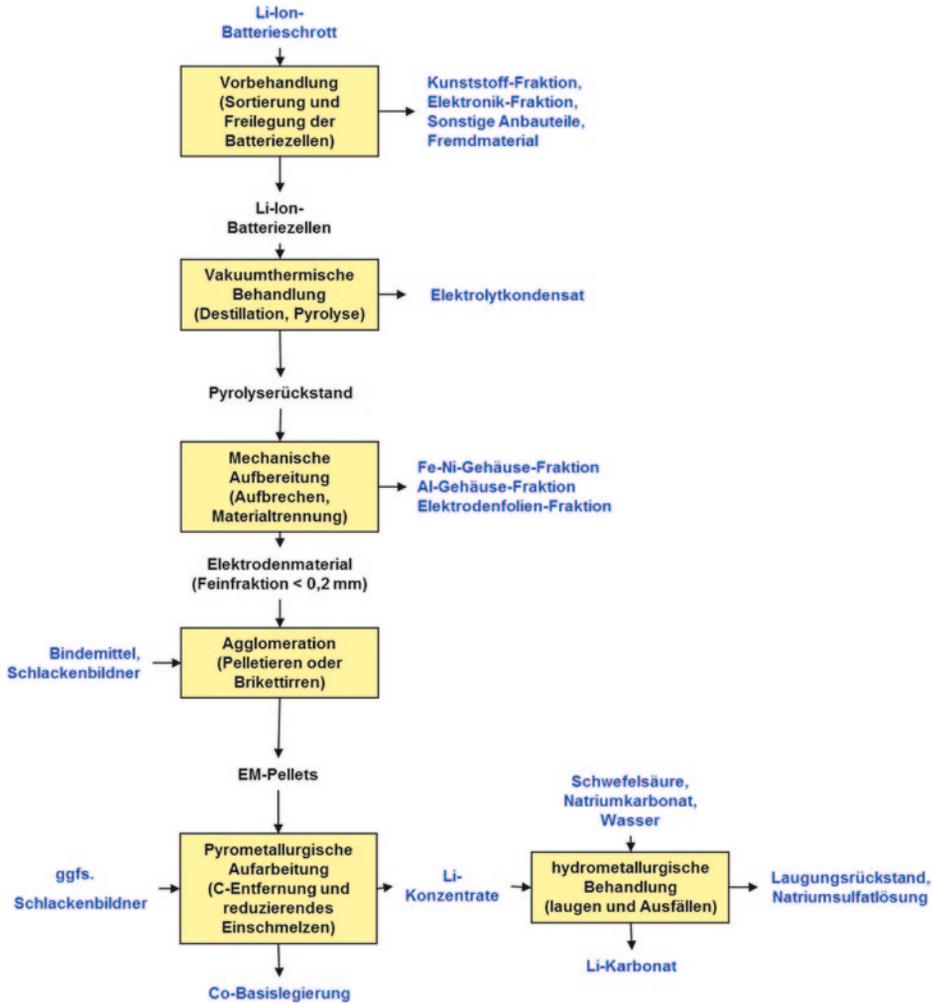


**Abb. 5.46** Schematische Darstellung des Umicore-Recyclingprozesses. *Quelle* Umicore (2010)

NiCo-Lösung wird gereinigt, Co und Ni durch ein Solvent-Extraktionsverfahren getrennt und als hochreine Zwischenprodukte gewonnen. Das so gewonnene Kobaltoxid wird dann im Umicore-Werk in Cheonan, Südkorea, als Ausgangsmaterial zur Herstellung von neuem aktivem Kathodenmaterial ( $\text{LiCoO}_2$ ) verwendet. Die nachfolgende Abb. 5.46 zeigt schematisch den Umicore-Recyclingprozess. Laut den Aussagen von Umicore kann so eine Recyclingeffizienz von 64,6 % erreicht werden (Umicore 2010).

#### 5.7.4.6 IME-ACCUREC-Verfahren als Beispiel für eine Kombination aus mechanischer, hydro- und pyrometallurgischer Aufbereitung

Am IME – Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der RWTH Aachen University wurde im Rahmen eines BMBF-geförderten Verbundforschungsprojektes („Rückgewinnung der Rohstoffe aus Lithium-Ionen-Akkumulatoren“; Förderkennzeichen 01RW0404) ein alternatives Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien entwickelt, das bereits erfolgreich im Technikums-Maßstab getestet wurde. Das Verfahren zielt darauf ab, sowohl die Metallgehalte weitestgehend in metallischer Form als auch die organischen Komponenten wiederzugewinnen. Dazu wurden verschiedene Aufbereitungstechniken sowie die Vorteile hydro- und pyro-metallurgischer Prozessschritte kombiniert.



**Abb. 5.47** Alternatives Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien. *Quelle* Georgi-Maschler (2011)

Im Unterschied zu den vorgestellten rein pyrometallurgischen Recyclingverfahren werden die Batterien vor dem Einschmelzen aufgebrochen, zerkleinert und die einzelnen Batteriekomponenten weitestgehend voneinander getrennt. Dies ermöglicht trotz der pyrometallurgischen Behandlung die Wiedergewinnung der unedlen und organischen Komponenten. Zudem soll das Verfahren eine Wiedergewinnungsmöglichkeit für Lithium bieten. Das zugehörige Prozessfließbild zeigt Abb. 5.47.

Die Hauptrecyclingprodukte sind eine im Elektrolichtbogenofen erschmolzene Kobalt-Mangan-Legierung sowie ein Lithium-Konzentrat (Lithium-angereicherter Flugstaub).

Die Metalllegierung kann als Vorlegierung für Superlegierungen auf Kobaltbasis eingesetzt werden und ist somit direkt absetzbar. Aus dem Lithium-Konzentrat wird mittels einer hydrometallurgischen Behandlung ein Lithium-Karbonat mit einer Reinheit größer 99 % gewonnen.

---

## Literatur

- Adam Opel AG (2012) Die Batterie des Opel Ampera. <http://www.opel.de/fahrzeuge/modelle/personenwagen/ampera/highlights/technology.html>. Zugegriffen: 10. Juli 2012
- Afonso JC (2006) Recovery of valuable elements from spent Li-batteries. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Interlaken, 28–30 June 2006
- Audi AG (2012) Bildmaterial Elektromobilität, Audi AG. <https://www.audi-mediaservices.com/publish/ms/content/de/public.html>. Zugegriffen: 16. Feb 2012
- BAN – The Basel Action Network (2009). <http://www.ban.org>. Zugegriffen: 5. Juni 2009
- Batrec Industrie AG (2009) Internetauftritt des Unternehmens. <http://www.batrec.ch>. Zugegriffen: 2. Juni 2009
- BattV (1998) Verordnung über die Rücknahme und Entsorgung gebrauchter Batterien und Akkumulatoren (Batterieverordnung – BattV) vom 27.03.1998 (BGBl. I Nr. 20 vom 02.04.1998 S. 658)
- Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern, GSA – Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft (Hrsg) (2009) Altbatterien gehören nicht in den Kehrriechtsack. Abfallsplitter, Abfall-Information Kanton Bern, Ausgabe 2, 2003. <http://www.bve.be.ch>. Zugegriffen: 2. Juni 2009
- Baumgarten H, Risse J (2001) Logistikbasiertes Management des Produktentstehungsprozesses. In: Hossner R (Hrsg) Jahrbuch der Logistik. Verlagsgruppe Handelsblatt, Düsseldorf, S 150–156
- Bille S et al (2011) (UNITY-Fokusgruppe Elektromobilität) Elektromobilität - Perspektiven und Chancen für Unternehmen. <http://www.unity.de/de/veroeffentlichungen/opportunity.html>
- Brieter K (2011) Ein Japaner unter Strom. ADAC Motorwelt Heft 2:46–54
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2001) Informationen zur Batterieverordnung vom 03.07.2001, Bonn, Berlin. <http://www.bmu.de>. Zugegriffen: 12. May 2009
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Internationale Harmonisierung der technischen Vorschriften für Kraftfahrzeuge. <http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB-LA/internationale-harmonisierung-der-technischen-vorschriften-fuer-kraftfahrzeuge.html?view=renderDruckansicht&nn=58354>
- Butler D (2004) Li-ion battery recycling in the UK. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Como, 02–04 June 2004
- Castillo S et al (2002) Advances in the recovering of spent lithium battery compounds. J Power Sources 112(1):247–254
- Contestabile M et al (2001) A laboratory-scale lithium-ion battery recycling process. J Power Sources 92(1–2):65–69
- Coy TR (2001) Lithium battery recycling, established and growing. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Montreux, 02–04 May 2001
- Coy TR (2006) Recycling Ni, Co and Cd from batteries in the United States. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Interlaken, 28–30 June 2006
- Czichos H, Hennecke M (2004) Hütte, das Ingenieurwissen. Springer, München

- David J (1999) New recycling technologies of rechargeable batteries. In: International battery recycling congress, Deauville, 27–29 Sept 1999
- Deinzer G H (2009) Die Karosserie birgt das größte Potenzial. In: Automobilwoche, Okt 2009
- Deutekom Hv (2004) Safety aspects of waste lithium batteries. In: ICBR—international congress for battery recycling, Como, 02–04 June 2004
- DIN IEC 60664: Isolationskoordination für elektrische Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen
- Döhring-Nisar E et al (2001) Die Welt der Batterien – Funktion, Systeme, Entsorgung. GRS – Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (Hrsg), Hamburg
- Dorella G, Mansur MB (2007) A study of the separation of cobalt from spent Li-ion battery residues. *J Power Sources* 170(1):210–215
- ECE-R 10: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit
- ECE-R 100: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge hinsichtlich der besonderen Anforderungen an die Bauweise und die Betriebssicherheit 42-V-Bordnetz – 42 V on-board power supply. <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/42-V-Bordnetz-42-V-on-board-power-supply.html>
- ECE-R 85: Messung der Motorleistung
- Eckstein L, Schmitt F, Hartmann B (2010) Leichtbau von Elektrofahrzeugen. In: ATZ 11
- EG (1991) EG-Richtlinie 91/157/EEC vom 18.03.1991: Council Directive of 18 March 1991 on batteries and accumulators containing certain dangerous substances (91/157/EEC)
- EG (1993) EG-Richtlinie 93/86/EEC vom 04.10.1993: Commission Directive 93/86/EEC of 4 October 1993 adapting to technical progress Council Directive 91/157/EEC on batteries and accumulators containing certain dangerous substances
- EG (1998a) EG-Richtlinie 98/101/EC vom 22.12.1998: Commission Directive 98/101/EC of 22 December 1998 adapting to technical progress Council Directive 91/157/EEC on batteries and accumulators containing certain dangerous substances
- EG (1998b) EG-Richtlinie 2008/12/EC vom 11.03.2008: Directive 2008/12/EC of the European Parliament and of the Council of 11 March 2008 amending Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators, as regards the implementing powers conferred on the Commission
- EG (2006) EG-Richtlinie 2006/66/EC vom 06.09.2006: Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the Council of 6 September 2006 on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 91/157/EEC
- EG (2007a) Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge
- EG (2007b) Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007, Artikel 3 Abs. 3
- EG (2008) EG-Richtlinie 2008/103/EC vom 19.11.2008: Directive 2008/103/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 amending Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators as regards placing batteries and accumulators on the market
- EG (2011) Verordnung (EU) Nr. 678/2011 der Kommission vom 14. Juli 2011 zur Ersetzung des Anhangs II und zur Änderung der Anhänge IV, IX und XI der Richtlinie 2007/46/EG
- EG-Fahrzeuggenehmigungsverordnung (2011) EG-Fahrzeuggenehmigungsverordnung vom 3. Februar 2011 (BGBl. I S. 126), die durch Artikel 27 des Gesetzes vom 8. November 2011 (BGBl. I S. 2178) geändert worden ist
- Ellar AM, Liwat CG (1987) Development of a new cobalt recovery process at the Surigao Nickel Refinery. *Int J Miner Process* 19(1–4):311–322

- E-Mobility – Die Normung im Blick (2011). <http://www.bsozd.com/?p=592666>
- Erläuterungen zur Anwendung der Normenreihe DIN IEC 60664 (2008). <https://www.dke.de/de/DKEArbeit/MitteilungenzurNormungsarbeit/2008/Seiten/Erlaeuterungen%20zur%20Anwendung%20der%20Normenreihe%20DIN%20IEC%2060664.aspx>
- Espinosa DC et al (2004) An overview on the current processes for the recycling of batteries. J Power Sources 135(1–2):311–331
- EU (1997) Beschluss der Europäischen Union 97/836/EG. <http://eurlex.europa.eu/Notice.do?mod=e=dbl&lang=de&ihmlang=de&lng1=de,et&lng2=cs,da,de,el,en,es,et,fi,fr,hu,it,lt,lv,mt,nl,pl,pt,sk,sl,sv,&val=412256:cs&page=>
- EU (2000) Beschluss der Europäischen Union 2000/125/EG. [http://eurlex.europa.eu/smartapi/cgi/sga\\_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&lg=de&type\\_doc=Decision&an\\_doc=2000&nu\\_doc=125](http://eurlex.europa.eu/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&lg=de&type_doc=Decision&an_doc=2000&nu_doc=125)
- EU (2007) Zusammenfassungen der EU-Gesetzgebung: Die globale technische Harmonisierung von Fahrzeugen. [http://europa.eu/legislation\\_summaries/internal\\_market/single\\_market\\_for\\_goods/motor\\_vehicles/motor\\_vehicles\\_technical\\_harmonisation/l24471\\_de.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/internal_market/single_market_for_goods/motor_vehicles/motor_vehicles_technical_harmonisation/l24471_de.htm)
- European Commission (2009) Recycling of primary and secondary lithium batteries. Record Control Number 51959, Informationen zum VALIBAT-Projekt. <http://ec.europa.eu/>. Zugegriffen: 25. Mai 2009
- Eversheim W (1996) Organisation in der Produktionstechnik, Bd 1 (Grundlagen). VDI-Verlag, Düsseldorf
- Eversheim W (2006) 100 Jahre Produktionstechnik. Springer, Berlin
- Eversheim W, Schuh G (1999) Produktion und Produktentwicklung – Produktmanagement. Springer, Berlin
- EWG (1970) Richtlinie des Rates vom 6. Februar 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Betriebserlaubnis für Kraftfahrzeuge und Kraftfahrzeuganhänger (70/156/EWG)
- Fahrzeugzulassungsverordnung (2011) Fahrzeug-Zulassungsverordnung vom 3. Februar 2011 (BGBl. I S. 139), die zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 12. Juli 2011 (BGBl. I S. 1378) geändert worden ist
- Fiebig A et al (2005) Subjektive Evaluierung hat Methode – Ein anwendungsbezogenes Design zur Beurteilung von Geräuschszenarien. DAGA, München
- Fitzek D (2004) Abschlussbericht des internationalen Benchmarking-Projekts „Anlaufmanagement für Automobilzulieferer“. St. Gallen
- Fitzek D (2006) Anlaufmanagement in Netzwerken: Grundlagen, Erfolgsfaktoren und Gestaltungsempfehlungen für die Automobilindustrie. Haupt, Bern
- Frese E (1998) Grundlagen der Organisation: Konzept – Prinzipien – Strukturen. Gabler, Wiesbaden
- Fricke JL (2009) Jahresbericht/Dokumentation 2008 – Erfolgskontrolle nach Batterieverordnung gemäß §10 BattV. GRS – Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (Hrsg), Hamburg
- Future Steel Vehicle, World Auto Steel (o. J.) <http://www.worldautosteel.org/projects/future-steel-vehicle/>. Zugegriffen: 10. Juli 2012
- Gavinet C (1999) 6 Years experience in lithium battery recycling. In: International battery recycling congress, Deauville, 27–29 Sept 1999
- GDV (2006) Sicherheitsrisiko von Leichtkraftfahrzeugen - Informationsgespräch der Unfallforschung der Versicherer am 6. Dezember 2006 in München. [http://www.gdv.de/Presse/Archiv\\_der\\_Presseveranstaltungen/Presseveranstaltungen\\_2006/inhaltssite200606.html](http://www.gdv.de/Presse/Archiv_der_Presseveranstaltungen/Presseveranstaltungen_2006/inhaltssite200606.html). Zugegriffen: 16. Mai 2007
- Gentner A (1994) Entwurf eines Kennzahlensystems zur Effektivitäts- und Effizienzsteigerung von Entwicklungsprojekten. Dissertation, RWTH Aachen
- Genuit K (2008) Interdisciplinary approaches for optimizing vehicle interior noise. In: 5. SNVH Kongress, Graz, Österreich

- Genuit K (2011) Warnsignale für leise Fahrzeuge – im Spannungsfeld zwischen Lärm (Emission) und Sicherheit. In: Automotive Acoustics Conference, 1. Internationale ATZ-Fachtagung, Zürich, Schweiz, Juli 2011
- Genuit K (Hrsg) (2010) Sound-Engineering im Automobilbereich. Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen. Springer, Heidelberg
- Genuit K et al (1997) Binaural “Hybrid” model for simulation of noise shares in the interior of vehicles. Inter-Noise 1997, Budapest, Ungarn
- Genuit K, Fiebig A (2007) The influence of combined environmental stimuli on the evaluation of acoustical comfort: case studies carried out in an interactive simulation environment. *Int J Veh Noise Vib* 3(2):119–129
- Genuit K, Fiebig A (2011) Fahrzeugakustik und Sound Design im Wandel der Zeit. *ATZ* 07–08:530–535
- Georgi-Maschler T (2011) Entwicklung eines Recyclingverfahrens für portable Li-Ion-Gerätebatterien. Dissertation, RWTH Aachen University, Shaker-Verlag
- Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren (Batteriegelgesetz – BattG) vom 25.06.2009 (BGBl. I Nr. 36 vom 30.06.2009 S. 1582)
- Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG) vom 27.09.1994 (BGBl. I S. 2705), zuletzt geändert durch Artikel 5 des Gesetzes vom 22.12.2008 (BGBl. I S. 2986)
- Goede M, Ferkel H, Stieg J, Dröder K (2005) Mischbauweisen Karosseriekonzepte – Innovationen durch bezahlbaren Leichtbau. In: 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen
- Göpfert J (1998) Modulare Produktentwicklung. Gabler, Wiesbaden
- Göpfert J, Steinbrecher M (2000) Modulare Produktentwicklung leistet mehr. *Harvard Bus Manager* 3:20–32
- Grabner J, Nothhaft R (2006) Konstruieren von PKW-Karosserien. Springer, Berlin
- GRB Working Group on Quiet Road Transport Vehicles (UNECE) (2011) Proposal for guidelines on measures ensuring the audibility of hybrid and electric vehicles to be added to [R.E.3 and/or S.R.1]. Document GRB-53-09
- Hahn D, Kaufmann L (2002) Handbuch Industrielles Beschaffungsmanagement. Gabler, Wiesbaden
- Honda K, Yoshida H (2007) Development of next-generation electric vehicle “i-MiEV”. Mitsubishi Motors Technical Review 19, Mitsubishi Motors Corporation. [http://www.mitsubishi-motors.com/corporate/about\\_us/technology/review/e/index.html](http://www.mitsubishi-motors.com/corporate/about_us/technology/review/e/index.html). Zugegriffen: 10. Juli 2012
- Hardies AC (2008) High temperature metal recovery from spent batteries. In: EBR – Electronics & Battery Recycling, Toronto, 03–06 June 2008
- Hauck U (o. J.) Standardisierung ist das Gebot der Stunde. <http://www.e-auto-industrie.de/energie/articles/295685>
- Henrion P (2004) Battery recycling – a perspective from a nickel and cobalt producer. In: ICBR—international congress for battery recycling, Como, 02–04 June 2004
- Henrion P (2008a) Recycling Li-ion batteries at Xstrata Nickel. In: EBR—electronics & battery recycling, Toronto, 03–06 June 2008
- Henrion P (2008b) Recycling Li-ion batteries at Xstrata Nickel. In: ICBR—international congress for battery recycling, Düsseldorf, 17–19 Sept 2008
- Hefß G (2008) Supply-Strategien in Einkauf und Beschaffung. Springer, München
- Hofheinz W (2010) Auf die Isolation kommt es an. <http://www.e-auto-industrie.de/bordnetz/articles/295738>
- Hurtado MDRF (2005) Method of recovering lithium ion batteries LG cellphone. In: ICBR—international congress for battery recycling, Barcelona/Sitges, 08–10 June 2005

- Hüttl RF, Pischetsrieder B, Spath D (2010) Elektromobilität – Potenziale und wissenschaftlich-technische Herausforderungen. Springer, Berlin
- IEC 61508: Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems
- IEC 61980-1: Electric equipment for the supply of energy to electric road vehicles using an inductive coupling; general requirements
- IEC 62196: Plugs, socket-outlets, vehicle couplers and vehicle inlets – conductive charging of electric vehicles
- IEC 62351: Data and communication security (Security for Smart Grid)
- Inmetco Inc. (2009) Internetauftritt des Unternehmens unter. <http://www.inmetco.com>. Zugegriffen: 17. Juli 2012
- ISO (1977) 3833:1977 Road vehicles – types – terms and definitions, international standards for business, government and society
- ISO 26262: Road vehicles – functional safety
- ISO 6469-3: Electric propelled road vehicles – safety specifications; protection of persons against electric shock
- ISO 6722: Road vehicles – 60 V and 600 V single-core cables
- ISO/IEC 15118: Road vehicles – communication protocol between electric vehicle and grid
- Jania T (2004) Änderungsmanagement auf Basis eines integrierten Prozess- und Produktdatenmodells mit dem Ziel einer durchgängigen Komplexitätsbewertung. Dissertation, Universität Paderborn
- KBA (2009) Verzeichnis zur Systematisierung von Kraftfahrzeugen und ihren Anhängern. Stand April 2009, SV 1. Kraftfahrt-Bundesamt
- Kim D-S et al (2003) Simultaneous separation and renovation of lithium cobalt oxide from the cathode of spent lithium ion rechargeable batteries. *J Power Sources* 132(1-2):145–149
- Kirst P (2006) Gelungener Start dank Anlaufmanagement: Der Erfolg von Serienneuanläufen wird nicht beim Automobilhersteller entschieden. *DVZ* 60(124):38
- Kraftfahrt-Bundesamt (o. J.) Genehmigungen nach harmonisierten Vorschriften (Globale technische Regelungen). [http://www.kba.de/nn\\_124996/DE/Fahrzeugtechnik/Typgenehmigung/GlobaleTechnischeRegelungen/globaletechnischeregelungen\\_\\_node.html?\\_\\_nnn=true](http://www.kba.de/nn_124996/DE/Fahrzeugtechnik/Typgenehmigung/GlobaleTechnischeRegelungen/globaletechnischeregelungen__node.html?__nnn=true)
- Krebs A (2002) Batrec process for spent Li-batteries. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Wien, 03–05 July 2002
- Krebs A (2003) Batrec news – industrial recycling of spent lithium batteries. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling. Lugano, 18–20 June 2003
- Krebs A (2005) About lithium batteries. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Barcelona/Sitges, 08–10 June 2005
- Krebs A (2006) Latest developments at Batrec. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Interlaken, 28–30 June 2006
- Krust M (2011) Daimler und Bosch wollen Produktion von E-Motoren 2012 starten. *Automobilwoche*. <http://www.automobilwoche.de/article/20110412/REPOSITORY/110419992/1139>
- Kuhn A et al (2002) „fast ramp-up“ – Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten. Verlag Praxiswissen, Dortmund
- Lain MJ (2001) Recycling of lithium ion cells and batteries. *J Power Sources* 97–98:736–738
- Laufenberg L (1996) Methodik zur integrierten Projektgestaltung für die situative Umsetzung des Simultaneous Engineering. Shaker, Aachen
- Lee C-K, Rhee K-I (2007) Preparation of LiCoO<sub>2</sub> from spent lithium-ion batteries. *J Power Sources* 109(1):17–21
- Li J et al (2007) Preparation of LiNi<sub>1/3</sub>Co<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>O<sub>2</sub> cathode materials from spent Li-ion batteries. *Trans Nonferrous Met Soc China* 17(5):897–901

- Lindemann U, Reichwald R (1998) Integriertes Änderungsmanagement. Springer, Berlin
- Lupi C et al (2005) Nickel and cobalt recycling from lithium-ion batteries by electrochemical process. *Waste Manage* 25(2):215–220
- Lupi C, Pasquali M (2003) Electrolytic nickel recovery from lithium-ion batteries. *Miner Eng* 16(6):537–542
- Matthies G et al (2010) Zum E-Auto gibt es keine Alternative. Bain & Company, München
- McKinsey (2003) HAWK 2015 – Herausforderung Automobile Wertschöpfungs-Kette. Eine Studie von McKinsey & Company und dem VDA. Heinrich Druck + Medien GmbH, Frankfurt am Main
- Metallurgische Exkursion des IME (2008) Information im Rahmen einer Unternehmensbesichtigung bei der Batrec Industrie AG. Wimmis, 19. Sept 2008
- Michelin (2004) Michelin active wheel. <http://www.michelin.com/corporate/EN/news/article?articleID=N13730>. Zugegriffen: 10. Juli 2012
- Miller DG, McLaughlin B (2001) Recycling the lithium battery. In: Pistoia G et al (Hrsg) *Used battery collection and recycling*, Elsevier Science, New York
- Möller K (2002) Lebenszyklusorientierte Planung und Kalkulation des Serienanlaufs. *Z Plan* 13(4):431–457
- Nan J et al (2006) Recovery of metal values from a mixture of spent lithium-ion batteries and nickel-metal hydride batteries. *Hydrometallurgy* 84(1–2):75–80
- National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) (2009) Incidence of pedestrian and bicyclist crashes by hybrid electric passenger cars. Dot HS 811204: Technical Report, USA
- Nationale Plattform für Elektromobilität (2010a) Die deutsche Normungsroadmap: Elektromobilität – Version 1. <http://www.dke.de/de/infocenter/Seiten/ArtikelDetails.aspx?eslShopItemID=99bf66a4-ea6a-4839-a174-593a29ccce33>
- Nationale Plattform für Elektromobilität (2010b) AG 4 – Normung, Standardisierung und Zertifizierung: Vorschriften in den Bereichen Kraftfahrzeugtechnik und Gefahrguttransport. [http://www.elektromobilitaet.din.de/sixcms\\_upload/media/3310/Bericht\\_Vorschriften\\_Gefahrguttransport.pdf](http://www.elektromobilitaet.din.de/sixcms_upload/media/3310/Bericht_Vorschriften_Gefahrguttransport.pdf)
- Neuhausen J (2002) Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion. Dissertation, RWTH Aachen
- NN (2010a) An assessment of mass reduction opportunities for a 2017–2020 model year vehicle program. Studie Lotus Engineering Inc
- NN (2010b) Elektrofahrzeuge – Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf. ETG VDE Taskforce Studie
- NPE (2010) Die deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität. Version 1, 30 Nov 2010
- Onto Technology LLC (2009) Internetauftritt des Unternehmens unter. <http://www.onto-technology.com>. Zugegriffen: 5. Juni 2009
- Parametric Technology GmbH (2012) Definition of an integral architecture for a virtual development – PLM Solution StreetScooter
- Patent Application US 20050244704 (2005) System and method for processing an end-of-life or reduced performance energy storage and/or conversion device using a supercritical fluid. USA, 03 Nov 2005
- Patent EP 20000108070 (2000) Procedure for the recycling of cathode masses of used lithium batteries. Europa, 29 Nov 2000
- Patent JP 2000015216 A (2000) Method for recycling positive electrode active material from lithium ion secondary battery. Japan, 18 Jan 2000
- Patent JP 2000173677 A (2000) Lithium battery processing method for recycling constituent material. Japan, 23 June 2000
- Patent JP 2000231941 A (2000) Recycling method of positive electrode for lithium ion secondary battery. Japan, 22 Aug 2000

- Patent JP 2001023704 A (2001) Recycling method of negative electrode material from used lithium battery. Japan, 26 Jan 2001
- Patent US 5352270 (1994) Method for recycling metal containing electrical components. USA, 04 Oct 1994
- Patent US 5491037 (1996) Method for recovering lithium cell materials. USA, 13 Feb 1996
- Patent US 5523516 (1996) Method for recycling lithium batteries. USA, 04 June 1996
- Patent US 5575907 (1996) Process for the recovery of raw materials from presorted collected waste, especially scrap electrochemical batteries and accumulators. USA, 19 Nov 1996
- Patent US 5882811 (1999) Method for recovering lithium cell materials. USA, 16 Mar 1999
- Patent US 5888463 (1999) Li reclamation process. USA, 30 Mar 1999
- Patent US 6048646 (2000) Method for treating copper current collectors for Li-ion and/or Li-ion polymer batteries. USA, 11 Apr 2000
- Patent US 6120927 (2000) Method of recovering lithium from batteries. USA, 19 Sept 2000
- Patent US 6261712 (2001) Method of reclaiming cathodic active material of lithium ion secondary battery. USA, 17 July 2001
- Patent US 6514311 (2003) Clean process of recovering metals from waste lithium ion batteries. USA, 04 Feb 2003
- Patent US 6835228 (2004) Process of recovering valuable metals from waste secondary batteries. USA, 28 Dec 2004
- Patent US 7119517 (2006) Method for recycling secondary battery. USA, 10 Oct 2006
- Patent US 7192564 (2007) Method for recycling spent lithium metal polymer rechargeable batteries and related materials. USA, 20 Mar 2007
- Patent WO 02/23651 A (2002) A method for recycling spent lithium metal polymer rechargeable batteries and related materials, international. 21 Mar 2002
- Peters A, Hoffmann J (2011) Forschungsbericht Nutzerakzeptanz von Elektromobilität. Fraunhofer ISI. [http://www.elektromobilitaet.fraunhofer.de/Images/FSEM\\_Ergebnisbericht\\_Fokusgruppen\\_2011\\_tcm243-92030.pdf](http://www.elektromobilitaet.fraunhofer.de/Images/FSEM_Ergebnisbericht_Fokusgruppen_2011_tcm243-92030.pdf)
- Pfohl HC, Gareis K (2000) Die Rolle der Logistik in der Anlaufphase. Z Betriebswirtsch 70(11): 1189–1214
- Pletschen B (2010) Akustikgestaltung in der Fahrzeugentwicklung. In: Genuit K (Hrsg) Sound-Engineering im Automobilbereich. Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen. Springer, Heidelberg
- Rausch A, Broy M (2008) Das V-Modell XT – Grundlagen, Erfahrungen und Werkzeuge. Dpunkt Verlag, Heidelberg
- Recupyl S.A.S. (2009) <http://www.recupyl.com>. Zugegriffen: 5. Juni 2009
- Rentz O et al (2001) Untersuchung von Batterieverwertungsverfahren und -anlagen hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Relevanz unter besonderer Berücksichtigung des Cadmiumproblems. Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Forschungsprojekt 299 35 330, Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung, Universität Karlsruhe (TH)
- Rosenberg A (2001) Battery recycling at METEK Metal Technology in Israel. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Montreux, 02–04 May 2001
- Rosenberg A (2004) Multi batteries non sorted recycling technology through hydrometallurgy. In: ICBR—international congress for battery recycling, Como, 02–04 June 2004
- RWTH Aachen (2009) Konzeptphase Projekt StreetScooter, erster Grobpackageentwurf
- S.N.A.M. (2009) Internetauftritt des Unternehmens unter. <http://www.snam.com>. Zugegriffen: 5. Juni 2009
- Sagawe T (2010) Sicherheit der Hochvolttechnik bei Elektro- und Hybridfahrzeugen. [http://www.sachverstaendigentag21.de/downloads/6\\_Sagawe.pdf](http://www.sachverstaendigentag21.de/downloads/6_Sagawe.pdf)

- Sandberg U et al (2010) Are vehicles driven in electric mode so quiet that they need acoustic warning signals. ICA 2010, Sydney, Australien
- Sauer DU, Lunz B (2010) Technologie und Auslegung von Batteriesystemen für die Elektromobilität. Solar Mobility, Berlin
- Sauler J, Kriso S (2009) Standardisierung: ISO 26262 – Die zukünftige Norm zur funktionalen Sicherheit von Straßenfahrzeugen. <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/themen/elektronikmanagement/projektqualitaetsmanagement/articles/242243/>
- Schäppi B et al (2005) Handbuch Produktentwicklung. Hanser, München
- Schmidt G (1994) Organisatorische Grundbegriffe. Schmidt, Gießen
- Schmitt F (2011) Leichtbau von Elektrofahrzeugen – eine wirtschaftliche Notwendigkeit. Innomateria, Köln
- Schneider M, Lücke M (2002) Kooperations- und Referenzmodelle für den Anlauf: Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten. wt Werkstattstechnik online 92(10):514–518
- Schönfelder M et al (2009) Elektromobilität – Eine Chance zur verbesserten Netzintegration Erneuerbarer Energien. In: uwf – UmweltWirtschaftsForum, Bd 17, Nr 4, pp 373–380
- Schuh G (2006) Produktionsplanung und Steuerung. Springer, Berlin
- Schuh G et al (2005) Anlaufmanagement – Kosten senken, Anlaufzeit verkürzen Qualität sichern. wt Werkstattstechnik (online) 95(5):405–409
- Schuh G et al (2008) Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen. Springer, Berlin
- Schulte-Fortkamp B et al (2006) New approach for the development of vehicle target sounds. Internoise 2006, Honolulu, HI, USA
- Seidel M (2005) Methodische Produktplanung. Universitätsverlag, Karlsruhe
- Sellerbeck P, Nettelbeck C (2010) Verbesserung des Geräusch- und Schwingungskomforts von Hybrid- und Elektrofahrzeugen. In: Aachener Akustik Kolloquium 2010, Aachen
- Shin S-M et al (2005) Development of a metal recovery process from spent Li-ion battery wastes. Hydrometallurgy 797(3–4):172–181
- Siret C (2008) Comprehensive life cycle assessments of rechargeable batteries. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Düsseldorf, 17–19 Sept 2008
- Siret C et al (2006) Recycling or direct metal production: a comprehensive life cycle analysis from metals to batteries. Poster der Unternehmen Saft und Umicore. <http://www.batteryrecycling.umicore.com>. Zugegriffen: 6. Juni 2006
- Siret C, Van Damme G (2008) Umicore and SAFT closing the battery loop – Recycling lowers environmental impact: The case of Li-ion batteries. In: EBR – Electronics & Battery Recycling, Toronto, 03–06 June 2008
- Sloop SE (2008) Advanced battery recycling. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Düsseldorf, 17–19 Sept 2008
- Sohn J-S (2003) Collection and recycling of spent batteries in Korea. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Lugano, 18–20 June 2003
- Sohn J-S et al (2006) Hydrometallurgical approaches for selecting the effective recycle process of spent lithium ion battery. In: Kongoli F, Reddy RG (Hrsg) Sohn international symposium, advanced processing of metals and materials. New, improved and existing technologies: aqueous and electrochemical processing, Bd 6, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)
- Stölzle W, Hofmann E, Hofer F (2005) Supply Chain Costing: Konzeptionelle Grundlagen und ausgewählte Instrumente. In: Brecht U (Hrsg) Neue Entwicklungen im Rechnungswesen. Gabler, Wiesbaden
- Stölzle W, Kirst P (2006) Portfolios als risikoorientiertes Instrument zur Steigerung des erwarteten Wertbeitrags im Lieferantenmanagement. In: Jacquemin M, Pibernik R, Sucky E (Hrsg.) Quantitative Methoden der Logistik und des SCM. Festschrift für Prof. Dr. Heinz Isermann. Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg

- Straßenverkehrszulassungsordnung (2009) Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. September 1988 (BGBl. I S. 1793), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 21. April 2009 (BGBl. I S. 872) geändert worden ist
- Straube F (2004) e-Logistik – Ganzheitliches Logistikmanagement. Springer, Berlin
- StVZO §21a: Anerkennung von Genehmigungen und Prüfzeichen auf Grund internationaler Vereinbarungen und von Rechtsakten der Europäischen Gemeinschaften
- StVZO §62: Elektrische Einrichtungen von elektrisch angetriebenen Kraftfahrzeugen
- Süddeutsche Zeitung (2007) Begehrter Rohstoff. 280:11, 05. Dez 2007
- Tedjar F (2003) Challenge for recycling new batteries and fuel cells. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Lugano, 18–20 June 2003
- Tedjar F (2005) Recupyl process for recycling lithium ion battery. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Barcelona/Sitges, 08–10 June 2005
- Tedjar F (2006) Recupyl process for recycling lithium ion battery. In: Kongoli F, Reddy RG (Hrsg) Sohn international symposium on advanced processing of metals and materials. New, improved and existing technologies: iron and steel and recycling and waste treatment, Bd 5, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)
- Tedjar F (2008) From portable batteries to hybrid vehicle and electrical vehicles batteries – extension of Recupyl process. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Düsseldorf, 17–19 Sept 2008
- Thomke S, Fujimoto T (2000) The effect of “Front-Loading” problem-solving on product development performance. *J Prod Innov Manage* 17:128–142
- Thompson S (2004) Recycling HEV batteries in the US. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Como, 02–04 June 2004
- Tollinsky N (2009) Xstrata boosts recycling capacity. *Sudbury Min Solutions J* 5(2):1 und 36. <http://www.sudburyminingsolutions.com>. Zugegriffen: 2. Juni 2009
- Toxco Inc. (2009) Internetauftritt des Unternehmens unter. <http://www.toxco.com>. Zugegriffen: 17. Juli 2012
- Ulrich K, Eppinger SD (2000) Methodologies for product design and development, 2. Aufl. McGraw-Hill, New York
- Umicore Recycling Solutions (2004a) Closing the loop for Li-ion batteries – patented recycling process that fulfills a market need. Marketingbroschüre des Unternehmens. <http://www.batteryrecycling.umicore.com>. Zugegriffen: 8 Dez 2004
- Umicore Recycling Solutions (2004b) Going green with Umicore – a global metals and materials company that adopts a dedicated professional approach to battery recycling with its VAL'EAS process. *Batteries Int* 60:42–44
- Umicore Recycling Solutions (2006a) Battery to battery – excellence in battery materials and battery recycling. Poster des Unternehmens. <http://www.batteryrecycling.umicore.com>. Zugegriffen: 6. Juni 2006
- Umicore Recycling Solutions (2006b) Recycling of new generation rechargeable batteries. Marketingbroschüre des Unternehmens. <http://www.batteryrecycling.umicore.com>. Zugegriffen: 6. Juni 2006
- Umicore Recycling Solutions (2006c) The Val'Eas process: Recycling of Li-ion and NiMH batteries via a unique industrial closed loop. Prozessbeschreibung des Unternehmens. <http://www.batteryrecycling.umicore.com>. Zugegriffen: 6. Juni 2006
- Umicore Recycling Solutions (2006d) Umicore – excellence in battery materials and battery recycling. Marketingbroschüre des Unternehmens. <http://www.batteryrecycling.umicore.com>. Zugegriffen: 6. Juni 2006
- Umicore Recycling Solutions (2008) Umicore's closed loop solution for rechargeable batteries. Umicore battery recycling presentation, Stand 2008
- Umicore Recycling Solutions (2009) Internetauftritt des Unternehmens unter. <http://www.batteryrecycling.umicore.com>. Zugegriffen: 6. Juni 2009

- Umicore: Artikel (2010) The Umicore process: recycling of Li-ion and NiMH batteries via a unique industrial closed loop. [www.batteryrecycling.umicore.com](http://www.batteryrecycling.umicore.com). Zugegriffen: 31. Aug 2011
- Verordnung über die Rücknahme und Entsorgung gebrauchter Batterien und Akkumulatoren (Batterieverordnung – BattV) vom 27.03.1998 (BGBl. I Nr. 20 vom 02.04.1998 S. 658); neugefasst durch Bekanntmachung vom 02.07.2001 (BGBl. I S 1486), geändert durch Artikel 7 des Gesetzes vom 09.09.2001 (BGBl. I S. 2331)
- Wallentowitz H et al (2010) Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Vieweg + Teubner, Wiesbaden
- Wangenheim S (1998) Integrationsbedarf im Serienanlauf dargestellt am Beispiel der Automobilindustrie. In: Horváth P, Fleig G (Hrsg) Integrationsmanagement für neue Produkte. Schäffer-Poeschel, Stuttgart
- Weber J (2009) Automotive development process – process for successful customer oriented vehicle development. Springer, Berlin
- Wiaux J-P (2002) Lithium batteries in European countries – technology, market, collection and recycling. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Wien, 03–05 July 2002
- Wiesinger G, Housein G (2002) Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten. Wettbewerbsvorteile durch ein anforderungsgerechtes Anlaufmanagement. wt Werkstatttechnik online 92(10):505–508
- Wildemann H (2006) Anlaufmanagement: Leitfaden zur Verkürzung der Hochlaufzeit und Optimierung der An- und Auslaufphase von Produkten. TCW, München
- Wissmann R (2008) Batterie-Recycling wird privatisiert. Der Bund S 19, Tageszeitung vom 19.09.2008, Espace Media, Bern
- Witt C (2006) Interorganizational new product launch management: an empirical investigation of the automotive industry. Dissertation, Universität St. Gallen
- World Health Organization (WHO), Europe (2011) Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe, Bonn, Germany
- Zanner S et al (2002) Änderungsmanagement bei verteilten Standorten. Ind Manage 18(3):40–43
- ZF Friedrichshafen AG (2001) Electric twist beam axle. [http://www.zf.com/corporate/de/press/press\\_releases/press\\_release.jsp?newsId=21852712](http://www.zf.com/corporate/de/press/press_releases/press_release.jsp?newsId=21852712). Zugegriffen: 16. Feb 2012
- Zhang P et al (1998) Hydrometallurgical process for recovery of metal values from spent lithium-ion secondary batteries. Hydrometallurgy 47(2–3):259–271

---

# Entwicklung von elektrofahrzeugspezifischen Systemen

# 6

Thilo Röth, Achim Kampker, Uwe Reisgen, Kay Hameyer,  
Rik W. De Doncker, Thilo Stolze, Andreas Vetter, Jürgen Hagedorn,  
Dirk Uwe Sauer und Dirk Müller

---

T. Röth (✉)

Lehr- und Forschungsgebiet Karosserietechnik, FH Aachen - University of Applied Sciences,  
Hohenstaufenallee 6, 52064 Aachen, Deutschland  
e-mail: roeth@fh-aachen.de

A. Kampker (✉)

Werkzeugmaschinenlabor (WZL), RWTH Aachen University, Steinbachstraße 19, 52074  
Aachen, Deutschland  
e-mail: a.kampker@wzl.rwth-aachen.de

U. Reisgen (✉)

Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF), RWTH Aachen University,  
Pontstr 49, 52062 Aachen, Deutschland  
e-mail: institutsleiter@isf.rwth-aachen.de

K. Hameyer (✉)

Institut für Elektrische Maschinen, RWTH Aachen University, Schinkelstr 4,  
52062 Aachen, Deutschland  
e-mail: post@iem.rwth-aachen.de

R. W. De Doncker (✉)

ISEA - Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, RWTH Aachen University,  
Jägerstr. 17/19, 52066 Aachen, Deutschland  
e-mail: post@isea.rwth-aachen.de

D. Sauer (✉)

ISEA - Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, RWTH Aachen University,  
Jülich Aachen Research Alliance (JARA), Section JARA Energy, Jägerstr. 17/19, 52066 Aachen,  
Deutschland  
e-mail: sr@isea.rwth-aachen.de

T. Stolze · A. Vetter (✉)

Infineon Technologies AG, Max-Planck-Strasse 5, 59581 Warstein, Deutschland  
e-mail: Thilo.Stolze@infineon.com

A. Vetter (✉)

e-mail: Andreas.Vetter@infineon.com

J. Hagedorn (✉)  
Aumann GmbH, Intzestrasse 37, 32339 Espelkamp, Deutschland  
e-mail: juergen.hagedorn@aumann.com

D. Müller (✉)  
E.ON Energy Research Center (E.ON ERC), RWTH Aachen University, Mathieustraße 10,  
52074 Aachen, Deutschland  
e-mail: dmuller@eonerc.rwth-aachen.de

## 6.1 Fahrzeugstruktur

### 6.1.1 Body für Elektrofahrzeuge

Thilo Röth

Die Fahrzeugkarosserie bildet als größte funktionale und organisatorische Systemeinheit ein zentrales Kompetenzfeld der OEMs. Für den Fahrzeughersteller stellt der Karosserierohbau eine hohe Kernkompetenz sowohl in der Produktentwicklung als auch in der Produktion dar. Neue, innovative Karosseriebauweisen, bspw. aufgrund eines neuen Fahrzeugkonzeptes oder neuer Anforderungen, bedeuten für den OEM auch gleichzeitig die intensive Auseinandersetzung mit Kompetenzfokussierung bzw. Wertschöpfungsverlagerungen.

Um das aktuelle Marktgeschehen bei Elektrofahrzeugen und damit verbundene Zukunftsszenarien zu beschreiben, wird in diesem Kapitel die Fahrzeugkarosserie in die Bereiche „Karosserietragstruktur“, „Karosserieaußenhaut“ und „Klappen“ unterteilt. Die Karosserietragstruktur befindet sich in der Bodengruppe sowie im Fahrzeugaufbau und besteht aus Trägern, Knoten sowie Schubfeldern bzw. Schließstrukturen (s. Abb. 6.1). Die Karosserieaußenhaut, die sog. Class-A-Flächen, beschreibt die Oberfläche des Fahrzeugs.

**Abb. 6.1** Fahrzeugkarosserie, bestehend aus Tragstruktur, Außenhaut und Klappen.  
1 Knoten, 2 Schließstrukturen, 3 Träger, 4 Außenhaut



Die Verglasung, Grills, Blenden und Spiegel werden für die Beschreibung der strukturellen Fahrzeugkarosserie ausgenommen. Unter Fahrzeugklappen werden neben den Türen auch die Heckdeckel sowie die Motorhaube verstanden. Die Klappen beinhalten sowohl Tragstrukturen als auch Class-A-Flächen der Karosserieaußenhaut. Typischerweise werden Class-A-Flächen vorrangig auf lokale mechanische Anforderungen (bspw. Beulsteifigkeiten) ausgelegt. Die eigentliche Tragstruktur übernimmt umfangreiche globale Anforderungen.

Im Gesamtfahrzeugkontext zeigt sich der konträre Stellenwert einer Fahrzeugkarosserie für die Entwicklung und Produktion von Elektrofahrzeugen. Bei konventionellen Fahrzeugen trägt die Fahrzeugkarosserie mit 35–45 % am Gesamtfahrzeuggewicht bei und ist somit eine der Hauptstellschrauben für den Fahrzeugleichtbau. Für ein neues Großserienfahrzeugmodell sind teilgebundene Investitionen zur Fertigung der einzelnen Karosserieblechpressteile mit mehr als 300 Mio. Euro nicht unüblich. Selbst neue Fahrzeugkarosserien mit hohen Übernahmeanteilen aus bereits existierenden Fahrzeugmodellen fordern Werkzeuginvestitionen von mindestens 10 % einer kompletten Neuentwicklung (Quick und Büttner 2008). Selbst für klassische Kleinserienkarosserien (bis 10.000 Fz./Jahr) in entsprechender profillastiger Aluminiumbauweise fallen teilgebundene Investitionen in einer Höhe von 5–20 Mio. Euro an. Somit bildet für einen OEM die Karosserie eines neuen Fahrzeugmodells eine wesentliche Säule der Kapitalbindung.

Eine weitere Besonderheit in der Karosserierohbaufertigung ist der sehr hohe Automatisierungsgrad. Er liegt in der Großserie bei bis zu 98 %, selbst in der mittleren Serienfertigung (ab 10.000 Fz./Jahr) sind bis zu 70 % üblich. Bei der Entwicklung und Herstellung von Elektrofahrzeugen werden diese Rahmenbedingungen verstärkt hinterfragt und neue Karosseriebauweisen, -werkstoffe und -fertigungsverfahren für die Einzelteile als auch deren Fügeprozesse unter einem neuen Blickwinkel bewertet.

### 6.1.1.1 Eigenschaftsmanagement von Elektrofahrzeug-Karosserien

Die Fahrzeugkarosserie interagiert maßgeblich mit dem Fahrzeug- und Kundennutzungskonzept, dem Fahrzeugdesign sowie der Produktionsstrategie. In sehr hohem Maß wird in der Karosserieentwicklung Integrationskompetenz für die Innenausstattung, das Fahrwerk und die verschiedenen Antriebsstrangkonzeppte gefordert. Grundsätzlich wird ein Karosseriekonzept auf der Basis eines komplexen geometrischen und mechanischen Anforderungsprofils entschieden. Damit reagiert das Karosseriekonzept mit seinen Funktionseigenschaften auf die Fahrzeughauptattribute (s. Abb. 6.2).

Für die Fahrzeugkarosserie eines Elektrofahrzeugs werden neue Bewertungsmaßstäbe insbesondere für folgende Fahrzeugeigenschaften gefordert:

- Passive Sicherheit
- Bedienung/Ergonomie
- Akustik und Vibrationen
- Klimatisierung
- Design
- Gewicht und Kosten

Fahrzeughaupt-eigenschaften		Mechanische Leistungskriterien					Geometrische Kriterien		
		Deformationsverhalten	Schwingungsverhalten/ dyn. Steifigkeiten	statische Steifigkeiten	Festigkeit (Zeit- / Betriebsfestigkeit)	Schallübertragung	Bauraumausnutzung	Anströmflächen	Fahrzeugaufbauform
Fahrverhalten				■			■		■
Sicherheit	passiv (Crash)	■					■		■
	aktiv				■			■	■
Komfort	Bedienung / Ergonomie						■		■
	Akustik		■		■	■		■	■
	Vibrationen		■		■	■			■
	Sitzkomfort		■	■			■		■
	Klimatisierung						■	■	
Haltbarkeit			■		■				
Wassermanagement							■	■	■
Design							■	■	■
Aerodynamik							■	■	■
Qualität		■					■	■	

Haupteinfluss

Nebeneinfluss

**Abb. 6.2** Eigenschafts-Interaktionsmatrix für die Fahrzeugkarosserie

Die korrespondierenden, mechanischen und geometrischen Leistungskriterien der Karosserie stehen somit im Fokus bei der Entwicklung eines neuen Elektrofahrzeugs. Insbesondere bei Purpose-Design-Elektrofahrzeugen werden durch neue mechanische Packagekonzepte für den Antrieb und die Energiespeichersysteme neue Karosseriestrukturkonzepte am Markt erkennbar.

Ein wichtiger Aspekt für die Umsetzung einer Elektrofahrzeug-Karosserie ist die Abbildung des kundenseitigen Fahrzeugnutzungs Konzeptes, d. h. der Fahrzeugklasse sowie der Fahrzeuggröße. In den nächsten Jahren werden Elektrofahrzeuge zum größten Teil in der Klasse der Klein- und Kleinstwagen sowie in der Sportwagenklasse erwartet. Entsprechend lassen sich anforderungsbezogene Elektrofahrzeug-Karosserien in die beiden Hauptdisziplinen „Hochleistungskarosserien für Freizeitsportgeräte“ und „wirtschaftliche Leichtbaukarosserien für Stadtfahrzeuge“ unterteilen.

### 6.1.1.2 Elektrofahrzeug-Karosserien – Evolution aus dem modernen Fahrzeugbau

Die Auseinandersetzung mit der richtigen Karosseriebauweise sowie dem entsprechenden Werkstoffkonzept für Elektrofahrzeuge erfolgt vorrangig im Kontext der Leichtbauanforderungen, der Leistungserwartung sowie der geplanten Produktionslosgrößen (s. Abb. 6.3). Die derzeit noch schwer vorhersagbaren Absatzprognosen für Elektrofahrzeuge

Bezeichnung	[Fzg./Jahr]		Elektrofahrzeug-Varianten	
	Min.	Max.	Jahr 2020	Jahr 2030
Einzelfertigung (Manufaktur)	1	5		
Kleinstserie (Manufaktur)	5	50		
Kleinserie	klein	50		
	mittel	200		
	groß	500		
mittlere Serienfertigung	klein	1.000		
	mittel	10.000		
	groß	30.000		
Großserienfertigung	klein	50.000		
	mittel	100.000		
	groß	300.000		
		offen		

**Abb. 6.3** Definition verschiedener Produktionslosgrößen in Abhängigkeit von den Elektrofahrzeug-Varianten

Bauweise	Werkstoff	Beispiel	Invest.-Kosten	Stückkosten	Gewicht	Produktionslosgröße	Großserienabsicherung
<b>Monobauweisen</b>							
Monocoque	CFK / GFK	Formel 1 / Motorsport, KTM X-BOW					o
	Alu	Lotus, Wiesmann, Tesler					+
Rohrrahmen	Stahl	DTM / Motorsport					o
	Alu	Rolls Royce Phantom Space					++
Space Frame	Alu	Audi A8, Audi R8, Jaguar XK					++
Selbsttragend	Alu	Hond NSX, Jaguar XJ					++
	Stahl	VW Golf					++
<b>Mischbauweisen</b>							
CFK-Schalenbauweise oder Monocoque / Space Frame	CFK / Alu	Porsche Carrera GT, McLaren MP4-12C, Lamborghini Aventador, BMW i3 & i8					++
Spaceframe / Selbsttragend	Alu / Stahl	Audi TT 8J (seit 2006) / BMW 5er E59					++
FlexBody-Rahmenbauweise	Alu / Stahl / GFK / CFK	Technologieträger, EC2Go*, Protoscar Lampo3b* (*Konzeptstudien)					++

**Abb. 6.4** Karosseriebauweisen und Werkstoffkonzepte in Abhängigkeit von Produktionslosgrößen, Kosten- und Gewichtsanforderungen als qualitative Aussage

sowie die Bereitschaft, für Leichtbaumaßnahmen deutlich höhere Kosten als im klassischen Fahrzeugbau zu akzeptieren, sorgen für klare Trends bei der Fahrzeugkarosserie von Elektrofahrzeugen.

Fahrzeugkarosserien von Elektrofahrzeugen orientieren sich heute noch stark an den klassischen Karosseriebauweisen und -werkstoffen (s. Abb. 6.4). So wird bspw. beim Conversion-Design-Elektrofahrzeug noch vorrangig auf die selbsttragende Karosserie in Stahlblech zurückgegriffen. Bei Purpose-Fahrzeugen für die Kleinst- und Kleinserie sowie für die kleine, mittlere Serienfertigung von Elektrofahrzeugen dominieren Aluminiumprofilbauweisen sowie Monocoque-Bauweisen. Stahlbauweisen, insbesondere profillastig, sind besonders

interessant bei Elektrofahrzeugkonzepten, bei denen niedrige Anschaffungskosten mit einer „mittleren Serienfertigung“ oder Großserienfertigung im Vordergrund stehen.

### **6.1.1.3 Karosserien von Conversion-Design-Elektrofahrzeugen**

Bei einem Conversion-Design-Elektrofahrzeug wird eine bereits existierende Karosserierohbaustruktur verwendet. Lediglich für die notwendigen Adaptionsteile zur Integration des elektrischen Antriebs und des Energiespeichersystems werden aufwendigere Leichtbaumaßnahmen und alternative Werkstoffe eingesetzt. Besondere Modifikationen an der Karosserie eines solchen Fahrzeugs sind:

- Schaffung entsprechender Bauräume in der Fahrzeugbodengruppe für die Batteriespeichersysteme
- zusätzliche Karosserieverstärkungen zur Kompensation des erhöhten Fahrzeugleergewichts
- Abdichtung bei strukturellen Batteriegehäusen und Sicherstellung der Servicezugänglichkeit

Die wesentlichen Vorteile einer Übernahmekarosserie für ein Conversion-Design-Elektrofahrzeug liegen in der intensiven Nutzung der Gleichteile. Die investitionsintensive Neuanfertigung der Fahrzeugkarosserie wird vermieden. Abgesehen vom Antriebsstrang kann in den Bereichen Exterior, Ausstattung, Fahrwerk und Fahrzeugelektronik auf Teile und Varianten eines bestehenden Produktes zugegriffen werden. Der größte Teil des funktionalen Absicherungsprozesses (bspw. Crash, Fahrdynamik, Klappentests) wird eingespart. Bei diesem Prozess handelt es sich um eine bewährte Vorgehensweise, die seit vielen Jahrzehnten zur Darstellung von Sonderserien mit leistungsstarken Antrieben angewendet wird. Zusätzlich werden diese Fahrzeuge häufig durch optische Tuning-Kits im Exterior und in der Innenausstattung vom Massenprodukt differenziert.

Nachteilig ist bei Conversion-Design-Elektrofahrzeugen, dass die durch elektrische Antriebe gewonnenen Freiheitsgrade ungenutzt bleiben und die Individualität im Fahrzeugkonzept nicht an den Nutzer weitergegeben werden kann.

Durch die in den letzten Jahren eingesetzte, rasante Auseinandersetzung mit der Elektromobilität haben die Conversion-Design-Elektrofahrzeuge einen sehr hohen Stellenwert am Markt. Um zügig Elektrofahrzeuge anbieten zu können, werden von den OEMs oder Spezialanbietern existierende Fahrzeuge und deren Karosserien verwendet und ein Elektroantrieb integriert. Die Serienkarosserie bleibt in sehr großem Umfang erhalten.

### **6.1.1.4 Karosserien von Inline-Design-Elektrofahrzeugen**

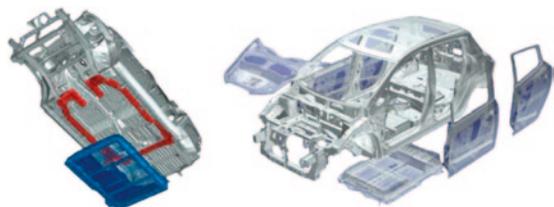
In der Zukunft werden Conversion-Design-Elektrofahrzeuge durch sog. Inline-Design-Elektrofahrzeuge ersetzt. Bei der Planung neuer Fahrzeugmodelle wird der rein elektrische Antriebsstrang als ein zusätzliches Derivat zu den konventionellen und hybriden Antrieben vorgesehen. Für alle Antriebsstränge kommt dieselbe oder eine

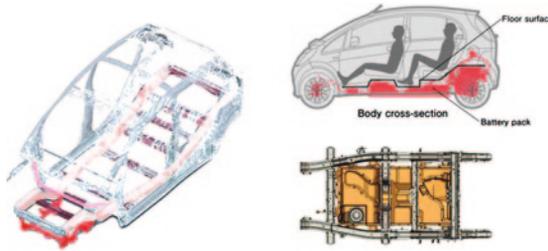
leicht modifizierte Fahrzeugkarosserie zum Einsatz. Der OEM kann somit den maximalen Skaleneffekt im Karosseriebau nutzen und gegenüber dem reinen Conversion-Design-Elektrofahrzeug eingeschränkt spezifische Anforderungen bereits in der Serienentwicklung umsetzen. Da die Karosserie bei Inline-Design-Elektrofahrzeugen alle geplanten Antriebsstränge bedienen muss, wird auch hier die Packagefreiheit der elektrischen Antriebe nur eingeschränkt eingesetzt.

Das grundsätzliche Konzept eines Inline-Design-Elektrofahrzeugs verdeutlicht der Nissan LEAF, welcher auf derselben Produktionslinie mit dem Juke, Cube, Note, Sylphy und Tida gefertigt wird (vgl. Yasutsune und Yoshinori 2011). Auf der Basis einer umfassenden Gleichteilestrategie werden die Bodenlängsträger gegenüber der konventionellen Bodengruppe deutlich gekürzt und durch die Batteriegehäusestruktur ersetzt (s. Abb. 6.5). Diese Gehäusestruktur unterstützt maßgeblich die verschiedenen Crash-Lastfälle, erhöht die Biege- sowie Torsionssteifigkeit des Karosserierohbaus und integriert die hintere Fahrwerksanbindung mit entsprechender Steigerung der lokalen Steifigkeiten. Um den noch vorhandenen dynamischen Steifigkeitsverlust zusätzlich zu kompensieren, werden eine geänderte Motorrahmenstruktur und ein versteifender Heckklappen-Torsionsring eingesetzt. Durch die Inline-Design-Strategie konnten 50 % der Anfangsinvestitionen eingespart werden. Um dem Bestreben nach Leichtbau für den elektrisch angetriebenen Nissan LEAF gegenüber den anderen Fahrzeugderivaten gerecht zu werden, wird in den Klappen des LEAF ausschließlich Aluminium (ca. 10 % des Rohbaugesamtgewichts) sowie 2,5-mal so viel UHSS (Ultra High Strength Steel >780 MPa) wie bei den anderen Derivaten eingesetzt.

Bei der Karosserie des Inline-Design-Elektrofahrzeugs i-MiEV von Mitsubishi kommt eine konventionelle Stahlkarosserie in selbsttragender Bauweise zum Einsatz (s. Abb. 6.6) (Likar 2011). Ergänzt wird diese durch 2 ausgeprägte Bodenlängsträger, die komplett vom Vorderwagen bis zum Heckwagen verlaufen. Ähnliche Karosserieformen sind bei SUVs als sog. „Body Integrated Frame“ seit vielen Jahren bekannt. Durch die sich nach hinten öffnende Topologie des integrierten Leiterrahmens wird im Vorderwagen dem Platzbedarf der Radhüllkurven Rechnung getragen. Im mittleren Bodenbereich wird ausreichend Platz für das Batteriepack und ausreichender Deformationsraum für den Seiten-Crash geschaffen. Die mit Querträgern stabilisierte Rahmenstruktur schützt die Batterie. Im Heckwagen wird der elektrische Heckantrieb durch die Hauptlängsträger eingefasst und es werden die Anbindungspunkte für das Fahrwerk integriert. Diese eher

**Abb. 6.5** Inline-Design-Elektrofahrzeug: Nissan LEAF – Karosseriebodengruppe und Klappen. Quelle Yasutsune und Yoshinori (2011)





**Abb. 6.6** Mitsubishi i-MiEV – Karosseriestruktur in selbsttragender Stahlblech-Schalenbauweise als „Body Integrated Frame“. *Quelle* Likar (2011)

konventionelle Karosseriebauweise setzt das Leichtbaupotenzial nur bedingt um und ist sehr an heutige Bauweisen von Großserienkarosserien angelehnt. Ursache ist die gleichzeitige Auslegung der Karosserie für einen konventionellen Antrieb, der ausschließlich für den asiatischen Markt eingesetzt wird.

#### 6.1.1.5 Karosseriestrukturkonzept in Abhängigkeit vom mechanischen Package

Das Batteriepack als Energiespeicher wird bei Elektrofahrzeugen typischerweise in der Bodengruppe verbaut. Das hohe Gewicht und Bauraumvolumen müssen durch die Karosseriebodenstruktur integriert werden. Je nach Fahrzeugkonzept und -größe sowie nach Größe des Batteriepacks haben sich verschiedene Layouts etabliert (s. Abb. 6.7). Durch das hohe Bauraumvolumen der Batterien wird je nach Fahrzeugtyp und Packagelayout die Bodentragstruktur unterschiedlich beeinflusst.

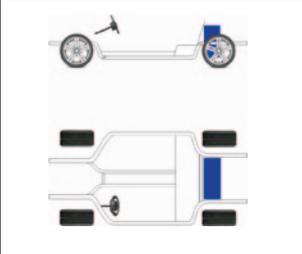
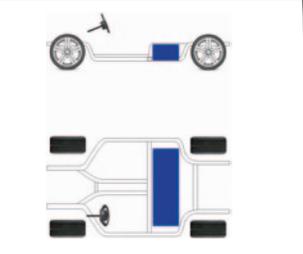
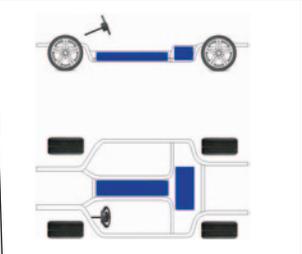
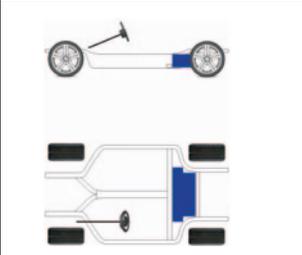
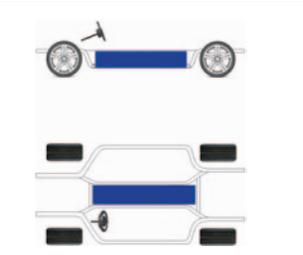
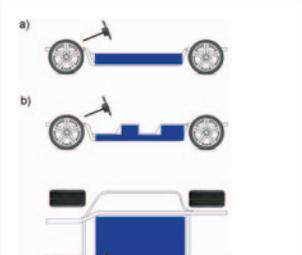
Bei urbanen Stadtfahrzeugen haben sich bspw. Batteriepacks direkt unter den vorderen Sitzen und auseinanderliegende Bodenlängsträger durchgesetzt. Bei Sportwagen werden der hohe Tunnel und die Bereiche hinter den Sitzen bzw. in der hinteren Bodengruppe als Nutzraum verwendet. Durch eine Packageanordnung der Batterie im hinteren Bereich des Fahrzeugs werden die Bodenlängsträger unterbrochen und entsprechende Versteifungsmaßnahmen durch die Batteriegehäusestruktur sind notwendig.

Am Beispiel des Batteriepacks wird das Potenzial erkennbar, das durch eine speziell auf ein Elektrofahrzeug entwickelte Karosserie entsteht.

#### 6.1.1.6 Karosserien von Elektrofahrzeugen – Purpose-Design

Die neue Karosserie eines ausschließlich für den elektrischen Antrieb entwickelten Fahrzeugs kann im höchsten Maß an die individuellen Maßgaben des Elektrofahrzeugkonzeptes angepasst werden. Die Karosserie wird insbesondere in der Bodengruppe auf das mechanische Package des Elektroantriebs ausgelegt.

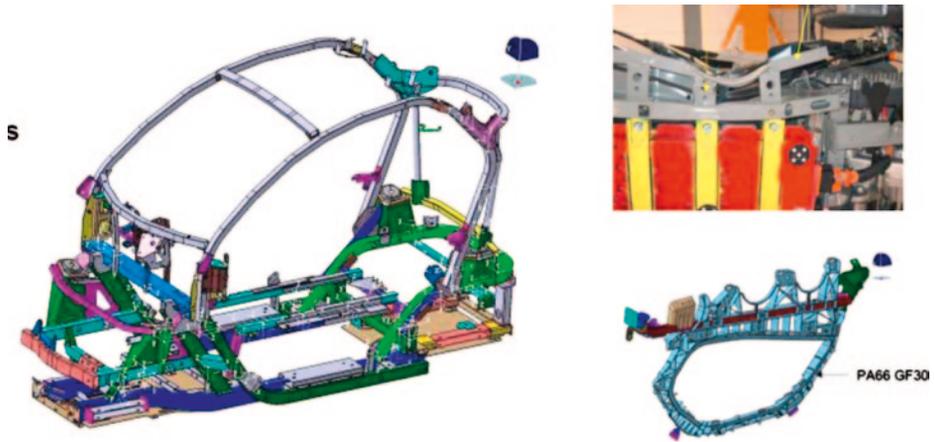
Eine Stahl-Karosseriebauweise kommt – gemäß L 7e homologiert – beim zweisitzigen Twizzy von Renault zum Einsatz (Le-Jaouen und Breat 2011). Die Skelettstruktur wird

		
Limousine 5-sitzig <i>Conversion-Design</i>	Kleintransporter <i>Conversion-Design</i>	Limousine 5-sitzig <i>Purpose-Design</i>
		
Sportwagen 2-sitzig <i>Conversion-/Purpose-Design</i>	Sportwagen 4-sitzig <i>Purpose-Design</i>	Kompaktwagen <i>Purpose-Design</i>

**Abb. 6.7** Topologie der Karosseriebodengruppen in Abhängigkeit vom Batteriepack

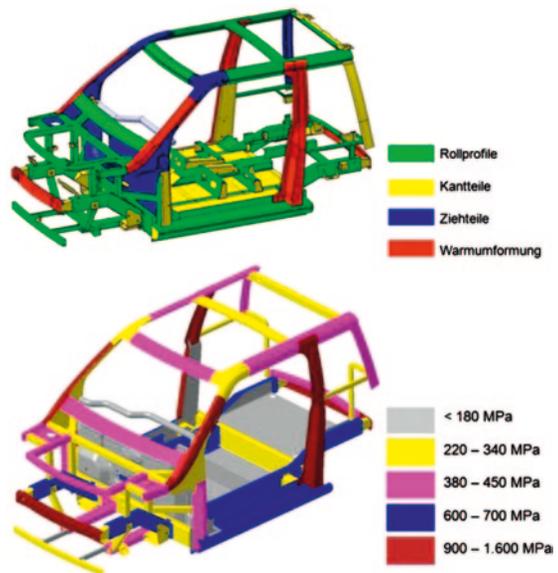
aus einfachen gebogenen Vierkant-Stahlprofilrohren und einfachen Faltblechen als Knotenverstärkungen gebildet (s. Abb. 6.8). Es werden ca. 800 manuelle Schweißnähte gesetzt. Die Batterie befindet sich in der Bodengruppe und wird durch zusätzliche 4 Querstreben im Falle eines Seitenaufpralls geschützt. Die 93,5 kg schwere Karosseriestruktur wird mit thermogeformten Kunststoffteilen beplankt. Das Karosseriekonzept lehnt sich verstärkt an Konstruktionen aus dem Motorradbau an und ist auf eine mittlere Serienfertigung (ca. 20.000 Stck./Jahr) ausgelegt. Verstärkte Leichtbaumaßnahmen kommen lediglich in der ca. 11 kg schweren Türkonstruktion zum Einsatz. Neben 13 einfachen Stahlblechteilen bildet eine faserverstärkte Kunststoffträgerstruktur aus PA66 die strukturelle Basis. Die Innen- und Außenbeplankung ist sowohl bei den Klappen als auch bei den restlichen Oberflächen mit thermogeformtem Kunststoff ausgeführt.

Ebenfalls auf Stahl-Leichtbau setzt der ca. 200 kg schwere Karosserierohbau des StreetScooters. Besonders kennzeichnend für diesen Karosserierohbau ist der Einsatz von Fertigungstechnologien, welcher eine hohe Produktionsskalierbarkeit sowohl von der Kleinstserie bis hin zu verschiedenen Losgrößen der mittleren Serienfertigung zulässt. Grundsätzlich versteht sich damit die StreetScooter-Karosserie als Fertigungsmischbauweise in Materialmonokultur. Durch den hohen Einsatz von sehr



**Abb. 6.8** Renault Twizy – Stahlkarosserie aus Vierkant-Profilen, Bodenquerträger zum Schutz der Batterie im Seitencrash, Tür in Kunststoff-Stahl-Mischbauweise (in Anlehnung an Le-Jaouen und Breat 2011)

**Abb. 6.9** StreetScooter  
– Werkstoff- und  
Bauweisenkonzept des  
Karosserierohbaus



investitionsfreundlichen Rollprofilen, Kant- und Biegeteilen (s. Abb. 6.9) sowie wenigen Blechziehteilen in Kalt- als auch Warmumformung lässt sich der Rohbau grundsätzlich als eine Stahl-Space-Frame-Struktur charakterisieren. Für die Tiefziehteile kommen dabei losgrößenangepasste Werkzeuge zum Einsatz. Die verwendeten Fertigungsverfahren ermöglichen, trotz geringer Investitionskosten, die Verwendung

von hochfesten und ultrahochfesten Stahlwerkstoffen. Die Verwendung der Längs- und Vertikalstrukturen in Profilbauweise erlauben ein hohes Maß an Variantenskalierbarkeit in Fahrzeuglänge und -höhe. Auf diesem Bauweisenkonzept können somit verschiedene Fahrzeugvarianten abgebildet werden.

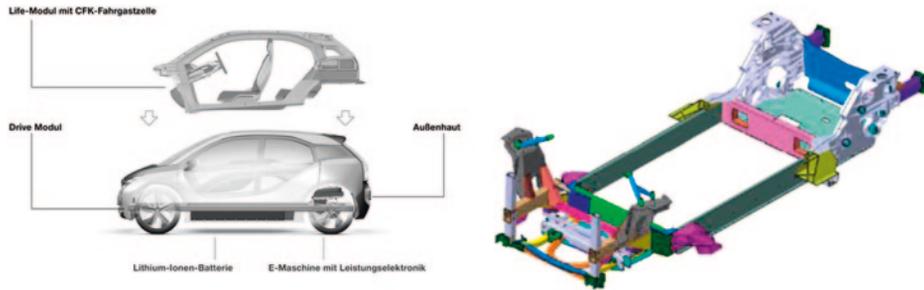
Das Rohbaufügekonzzept wird mit konventionellen Fügeverfahren, insbesondere dem Punktschweißen, umgesetzt. Je nach Losgröße kann somit auf bekannte Standards – vom manuellen Prozess mit einzelnen Schweißzangen bis hin zu hoch automatisierten Schweißzellen – zurückgegriffen werden. Die Karosseriebeplankungen sind als „Hang-On-Panel“ in thermogeformtem Kunststoff konzipiert und tragen somit nicht zur Strukturleistung des Karosserierohbaus bei.

Der THINK CITY (Mollestad 2010) setzt auf eine Fahrzeugkarosserie in Material- und Fertigungsmischbauweise. Die Produktionsplanzahl liegt bei ca. 1.000 Fahrzeugen. Die Bodengruppe besteht aus Stahlblech, der Strukturaufbau aus Aluminiumprofilen und die Beplankungen aus Kunststoff (s. Abb. 6.10). Die ca. 128 kg schwere Bodenstruktur ist als Blech-Monocoque-Bauweise ausgeführt. Es werden vor allem Präge-Falt-Blechteile aus hochfestem Stahl eingesetzt. Die Investitionsausgaben für diese Werkzeuge sind im Vergleich zu klassischen Tiefziehwerkzeugen sehr gering. Bei der Aufbaustruktur mit einer Gesamtmasse von 26 kg kommt eine sog. Rohrrahmenstruktur aus höherfesten, stranggepressten sowie streckgebogenen Aluminiumprofilen der Werkstoffgüte 6060 zum Einsatz. Die Außenbeplankung besteht komplett aus thermoplastischen Kunststoffen, die nach dem Fertigungsverfahren „Thermoformen“ hergestellt werden. Dabei bestehen die Stoßfängerschalen aus Polypropylen (PP), die restliche Außenhaut zu 80 % aus ABS und zu 20 % aus ASA. Da die extrudierten Ausgangsplatten vollständig durchgefärbt sind, kann auf einen nachträglichen Lackierprozess verzichtet werden. Die matte Kunststoffaußenhaut bietet eine „moderne“, unsensible Oberfläche.

Die Karosserie des urbanen, elektrisch angetriebenen Stadtfahrzeugs i3 von BMW setzt ebenfalls auf Fertigungs- und Materialmischbauweise. Trotz einer relativ hohen Planstückzahl für eine mittlere Serienfertigung wird ein großer Anteil der Fahrzeugkarosserie in kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) umgesetzt.



**Abb. 6.10** THINK CITY – Karosserieaufbau in Material- und Fertigungsmischbauweise mit Stahlblech-Bodengruppe sowie Aluminium-Aufbaustruktur und Kunststoffbeplankung (in Anlehnung an Mollestad 2010)



**Abb. 6.11** BMW i3 – Bodengruppe aus Aluminium-Space-Frame sowie Karosseriehaut in kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff nach dem RTM-Verfahren (Ségaud 2011)

Lediglich in der Bodenstruktur (s. Abb. 6.11), die beim i3 Bestandteil des sog. „Drive-Moduls“ ist, kommt ein Aluminium-Space-Frame zur Anwendung. Neben den stranggepressten Aluminiumprofilen und einfachen Blechteilen vervollständigen sehr große, integrative Druckgussteile die Bodenstruktur. Mit dem Verbau des Antriebsstrangs und des Fahrwerks wird das Drive-Modul komplettiert.

Für das Crash-Management ist zum großen Teil der duktile Aluminiumwerkstoff des Drive-Moduls verantwortlich. Durch die horizontale Teilung zwischen der Bodengruppe und dem Fahrzeughut können unterschiedliche Bauweisen vorteilhaft realisiert werden. Beim Fahrzeughut (Life-Modul) werden nur noch 20 % der üblichen Bauteile miteinander verklebt. Hierbei handelt es sich um Carbon-Fasergelege-Bauteile nach dem RTM-Verfahren (Resin Transfer Moulding). Zusätzlich kommen Wabenstrukturen sowie Flechtprofile als Verstärkungsmaterial zum Einsatz. Das Life-Modul wird vollständig über Strukturklebung und mechanische Schraubverbindungen an das Drive-Modul gekoppelt. Die Außenbeplankungen des BMW i3 bestehen aus thermoplastischem Kunststoff. Die industrielle Umsetzung der CFK-Karosserie geht bei BMW mit dem Aufbau einer neuen, hoch automatisierten CFK-Fertigungsstätte einher.

Die verschiedenen Fahrzeugkarosserien aktueller Purpose-Design-Elektrofahrzeuge zeigen, dass in der Werkstoffwahl, den Fertigungstechniken und in den Bauweisen neue Wege im Karosseriebau beschrritten werden. Dies gilt gleichermaßen für neue OEMs als auch für etablierte Fahrzeughersteller.

### 6.1.1.7 Karosseriebaukasten für Elektrofahrzeuge – ein Blick in die Zukunft

Aus heutiger Sicht ist zu erwarten, dass sich die Markteinführung für Purpose-Design-Elektrofahrzeuge vorwiegend in den Segmenten der Manufaktur bis zur mittleren Serienfertigung abspielen (s. Abb. 6.3) wird.

In den Studien von (Röth und Göer 2011) bzw. (Kern et al. 2009) wurde erstmalig der Karosseriebaukasten „FlexBody“ für Kleinserienproduktionsgrößen vorgestellt. Zu den

wesentlichen Merkmalen dieses Baukastens zählen die Anwendbarkeit auf verschiedene Fahrzeugklassen, ohne die Designfreiheit einzuschränken, eine kurze Entwicklungs- und Produktionszeit, die Erfüllung moderner Leichtbauanforderungen sowie die funktionale Absicherung insbesondere von Sicherheitsanforderungen.

Mit dem Baukasten können unterschiedlichste Strukturverläufe in Rahmenbauweisen umgesetzt werden. Beim FlexBody wird die Karosserietragstruktur mit Profilen und konzeptgleichen Knotenstrukturen abgebildet. Die Knoten werden in sog. 2-Arm-, 3-Arm- oder 4-Arm-Knoten unterteilt. Die Profile und Knoten werden, in Abhängigkeit von den Werkstoffkombination, abschließend mittels kalter oder warmer Fügeverfahren zur fertigen Karosserie assembliert (s. Abb. 6.12).

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

Der modulare Aufbau des Karosseriebaukastens erlaubt eine Kombination unterschiedlichster Materialien wie Stahl, Aluminium, GFK/CFK sowie Strukturschäume (s. Abb. 6.13). Durch den Einsatz des „richtigen Materials an der richtigen Stelle“ ist somit gezielter, wirtschaftlicher Leichtbau möglich. Auf diese Weise wird das Fahrzeuggewicht insgesamt reduziert und auf die Gewichtsverteilung durch gezielten Leichtbau Einfluss genommen.

Um einen solchen Materialmix für eine Kleinserie zu ermöglichen, werden nur solche Fertigungsverfahren im Karosseriebaukasten zugelassen, die in Abhängigkeit der geplanten Stückzahlen sehr geringe bis niedrige Werkzeuginvestitionen erfordern. Für eine sichere Verbindung von Bauteilen aus unterschiedlichen Materialien sorgt neben den klassischen Verbindungstechniken ein neues Fügeverfahren – das Injektionskleben. Damit können über die verhältnismäßig dicke Klebeschicht die Bauteiltoleranzen bis zu 2 mm ausgeglichen werden.

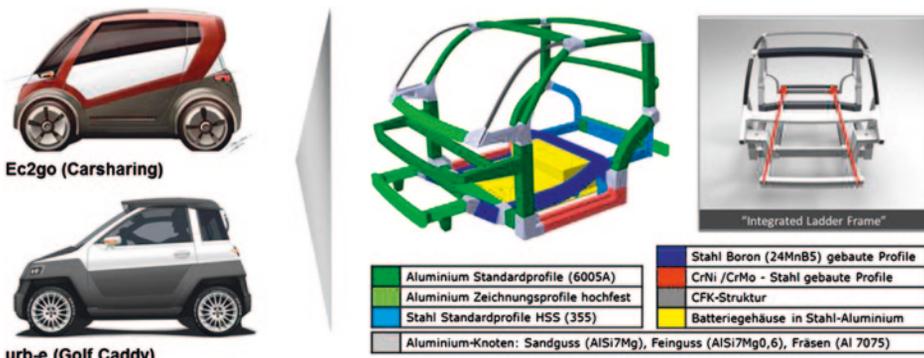
Die folgenden Beispiele zeigen konkrete Anwendungen für den Karosseriebaukasten (s. Abb. 6.14). Bei den beiden Stadtfahrzeugkonzepten „urb-e“ – einem Elektrofahrzeug



**Abb. 6.12** Profile und Knotenstrukturen im FlexBody-Karosseriebaukasten



**Abb. 6.13** Beispielhafte Material- und Fertigungsmischung beim FlexBody-Karosseriebaukasten



**Abb. 6.14** Strukturlayout mit Karosseriebaukasten für die urbanen Stadtfahrzeug urb-e und ec2go. *Quellen* Röth und Göer (2011); Kern et al. (2009); Röth (2011)

als Ableitung eines Golf-Caddy – sowie dem „ec2go“ (Röth 2011) – einem reinen eCar-sharing-Fahrzeug – kommt ein „Integrated Ladder Frame“ (ILF) zum Einsatz. Aus dem Baukastenportfolio wird ein Leiterraum in die Profiltragstruktur integriert. Er bildet den strukturellen Hauptlastpfad in der Bodengruppe und schützt das zentral angeordnete Batteriepack. Die gewählte Werkstoffkombination ist auf Stückzahlen bis max. 1.000 Fz./Jahr und auf niedrige Einzelkosten ausgelegt. Eine hohe Leistungsumsetzung spielt für diese beiden urbanen Fahrzeugkonzepte eine untergeordnete Rolle.

Für die Konzeptstudie des 4-sitzigen Supersportwagens „Lampo3“ (Röth und Piffaretti 2012) wird als Hauptlastpfad ein „Center Tube Frame“ (CTF) genutzt. Dabei

handelt es sich um eine Neuinterpretation des historischen Zentralrohrrahmens. Das umfangreiche Batteriepack mit weniger als 350 kg (42 kWh) wird in den Strukturtunnel umfassend integriert. Ein besonderes Merkmal des CTF sind die beiden Zentralplatten, welche den profillastigen Vorder- und Heckwagen mit dem Strukturtunnel verbinden.

Aufgrund der sehr hohen strukturellen Leistungsanforderungen für das Gesamtfahrzeug sowie einer Planstückzahl für eine Kleinserien-Manufaktur wird mit dem Baukasten ein aggressives Materialkonzept umgesetzt. Es kommen neben ultrahochfesten Stahlsorten, CFK und Aluminiumteilstrukturen verstärkt hochfeste Edelstahlprofile zum Einsatz (Abb. 6.15).

Zusammenfassend lassen sich für die Fahrzeugkarosserien von Elektrofahrzeugen der Zukunft einige Trends identifizieren. Auch wenn heute Karosserien eines Elektrofahrzeugs eher eine evolutionäre Ableitung des klassischen, konservativen Karosseriebaus sind, so sind heute schon sehr aggressive Ansätze von Bauweisen und Werkstoffkonzepten für Elektrofahrzeug-Karosserien erkennbar. Es ist durchaus denkbar, dass gerade durch die Entwicklung von Elektrofahrzeugen ausgeprägte Leittechnologien im Karosseriebau entstehen, von denen konventionelle Fahrzeuge zukünftig ebenfalls profitieren.

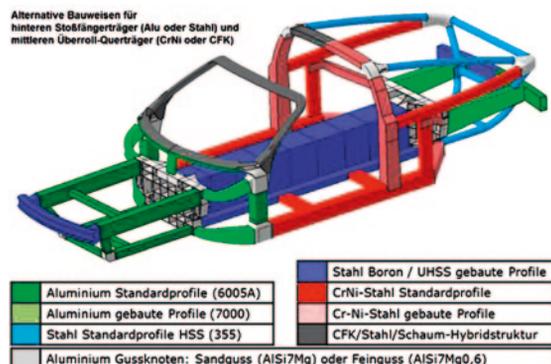
## 6.1.2 Produktionsprozesse der Fahrzeugstruktur

Achim Kampker, Uwe Reisgen, Bastian Schittny und Regina Thiele

### 6.1.2.1 Stückzahl-spezifische Produktionsverfahren der Außenhautkomponenten

Energieeffizienz ist einer der wichtigsten Aspekte in der Elektromobilität, da sie sich direkt auf die Reichweite bzw. die erforderliche Batteriekapazität und somit auf die Kosten auswirkt. Die Steigerung der Energieeffizienz ist zugleich der Treiber für die Ausgestaltung der Fahrzeugstruktur. Die beste Balance zwischen Leichtbau und Herstellungskosten bietet eine Kombination aus Space-Frame-Bauweise und Kunststoffaußenhaut.

**Abb. 6.15** Lampo3  
– Strukturlayout mit Karosseriebaukasten für einen Supersportwagen. *Quelle* Röth und Piffaretti (2012)



Im Folgenden werden die stückzahl-spezifischen Produktionsverfahren zur Herstellung der Außenhaut eines Elektrofahrzeugvorderwagens kurz vorgestellt. Alle Verfahren für die Fertigung von Komponenten eines Fahrzeugvorderwagens müssen das Umsetzen der technischen und technologischen Anforderungen an diesen gewährleisten. Produktionsprozesse, die dieses Kriterium erfüllen, unterscheiden sich in ihrem Aufwand bei den Investitions-, Rüst- und Prozesskosten. Für unterschiedliche Stückzahlen sind deshalb jeweils unterschiedliche Herstellungsverfahren vorzuziehen.

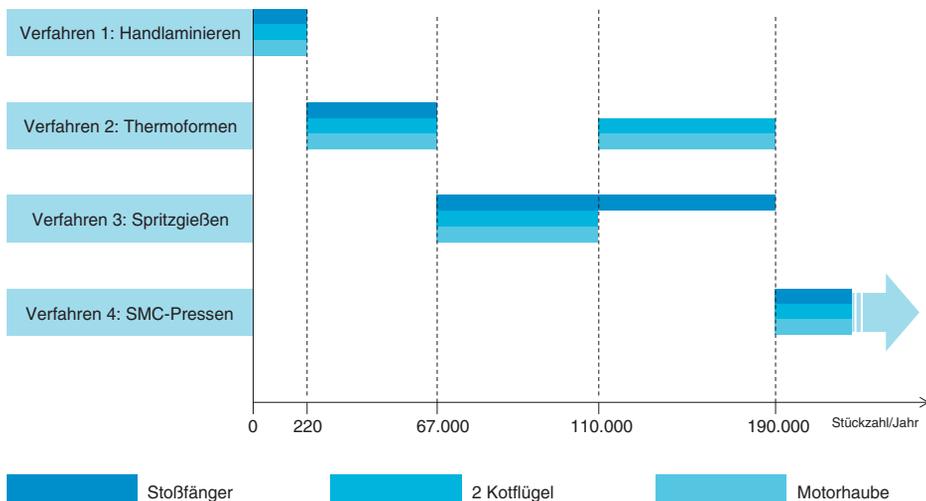
### *Stückzahlabhängige Produktionsverfahren Kunststoff*

Wirtschaftliches Produzieren verlangt nach stückzahlbasierten Produktionsverfahren, um verschiedene Stückzahlbereiche effizient herstellen zu können. Ein dieser Arbeit zugrunde liegendes stückzahl-optimiertes Produktionsprogramm für Kunststoffkomponenten ist in Abb. 6.16 dargestellt.

Für eine Stückzahl von 220 ist Handlaminieren das wirtschaftlichste Produktionsverfahren. Stückzahlen im Bereich von 220 bis 67.000 sind mithilfe des Verfahrens Thermoformen herzustellen. Zwischen 67.000 und 110.000 sollten die Karosserieteile aus Kunststoff mittels des Spritzgießens gebaut werden, um kostenminimal zu arbeiten. Ab einer Stückzahl von 110.000 bis 190.000 Teilen werden die Komponenten auf verschiedenen Produktionsanlagen hergestellt, um kostensparend zu produzieren. Stoßfänger werden durch das Verfahren Spritzgießen und Kotflügel sowie Motorhauben nach dem Verfahren Thermoformen gefertigt.

### **Handlaminieren**

Handlaminieren ist ein manuelles Herstellungsverfahren, bei dem Bauteile mittels spezieller Formen schichtweise produziert werden. Schichten von Laminierharz



**Abb. 6.16** Stückzahl-optimiertes Produktionskonzept für Kunststoffteile

und Verstärkungsmatten werden im Wechsel in die Form eingebracht und mithilfe einer Rolle entlüftet und abdichtet. Dieses Verfahren eignet sich für Kleinserien von Bauteilen, da keine umfangreichen Investitionen in Maschinen erforderlich sind. (AVK 2010) Durch rein manuelles Bearbeiten sind die Prozesskosten und die Durchlaufzeiten im Vergleich zu automatisierten Prozessen hoch.

### **Thermoformen**

Das Verfahren Thermoformen beschreibt das Erwärmen und Verformen eines Halbzeugs durch Verstreckhilfen, Vakuum oder Druckluft unter Ausdünnung der ursprünglichen Wanddicken. Thermoformen verursacht geringe Fixkosten, die sich im Wesentlichen aus Investitionskosten für eine geeignete Maschine und Werkzeugkosten zusammensetzen. Daher eignet sich dieses Verfahren für mittlere Stückzahlbereiche von Kunststoffteilen. Hohe Ausstoßraten machen dieses Verfahren aber auch für große Stückzahlbereiche anwendbar (Throne und Beine 1999).

### **Spritzgießen**

Spritzgießen ist ein Verfahren zur Herstellung von Kunststoffbauteilen. Hier wird der Ausgangswerkstoff, das Granulat, aufgeschmolzen und in die Kavität eines Werkzeugs eingespritzt. Nachdem das Material ausgehärtet ist, kann das Bauteil dem Werkzeug entnommen und für evtl. Nacharbeiten weitergeleitet werden. Spritzgießen eignet sich aufgrund geringer Zykluszeiten und damit hohem Durchsatz für große Stückzahlbereiche. Dieses Verfahren ist jedoch wenig flexibel, da es ausschließlich für hohe Stückzahlbereiche angewendet wird. Der Grund sind hohe Investitionskosten für einen nahezu vollautomatisierten Prozess (Jaroschek 2008).

### **SMC-Pressen**

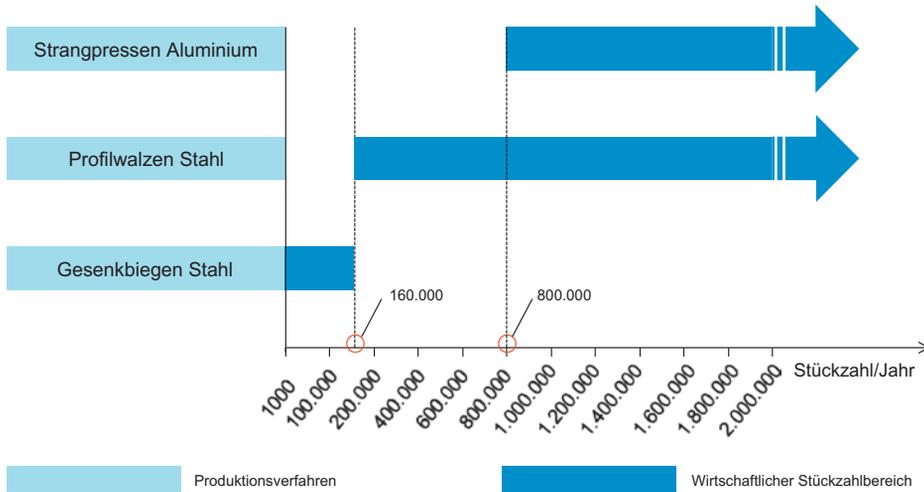
SMC-Pressen ist ein Verfahren, bei dem ein Halbzeug unter Druck und Temperatureinwirkung in einem Werkzeug verformt und ausgehärtet wird. SMC (Sheet Moulding Compound) stellt hierbei das Halbzeug dar und besteht aus einer flächigen Formmasse, Harzpaste, Glasfasern und Thermoplasten. Hohe Investitionskosten machen dieses Verfahren unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten für große Stückzahlen von Kunststoffkomponenten nutzbar (Flemming et al. 1999). Ein hoher Durchsatz und Automatisierungsgrad sind die Kennzeichen dieses Verfahrens.

### *Stückzahlabhängige Produktionsverfahren Metall*

Nachfolgend wird die Produktion der Baugruppe Vierkant-Hohlprofil, Stirnwand, Space-Frame-Knoten und Federbeinaufnahmen vorgestellt. Dabei kommen die stückzahlabhängigen, günstigsten Produktionsverfahren zum Einsatz.

### **Produktion eines Vierkant-Hohlprofils**

In Abb. 6.17 ist ein stückzahloptimiertes Produktionsprogramm zur Herstellung eines Vierkant-Hohlprofils, bestehend aus Stahl oder Aluminium, dargestellt.



**Abb. 6.17** Stückzahloptimiertes Produktionsprogramm Vierkant-Hohlprofil

Für den Werkstoff Stahl ist bis zu einer Stückzahl von 160.000 Komponenten mit einer Länge von 1 m das Verfahren Gesenkbiegen sinnvoll, da es mit geringeren Investitionskosten verbunden ist als das Verfahren Profilwalzen. Ein Technologiewechsel hin zum Profilwalzen findet ab einer Komponentenzahl von 160.000 statt. Dieses Verfahren ist besonders für hohe Stückzahlen geeignet, weil es einen kontinuierlichen und damit schnellen Prozess gewährleistet. Das Vierkant-Hohlprofil aus Aluminium herzustellen, ist ab einer Stückzahl von 800.000 mittels des Verfahrens Strangpressen wirtschaftlich. Für kleine oder mittlere Stückzahlen ist Strangpressen aufgrund seiner hohen Investitionskosten ungeeignet.

### Profilwalzen

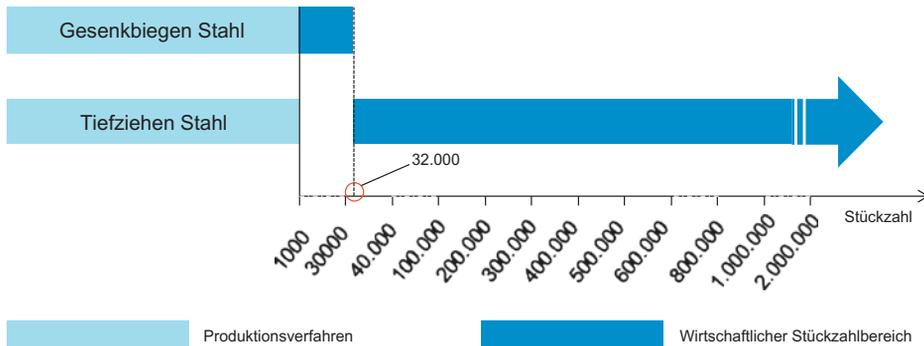
Mithilfe des Profilwalzens können Bleche in verschiedene Geometrien gebogen werden. Je nach Komplexität der Geometrie müssen dazu verschieden viele Walzen hintereinander geschaltet werden, um durch Anpassung der Biegewinkel die gewünschte Form zu erreichen (Fritz und Kuhn 2010). Der überbleibende Schlitz kann nach dem Biegeprozess mittels Schweißen verschlossen werden.

### Gesenkbiegen

Mithilfe dieses Biegeverfahrens können Bleche auf eine gewünschte Form gebogen werden. Das Blech wird auf das Gesenk gelegt. Ein Stempel drückt das Blech so lange in das Gesenk, bis dieses auf dessen Innenseiten anliegt. Das Vierkant-Hohlprofil kann durch Verschweißen zweier U-Profile hergestellt werden (Doege und Behrens 2010).

### Strangpressen

Innerhalb dieses Pressverfahrens wird ein erhitzter Metallblock, bspw. Aluminium, unter hohem Druck mit einer bestimmten Geschwindigkeit durch eine Matrize gepresst, wobei



**Abb. 6.18** Stückzahloptimiertes Produktionsprogramm Stirnwand

gradlinige Profile entstehen. Diese können durch weitere Verfahren in die gewünschte Form gebogen werden (Fritz und Kuhn 2010).

### **Produktion der Stirnwand**

Abbildung 6.18 zeigt das stückzahloptimierte Produktionsprogramm zur Herstellung einer Stirnwand.

Es wird deutlich, dass bis zu einer Stückzahl von 32.000 Komponenten das Verfahren des Gesenkbiegens optimal ist. Für größere Stückzahlen ist das Produktionsverfahren Tiefziehen wirtschaftlicher. Da das Verfahren Gesenkbiegen bereits erläutert wurde, wird es an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt.

### **Tiefziehen**

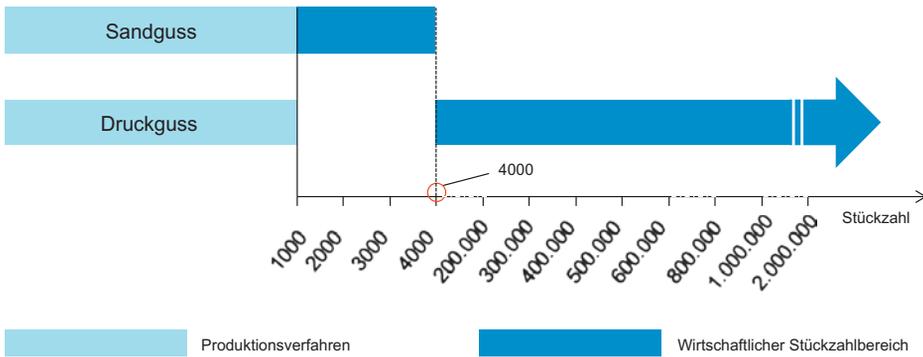
Das Verfahren des Tiefziehens bezeichnet einen Umformprozess, bei dem ein Blechzuschnitt mittels eines Werkzeugs verbogen wird. Dabei wird das zugeschnittene Blech auf das Werkzeug, die Ziehmatrize, gelegt. Das Blech wird von einem Niederhalter eingespannt, sodass kein Material nachfließen kann und das Bilden von Blechfalten verhindert wird. Das Verfahren verändert nicht die Wanddicke und eignet sich besonders für hohe Stückzahlen (Hering 2009).

### **Produktion des Space-Frame-Knotens**

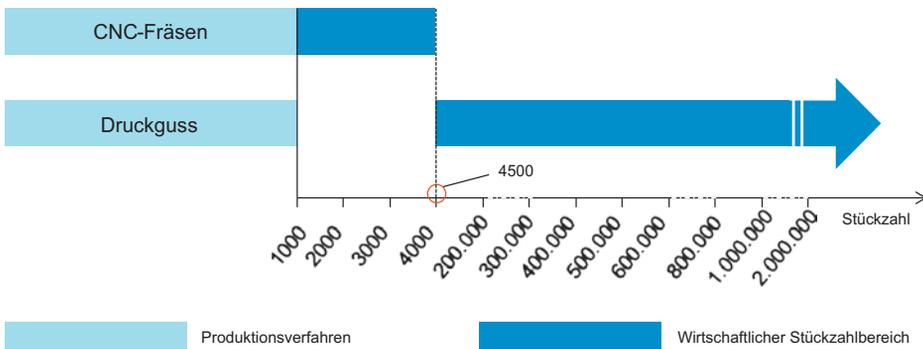
In Abb. 6.19 wird das optimale Produktionsprogramm für verschiedene Stückzahlbereiche vorgestellt. Hierbei werden Kleinserien mithilfe des Sandgusses und Mittel- bis Großserien nach dem Verfahren des Druckgusses produziert.

### **Sandguss**

Der Sandguss ist ein in der Automobilindustrie weit verbreitetes Gießverfahren. Zunächst wird ein Modell mit der gewünschten Form in den Sand platziert. Das Negativ wird mittels Kunstharz in Form gehalten. Dieser Hohlraum wird mit flüssiger Schmelze ausgefüllt. Nachdem das Material ausgehärtet ist, kann die Sandform zerstört werden



**Abb. 6.19** Stückzahloptimiertes Produktionsprogramm Space-Frame-Knoten



**Abb. 6.20** Stückzahloptimiertes Produktionsprogramm Federbeinaufnahme

und das Gussteil bleibt übrig (Kalpakjian et al. 2011). Das Verfahren eignet sich unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten für kleine Bauteilserien.

### Druckguss

Innerhalb des Druckgussverfahrens wird die Schmelze in eine Gießkammer eingeführt. Danach wird diese durch einen Kolben unter hohem Druck in das zweiteilige Werkzeug gepresst. Dieses Verfahren ist sehr schnell und zeichnet sich durch eine besonders hohe Oberflächenqualität der Gussteile aus. Damit können Mittel- bis Großserien effizient hergestellt werden (Ilschner und Singer 2010).

### Produktion der Federbeinaufnahme

Abbildung 6.20 zeigt die Produktionsverfahren zur Herstellung einer Federbeinaufnahme und die Stückzahlbereiche, in denen diese Verfahren unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten angewendet werden.

Das Karosserieteil kann durch CNC-Fräsen oder Druckguss hergestellt werden.

### CNC-Fräsen

CNC steht für Computer Numerical Control. Bei diesem Fräsverfahren werden aus massiven Metallblöcken plane und gekrümmte Flächen mittels eines drehenden, mehrschneidigen Werkzeugs hergestellt (Schicker 2002). Mithilfe dieser elektronischen Methode können Werkzeugmaschinen genauer gesteuert und geregelt werden. Komplexe, feine Ausfräsungen sind damit möglich (Orlowski 2009).

#### 6.1.2.2 Wertschöpfungskette innerhalb des Produktionssystems

Die beschriebenen Verfahren zur Herstellung der Außenhaut eines Elektrofahrzeugvorderwagens sind in eine Wertschöpfungskette zu integrieren. Innerhalb der operativen Prozesskette werden die Bereiche Werkzeugbau, Produktionsverfahren und die Montage der Komponenten in eine prozessorientierte Reihe gebracht. Außerdem können Leistungsbeziehungen zwischen den Prozessbereichen benannt und dargestellt werden.

In Abb. 6.21 sind die Bereiche der Prozesskette und deren Leistungsbeziehungen gezeigt. Damit soll eine erste Idee des Prozessaufbaus visualisiert werden, exemplarisch für Kunststoffkomponenten. Schnittstellen der einzelnen Prozesse zu anderen Prozessstufen bzw. zu Beschaffungsmärkten und Absatzmärkten werden später entwickelt und gezeigt.

#### Werkzeugbau

Innerhalb der industriellen Prozesskette ist der Werkzeugbau zwischen der Produktentwicklung und der Serienproduktion einzuordnen. In der Regel kann davon ausgegangen werden, dass der Werkzeugbau Kleinserien von Werkzeugen herstellt, um die nachgelagerte Serienproduktion zu ermöglichen. Man spricht in der Literatur von der „Fabrik in der Fabrik“ (Spath et al. 2002), da der Werkzeugbau auch in die Bereiche Entwicklung und Produktion aufgeteilt werden kann.

Aus Abb. 6.22 wird ersichtlich, dass Leistungsbeziehungen zwischen dem Werkzeugbau und der vorgelagerten Produktentwicklung und der nachgeschalteten



Abb. 6.21 Operative Prozesskette für Kunststoffkomponenten



Abb. 6.22 Der Werkzeugbau in der industriellen Prozesskette

Produktion bestehen müssen. Der Werkzeugbau stellt die Voraussetzung für die Serienproduktion dar und hängt eng mit den zu definierenden Zielgrößen des Produktionsmanagements zusammen. Diese Zielgrößen sind

- Qualität,
- Termintreue,
- Minimierung relevanter Kosten und
- Kapazitätsauslastung. (Dietrich 1998)

Qualität kann als elementares Ziel des Produktionsmanagements gesehen werden, da alle produzierten Teile die verlangte Beschaffenheit aufweisen müssen (Geiger und Kotte 2005). Auf die Oberflächenbeschaffenheit und die Qualität im Ganzen hat das verwendete Werkzeug maßgeblichen Einfluss und steht direkt mit der Qualität des Produktes in Verbindung.

Termintreue ist ein wesentlicher Faktor, um am Markt als Unternehmen bestehen zu können. Sie ist maßgeblich von der Verfügbarkeit der notwendigen Werkzeuge abhängig, da die Werkzeuge die Serienproduktion grundlegend ermöglichen. Eine punktgenaue Verfügbarkeit der Werkzeuge ist absolut notwendig, da Endprodukte erst nach erfolgreicher Integration der Werkzeuge in den Produktionsprozess hergestellt werden können. Die Rüstzeiten werden maßgeblich von der anzuwendenden Werkzeugtechnologie bestimmt und sind als Installationsaufwand der verwendeten Werkzeuge zu verstehen (Gaus 2010).

Zwischen der Produktentwicklung und dem Werkzeugbau besteht ein Leistungsaustausch. Zunächst werden die Produkteigenschaften eines zu produzierenden Gutes sehr von den verwendeten Werkzeugen beeinflusst. Die Leitung des Werkzeugbaus muss die technologische Machbarkeit eines geplanten Produktes kommunizieren. Außerdem können die Innovationsfähigkeit und wirtschaftliche Machbarkeit des Endproduktes durch Austausch von Expertise gesteigert werden (Fricker 2005).

Der Werkzeugbau stellt das Bindeglied zwischen der Produktentwicklung und der Teileproduktion dar. Seine Fähigkeiten steigern die Flexibilität innerhalb des Produktherstellungsprozesses, bspw. durch Produktänderungen und -anpassungen (Eversheim 1998). Außerdem nimmt er erheblichen Einfluss auf das Investitionsvolumen in der Automobilindustrie. Nach Klotzbach machen Werkzeugkosten einen erheblichen Teil des zur Verfügung stehenden Investitionsvolumens aus (Klotzbach 2006).

Die Einordnung des Werkzeugbaus in die industrielle Prozesskette macht deutlich, dass dieser eine hinreichende Bedingung für die Teileproduktion ist.

#### *Produktionsverfahren Teileproduktion*

Die Teileproduktion bekommt nicht nur Input vom Werkzeugbau, sondern auch externen Input, der vom Beschaffungsmarkt ausgeht und von Zulieferern sichergestellt wird.

Abbildung 6.23 zeigt, dass die Teileproduktion verschiedene Inputgrößen enthält. Zum einen wurden vom vorgelagerten Werkzeugbau Betriebsmittel in Form von Werkzeugen



**Abb. 6.23** Input der Teileproduktion

und die zugehörige Dienstleistung der Wartung bereitgestellt, zum anderen erhält der Prozessschritt Produktion Input von außerhalb der Prozesskette. Die verschiedenen Maschinenhersteller dienen als Bezugsquelle für den benötigten Maschinenpark. Außerdem übernehmen sie die Dienstleistung der Wartung. Am Arbeitsmarkt werden qualifizierte Mitarbeiter rekrutiert, die die vorhandenen Maschinen bedienen können. Außerdem werden durch Zulieferer die verschiedenen Werkstoffe für die Komponentenherstellung bereitgestellt. Hierbei werden metallische Werkstoffe wie Stahl und Aluminium und Kunststoffe wie Polypropylen und Thermoplaste benötigt. Generell werden drei Produktionstypen unterschieden: Massen-, Serien- und Einzelproduktion. Sie haben verschiedene charakteristische Primärziele. Die Massenproduktion zielt auf einen hohen Umlaufbestand und eine hohe Auslastung ab. Bei der Produktion in Serie ist ebenfalls auf einen hohen Umlaufbestand, aber auch auf Termintreue zu achten. Innerhalb der Einzelproduktion steht die Einhaltung von Lieferzeiten und Termintreue im Zentrum (Wiendahl et al. 2009).

### Montage

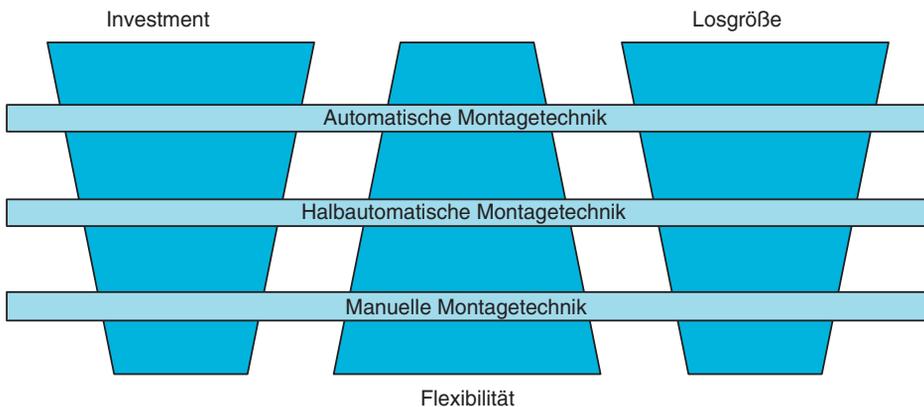
In Anlehnung an Warnecke kann die Montagetechnik wie folgt definiert werden: Die Montage hat die Aufgabe, verschiedene Komponenten mit vorgegebener Funktion innerhalb eines bestimmten Zeitraums zu einem Produkt höherer Komplexität und Güte zusammenzufügen (Lotter und Wiendahl 2006). Die Montagetechnik setzt sich aus den Teilbereichen

- Fügen (bspw. Schweißen, Kleben, Lötten, mechanische Verfahren),
- Handhaben (bspw. Bewegen, Sichern, Speichern),
- Kontrollieren (bspw. Prüfen, Messen),
- Justieren (bspw. Einformieren, Umformen, Trennen) und
- Sonderoperationen (bspw. Markieren, Erwärmen, Kühlen)

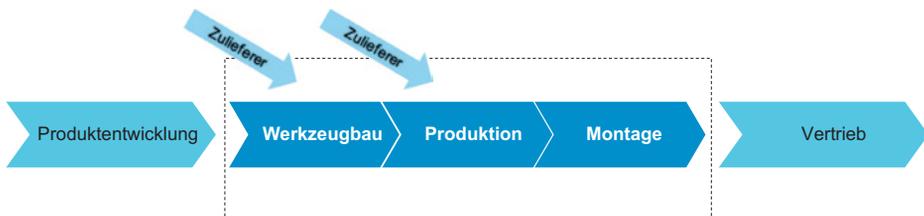
zusammen. Außerdem kann zwischen verschiedenen Automatisierungsgraden innerhalb der Montage unterschieden werden (s. Abb. 6.24).

Der Zusammenhang zwischen dem ausgewählten Automatisierungsgrad der Montage und dem zu investierenden Kapital ist deutlich. Je höher der Automatisierungsgrad eines Montagesystems ist, desto höher wird auch das Investment zur Beschaffung ausfallen. Das entsprechende Montagesystem kann man nach Flexibilität und Losgröße abwägen. Je automatisierter die Montage abläuft, desto unflexibler ist dieser Prozess. Mit einer hohen Automatisierung innerhalb der Montage kann aber eine hohe Losgröße kalkuliert werden, da die einzelnen Montageschritte schneller vollzogen werden können. Die Schnittstellen der Montage sind die vorgelagerte Produktion. Hier werden die produzierten Teile an den Montageprozess weitergeleitet. Mit der Montage endet die definierte operative Prozesskette. Innerhalb der Wertschöpfungskette hat die Montage eine Schnittstelle mit dem Vertrieb, da nach der Montage das Produkt für den Verkauf bereitsteht.

Es wurde zum einen die operative Prozesskette in ihrer Struktur definiert und erklärt, zum anderen wurden die einzelnen Bestandteile der Kette in ihrer Funktion beschrieben. Abbildung 6.25 zeigt die Schnittstellen der operativen Prozesskette mit vor- und nachgelagerten Prozessen der Wertschöpfungskette und die Zulieferer der Prozesse Werkzeugbau und Produktion. Für den Bereich Montage werden im Folgenden die möglichen Fügeverfahren betrachtet.



**Abb. 6.24** Auswahlkriterien für Montagesysteme



**Abb. 6.25** Schnittstellen der operativen Prozesskette

### 6.1.2.3 Fügen von Außenhaut und Karosserie

Die Karosserie eines Elektrofahrzeugs hat einen großen Anteil am Gesamtgewicht. Aus diesem Grund ist die Reduzierung des Karosseriegewichts eine der wichtigsten Aufgaben im automobilen Leichtbau. Insbesondere bei Elektrofahrzeugen sind niedrige Gewichte ein dominierendes Thema, da ein leichteres Fahrzeug weniger Antriebsleistung benötigt, um die gleichen Anforderungen an Reichweite und Geschwindigkeit zu erfüllen wie ein schwereres. Dies könnte die benötigte Gesamtkapazität der Fahrzeugbatterie verringern, was zu niedrigeren Anschaffungskosten führt und somit die Attraktivität des Fahrzeugs für den Kunden erhöht.

Im Bereich der Automobilkarosserie werden verschiedene Lösungsansätze zur Gewichtsreduzierung verfolgt. Dazu zählen der Einsatz von hoch- und höchstfesten Stählen zur Reduzierung der Blechdicken im Vergleich zu konventionellen Stählen, die Verwendung von Leichtbauwerkstoffen geringerer Dichte, wie bspw. Aluminium oder Kunststoff, sowie das Konzept der Mischbauweise. Im Bereich der Fahrzeugaußenhaut wird das Prinzip des Leichtbaus, ähnlich wie bei der Karosserie, durch den Einsatz von Stahlwerkstoffen mit höherer Festigkeit und geringerer Blechdicke oder von Leichtbauwerkstoffen, insbesondere Kunststoff, umgesetzt. Dadurch ergibt sich die fügetechnisch anspruchsvolle Aufgabe, verschiedene Werkstoffe miteinander zu verbinden, die sich in ihren Materialeigenschaften teilweise erheblich voneinander unterscheiden. Aus diesem Grund ist die Anwendung von im Karosseriebau etablierten Verfahren, insbesondere dem Widerstandspunkt- oder Laserstrahlschweißen, für die angesprochene Mischbauweise nicht ohne Weiteres möglich. Während sich verschiedene Stahlwerkstoffe aus den potenziell anwendbaren Legierungen mittels Schmelzschweißverfahren mit ausreichender Verbindungsqualität fügen lassen, sind Verbindungen mit entsprechenden mechanischen Eigenschaften aus Stahl- und Aluminiumwerkstoff mittels konventioneller Schweißverfahren herstellbar. Der Grund dafür sind große Unterschiede in den physikalischen Eigenschaften, wie bspw. dem Schmelzpunkt oder dem Wärmeausdehnungskoeffizient. Darüber hinaus kommt es während des Schweißens von Stahl und Aluminium zur Bildung hochspröder intermetallischer Phasen im Schweißgut, die die Festigkeiten der erzeugten Verbindung auf ein nicht akzeptables Maß reduzieren. Das Schweißen von Metall und Kunststoffen ist aufgrund ihrer unterschiedlichen Materialcharakteristik nicht möglich. Zur Lösung dieser Problematik sind Verfahren anzuwenden, bei denen ein Aufschmelzen der Fügepartner nicht erforderlich ist. Dazu zählen bspw. das Rührreibschweißen, das Kleben, das Lötens sowie die mechanischen Fügeverfahren. Trotz der genannten Schwierigkeiten im Bereich des Mischbaus bleiben die für den Automobilbau typischen schweißstechnischen Fertigungsverfahren für die Herstellung von Elektrofahrzeugen aufgrund ihrer guten Wirtschaftlichkeit, der hohen Verbindungsqualitäten bei artgleichen Verbindungen sowie des hohen erreichbaren Automatisierungsgrades relevant. Im Folgenden werden einige Fügeverfahren näher beschrieben, die bereits im Automobilbau eingesetzt werden und für die Fertigung in der Elektromobilität ebenfalls hohes Anwendungspotenzial besitzen. Dazu zählen das Widerstandspunktschweißen, das Laserstrahlschweißen, die Klebtechnik, das

Rührreibschweißen und mechanische Fügeverfahren wie das Durchsetzfügen oder das Verbinden mit Funktionselementen (Nieten, Schrauben etc.).

#### *Widerstandspunktschweißen*

Das Verfahren des Widerstandspunktschweißens basiert auf dem Prinzip der Joule'schen Widerstandserwärmung bei Stromfluss durch einen elektrischen Leiter. Beim Widerstandspunktschweißen sind die zu verschweißenden Bleche überlappt angeordnet. Die Stromzufuhr erfolgt durch Kupferelektroden, die beidseitig mit einer definierten Elektrodenkraft von mehreren kN an der Fügestelle aufsetzen. Die Schweißströme können je nach Werkstoff bis zu 60 kA betragen, die Spannung hat dabei in der Regel nicht mehr als 15 V. Das Verfahren eignet sich insbesondere für das Schweißen von dünnen Stahlblechen. Aluminium und Kupfer sind ebenfalls schweißbar, allerdings kann es zu einem erhöhten Elektrodenverschleiß kommen. Das Widerstandspunktschweißen ist aufgrund seiner hohen Prozessgeschwindigkeit, der hervorragenden Automatisierbarkeit und der hohen Wirtschaftlichkeit zurzeit das dominierende Fügeverfahren in der automobilen Karosseriefertigung.

#### *Laserstrahlschweißen*

Die Basis des Laserstrahlschweißens bildet ein hochenergetischer Lichtstrahl, der Laserstrahl. Beim Laserstrahl handelt es sich um kohärentes monochromatisches Licht, das sich aufgrund seiner geringen Divergenz zur Übertragung über vergleichsweise lange Strecken eignet und über eine hohe Leistungsdichte verfügt. Die Wellenlänge des erzeugten Lichts hängt unmittelbar mit der Art der Strahlerzeugung zusammen. Dazu kommen entweder CO<sub>2</sub>-, Nd:YAG- oder Diodenlaserstrahlquellen zum Einsatz. Die Übertragung des Laserlichts wird entweder über Spiegel (CO<sub>2</sub>-Laser) oder über lichtleitende, flexible Fasern (Nd:YAG-, Diodenlaser) realisiert. Zum Schweißen wird der Laserstrahl über eine Optik auf dem Werkstück fokussiert, um dadurch die benötigte Energiedichte zu erhalten. Die Energieeinbringung in das Werkstück basiert auf der Absorption des Laserstrahls durch den Bauteilwerkstoff, wobei der Absorptionsgrad je nach Werkstoff und Wellenlänge des Laserstrahls stark variiert. Die Vorteile des Laserstrahlschweißens sind: Eignung, fast alle metallischen Werkstoffe können gefügt werden, sehr hohe erreichbare Schweißgeschwindigkeiten von bis zu 20 m/min, die vergleichsweise geringe Streckenenergie und die lediglich einseitig benötigte Zugänglichkeit zur Fügestelle. Nachteilig sind der hohe Investitionsaufwand in die Schweißanlage und benötigte Sicherheitseinrichtungen, hohe Betriebskosten, ein geringer Wirkungsgrad bei Strahlerzeugung und Energieeinkopplung sowie die hohen Anforderungen an Bauteilvorbereitung und -positionierung.

#### *Kleben*

Das starke Bestreben zum Leichtbau besteht insbesondere bei Elektrofahrzeugen, um das Gesamtgewicht zugunsten der Batterie gering zu halten. Eingesetzt wird deswegen die Multimaterialbauweise, bei der Werkstoffe wie Aluminium, Stahl und Kunststoffe miteinander kombiniert werden. Diese Werkstoffe können aufgrund ihrer

Materialcharakteristik nicht mit den herkömmlichen Schweißverfahren gefügt werden. Hier kommt der Klebtechnik eine wachsende Bedeutung zu. Kleben ist das Fügen unter Verwendung eines Klebstoffs (DIN 8593). Ein Klebstoff ist ein nichtmetallischer Werkstoff, der Füge­teile durch Flächenhaftung und innere Festigkeit miteinander verbindet (DIN 16920). Die stoffschlüssige Verbindung entsteht durch Adhäsion und Kohäsion. Die Adhäsion wirkt zwischen Klebstoff und Füge­teil, die Kohäsion stellt die innere Festigkeit des Klebstoffs dar. Häufig eingesetzte Klebstoffe im Automobilbau sind ein- und zweikomponentige Epoxidharze bzw. Polyurethanklebstoffe.

### *Rührreibschweißen*

Das Verfahren des Rührreibschweißens (engl. Friction Stir Welding, kurz: FSW) ist ein vergleichsweise junges Schweißverfahren mit einem enormen Anwendungspotenzial. Die Einbringung der zum Schweißen notwendigen Prozesswärme wird allein über die Reibung des Werkzeugs, bestehend aus Stift und Schulter, auf und im Werkstück realisiert. Dadurch wird das zu fügende Material plastifiziert und durch die Rotation des Werkzeugs verrührt. Ein Aufschmelzen der Füge­teile findet hierbei nicht statt, sodass keine Umwandlung der flüssigen in die feste Phase erfolgt. Die Bildung von spröden intermetallischen Phasen wird durch diese Tatsache weitestgehend vermieden. Daraus resultiert u. a. die hervorragende Eignung zum Fügen von Mischverbindungen und das damit verbundene Leichtbaupotenzial.

### *Mechanisches Fügen*

Mechanische Fügeverfahren werden überall dort eingesetzt, wo die zu fügenden Bauteile thermisch nicht stark belastet werden dürfen oder aufgrund ihrer Materialcharakteristik nicht mit den herkömmlichen Schweißverfahren gefügt werden können. Im Bereich des Fügens von Aluminiumkarosserien haben mechanische Fügeverfahren das Widerstandspunktschweißen weitestgehend abgelöst, da es hier zu hohem Elektrodenverschleiß und damit zu geringen Elektrodenstandzeiten kommt. Als mechanische Fügeverfahren werden bspw. Schrauben, Nieten, Bolzen oder das Durchsetzfügen (Clinchen, Toxen) eingesetzt. Die mechanischen Fügeverfahren sind hinsichtlich der eingesetzten Funktionselemente und der Bauteilvorbereitung zu unterscheiden. Schrauben oder Blindniete erfordern bspw. ein vorgefertigtes Durchgangsloch für das Funktionselement. Bei selbstschneidenden Funktionselementen wie Bolzen kann auf die Füge­teilverbereitung verzichtet werden. Das Durchsetzfügen basiert auf der Umformung der Fügepartner. Hierbei wird kein zusätzliches Funktionselement verwendet, auch eine Bauteilvorbereitung ist nicht erforderlich.

### *Fügen von elektrischen Komponenten*

Für elektrisch betriebene Fahrzeuge rückt neben den bewährten Verbindungen in Karosserie und Außenhaut auch die Verbindung von elektrischen Kontakten in den Fokus der Füge­technik. Diese müssen nicht nur über sehr gute und dauerhafte mechanische Festigkeit verfügen, sondern auch eine dauerhaft niedrigohmige Stromleitung garantieren.

Aufgrund seiner besonders guten elektrischen Leitfähigkeit wird Kupfer für elektrische Kontakte eingesetzt. Dieser Werkstoff wird vermehrt mit Aluminium kombiniert

oder sogar ganz durch Aluminium substituiert, um Kosten- und Gewichtsvorteile nutzen zu können. Häufig sind demnach Kupfer-Kupfer- und Aluminium-Aluminium-Verbindungen, mit steigender Nachfrage auch Kupfer-Aluminium-Verbindungen, in elektrischen Kontakten zu finden. Den Ansprüchen von Fügeverbindungen gleicher Werkstoffart werden bekannte Fügeverfahren gerecht. Wärmearme Fügeverfahren werden vor allem dort eingesetzt, wo Mischverbindungen aus Kupfer und Aluminium erforderlich werden. Hier bestehen aufgrund unterschiedlicher Werkstoffeigenschaften besondere Herausforderungen für eine mechanisch stabile und elektrisch leitfähige Schweißverbindung. Berücksichtigt werden müssen große Unterschiede für Schmelztemperaturen, Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit ebenso wie die ausgeprägte Bildung intermetallischer spröder Phasen in Schmelzschweißverbindungen.

Als Standard haben sich Verfahren wie Ultraschallschweißen, Widerstandsschweißen und Laserstrahlschweißen zum Fügen in der Elektronik und Feinwerktechnik etabliert, aber auch das Löten kommt in geringem Umfang zum Einsatz.

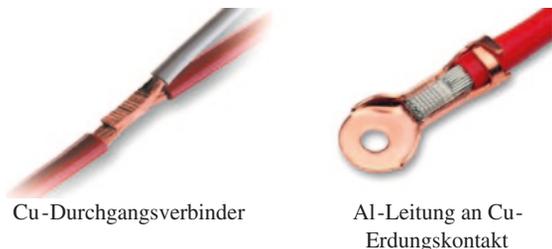
#### *Ultraschallschweißen*

Das Ultraschallschweißen ist ein ausgereiftes Verfahren zum Fügen von NE-Metallen. Mittels einer hochfrequenten elektrischen Schwingung wird eine hochfrequente mechanische Schwingung erzeugt. Die Verbindung der Werkstoffe erfolgt durch mechanische Schwingungsenergie bei plastischer Verformung der Oberflächen und Zerstörung vorhandener Oberflächenschichten unter vertikalem Druck. Ultraschallschweißen wird zum Verbinden dünner Bleche, Folien, Drähte und Litzen eingesetzt. Da die Schweißtemperatur unterhalb der Schmelztemperatur der Werkstoffe bleibt, können gerade Mischverbindungen aus Aluminium und Kupfer mit ausreichend mechanischer Stabilität und guter elektrischer Leitfähigkeit geschweißt werden (Abb. 6.26).

#### *Widerstandsschweißen*

Beim Widerstandsschweißen erfolgt die Verbindungsherstellung durch Aufbringung äußerer Kräfte, die zusammen mit dem eingebrachten Schweißstrom die erforderlichen Kontakt- und Werkstoffwiderstände ausbilden. Die Einstellung der Schweißparameter Zeit (Vorhalte-, Schweiß- und Nachhaltezeit), Schweißstrom und Elektrodenkraft erfordern insbesondere bei Werkstoffen wie Aluminium und Kupfer die Berücksichtigung der bereits genannten spezifischen Werkstoffeigenschaften. Im Vergleich zu

**Abb. 6.26** Kontaktierung mittels Ultraschallschweißen.  
*Quelle* Schunk Sonosystems GmbH



**Abb. 6.27** Schliffbild einer widerstandsgeschweißten Al-Cu-Verbindung. *Quelle* ISF RWTH Aachen



Stahlschweißungen müssen der Schweißstrom heraufgesetzt und Schweißkraft sowie Schweißzeit reduziert werden. Durch eine geeignete Prozessparametrierung gelingt es für Aluminium-Kupfer-Verbindungen (insbesondere im Dünoblechbereich) und für elektrische Kontakte, die Bildung intermetallischer Phasen gering zu halten bzw. zu vermeiden (Abb. 6.27).

#### *Laserstrahlschweißen*

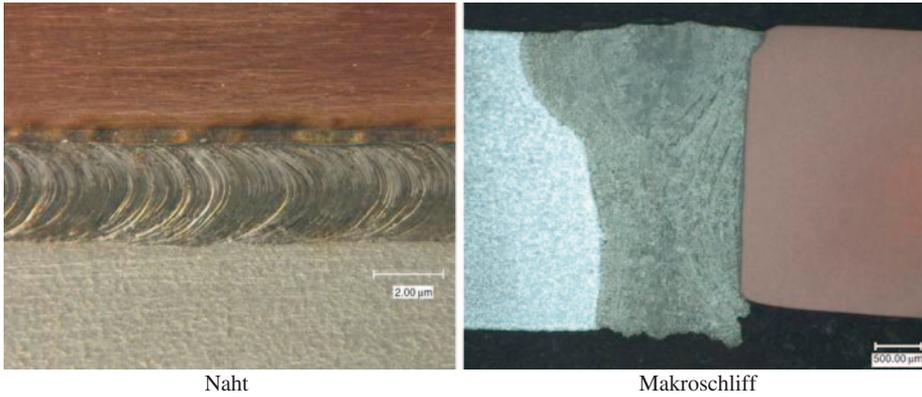
Das Laserstrahlschweißen findet vielfältige Anwendung, so auch in der Elektronik und Feinwerktechnik. Die Bandbreite der mit dem Laser zu verschweißenden Werkstoffe reicht von den un- und niedriglegierten Stählen bis zu hochwertigen Titan- und Nickelbasislegierungen. Aluminium und Kupfer bereiten aufgrund ihrer thermophysikalischen Materialeigenschaften Probleme bei der Energieeinkopplung und der Prozessstabilität. Mit entsprechender Prozessgestaltung und unter Berücksichtigung der werkstoffspezifischen Erfordernisse lassen sich gute Mischverbindungen schweißen. Das Schweißen von Kupfer stellt aufgrund der Strahlabsorption eine besondere Herausforderung dar. Hier werden bereits gute Ergebnisse durch Schweißen mit grünem Laserlicht erzielt (Abb. 6.28).

Da für Mischverbindungen aus Aluminium und Kupfer vor allem wärmearme Verfahren oder solche mit präzise definierbarer Energieeinbringung erfolgversprechend sind, werden Füge-technologien wie Rührreibschweißen und Elektronenstrahlschweißen für diese Anwendungsgebiete immer interessanter. Es existiert in diesem Zusammenhang eine Vielzahl von Forschungsvorhaben.

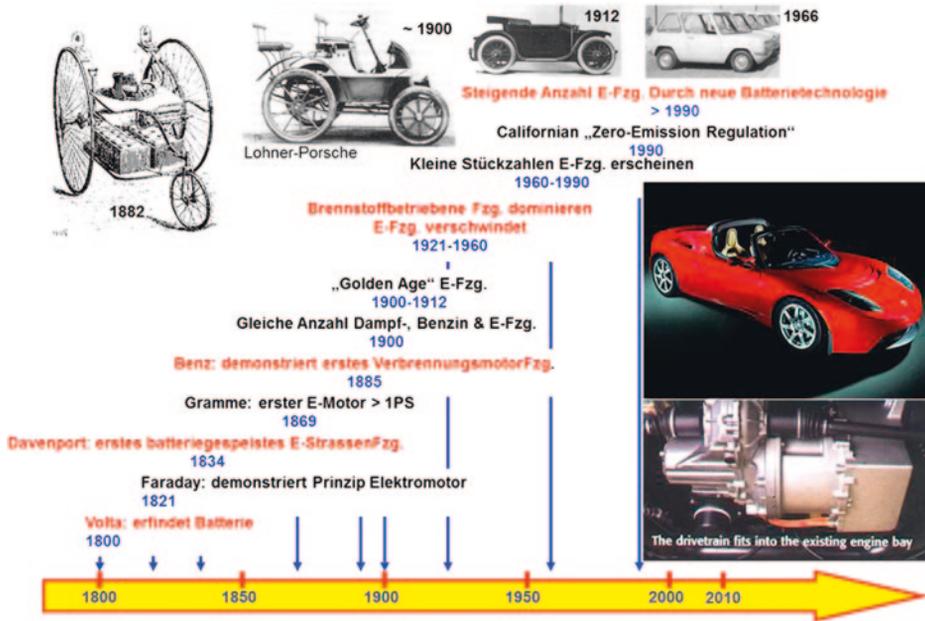
---

## 6.2 Elektrischer Antriebsstrang

Kay Hameyer, Rik W. De Doncker, Hauke van Hoek, Mareike Hübner, Martin Hennen, Achim Kampker, Christoph Deutschens, Sebastian Ivanescu, Thilo Stolze, Andreas Vetter und Jürgen Hagedorn



**Abb. 6.28** AlCu-Verbindung laserstrahlgeschweißt. *Quelle* ISF RWTH Aachen



**Abb. 6.29** Meilensteine der Entwicklung in der Automobiltechnik

Der Einsatz von elektrischen Antrieben in Personenkraftfahrzeugen reicht weit zurück zu den ersten Fahrzeugen ohne Zugpferde. Diese ersten elektrischen Antriebe wurden damals mit Gleichstrommaschinen realisiert, wobei sowohl radnahe Motoren als auch Radnabenmotoren, wie bspw. beim Lohner-Porsche, eingesetzt wurden. Abb. 6.29 zeigt die zentralen Meilensteine in der Entwicklungsgeschichte von Kraftfahrzeugen. In der ersten Zeit wurden Elektrofahrzeuge dem Verbrennerfahrzeugen sogar vorgezogen, da deren Motor nicht mühsam mit einer Kurbel gestartet werden musste. Dieses „goldene Zeitalter“ der Elektrofahrzeuge



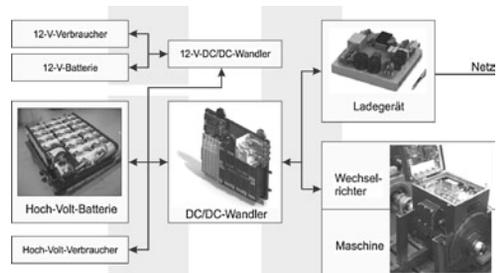
**Abb. 6.30** Einfache Antriebsstrangtopologie

wurde um 1912 beendet, als der elektrische Startermotor für Verbrennungsmotoren erfunden wurde. Erst die Ölkrise 1973 und das Zero-Emission-Programm in Kalifornien 1990 lösten eine kleine, aber nicht signifikante Rückkehr der Elektrofahrzeuge aus. Motiviert von einem neuen Umweltbewusstsein werden in naher Zukunft einheitliche Vorgaben zum erlaubten durchschnittlichen Schadstoffausstoß einer Hersteller-Fahrzeugflotte eingeführt. Dies führt aktuell zu einem Umdenken bei den Fahrzeugherstellern.

Der elektrische Antriebsstrang bildet, als Bindeglied zwischen der Traktionsbatterie und der Antriebswelle, die zentrale Komponente jedes Elektrofahrzeugs. Er beinhaltet alle Komponenten, die für die Umwandlung der gespeicherten elektrochemischen Energie in Antriebsenergie notwendig sind. Die einfachste Antriebsstrangtopologie ist in Abb. 6.30 dargestellt. Der Umrichter wandelt die Gleichspannung der Batterie in eine Wechselspannung um, wie sie bspw. von Drehfeldmaschinen benötigt wird. Die Maschine wandelt die bereitgestellte elektrische Energie in mechanische Energie um, also in ein Drehmoment bei einer bestimmten Drehzahl. Dieses Prinzip lässt sich auch umkehren, d. h. die Maschine ist in der Lage elektrisch zu bremsen. Bei dieser sogenannten Rekuperation arbeitet die Maschine als Generator und wandelt Bremsenergie wieder in elektrische Energie um, die dann über den Umrichter in der Batterie gespeichert wird.

In Abb. 6.31 sind die Komponenten eines Antriebsstrangs dargestellt. Der Austausch der elektrischen Energie zwischen den Komponenten erfolgt über das Bordnetz, das verschiedene Spannungsniveaus aufweist. Es wird zwischen dem Hoch-Volt-Netz (HV-Netz) und dem Nieder-Volt-Netz (NV-Netz) unterschieden. Im HV-Bordnetz befinden sich der Wechselrichter, die HV-Batterie, ein optionaler DC/DC-Wandler, das Ladegerät und der 12-V-DC/DC-Wandler. Bei Verwendung des optionalen DC/DC-Wandlers ergeben sich unterschiedliche Spannungsebenen für die HV-Batterie und den Hauptantrieb. Es besteht die Möglichkeit, Verbraucher hoher Leistungen, wie die Klimatisierungssysteme, an das HV-Netz anzuschließen. Das Ladegerät lädt die HV-Batterie aus dem Elektrizitätsnetz. Der 12-V-DC/DC-Wandler speist das Niedervoltnetz

**Abb. 6.31** Komponenten in einem elektrischen Antriebssystem

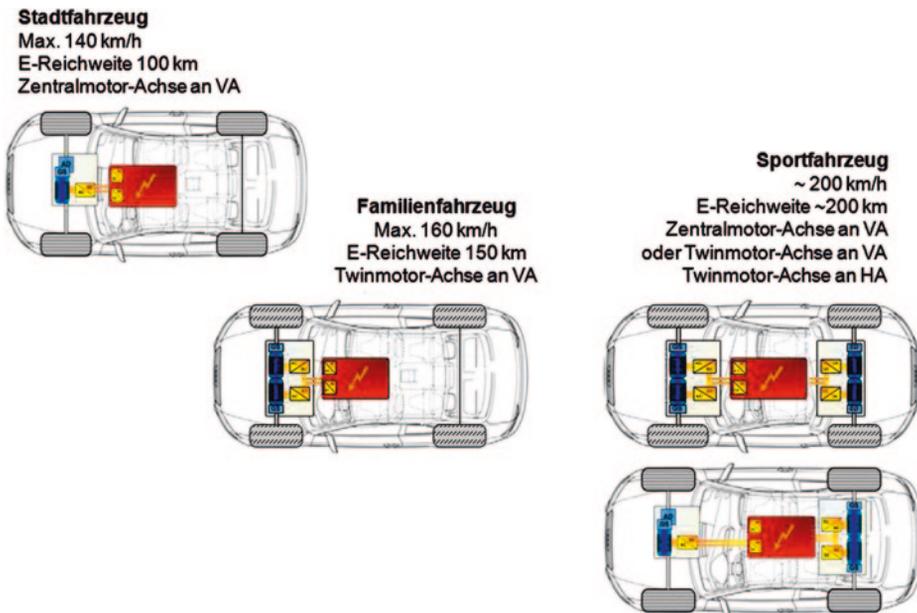


mit Energie aus der Traktionsbatterie. Er versorgt die 12-V-Verbraucher während der Fahrt und stellt einen ausreichenden Ladezustand der 12-V-Batterie sicher. Viele der 12-V-Verbraucher sind aus den konventionellen Fahrzeugen bekannt.

### 6.2.1 Antriebsstrangkonzeppte

Es gibt grundsätzlich viele Möglichkeiten, den Umrichter, die Maschine und das zugehörige Getriebe mit der Antriebswelle anzuordnen. Die Bandbreite reicht von einer größeren, zentralen Maschine mit Differential bis hin zu kleineren, verteilten Radnabenmotoren, bei denen die Energiewandlung direkt im angetriebenen Rad vorgenommen wird. Durch eine genaue Analyse der Anforderungen wird das optimale Konzept ermittelt. Ein wesentliches Auslegungsziel ist ein hoher Gesamtsystemwirkungsgrad über einem festgelegten Fahrzyklus, also einer zeitlichen Abfolge verschiedener Betriebspunkte. Ein höherer Wirkungsgrad führt direkt zu einer höheren Reichweite des Fahrzeugs.

Zur Verdeutlichung der Unterschiede wird in Abb. 6.32 zwischen verschiedenen Fahrzeugkategorien unterschieden: Einem Kleinfahrzeug für den urbanen Stadtverkehr mit geringer Reichweite, einem etwas schwereren und geräumigeren Familienfahrzeug mit etwas größerer Reichweite für Fahrten am Wochenende und als drittes Konzept einem Sportfahrzeug, das auf hohe Beschleunigungen und Geschwindigkeiten ausgelegt



**Abb. 6.32** Beispiele möglicher Fahrzeugkonzepte

ist. Diese drei Konzepte unterscheiden sich deutlich bei der Dimensionierung der Batterie, so wird bei dem Sportfahrzeug ein deutlich größerer Energiespeicher benötigt. Weitere Entscheidungskriterien zur Konzeptauswahl können sich aus Randbedingungen des vorhandenen Platzes und dem Packaging der Antriebselemente Batterie, Leistungselektronik und Motor ergeben. Aus den verschiedenen Konzepten ergeben sich typische Leistungen zwischen 30 kW und 150 kW.

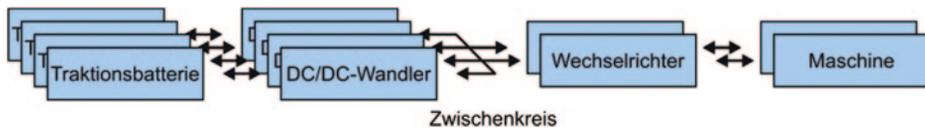
Die Twinmotoren in Abb. 6.32 ermöglichen radnahe Antriebskonzepte, bei denen jeder Motor über ein Getriebe und eine Welle nur ein Rad antreibt. Eine Steigerung dieses verteilten Konzepts wären die erwähnten Radnabenantriebe, die unmittelbar am Rad untergebracht sind. Obwohl die deutliche Reduktion des Bauraums einen nicht zu unterschätzenden Vorteil darstellt, überwiegen bei der Bewertung dieses Konzepts meist die Nachteile, da die Konstruktion sehr komplex ist, zumal häufig noch ein Planetengetriebe in das Rad integriert werden muss. Durch die größeren ungefederten Massen, ergeben sich darüber hinaus Nachteile bei der Fahrzeugdynamik.

Die Vielzahl möglicher Topologien mit individuellen Vor- und Nachteilen sowie die komplexe Modellierung dieser Systeme wird noch einige Zeit für Diskussionen über die optimalen Strukturen sorgen (van Hoek et al. 2010). Letztendlich wird neben den sicherheitstechnischen und zuverlässigkeitsrelevanten Aspekten die Käuferakzeptanz, insbesondere welcher Funktionsumfang zu welchem Preis erhältlich ist, die Topologien künftiger Generationen von Elektrofahrzeugen prägen. Es ist daher nicht verwunderlich, dass zunächst auf einfache, zuverlässige und günstige Konzepte gesetzt wird, um auf einem Markt mit den konventionellen Autos konkurrenzfähig zu sein. Dementsprechend wird bisher in den kommerziell verfügbaren Elektroautos weitgehend eine einfache Antriebsstrangtopologie eingesetzt, wie sie in Abb. 6.30 zu sehen ist.

### 6.2.1.1 Modularisierung der Komponenten

Die Antriebsstrangtopologien des Familien- und des Sportfahrzeugs aus Abb. 6.32 zeigen bereits die Möglichkeit der Modularisierung von Maschine und Umrichter, da sie nicht nur eine zentrale Maschine mit Differential einsetzen, wie das Stadtfahrzeug. Der Einsatz mehrerer Maschinen birgt Vorteile bei der Platzierung der Komponenten in der Karosserie und ermöglicht darüber hinaus je nach Konfiguration „Torque-Vectoring“, also die gezielte Aufteilung der Antriebsmomente auf Achsen oder Räder, was insbesondere für die Fahrdynamik interessant ist.

Diese Modularisierung lässt sich auch für die anderen Komponenten, den DC/DC-Wandler und die Batterie vornehmen. Ein Beispiel für ein solches System ist in Abb. 6.33 skizziert. Durch den Einsatz modularer DC/DC-Wandler werden die modulare Batterie und der modulare Umrichter entkoppelt. Dadurch erhöht sich die Redundanz im System und es ergibt sich eine hohe Flexibilität beim Anschluss der Energiespeicher. So können nicht nur Batterien verschiedenen Alters oder Ladezustands kombiniert werden, sondern auch verschiedene Batterietechnologien. Durch eine dynamische Anpassung



**Abb. 6.33** Verteilte Antriebsstrangtopologie

der Ausgangsspannung der DC/DC-Wandler gibt es einen zusätzlichen Freiheitsgrad, mit dem die Wirkungsgrade des Umrichters und der Maschine über den gesamten Drehzahlbereich optimiert werden können. Eine Verbesserung des Wirkungsgrads kann bspw. dadurch erreicht werden, dass bei niedrigeren Drehzahlen die Spannung reduziert wird. Weiterhin kann durch die DC/DC-Wandler der Einfluss des Ladezustands der Batterie auf die Spannung kompensiert werden. Die Maschine und der Wechselrichter müssen dann nicht so ausgelegt werden, dass sie bei geringer Batteriespannung die maximale Leistung liefern müssen. Dies würde zu deutlich größeren Strömen im Umrichter und in der Maschine führen. Wenn der DC/DC-Wandler nicht nur die Änderungen der Batteriespannung ausgleicht, sondern insgesamt eine höhere Spannung stellt, ergibt sich eine geringere Strombelastung der angeschlossenen Komponenten. Dadurch wird der benötigte Leiterquerschnitt der Zuleitungen und der Maschine reduziert, was potenziell zu einem geringeren Gewicht führt. All diesen Vorteilen stehen die Verluste, die höhere Komplexität des Systems und die zusätzlichen Kosten gegenüber, die mit der Verwendung eines DC/DC-Wandlers einhergehen. Untersuchungsergebnisse sprechen jedoch durchaus dafür, dass ein solches Gesamtsystem effizienter sein kann (van Hoek et al. 2010; Schoenen et al. 2010).

Neben den funktionellen Aspekten ergeben sich durch Modularisierung insbesondere Vorteile bei der Standardisierung von Komponenten und daraus ein Kostenvorteil bei der Serienfertigung durch Skaleneffekte. So könnten alle Fahrzeugkonzepte die gleichen Maschinen, Umrichter, DC/DC-Wandler und Batterien als Grundbausteine einsetzen. Die Skalierung der Leistung und Reichweite erfolgt dabei über die Anzahl der Module. So hätte das Sportwagenkonzept aus Abb. 6.32 mehr Batterie- und Maschinenmodule als der Familienwagen, um die höhere Leistung und Reichweite abzubilden.

### 6.2.1.2 Optimale Spannungslevel für Antriebssysteme

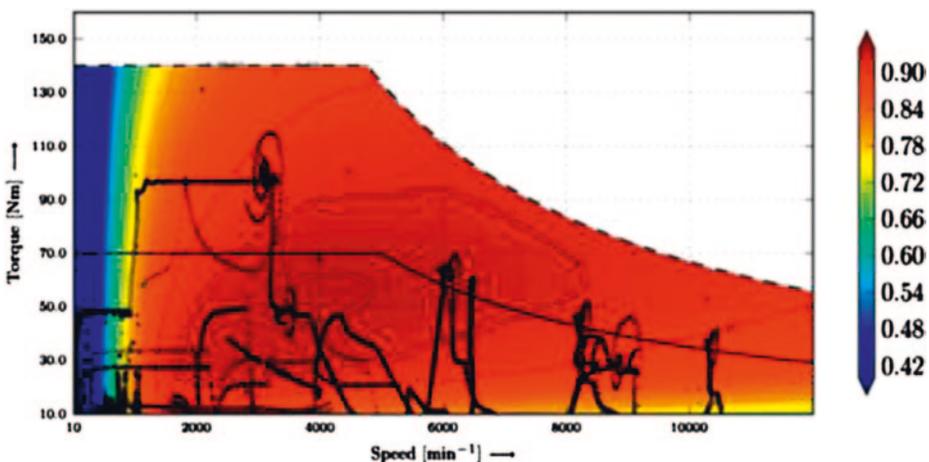
Die Wahl der Spannungsebenen im System ist eines der zentralen Themen in der aktuellen Diskussion. Verschiedene Spannungslevel haben unterschiedliche Anforderungen zur Folge. Bei einem niedrigen Spannungsniveau von 60 V kann einfacher sichergestellt werden, dass beispielsweise bei einem Unfall keine Gefahr für Insassen und Rettungskräfte durch spannungsführende Teile besteht. Allerdings bedeutet eine niedrige Spannung bei gleicher Leistung höhere Ströme, wodurch die Verluste in der Maschine und der Kupferaufwand für das Bordnetz, besonders bei

verteilten Topologien, steigen. Einen weiteren Faktor bilden die Betriebsspannungen der kommerziellen Leistungshalbleiter, die bei etwa 400 V (600-V-Bauteile) bzw. 900 V (1.200-V-Bauteile) liegen. Diese Spannungen versprechen aus Sicht der leistungselektronischen Komponenten die ideale Ausnutzung der Bauteile. Bei ausreichenden Stückzahlen ist die Einführung einer spezifischen Spannungsebene für Automotive durchaus denkbar, allerdings müsste hierfür eine Einigung auf die benötigte Spannungsklasse erfolgen und den Halbleiterherstellern der entsprechende Markt in Aussicht gestellt werden. Aus den bisherigen Überlegungen werden die Vorteile eines Konzepts mit DC/DC-Wandler deutlich, da dieser die von Wechselrichter, Bordnetz und Maschinen geforderte höhere Spannung dynamisch erzeugt und steuert. Beim Abstellen des Fahrzeugs oder im Fehlerfall kann der Zwischenkreis schnell entladen werden, dann ist nur noch die niedrige Batteriespannung im System vorhanden. Im Extremfall kann diese Spannung unterhalb von 60 V liegen, wodurch das System berührungssicher ist. Die Verwendung solch kleiner Batteriespannungen ist ohne DC/DC-Wandler nur bei geringen Antriebsleistungen, etwa einem kleinen Stadtfahrzeug, eine sinnvolle Lösung.

## 6.2.2 Elektrische Maschinen

Grundsätzlich lassen sich alle bekannten elektrischen Maschinenarten in Elektrofahrzeugen einsetzen. Die Entscheidung für eine bestimmte Maschine ist abhängig vom erwarteten Fahrprofil. Weitere Kriterien, wie Kosten, Fertigbarkeit des Motors, Wartungsfähigkeit, Recycelbarkeit, Lebensdauer, Leistungsdichte, Wirkungsgrad, Materialauswahl etc., sind bei der Motorauswahl zu beachten.

Für eine elektrische Maschine wird häufig der Wirkungsgrad über den Drehmoment-Drehzahl-Bereich dargestellt, wie beispielsweise in Abb. 6.34. Im Grunddrehzahlbereich bis



**Abb. 6.34** Typische Drehmoment-Drehzahlcharakteristik eines Traktionsantriebs

zum Eckpunkt (im Beispiel bei ca.  $4.800 \text{ min}^{-1}$ ) ist das Maximaldrehmoment der Maschine konstant, es liegt im Beispiel bei 70 Nm. Der Eckpunkt ist als der Punkt definiert, bei dem die Nennleistung des Antriebs erreicht wird. Bei höheren Drehzahlen sinkt das maximale Drehmoment bei gleicher Leistung. Dieser Bereich wird als Feldschwächbereich bezeichnet. Im Feldschwächbereich können Drehzahlen bis zum Fünffachen der Eckdrehzahl erreicht werden. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Feldschwächung bei permanentmagneterregten Motoren eine gewisse Schwierigkeit darstellt.

Eine elektrische Maschine kann kurzzeitig oberhalb der Nennleistung betrieben werden, da sie sich durch ihre hohe thermische Zeitkonstante nur langsam erwärmt. In diesem sogenannten Überlastbereich wird üblicherweise das 1,5-2-fache Nennmoment erreicht. In Abb. 6.34 liegt der Überlastbereich zwischen der durchgezogenen und der gestrichelten schwarzen Linie, also bspw. zwischen 70 Nm und 140 Nm bei Drehzahlen unterhalb von  $4.800 \text{ min}^{-1}$ .

Die Maximaldrehzahl für Pkw-Anwendungen bewegt sich bei den Antriebsmotoren zwischen  $5.000$  und  $15.000 \text{ min}^{-1}$ , bei Nutzkraftfahrzeugen liegt sie aktuell etwas niedriger im Bereich von  $2.000$ – $8.000 \text{ min}^{-1}$ . Es existiert ein deutlicher Trend zu höheren Drehzahlen und damit zu niedrigeren Drehmomenten. Da das Volumen der Maschine proportional zum Drehmoment ist, wird der Antrieb dadurch kleiner und leichter.

In Abb. 6.32 ist durch Farbgebung der Wirkungsgrad der Maschine abzulesen. Im gezeigten Beispiel sind die höchsten Wirkungsgrade um den Bereich des Eckpunkts bei  $4.800 \text{ min}^{-1}$  und 70 Nm zu finden. Die schwarzen, dicken Linien in Abb. 6.32 kennzeichnen die Betriebspunkte eines bestimmten Fahrzyklus. Durch Mittelung dieser Arbeitspunkte wird der Gesamtwirkungsgrad für einen Fahrzyklus bestimmt. Ein hoher Gesamtwirkungsgrad führt zu einer hohen Reichweite und ist daher einer der wichtigsten Aspekte bei der Auswahl und Auslegung der elektrischen Maschine.

In Abb. 6.35 sind die Querschnitte der wichtigsten Maschinenvarianten aufgeführt. Jede dieser Maschinen bietet Vor- und Nachteile, die im Folgenden erläutert sind.

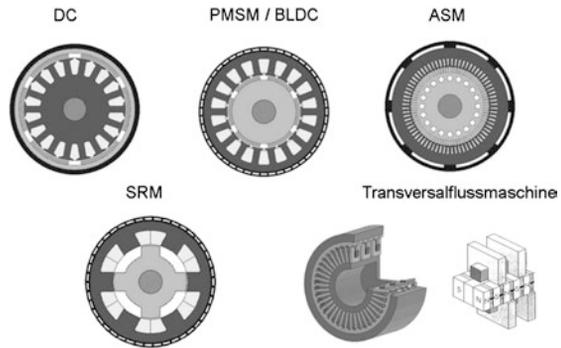
### 6.2.2.1 Gleichstrommaschinen

Die Gleichstrommaschine (DC) mit mechanischem Kommutator hat heutzutage für den Einsatz als Hauptantrieb im Pkw-Bereich keine Bedeutung mehr. Man findet diese Maschine noch vereinzelt in fahrbaren Arbeitsmaschinen kleinerer Leistungen.

### 6.2.2.2 Permanentmagneterregte Maschinen

Die permanentmagneterregten Maschinen (PM) besitzen die höchsten Wirkungsgrade und ermöglichen die größten Leistungsdichten. Bedingt durch moderne Hochenergiepermanentmagnete wie bspw. die NdFeB-Werkstoffe, sind sehr kompakte Konstruktionen möglich. Trotz der zurzeit extrem hohen Werkstoffpreise für diese Magnete gibt es keine Alternative, wenn Leistungsdichte das Hauptkriterium ist. Falls doch aus Kostengründen vom Einsatz der NdFeB-Magneten abgesehen werden soll, können Kompromisse bei Leistungsdichte und Wirkungsgrad gemacht werden.

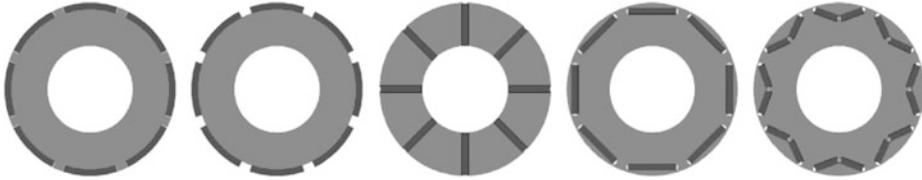
**Abb. 6.35** Mögliche Motorarten für den Einsatz im Elektrofahrzeug



Die Speisung der PM-Maschinen mit blockförmigen oder sinusförmigen Stromsystemen entscheidet über die Namensgebung einer permanentmagneterregten bürstenlosen Gleichstrommaschine (BLDC) bzw. der permanentmagneterregten Synchronmaschine (PMSM). Die Magnetkreistopologie beider Maschinenarten ist identisch. Details in der Gestaltung des Magnetkreises sorgen für die effiziente Funktion beider Maschinen. Teilweise werden auch beide Betriebsarten verwendet. So wird im Sinusbetrieb der Antrieb bei kleinen Drehzahlen geführt und dann bei höheren Drehzahlen in den Blockbetrieb gewechselt. Dies hat den Vorteil eines ruckfreien Anfahrens bzw. Fahrens ohne Drehmomentschwankungen bei kleinen Fahrgeschwindigkeiten und einem hohen Wirkungsgrad der Leistungselektronik bei höherer Geschwindigkeit. Ein etwas schlechterer Wirkungsgrad des Antriebsmotors muss bei dieser Betriebsart in Kauf genommen werden. Die permanentmagneterregten Maschinen lassen sich für einen großen Drehzahlbereich mit hohen Wirkungsgraden und hohen Drehmomentdichten dimensionieren, sie sind somit als Direktantrieb ohne mechanisches Getriebe gut geeignet.

Heutzutage werden in Elektrofahrzeugen größtenteils PM-Maschinen eingesetzt, da sie gute Wirkungsgrade und durch die Verwendung der Hochenergiepermanentmagnete eine sehr große Leistungsdichte aufweisen. Als Hauptantrieb werden meist Innenrotorkonstruktionen verwendet. Außenläufer bilden die Ausnahme. Bei Radnabenmotoren können diese Konstruktionsvarianten vorteilhaft sein. In der Regel befinden sich die Permanentmagnetsysteme im Rotor des Motors (s. Abb. 6.36).

Von links nach rechts zeigt Abb. 6.36 Oberflächenmagnete mit weichmagnetischer Pollücke zur Erweiterung des Feldschwächbereichs, auf der Oberfläche des Rotors aufgebraute Magnete, Magnetsysteme mit Flusskonzentrator, um den Luftspaltfluss zu vergrößern, im Rotoreisen eingebettete Magnete und die V-förmig eingelassenen Magnete. Mit all diesen Varianten lässt sich das Luftspaltfeld der Maschine anpassen, sodass der Flussverlauf bzw. die induzierte Spannung genau zum speisenden Strom passt, um ein großes und gleichförmiges Drehmoment zu erzeugen.



**Abb. 6.36** Verschiedene Rotorvarianten für Permanentmagneterregung

### 6.2.2.3 Asynchronmaschinen

Die Asynchronmaschine (ASM) bietet eine preiswerte Alternative für einen Hauptantrieb. Verglichen mit PM-Maschinen muss mit einem schlechteren Wirkungsgrad gerechnet werden, da diese Maschine in jedem Betriebspunkt einen Blindleistungsbedarf hat. Größere Einbauvolumen und damit schlechtere Leistungsdichten, gerade im Teillastbereich der Maschine, sind zu berücksichtigen. Erst für höhere Drehzahlen lassen sich Wirkungsgrade erzielen, die mit denen der PM-Maschinen vergleichbar sind. Als Direktantrieb ohne Getriebe sind die ASM daher nicht geeignet.

### 6.2.2.4 Geschaltete Reluktanzmaschinen

Die Geschaltete Reluktanzmaschine (GRM) zeichnet sich durch einen einfachen und robusten Aufbau ohne Magnete und Rotorwicklung aus. Sowohl Stator als auch Rotor besitzen ausgeprägte Zähne, wie in Abb. 6.37 zu sehen ist. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Maschinen entsteht das Drehmoment durch Änderung der Reluktanz (magnetischer Widerstand).

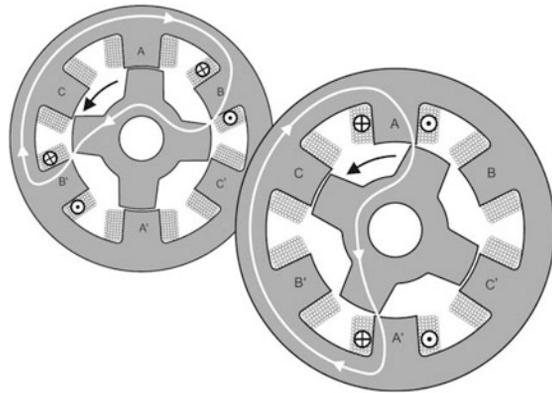
Die Reluktanz eines Motorstrangs ist von der Rotorposition abhängig. Wird zunächst Strang A bestromt, so entsteht der weiß eingezeichnete Fluss. Die Reluktanzkraft sorgt für eine Drehung gegen den Uhrzeigersinn, bis die Rotorzähne den bestromten Statorzähnen komplett gegenüber stehen. Für eine kontinuierliche Drehbewegung wird nun Strang A abgeschaltet und Strang B bestromt. Um ein Drehmoment mit geringer Welligkeit zu erreichen, werden die pulsformigen Drehmomentverläufe, die durch die einzelnen Stränge verursacht werden, aufeinander abgestimmt.

Wegen der zusätzlichen pulsformigen Kraftanregung in radialer Richtung ist die GRM für eine hohe Geräuscentwicklung bekannt. Diese lässt sich jedoch durch eine entsprechende Maschinenauslegung (Fiedler 2007) sowie durch die Regelung mit einem frühen Einzelpulsbetrieb bei niedrigen Drehzahlen (Kasper 2011) minimieren.

Insgesamt ist die GRM für Elektrostraßenfahrzeuge, insbesondere für Hochdrehzahlantriebe, geeignet, da sie robust und kostengünstig zu fertigen ist und zudem im hohen Drehzahlbereich eine große Leistungsdichte aufweist.

Eine Übersicht über die GRM als Antriebsmotor bietet De Doncker et al. (De Doncker et al. 2011b). Weitere Grundlagen zur GRM finden sich bspw. in (De Doncker et al. 2011a).

**Abb. 6.37** Prinzip  
der geschalteten  
Reluktanzmaschine



### 6.2.2.5 Transversalflussmaschinen

Die Transversalflussmaschine (TFM) ist eine elektrische Maschine mit einer besonders hohen Polpaarzahl. Dies führt zu großen Drehmomentdichten. Ihr typisches Einsatzgebiet bei Elektrofahrzeugen sind die Direktantriebe ohne Getriebe. Neben dem großen Drehmoment ist die relativ kurze axiale Länge der Maschine vorteilhaft. Es gibt Anwendungen als Radnabenantrieb in Kleinbussen.

### 6.2.2.6 Aufbau elektrischer Maschinen

Beim Aufbau elektrischer Maschinen wird zwischen aktiven und inaktiven Bauteilen differenziert. Unter aktiven Bauteilen einer elektrischen Maschine versteht man den magnetischen Kreis, die Wicklungen und die stromzuführenden Teile. Die inaktiven Bauteile dienen mechanischen Zwecken. Hier wird zwischen den arbeitenden Teilen (Welle, Lüfter, Lager usw.) und den tragenden oder haltenden Teilen (Gehäuse, Lagerschilde) unterschieden. Der magnetische Kreis besteht aus einem Ständer- (Stator) und Läufer (Rotor) sowie dem Luftspalt. Sowohl Rotor als auch Stator sind als Blechpaket ausgeführt. Die voneinander isolierten Bleche reduzieren die auftretenden Wirbelstromverluste, die durch die zeitlich veränderlichen Flüsse in der Maschine hervorgerufen werden.

In diesem Kapitel wird auf die in den Elektromotoren eingesetzten Werkstoffe eingegangen. Zusammengefasst bestehen die gezeigten Maschinentypen in Abb. 6.35 aus Elektroblechen (weichmagnetisches Material), Wicklungen (bspw. Kupfer) und teilweise Permanentmagneten.

Die Eigenschaften der Werkstoffe stehen zentral für die erreichbaren Leistungen und Eigenschaften des Motors. Auf die Unterscheidung zwischen weichmagnetischen Werkstoffen, die zur Flussführung dienen, und den hartmagnetischen Werkstoffen zur Erzeugung von magnetischem Fluss wird ebenfalls eingegangen.

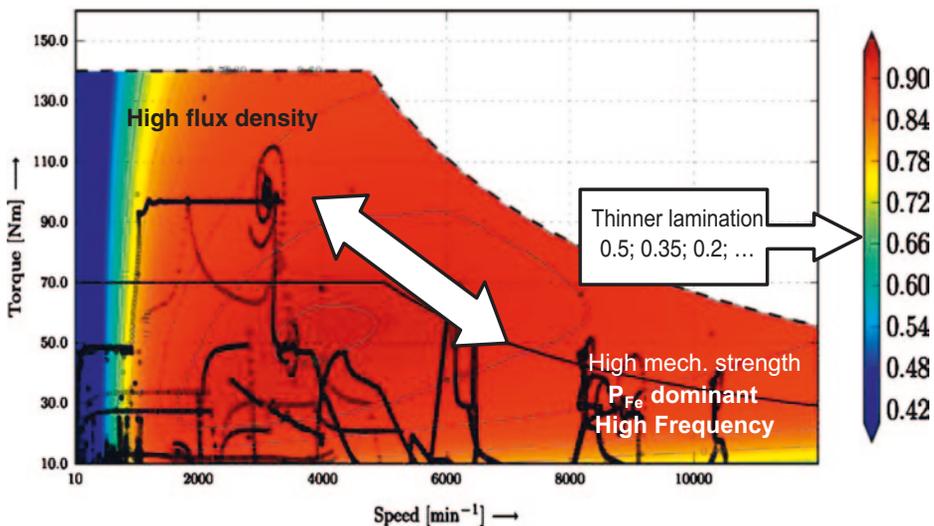
#### *Weichmagnete*

Die weichmagnetischen Werkstoffe im magnetischen Kreis des Motors, auch Elektro Stahl oder Elektroblech genannt, sollen den Maschinenfluss führen. Die

Permeabilität, die magnetische Leitfähigkeit dieses Werkstoffs, ist verglichen mit der von Luft sehr hoch. Dadurch wird der gesamte Fluss der Maschine im Eisen geführt. Mit steigender Feldstärke geht das Material in die Sättigung, d. h., der für kleine Feldstärken lineare Anstieg der Induktion wird für höhere Werte der Feldstärke stark nichtlinear.

Weichmagnetische Werkstoffe haben im Gegensatz zu den Hartferriten eine sehr kleine Hysterese. Sie bedingt relativ kleine Hystereseverluste, die durch Ummagnetisierungserscheinungen im Material entstehen. Ein weiterer Verlust im Eisen, der durch die Flussschwankungen und durch Ummagnetisierung entsteht, sind die Wirbelstromverluste. Sie können für große Ummagnetisierungsfrequenzen in schnelllaufenden Motoren sehr groß werden. Um diesen Verlustanteil in der elektrischen Maschine möglichst gering zu halten, wird der magnetische Kreis nicht aus massivem weichmagnetischen Material gefertigt, sondern aus dünnen, voneinander elektrisch isolierten Blechen. Grundsätzlich kann festgestellt werden: Je dünner die Bleche, desto kleiner werden die Wirbelstromverluste sein. Der Betrieb eines Elektrofahrzeugs bedeutet, dass der Traktionsmotor je nach Fahrsituation in verschiedenen Arbeitspunkten betrieben wird. Die Drehzahl des Motors korreliert dann mit der Ummagnetisierungsfrequenz im Eisenkreis der Maschine. Die richtige Werkstoffauswahl für den Magnetkreis spielt also eine wichtige Rolle für den Gesamtwirkungsgrad der Maschine.

In Abb. 6.38 sind in dem Drehmoment-Drehzahldiagramm des Traktionsmotors die Eigenschaften eingetragen, die das Elektroblech für die verschiedenen Arbeitspunkte besitzen muss. Hohe Drehzahlen benötigen dünne Bleche, um die Wirbelströme zu begrenzen. Kleine Drehzahlen mit großem Drehmoment benötigen einen Werkstoff, der



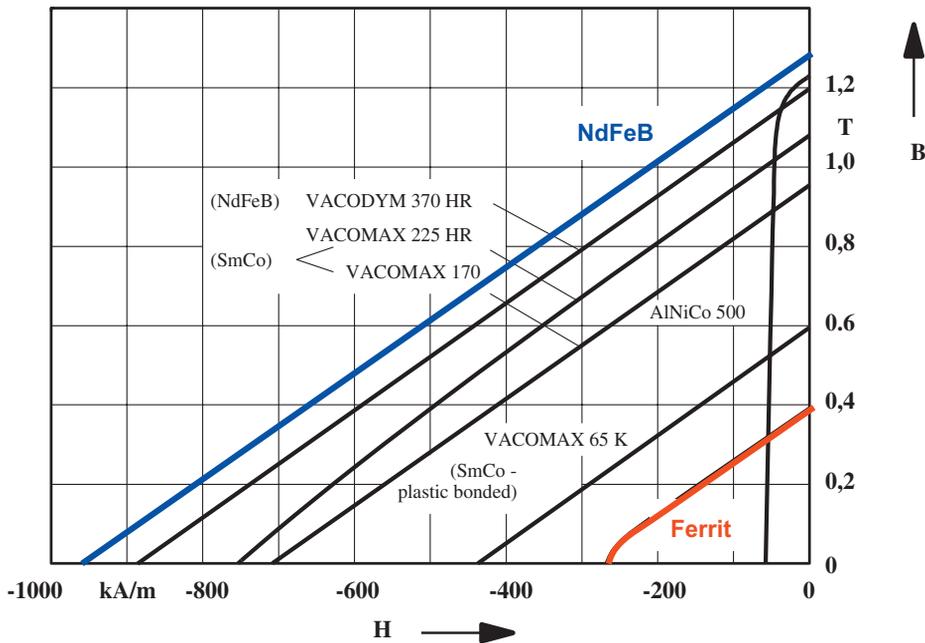
**Abb. 6.38** Benötigte Werkstoffeigenschaften des Elektroblechs für die verschiedenen Arbeitspunkte des Traktionsmotors

eine möglichst hohe Sättigungsmagnetisierung besitzt. Aus diesen Zusammenhängen wird die Schwierigkeit deutlich, den richtigen Werkstoff zu wählen, um einen über alle Arbeitspunkte des Antriebs gemittelt hohen Wirkungsgrad zu erzielen. Damit hängt auch die Abhängigkeit des Gesamtwirkungsgrades von der Verwendung des Fahrzeugs ab. Der Fahrzyklus spielt somit eine große Rolle beim Entwurf eines Antriebssystems für eine spezifizierte Anwendung als Elektrofahrzeug.

### Hartmagnete

Die Permanentmagnete sollen in permanentmagneterregten Maschinen einen möglichst großen magnetischen Fluss erzeugen, um ein hohes Drehmoment zu erreichen. Dies lässt sich mit großen Werten für die Remanenzinduktion erreichen (Abb. 6.39:  $B$  für  $H = 0$ ). Daher soll der Energieinhalt der Magnete, gekennzeichnet durch den  $BH_{\max}$ -Wert, möglichst groß sein. Das hartmagnetische Material wird in einer Magnetisierungseinrichtung aufmagnetisiert und anschließend im zweiten Quadranten, der Entmagnetisierungscharakteristik, der Hysterese betrieben (s. Abb. 6.39).

Abbildung 6.39 zeigt typische Entmagnetisierungskennlinien einiger Permanentmagnetwerkstoffe. Deutlich ist die Überlegenheit der NdFeB-Werkstoffe bspw. gegenüber den Ferriten. Sehr viel größere remanente Induktionen ( $B$  bei  $H = 0$ ) und sehr große Werte der Koerzitivfeldstärke ( $H$  bei  $B = 0$ ) lassen sich verifizieren. Eine große Koerzitivkraft gewährleistet eine hohe Entmagnetisierungssicherheit des Permanentmagneten.



**Abb. 6.39** Typische Entmagnetisierungskennlinien verschiedener Hartmagnete (20 °C)

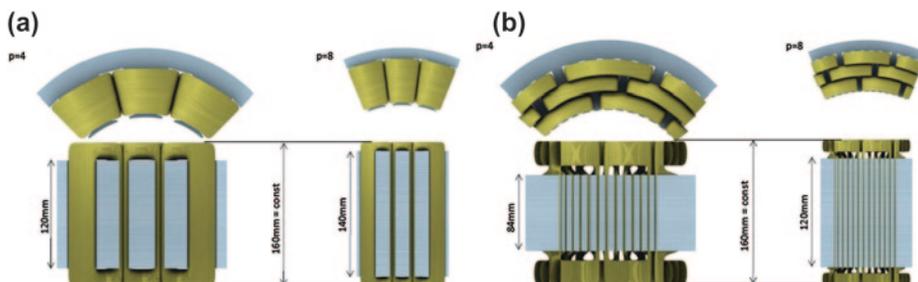
Grundsätzlich kann man sagen, dass die Ferritwerkstoffe zwar relativ schwache Magneteigenschaften haben, ihre Kosten aber verglichen mit den SmCo- oder NdFeB-Werkstoffen sehr klein sind. Ferrite sind daher in allen Konsumeranwendungen zu finden, bei denen die Kosten einen besonders hohen Stellenwert haben. Fast alle Hilfsantriebe im Kraftfahrzeug sind mit diesem Material ausgestattet. Bedingt durch den kleinen  $BH_{\max}$ -Wert der Ferrite lassen sich keine kompakten und leitungsdichten Traktionsantriebe mit diesem Werkstoff realisieren. Hier ist der Werkstoff NdFeB, auch bei dem zurzeit extrem hohen Preis, alternativlos, wenn es um Wirkungsgrad, Leistungsdichte und um ein geringes Gewicht geht.

### Wicklungskonfigurationen

Der Stator jeder elektrischen Maschine besteht aus Elektroblechen und einer Statorwicklung. Abhängig vom Maschinentyp gibt es hier verschiedene Möglichkeiten der Wicklung. Grundsätzlich kann man zwischen verteilten und Einzelzahnwicklungen, auch als konzentrierte Wicklung bezeichnet, unterscheiden.

Unterstellt man, dass nur ein ganz bestimmtes Einbauvolumen für den Motor zur Verfügung steht, sieht man in Abb. 6.40a die Vorteile der Einzelzahnwicklung: Die Wickelköpfe sind sehr kurz und die magnetisch aktive Maschinenlänge ist verglichen mit der verteilten Wicklung größer. Bei Erhöhung der Polpaarzahl ist eine weitere Reduktion des Wickelkopfes möglich. Die Einzelzahnwicklung hat Vorteile, wenn der Motor sehr kompakt aufgebaut werden soll. Das eingesetzte Kupfervolumen im Wickelkopfbereich ist bei der Einzelzahnwicklung kleiner, was einen besseren Wirkungsgrad bedeutet. In diesem Zusammenhang darf nicht vergessen werden, dass die Einzelzahnwicklung einen höheren Anteil von Feldoberwellen im Luftspalt der Maschine erzeugt. Diese Oberwellen haben parasitäre Wirkungen wie Drehmomentschwankungen und Zusatzverluste im Kupfer als auch im weichmagnetischen Eisenkreis der Maschine zur Folge. Die Produktion von Einzelzahnwicklungen ist verglichen mit derjenigen der verteilten Wicklung kostengünstiger. Falls jedoch der Wirkungsgrad der Maschine das Hauptkriterium zur Auswahl des Wicklungssystems ist, werden verteilte Wicklungen bevorzugt, die einen sehr kleinen Anteil an harmonischen Wicklungsobersfeldern im Luftspalt aufweisen.

Die Asynchronmaschine wird grundsätzlich nur mit verteilten Wicklungen ausgestattet werden. Der bei der ASM prinzipbedingt sehr kleine Luftspalt führt dazu,



**Abb. 6.40** Statorwicklung **a** als Einzelzahnwicklung und **b** als verteilte Wicklung ausgeführt

das alle parasitären Oberfelderscheinungen in ihrer negativen Wirkung voll auf das Betriebsverhalten der Maschine durchschlagen. Für Geschaltete Reluktanzmaschinen hingegen kommt prinzipbedingt nur der Einsatz von konzentrierten Wicklungen infrage, wie anhand der Statorgeometrie in Abb. 6.40 zu erkennen ist.

### 6.2.3 Leistungselektronik

Das Gebiet der Leistungselektronik beschäftigt sich mit elektrischen Komponenten, sog. Umrichtern oder Wandlern, die elektrische Energie von einer Form in eine andere konvertieren. Diese Energietransformation kann dabei die Form, bspw. Gleichspannung in Wechselspannung, als auch die charakteristischen Größen betreffen, wie etwa bei einer Wandlung der Frequenz oder der Spannung. Die Leistungselektronik gilt mit ihren Merkmalen bei vielen Innovationen als wichtige Schlüsseltechnologie. Da sie dabei jedoch selten im Vordergrund steht, sind sich nur wenige ihrer Bedeutung bewusst. Heutzutage stellt die Leistungselektronik mit Wirkungsgraden deutlich über 90 % und ihrer hohen Flexibilität die fortgeschrittenste Möglichkeit der elektrischen Energieumwandlung dar. In Zeiten zunehmenden Energiebewusstseins und steigender Energiekosten ist sie aus ökonomischer und ökologischer Sicht bei vielen Applikationen alternativlos.

Wie bereits beschrieben, bildet der Wechselrichter, der die elektrische Maschine speist, eine zentrale Komponente des Antriebssystems. Die komplexe, dynamische Steuerung der elektromechanischen Energiewandlung des Systems obliegt dabei der Wechselrichterregelung, weswegen die Forschungsgebiete der Leistungselektronik und der elektrischen Antriebe eng miteinander verknüpft sind.

Die Anwendung von Leistungselektronik beschränkt sich nicht nur auf die reine Antriebsenergie. Auch viele Hilfsaggregate wie bspw. die elektrisch unterstützte Lenkung oder das Batteriemanagement mit der dazugehörigen Ladetechnik sind prädestinierte Applikationen für moderne Leistungselektronik.

Um hohe Effizienzen erreichen zu können, arbeiten leistungselektronische Schaltungen mit getakteten Schaltzuständen. Der Grundgedanke ist hierbei, statt eines kontinuierlichen Leistungsflusses die Energie periodisch in einzelnen Paketen zu übertragen. Durch eine hohe Frequentierung der Pakete und entsprechende Leistungsfiler erscheint dieser zerstückelte Leistungsfluss nahezu kontinuierlich an Ein- und Ausgang. Schon mit dieser abstrakten Darstellung wird deutlich, dass eine höhere Frequentierung den Filteraufwand und damit das Bauvolumen und die Kosten der Komponente herabsetzen kann. Diese Zielvorgabe wird durch die schaltenden Halbleiterbauelemente beschränkt, da deren Schaltverluste mit steigender Schaltfrequenz zunehmen und die abführbare Verlustleistung begrenzt ist. Entsprechend ist die Herausforderung der Auslegung eines leistungselektronischen Wandlers meist die Abbildung des Optimums aus Wirkungsgrad, Bauraum/Gewicht und Kosten.

In Bezug auf die Leistungsdichte wurden bei wassergekühlten Systemen für den Antriebswechselrichter und den DC/DC-Wandler Zielgrößen für 2015 formuliert: Leistungsdichten von 12 kW/l bei Kosten von 5 Euro/kW (Energietechnische Gesellschaft (ETG) 2010). Ein Trend zur steigenden Integration der Komponenten,

bspw. des Antriebswechselrichters in die Maschine, soll in naher Zukunft für deutlich höhere Leistungsdichten sorgen (März 2007). Der erste Schritt hin zu einer solchen Integration ist die Vermeidung von Kabelverbindungen. So kann der Wechselrichter bspw. direkt auf der Maschine platziert werden. Nachteile ergeben sich durch die stärkeren Vibrationen, denen die Leistungselektronik durch die mechanische Kopplung ausgesetzt ist.

Der Betrieb der verschiedenen Komponenten auf immer kleinerem Raum ist aus Sicht der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) kritisch. Unter diesem Begriff werden ungewollte elektrische und elektromagnetische Wechselwirkungen technischer Geräte behandelt. Es wird zwischen leitungsgebundenen und feldgebundenen, also abgestrahlten Störungen unterschieden. Leitungsgebundene Störungen sind solche, die sich über die Verbindung verbreiten. Bei leistungselektronischen Komponenten ist diese Störungsform ein zentrales Problem.

Es ist nachvollziehbar, dass man die Taktung in irgendeiner Weise an Ein- und Ausgang der Wandler im Signal sehen kann und sie sich über das Anschlusskabel als hochfrequenter Stromrippel ausbreitet. Diese Störungen können durch EMV-Filter unterdrückt werden. Mit dem entsprechenden Aufwand können demnach die EMV-Vorschriften für die Bordnetze, d. h. die Grenzen der Amplitude, mit der diese hochfrequenten Signale in verschiedenen Frequenzbändern ausgesendet werden dürfen, eingehalten werden. Feldgebundene Störungen erweisen sich vor allem innerhalb der Komponenten als problematisch. Hier muss die zuverlässige Funktion der Steuergeräte in unmittelbarer Nähe zu den schaltenden Leistungsteilen und magnetischen Bauteilen, die elektromagnetische Felder abstrahlen können, sichergestellt sein.

### 6.2.3.1 Bauelemente und ihre Ausführungsformen

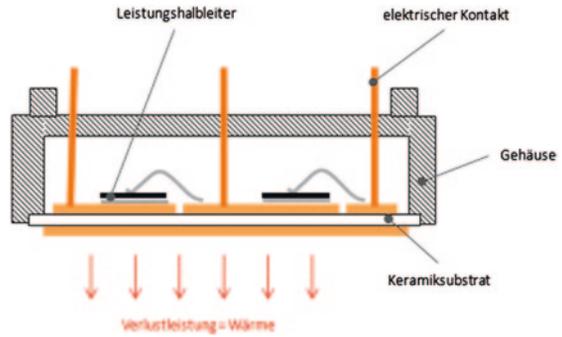
Die erforderlichen hohen Schaltfrequenzen können nur von Halbleiterschaltern umgesetzt werden. Der Vorteil, die Leistungshalbleiter in Form von kompakten Modulen bereitzustellen, liegt dabei im von vornherein isolierten Aufbau und der dadurch möglichen sehr hohen Leistungsdichte. Als Bauelemente selbst werden meist IGBTs (Insulated-Gate-Bipolar-Transistoren) verwendet, da sie die Vorteile vom Bipolar- und Mosfet-Transistor zu einem Bauelement mit geringen Verlusten, guter Parallelschaltbarkeit und leistungsloser Ansteuerung kombinieren.

Leistungshalbleitermodule für automotive Applikationen sind in der Regel wie folgt aufgebaut:

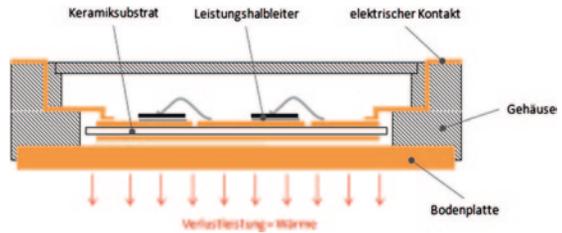
Die Bauelemente werden auf ein Keramik-Substrat o. ä. gelötet, das beidseitig mit einer Kupfer-Kaschierung versehen ist. Auf der einen Seite (Layout/Bestückseite) befindet sich meist eine Struktur, die zur internen Verschaltung der Bauteile dient; auf der anderen Seite (Unterseite) ist die Kaschierung durchgängig. Das Substrat bildet dabei oft die Basis des Moduls. In größeren Modulen für größere Leistungen werden häufig mehrere Substrate mit oder ohne Bodenplatte zusammengefasst.

Die elektrischen Potenziale des Moduls müssen über entsprechende Kontakte nach außen geführt werden, wo sie an Leiterplatten, Busbars oder anderen externen Leitern angeschlossen werden (Abb. 6.41, 6.42).

**Abb. 6.41** Modul ohne Bodenplatte



**Abb. 6.42** Modul mit Bodenplatte



**Abb. 6.43** Hybrid-PACK 1



**Abb. 6.44** Easy 1B



Grundsätzlich kommen also zwei verschiedene Ausführungsformen zum Einsatz: Module mit Bodenplatte für größere Leistungen und Module ohne Bodenplatte für kleinere Leistungen. Dabei unterscheiden sich Module mit Bodenplatte in der Art der Kühlschnittstelle im Umrichter: Universell verwendbar sind Module mit Standard-Bodenplatte zur Verschraubung auf einer ebenen, standardisierbaren Kühlfläche. Effizienter – aber bezüglich ihrer Einbausituation unflexibler – sind Module mit direkter Kühlung, bspw. sog. Pin-Fin-Kühler (Abb. 6.43, 6.44).

### 6.2.3.2 Wechselrichter

Mit dem Wechselrichter wird die Gleichspannung aus dem Hoch-Volt-Bordnetz in die benötigte Spannungsform für den Elektromotor umgewandelt. Die Nennleistung des Wechselrichters muss dabei den Überlastbereich der Maschine abdecken, da die thermischen Zeitkonstanten der Leistungselektronik signifikant kleiner sind. Für die Rekuperation muss ein Stromfluss in umgekehrte Richtung möglich sein. Für den Betrieb von Drehfeldmaschinen kommen dreiphasige Wechselrichter wie die B6C-Brücke in Abb. 6.45 zum Einsatz. Diese erzeugen eine Dreiphasenwechselfrequenz und Amplitude, wodurch sich Drehzahl und Drehmoment innerhalb des Betriebsbereichs stufenlos einstellen lassen.

Bei der GRM ist die Stromrichtung für die Drehmomenterzeugung nicht von Belang. Daher wird in der Regel die asymmetrische Halbbrücke verwendet (s. Abb. 6.46). Sie

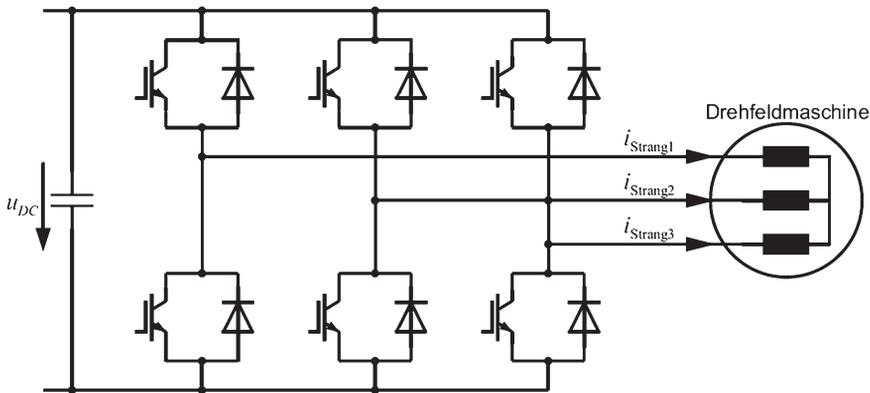


Abb. 6.45 B6C-Brücke als dreiphasiger Wechselrichter für Drehfeldmaschinen

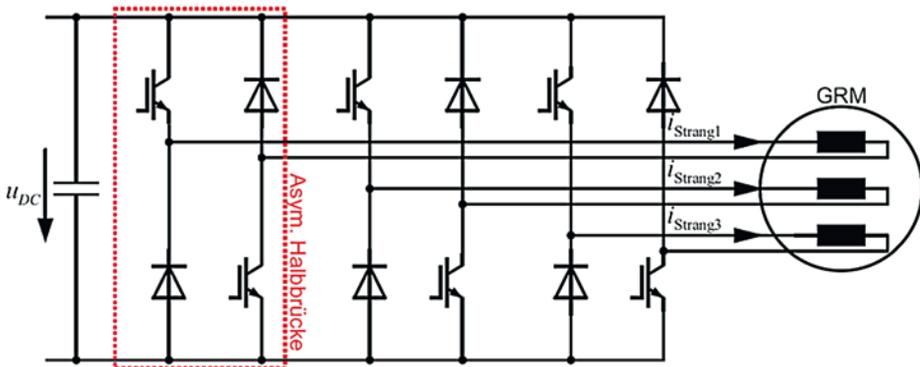
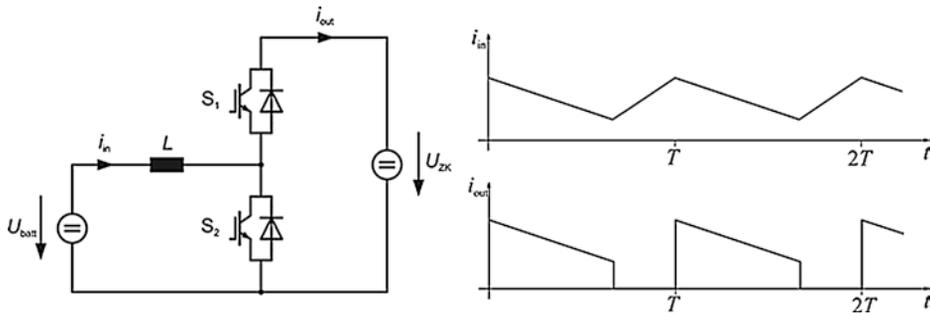


Abb. 6.46 Dreiphasige asymmetrische Halbbrücke für dreisträngige GRM



**Abb. 6.47** Bidirektionales Ladegerät

besteht im dreiphasigen Fall aus ebenso vielen Halbleitern wie die B6C-Brücke, benötigt aber die doppelte Anzahl an Zuleitungen. Daher ist eine Integration des Umrichters bei der GRM besonders interessant. Mit der mehrphasigen asymmetrischen Halbbrücke lassen sich die Stellparameter für jeden Betriebspunkt optimieren, da die einzelnen Stränge voneinander unabhängig ansteuerbar sind. Zudem ist der Weiterbetrieb des Antriebs bei Ausfall eines Motorstrangs möglich (De Doncker et al. 2011a). Weitere Umrichtertopologien für GRM finden sich bei Barnes und Pollock (Barnes und Pollock 1998).

### 6.2.3.3 DC/DC-Wandler

Wie in Kap. 6.2.1.1 beschrieben wurde, dient der DC/DC-Wandler der flexiblen Kopplung von Traktionsbatterie und Wechselrichter, wobei der Grad der Flexibilität von der verwendeten Schaltung vorgegeben wird. Die Batteriespannung wird auf eine höhere Zwischenkreisspannung für die Wechselrichter angehoben, der DC/DC-Wandler arbeitet also im Motorbetrieb als Hochsetzsteller. Beim Rekuperieren, d. h. der Rückspeisung in die Batterie, arbeitet der Wandler als Tiefsetzsteller.

Die einfachste Realisierung des DC/DC-Wandlers bildet ein bidirektionaler Gleichstromsteller, wie er in Abb. 6.47 links dargestellt ist. Anhand der Stromverläufe in der rechten Abbildung lässt sich die Taktung der Energieübertragung erkennen. Während sich der Eingangsstrom kontinuierlich und mit einem dreiecksförmigen Stromrippel ergibt, fließt der Ausgangsstrom nicht kontinuierlich und ein entsprechend großer Stromrippel stellt sich ein. Die EMV-Filter müssen dabei anhand der Vorgaben zur Glättung dieses Rippels dimensioniert werden. Ein praktikabler Betriebsbereich des bidirektionalen Gleichstromstellers liegt in einem Spannungsübersetzungsverhältnis von 1, 1–10.

### 6.2.3.4 Ladegerät

Das Ladegerät dient zum Aufladen der Traktionsbatterie und kann durch Kommunikation mit dem Batterie-Management-System (BMS) einen zustandsangepassten Ladeprozess umsetzen, der die Lebensdauer der Batterie entscheidend erhöhen kann. Bei Antriebsstrangtopologien mit verteilten Batterien und DC/DC-Wandler (s. Abb. 6.33) speist das Ladegerät den Zwischenkreis und die Leistungssteuerung wird durch die

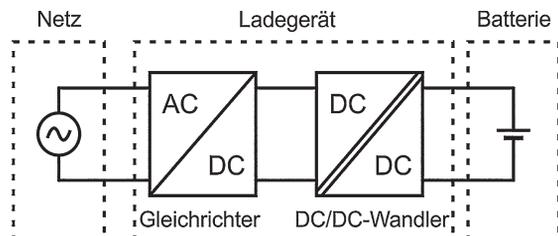
DC/DC-Wandler umgesetzt. Unabhängig von der Antriebsstrangtopologie sind hier verschiedene Konzepte möglich, wobei zwei wichtige Aspekte eine entscheidende Rolle spielen: die angestrebte Ladegeschwindigkeit und die Anschlussverfügbarkeit.

Das Laden an einer Haushaltssteckdose (ca. 3,5 kW) dauert mehrere Stunden (ca. 7–10 h für 150–200 km), dafür ist sie überall verfügbar und wird entsprechend für Pkws als Lösung favorisiert (Energietechnische Gesellschaft (ETG) 2010). Die Installation eines dreiphasigen Anschlusses in der Garage könnte die Ladeleistung auf 11 kW (16 A) bzw. 22 kW (32 A) heraufsetzen, wodurch sich die Ladezeit zwar entsprechend verringert, aber noch deutlich über einer Stunde liegt. Einige Ladegeräte sehen hierfür Anschlussmöglichkeiten für ein- und dreiphasiges Laden vor. Dieses Konzept setzt voraus, dass das Ladegerät als Komponente im Auto verbaut wird, was mit höherem Aufwand und höheren Kosten einhergeht. Im Hinblick auf die Kundenakzeptanz von Verfügbarkeit und Zugangsmöglichkeiten ist ein externes Ladegerät für Pkws nicht rentabel.

Eine Schnellladestation, die etwa während einer kurzen Pause innerhalb von einer Viertelstunde nennenswert nachlädt, braucht deutlich über 50 kW Ladeleistung und ist damit für die Hausinstallation ungeeignet. Derartige Konzepte werden eher bei Nutzfahrzeugen mit festen Tagesstrecken, wie bei Buslinien oder Lieferdiensten, eingesetzt, wo feste Standzeiten und -orte planbar sind.

Ein Beispiel für den Aufbau eines integrierten Ladegerätes zeigt Abb. 6.48. Es besteht aus zwei Stufen: einem Gleichrichter und einem DC/DC-Wandler mit Transformator, also einer galvanischen Trennung. Je nach Schutzkonzept im Fahrzeug kann diese Potenzialtrennung, d. h. die Verwendung eines Transformators im Ladegerät, erforderlich sein. Zwar gibt es dafür aktuell noch keine Vorschrift, aber die Forderung nach einer Potenzialtrennung unabhängig vom Schutzkonzept erscheint sinnvoll (Energietechnische Gesellschaft (ETG) 2010). Es wird nicht nur eine Gleichrichterstufe mit Transformator eingesetzt, weil dieser dann für eine Betriebsfrequenz von 50 Hz ausgelegt werden muss, was ihn groß und schwer macht. Das zweistufige System mit einem Transformator im DC/DC-Wandler, der mit einer hohen Betriebsfrequenz (im Bereich von 10–50 kHz) arbeitet, kann deutlich kompakter gebaut werden. Bei den Konzepten mit geringerer Ladeleistung werden kleinere Halbleiterschalter als im Wechselrichter oder DC/DC-Wandler verwendet. Neben kleinen IGBTs kommt insbesondere der „Metal Oxide Semiconductor“ (MOSFET) zum Einsatz, mit dem höhere Schaltfrequenzen erreicht werden können.

**Abb. 6.48** Aufbau eines Ladegerätes



Im Zuge der intelligenten Stromnetze („Smart Grids“) kann das Ladegerät zusätzliche Funktionen übernehmen. Denkbar wäre die Stützung des Netzes durch die Bereitstellung von Blindleistung oder bei bidirektionaler Ausführung auch die Rückspeisung von Wirkleistung. Letzteres, die Einführung von verteilten Energiespeichern im Netz, wird im Zusammenhang mit der Erschließung erneuerbarer Energien als möglicher Energiepuffer diskutiert. Untersuchungen zeigen, dass diese zusätzlichen Entladephasen die Lebensdauer der Batterie nicht nennenswert herabsetzen (Energietechnische Gesellschaft (ETG) 2010). Ein Ladeegerät-konzept, das einen aktiven Eingriff ins Netz vorsieht, ist allerdings mit hohem Aufwand verbunden, da neben einer komplexen Kommunikationsstruktur spezielle Sicherheitseinrichtungen für Inselnetz-erkennung in den Ladeegeräten benötigt werden. Diese Vorschrift gilt für alle Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz, um am Netz arbeitende Personen nicht zu gefährden. Entsprechend ist die Einführung rückspeisender Ladeegeräte vorerst nicht zu erwarten (Energietechnische Gesellschaft (ETG) 2010). Eine Regelung der Ladeleistung, also eine gezielte Netzentlastung im Bedarfsfall, ist im Vergleich einfacher zu realisieren, und eine Umsetzung daher wahrscheinlicher.

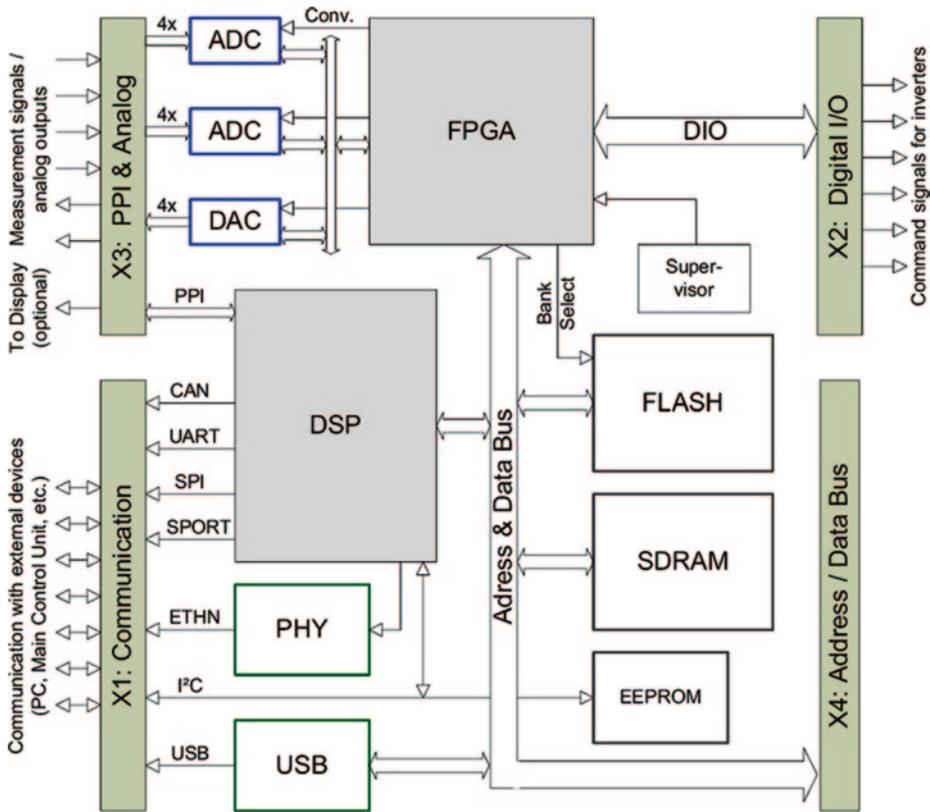
### 6.2.3.5 Regelung und Steuerung

Für die hoch dynamische Regelung des elektromechanischen Energiewandlungsprozesses sowie der Spannungswandlung sind digitale Regelungsplattformen unverzichtbar, die Sensoren auslesen, Steuersignale liefern und die Kommunikation mit weiteren Geräten ermöglichen. Abbildung 6.49 zeigt eine Beispielarchitektur, in der ein schnell arbeitendes Field Programmable Gate Array (FPGA) die Sensorsignale über Analog-Digital-Umsetzer (analog-to-digital-converter, ADC) erhält und die Steuersignale für den Wechselrichter generiert. Auf höherer Ebene und etwas langsamer regelt ein digitaler Signalprozessor (DSP) die Kommunikation zu externen Geräten und zur übergeordneten Regelung (De Doncker et al. 2011b). Durch derartige Steuerbausteine sind komplexe Regelungs- und Schutzalgorithmen auf kleinem Raum möglich. Die Entwicklungszeit wird durch höhere Programmiersprachen wie C++ oder spezielle Werkzeuge verkürzt, sodass eine schnelle Anpassung des Antriebs für verschiedene Anwendungen möglich ist (De Doncker 2006).

## 6.2.4 Prozesskette und Kosten elektrischer Maschinen

In Abb. 6.50 wird exemplarisch die Prozesskette zur Herstellung einer Asynchronmaschine visualisiert. Im ersten Schritt werden die aktiven und inaktiven Bauteile gefertigt und im anschließenden Montageprozess zusammengefügt. Dabei kann sowohl die Fertigung als auch die Montage voll- oder teilautomatisiert verlaufen. So erfolgt bspw. die Montage von mittleren Maschinen (Leistung bis 1 MW) in Kleinserie hauptsächlich manuell bzw. teilautomatisiert. Im Gegensatz dazu werden Kleinst- und Kleinmaschinen (Leistung bis 10 kW) in Großserie auf vollautomatischen Anlagen produziert.

Grob geschätzt können die Produktionskosten der heute in Großserie produzierten Kleinmaschinen (10 W bis 10 kW) zu 2/3 den aktiven Bauteilen und zu 1/3 den inaktiven Bauteilen zugeordnet werden.



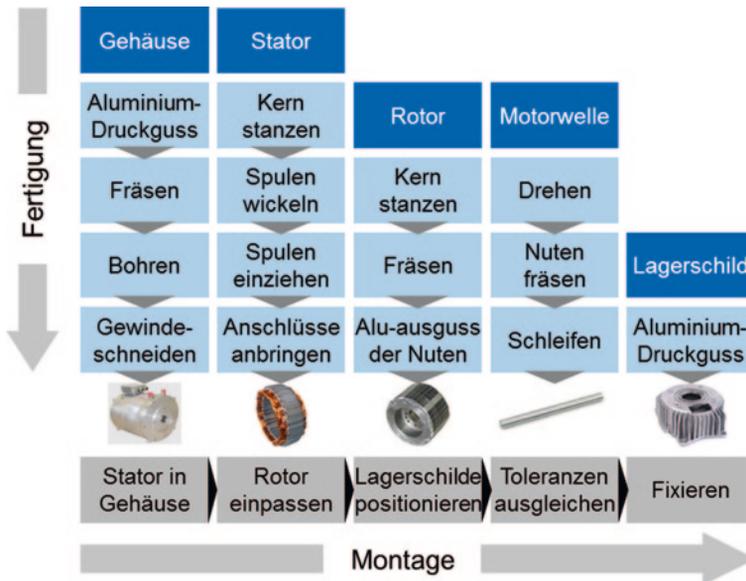
**Abb. 6.49** Exemplarische Rapid-Control-Prototyping-Regelungsplattform

Artmäßig teilen sich die Kosten für die Produktion elektrischer Maschinen in Großserie wie folgt auf:

- ca. 50 % Materialkosten (Eisen, Kupfer, Aluminium, Kunststoffe sowie Zukaufteile)
- ca. 10 % direkte Lohnkosten
- ca. 40 % Gemeinkosten (Entwicklung, Vertrieb, Verwaltung, Abschreibungen etc.)

### 6.2.4.1 Verfahren zur Herstellung der Bauteile des magnetischen Kreises

Die Bauteile des magnetischen Kreises werden hauptsächlich als Blechpaket gestaltet. Dementsprechend kommen Blechbearbeitungsverfahren zum Einsatz. Je nach Aufbau des Blechpakets werden die einzelnen Blechkomponenten im Tippschnitt-, Komplettschnitt-, Folgeschnitt- oder Formbandschneidverfahren auf Stanz- und Blechschneidmaschinen hergestellt. Der Folgeschnitt ist das am häufigsten eingesetzte Verfahren. Dabei werden Nuten und Löcher aus Blechstreifen, welche die Stanzmaschine durchlaufen, schrittweise



**Abb. 6.50** Prozesskette bei der Herstellung einer Asynchronmaschine

ausgeschnitten. Die Nutzung versetzter Folgeschnitte ermöglicht hier ein hohes Nutzungsrad des Materials, sodass infolge des Stanzprozesses nur wenig Abfall entsteht.

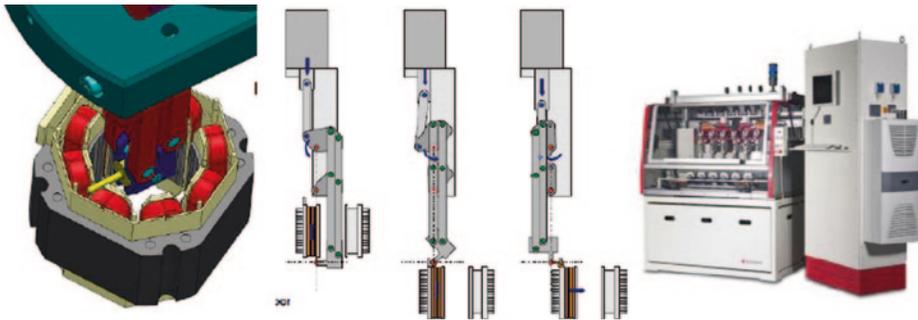
Im nächsten Schritt werden die Blechsegmente pakettiert. Die für das Paket benötigte Anzahl an Blechsegmenten wird durch Wiegen oder Längenmessung bestimmt. Die Verbindung der Segmente erfolgt meist mittels Stanzpakettieren oder Kleben mit Backlack, der auch die Isolierfunktion übernimmt. Zum Erreichen einer höheren Formstabilität können auch mechanische Verbindungsverfahren wie bspw. Schweißen oder Nieten angewendet werden.

Zur Herstellung von Massivteilen, wie bspw. Ständer von Gleichstrommaschinen oder Magnetkörper, kommen Fertigungsverfahren wie Gießen, Sintern und spanende Fertigung zum Einsatz. So werden die Läuferstäbe von Asynchronmaschinen direkt in die dafür vorgesehenen Nuten des Läuferblechpakets eingegossen. Permanentmagnete werden hauptsächlich mittels Sintern aus magnetischen Pulverwerkstoffen produziert.

### 6.2.4.2 Wickelverfahren

#### *Nadelwickeltechnik*

Die Direktbewicklung mittels der Nadelwickeltechnik ist das optimale Verfahren zur Bewicklung von elektrischen Maschinen für Elektrofahrzeuge. Dabei wird eine Nadel mit einer Düse, die rechtwinklig zur Bewegungsrichtung angeordnet ist, in einer Hubbewegung an den Anker- bzw. Statorpaketen des Motors vorbeigeführt, durch den Nutschlitz zwischen zwei benachbarten Polen hindurch, um den Draht an der gewünschten Stelle abzulegen.



**Abb. 6.51** Direktbewicklung mittels Nadelwickeltechnik, rechts Nadelwickelanlage der Firma Aumann

Im Umkehrpunkt am Wicklungskopf wird dann der Stator um eine Zahnteilung gedreht, sodass der vorherige Prozess in umgekehrter Reihenfolge ablaufen kann (Abb. 6.51).

Bei der Realisierung des Lagenaufbaus muss zwischen zwei benachbarten Polen ein Freiraum beibehalten werden, dessen Größe mindestens dem Düsendurchmesser entspricht. Der Düsendurchmesser der bekannten Wicklungsmaschinen ist 3-mal so groß wie der Durchmesser des Wickeldrahtes.

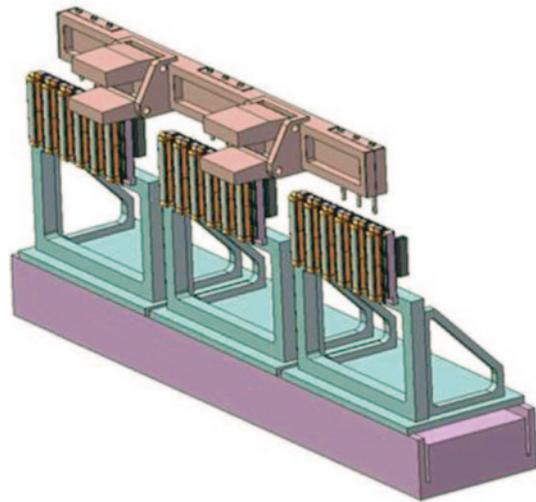
Der Vorteil der Nadelwickeltechnik ist, dass der Nadelträger, an dem sich die Drahtführungsdüse befindet, an ein CNC-Koordinatensystem gekoppelt ist. Dies ermöglicht ein räumliches Verfahren der Düse zum Stator. So kann neben der normalen Hubbewegung und der Rotation des Stators ebenfalls eine Verlegebewegung vollzogen werden. Ein gezieltes Ablegen des Drahtes ist dennoch nur bedingt möglich, da der Draht in einem Winkel von  $90^\circ$  aus der Drahtführerdüse gezogen wird und eine undefinierte Bauchigkeit entsteht. Die Umlenkung des Drahtes beim Austritt aus der Drahtführerdüse beansprucht diesen stark und macht es schwierig, Kupferdrähte über 1 mm Durchmesser zu wickeln.

Die Nadelwickeltechnik ermöglicht es, die Fertigung kompletter Baugruppen – bestehend aus Stator, Spulen, Verschaltung und Kontaktiertechnik – in einer Maschine zu integrieren. Abgesehen vom nicht komplett genutzten Raum zwischen den Polen können im Gegensatz zur Einzichtechnik aufgrund der geringen Wickelkopfhöhen Motorspulen mit einer guten Performance gewickelt werden.

### *Kettenwickeltechnik*

Das Kettenwickeln (auch Polkettenwickeln genannt) ist eine Kombination der klassischen Nadelwickeltechnik und der Einzelpolbewicklung. Die Vorteile ergeben sich aus der Möglichkeit, die Teilspulen einer Phase durchwickeln zu können, ohne dabei unnötige Kontaktstellen zu generieren. Zudem gibt es durch das Öffnen des Wickelraums mehr Platz zum Einbringen der Wicklung. Durch Mehrfachanordnungen können so alle drei Phasen U, V und W gleichzeitig gewickelt werden. Im Gegensatz zum Nadelwickeln wird so die Herstellzeit deutlich reduziert (Abb. 6.52).

**Abb. 6.52** Mehrfachanordnung zum gleichzeitigen Bewickeln aller Phasen



Die Verschaltung der einzelnen Teilspulen einer Phase kann ohne Unterbrechung am Zahnrücken durch die Wickelmaschine durchgeführt werden. Durch das Bewickeln der Zähne auf einem Werkstückträger kann ein hoher Automatisierungsgrad erzielt und die fertig gewickelten Bauteile können direkt einer weiteren Station zugeführt werden.

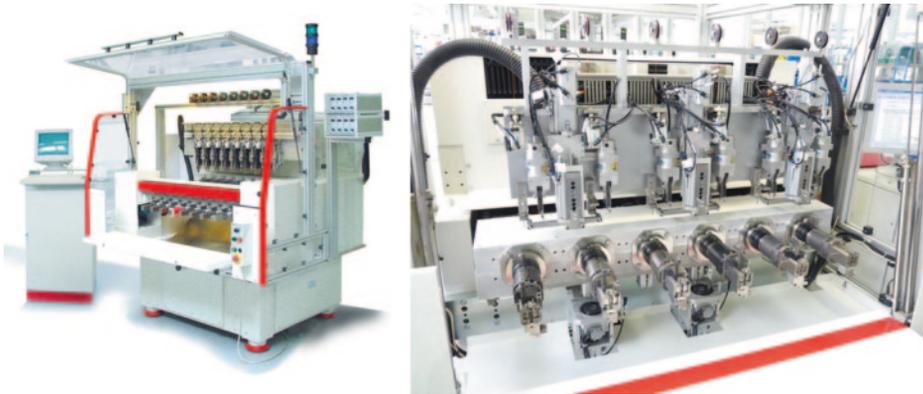
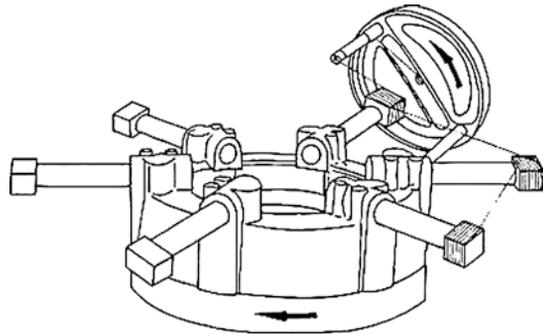
Im nächsten Schritt erfolgt das Runden der Polkette. Hier gibt es die Möglichkeit, die einzelnen Zähne zur Hälfte über den Zahnrücken zu spannen und mit einem Handling aufzuwickeln. Dabei werden die Zähne nacheinander mit einem Klemmfinger gegriffen und auf den Innendurchmesser gespannt. Diese Rundungsbewegung kann mit einem Roboter oder einem Achshandling ausgeführt werden. Die Verbindungsdrähte der Teilspulen einer Phase rollen sich am Rücken der Zahnendkappen ab und erzeugen so die kürzeste Verbindung zueinander.

### *Flyerwickeltechnik*

Mithilfe der Flyerwickeltechnik wird eine elektrische Spule oder Wicklung erzeugt. Der Draht wird über eine Rolle oder durch eine Düse, die sich an einem Flyer befindet, zugeführt, und zwar durch das Zentrum der Lagerstelle des Flyers, und rotiert in einem bestimmten Abstand zur Spule. Während des Wickelprozesses muss nur das zu bewickelnde Bauteil im Wickelbereich des Flyers präsentiert werden (Abb. 6.53).

Die Fixierung des Drahtes wird in der Regel durch das sog. Folgewickelverfahren möglich. Dieses Verfahren wird häufig an Rundschalttischen eingesetzt, bei denen sich am Umfang des Tisches Drahtklemmen oder Drahtumlenkungen befinden, die ein Mitziehen und damit Fixieren des Drahtes erlauben. Dadurch wird ein sehr schneller Bauteilewechsel umsetzbar, denn ein separates Ablegen des Drahtes in eine maschinen-seitige Drahtklemme ist nicht notwendig.

**Abb. 6.53** Wicklung mittels Flyerwickeltechnik



**Abb. 6.54** Linearwickelanlage der Fa. Aumann, rechts: Detail Innenraum

### *Linearwickeltechnik*

Durch das Linearwickelverfahren wird eine elektrische Spule oder Wicklung erzeugt, der Draht wird durch Rotation des zu bewickelnden Spulenkörpers oder der zu bewickelnden Vorrichtung aufgewickelt. Die Zuführung des Drahtes findet durch ein Röhrchen statt. Vor dem eigentlichen Wickelprozess wird der Draht an einem Pfosten oder einer Klemmvorrichtung des Spulenkörpers oder der Wickelvorrichtung befestigt. Durch die zur Drehbewegung des zu bewickelnden Bauteils erfolgende lineare Verlegebewegung des Drahtführerröhrchens wird der Draht in den Wickelraum des Spulenkörpers verteilt. Die Rotationsbewegung und die Verlegebewegung werden mithilfe von CNC-Achsen realisiert (Abb. 6.54).

Der Draht wird dabei häufig aus einer Vorratsrolle, die bis zu 400 kg Kupferlackdraht beinhaltet, über Kopf abgezogen. Bei der Umdrehung der Rotationsachse wird in Abhängigkeit vom Drahtdurchmesser die Verlegeachse des Drahtführerröhrchens verfahren (Verlegesteigung). Dabei werden Drehzahlen, speziell bei der Verarbeitung von dünnen Drähten, von bis zu 30.000 1/min erreicht. In Abhängigkeit vom Wicklungsdurchmesser werden während des Wickelprozesses Drahtgeschwindigkeiten von bis zu 30 m/s erreicht.

Da alle Bewegungen während des Wickelprozesses über CNC-Achsen eingeleitet werden, ist es möglich, neben der viel verbreiteten wilden Wicklung auch orthozyklische Wicklungen herzustellen. In Folge der Trennung zwischen Drahtführung und Rotation des zu bewickelnden Bauteils kann bei der Linearwickeltechnik die Anordnung von Produkt und Drahtführung vervielfältigt werden, um bis zu 20 Spindeln gleichzeitig zu wickeln. Dies führt zu einer hohen Wirtschaftlichkeit des Linearwickelverfahrens. Es kommt meist zur Bewicklung massearmer Spulenkörper zum Einsatz.

## 6.2.5 Aktuelle Produktionsprozesse für Leistungshalbleitermodule

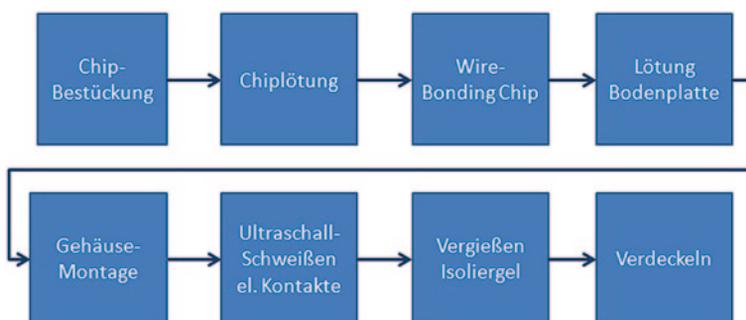
### 6.2.5.1 Montageprozesse

Alle Bauformen sind in ihrem Aufbau sehr ähnlich. Im Detail unterscheiden sie sich stark in der Aufbau- und Verbindungstechnik und folglich bei den zum Aufbau notwendigen Prozessen und deren Ausprägung. Im weiteren Verlauf wird nur auf die Produktion von Leistungshalbleitermodulen mit Bodenplatte eingegangen, da diese einen hohen Komplexitätsgrad besitzt und nahezu alle gängigen Prozesse für Leistungshalbleitermodule umfasst (Abb. 6.55).

#### *Chipbestückung*

Jede Modulfertigung beginnt mit dem Bestücken der Bauelemente (bspw. IGBT-Leistungstransistoren und Dioden) auf ein entsprechendes Trägersubstrat, bspw. ein DCB-Substrat (direct copper bonded).

Die am häufigsten verwendete Verbindungstechnik ist die sog. Pastenlötung. Dabei wird zuerst die viskose Lotpaste, bestehend aus einem Lot- und Flussmittelsystem, mit vollautomatisierten Inline-Druckern per Schablonendruck auf das Ausgangssubstrat gedruckt. Wichtig ist, dass die Maschinen aufkommende Verschmutzungen und Zusetzungen der Schablonen automatisch erkennen und den Prozess durch entsprechende Selbstreinigungsschritte im Fluss halten (Abb. 6.56).



**Abb. 6.55** Montageablauf Leistungshalbleitermodul mit Bodenplatte

**Abb. 6.56** Die-Bonder. *Quelle*  
www.besi.com



Anschließend werden die Bauelemente (Halbleiterchips) direkt von einem fertig prozessierten und vorgetesteten Siliziumwafer mithilfe eines Vakuum-Tools abgepickt und auf die feuchte Paste gesetzt. Dies geschieht unter Einsatz von modernen Die-Bondern, die ohne zwischenzeitlichen Rüstaufwand eine große Menge verschiedener Bauelemente automatisch aus entsprechenden Magazinen abarbeiten können.

#### *Chiplötung*

Bei der sog. Chiplötung werden die zuvor bestückten Halbleiterchips stoffschlüssig auf das Trägersubstrat gelötet, d. h., sie werden damit auch rückseitig elektrisch kontaktiert. Moderne Lötanlagen arbeiten vollautomatisch von Magazin zu Magazin, die zu lötenden Substrate werden dem Ofen über Transportstrecken automatisch zugeführt und laufen nach erfolgtem Prozess automatisch in entsprechend zur Weiterverarbeitung geeignete Magazine. In den meisten Fällen schließt sich an die Lötung noch ein Reinigungsschritt an, in dem vorhandene Flussmittelreste heruntergewaschen werden, da diese insbesondere den nachgelagerten Wire-Bond-Prozess stören können (Abb. 6.57).

Die Güte der Lötverbindung ist für Leistungshalbleitermodule von hoher Bedeutung, da Lunker unter den Bauelementen die Ableitung der Verlustwärme behindern würden, was zum Ausfall des Moduls führen kann. Deshalb arbeitet ein Lötoven mit einem exakt justierten Temperaturprofil, das meist im Durchlauf durch mehrere Kammern und einer starken Evakuierung der eigentlichen Lötchamber eingestellt wird. Das Lötresultat wird zudem mit teilautomatisierten Röntgenkontrollanlagen stichprobenartig überprüft.

#### *Drahtbonden-Chip*

Das Draht- bzw. Wire-Bonding ist der für Leistungshalbleiter meistverwendete Prozess zur Vorderseitenkontaktierung. Dabei wird ein Aluminiumdraht mit einem

**Abb. 6.57** Lötöfen.  
Quelle www.pink.de



hochfrequenten Ultraschallschweißprozess von der metallisierten Chipoberfläche auf den vorgesehenen Landepunkt der Substratmetallisierung gezogen. In der Leistungselektronik werden dabei sog. Dickdrähte mit Durchmessern bis zu 500  $\mu\text{m}$  verwendet. Die Vorteile dieses Verfahrens sind die gute Skalierbarkeit und die hohe Flexibilität, denn die Anzahl der Drähte kann je nach benötigter Leistung (Strom) im Design erhöht werden. Zudem übernimmt das Verfahren einen Teil der Verschaltung, da die Drähte vom Startpunkt aus gesehen in verschiedene Richtungen, Winkel und Längen auf mehr oder weniger beliebige Endpunkte auf dem Substrat gezogen werden können (Abb. 6.58).

Der Prozess wird je nach Drahtstärke und Randbedingungen über eine definierte Rampe von Bondleistung und Bondkraft abgebildet. Moderne Maschinen überwachen dabei nicht nur die eigentlichen Bondparameter, sondern auch den Verlauf über die Zeit und damit die Standzeit der Bondtools.

Nach dem Bondprozess sind die Chips in der Regel vollständig kontaktiert und damit testbar. In einem Leistungshalbleitermodul mit Bodenplatte sind oft mehrere Substrate enthalten, d. h., sie werden in der nachfolgenden Lötung der Bodenplatte auf dieser zusammengefasst. Deshalb wird nach dem Wire-Bonding ein elektrischer Vortest gemacht, um den Einbau von fehlerhaften Substraten ins Modul zu vermeiden und die Gesamtausbeute zu verbessern.

#### *Lötung der Bodenplatte*

In der Lötung der Bodenplatte werden die vorgefertigten Substrate mit auf die gemeinsame Bodenplatte gelötet. Die Anlagentechnik arbeitet analog zur Chiplötung auch hier vollautomatisch, d. h., die zu lötenen Substrate werden dem Ofen – meist auf passenden Werkstückträgern – über entsprechende Transportstrecken automatisch zugeführt und laufen nach erfolgtem Prozess automatisch wieder heraus.

Ebenfalls analog zur Chiplötung ist auch hier die Güte der Lötverbindung von hoher Bedeutung, da Lunker unter den Substraten die Ableitung der Verlustwärme behindern würden.

**Abb. 6.58** Drahtbonder.  
Quelle [www.ortodyne.com](http://www.ortodyne.com)



### *Gehäusemontage*

Während der Gehäusemontage wird der Gehäuserahmen mit der systemgelöteten Bodenplatte verbunden. Dies geschieht vollautomatisch. Der Anlage werden über Werkstückträger die Materialien zugeführt. Dazu gehören die Bodenplatte mit darauf gelöteten DCB-Substraten, der Gehäuserahmen, Befestigungsmaterial und Klebstoffe. Im ersten Schritt wird mit einer feinen Düsenadel der Klebstoff auf die Bodenplatte aufgetragen. Danach setzt ein Roboter den Gehäuserahmen in die Kleberaupe. Im nächsten Schritt wird je nach Design der Rahmen mit der Bodenplatte verschraubt bzw. vernietet. Auf einem Werkstückträger verlässt das „Modul“ die Anlage.

Der Kleber übernimmt neben einer klebenden auch eine dichtende Funktion. Er verhindert ein späteres Auslaufen des Weichvergusses. Für die Rückverfolgbarkeit (Traceability) werden über Scanner die DMX-Codes eingelesen und in einer Datenbank hinterlegt.

### *Ultraschallschweißen*

Für die elektrische Verbindung der DCB-Substraten zu den nach außen führenden Anschlüsselementen werden zwei Technologien eingesetzt: das Drahtbenden und das Ultraschallschweißen.

Beim Ultraschallschweißen werden die vom Gehäuserahmen kommenden Anschlüsse direkt mit der Kupferkaschierung der DCB mittels Ultraschallschweißprozess verschweißt. Die Sonotrode fährt hierzu die entsprechenden Positionen an und bringt die für die Schweißung erforderliche Energie mit Ultraschall in die Verbindungsstelle ein. Dies geschieht unter „Beobachtung“ von Leistung und Zeit.

Mit dieser Verbindungstechnologie können bei gleichem Platzbedarf im Vergleich zum Drahtbenden höhere Ströme geführt werden.

### Vergießen

Bevor ein Deckel die Herstellung des Leistungshalbleitermoduls abschließt, wird das Gehäuse mit einem hochisolierenden Verguss verfüllt. Zum Einsatz kommt ein Zweikomponentenmaterial. Die Mischung erfolgt während der Prozessierung direkt am Düsenkopf der Anlage. Durch Wärmezufuhr wird der Verguss vernetzt. Dazu durchläuft das Modul eine Ofenstrecke, an deren Ende der Verguss zu einer gallertartigen Masse „aushärtet“. Anschließend wird der Deckel aufgelegt und mithilfe einer Deckelpresse montiert. Üblicherweise erfolgt diese Verbindung mit Rastelementen. Das Modul ist fertig.

Der nachfolgende Endtest mit visueller Kontrolle prüft, ob die diesem Produkt zugesicherten Eigenschaften erfüllt werden.

#### 6.2.5.2 Testen und Verpacken

Zur Sicherstellung der definierten Produkteigenschaften werden verschiedene Tests/Kontrollen durchgeführt. So gibt es produktionsbegleitende Kontrollen, um die jeweiligen Arbeitsschritte zu überwachen. Zusätzlich erfolgt mithilfe der Statistischen Prozess-Steuerung (SPC = Statistic Process Control) eine kontinuierliche Überwachung aller wichtigen Prozessparameter. Zum Teil sind optische Kontrollen notwendig, die derzeit nicht durch Maschinen erfolgen können, sondern durch besonders geschultes Personal.

Am Ende der Produktionskette folgt ein Test des fertigen Produktes. In Abb. 6.59 sind die typischen Tests zu sehen. Beim statischen und dynamischen Test kommen verschiedene Temperaturen zum Einsatz. Dadurch ist es möglich, Kennlinien zu ermitteln, um bspw. die Steigung der IGBT-Durchlasskennlinie zu bewerten.

Mit den gesammelten Daten werden, insbesondere für den Automobilmarkt, statistische Betrachtungen erstellt. Werden Produkte in dem betrachteten Los als „Ausreißer“ identifiziert, werden sie verworfen. Für dieses „post processing“ muss dann allerdings das gesamte zu bewertende Los komplett gemessen sein. Im nächsten Schritt erfolgt eine Sortierung, die einen Versand unter dem Stichwort „Full Box“ ermöglicht, die Verpackungseinheit ist zu 100 % mit Gut-Teilen gefüllt. Ein dem Kunden angepasstes maschinenlesbares Etikett ist obligatorisch. Sehr oft wird bei Kunden mit hochvolumigen Abnahmemengen die Verpackung gemeinsam abgestimmt. Dadurch kann das Produkt mit seiner Verpackung beim Kunden direkt am Montageplatz verarbeitet werden. Es kommen z. T. Pendelverpackungen zum Einsatz.

Die einzelnen Testschritte müssen gegeneinander abgestimmt werden. Die Tests beim Lieferanten und beim Kunden gehören dazu. Nur so kann verhindert werden, dass durch



**Abb. 6.59** Prinzipdarstellung, elektrischer Endtest eines Leistungshalbleitermoduls

Toleranzen der verwendeten Messsysteme Ausschuss entsteht. Ein weiterer Vorteil der abgestimmten Teststrecke ist das Kosteneinsparpotenzial, weil Doppelmessungen vermieden werden.

### 6.2.5.3 Qualität

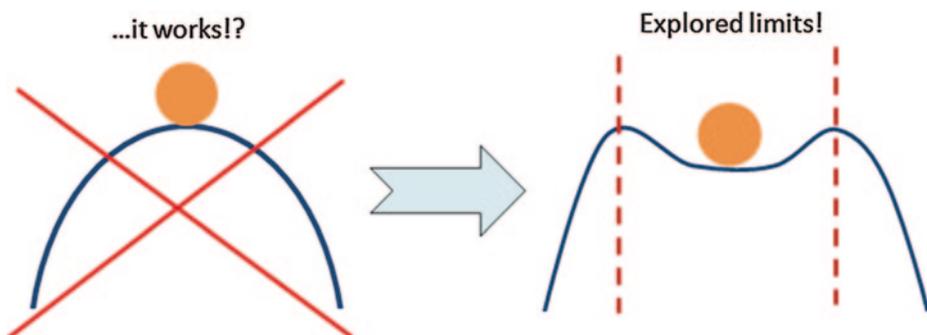
Der Begriff Qualität stammt vom lateinischen Ausdruck „qualis“ und heißt übersetzt „Wie beschaffen?“. Der Kunde erwartet von einem Produkt, dass es ihm die zugesicherten Eigenschaften über die vereinbarte Lebensdauer störungsfrei zur Verfügung stellt. Für das Produkt müssen also Eigenschaften und eine Lebensdauer definiert sein.

Diese Definition setzt die genaue Kenntnis der aus der Anwendung resultierenden Belastungen an ein Produkt voraus. Sie ist die Grundlage für die Entwicklung des Produktes sowie der Produktionsprozesse und -abläufe. Für die Lebensdauer ist die Kenntnis der Produktbelastungen zentral.

Zur Überprüfung der zugesicherten Eigenschaften werden während der Produktentwicklung Typenprüfungen und Lebensdaueruntersuchungen durchgeführt. Da es nicht möglich ist, die Lebensdauer eines Autos mit 15 Jahren oder die einer Lokomotive mit 30 Jahren abzubilden, werden beschleunigte Tests herangezogen. Die Kenntnis der Fehlermechanismen und der Beschleunigungsfaktoren ist wichtig, um belastbare Ergebnisse zu erzielen.

Während der Produktentwicklung müssen die Toleranzen der eingesetzten Bauteile und die Prozessschwankungen betrachtet werden. Nur mit einem „toleranten“ Design und einer „toleranten“ Produktionskette ist die Herstellung des Produktes in hohem Volumen und über einen langen Zeitraum gewährleistet.

Untersuchungen in den Grenzbereichen der Prozesse mit Bauteilen, die am Rand der Toleranzen liegen, geben Aufschluss über die Prozessfähigkeit. Dies wird allzu oft vernachlässigt und führt während des Produktionshochlaufs zu unerwünschten Effekten. Die Kosten für die Beseitigung dieser Effekte sind während des Hochlaufs deutlich höher als der Aufwand in Grenzwertuntersuchungen während der Entwicklungsphase (Abb. 6.60).



**Abb. 6.60** Schematische Darstellung der Prozesssicherheit

Wenn in der Produktion alle Prozessschritte – inklusive der Wartungsvorschriften der Anlagen – beschrieben sind und sichergestellt ist, dass alles im definierten Toleranzbereich liegt, ist eine fehlerfreie Herstellung des Produktes gewährleistet. Überwachungen der Prozessschritte und auch der zugekauften Materialien sind erforderlich, um Fehler zu erkennen. Dies wird durch Qualitätssicherungsvereinbarungen (QSV) mit den Lieferanten und stichprobenartige Wareneingangskontrollen auf der Seite der Zukaufteile sichergestellt.

Gerade im Automobilbereich ist der Anspruch hoch. Das „Liegenbleiben“ mit einem Auto sorgt beim Kunden für sehr große Verärgerung. Je jünger das Fahrzeug ist, desto verständnisloser wird er reagieren. Heute werden 100.000 km und 10 Jahre Lebensdauer als selbstverständlich angesehen.

Für moderne Leistungshalbleitermodule, die sich seit vielen Jahren in langlebigen Anwendungen wie Wind- und Solarenergie oder Traktion bewährt haben, ist die Lebensdaueranforderung im Hybrid- bzw. Elektrofahrzeug nichts Neues. Die geforderte Fehlerrate im Automobilbau liegt deutlich unter 10 ppm.

Um bei Fehlern schnell und gezielt reagieren zu können, ist ein durchgängiges Rückverfolgbarkeitskonzept (Traceability) sinnvoll. Die Produktionsanlagen, wichtige Prozessparameter, Produktionshilfsmittel, Testergebnisse und die Materialien müssen erfasst werden. Dies hat Auswirkungen auf die Produktionsanlagen und die gesamte Logistikkette. Sie müssen mit Schnittstellen für die Ein- und Ausgabe der Daten ausgerüstet sein. Mithilfe von maschinenlesbaren Codes und Datenbanken ist der Weg des Materials auf den Fertigungsanlagen dann nachvollziehbar. Wichtig hierbei ist, dass diese Kette beim Kunden fortgeführt wird. Eine solche Rückverfolgbarkeit führt bei einem Leistungshalbleitermodul bis zur Position des Chips auf dem Wafer.

---

## 6.3 Batteriesysteme und deren Steuerung

Dirk Uwe Sauer, Achim Kampker, Christoph Deutskens und Heiner Hans Heimes

### 6.3.1 Entwicklung eines Batteriesystems

Lithium-Ionen-Batterien werden als Schlüssel für eine weitreichende Hybridisierung und Elektrifizierung von Antrieben in ganz unterschiedlichen Anwendungsbereichen angesehen. Durch das hohe Potenzial dieser Speichertechnologie, den wachsenden Druck auf CO<sub>2</sub>-Einsparungen und steigende Treibstoffkosten beschäftigen sich viele Firmen mit Hybridisierung und Elektrifizierung. Da es keine Universalbatterie gibt, die alle Anforderungen erfüllen kann, muss für die verschiedenen Anwendungen die jeweils geeignete Batterie ausgewählt werden. Dabei können in der Regel auch auf der Basis einer einzelnen Batterietechnologie durch unterschiedliche Materialkombinationen und den inneren Aufbau der Zellen verschiedene Leistungsdaten erreicht werden.

Nach einer Analyse der typischen Anforderungen für Batteriespeicher werden Leistungsmerkmale für die Speicher abgeleitet. In der Folge werden verschiedene Speichertechnologien vorgestellt, die für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen geeignet sind. Die Lithium-Ionen-Technologie erweist sich dabei als die vielseitigste. Alle technischen Anforderungen an Leistung und Lebensdauer lassen sich damit bei akzeptablen Energiedichten erreichen. Für lang-reichweitige Elektrofahrzeuge stehen Kosten und Energiedichten allerdings einem großflächigen Einsatz noch entgegen.

### **6.3.1.1 Typische Batterieauslegung**

Bei der Dimensionierung des Batteriesystems müssen mehrere Parameter betrachtet werden. Die erste Auslegungsgröße ist die Batteriespannung. Bei höherer Leistung ist eine entsprechende Batteriespannung notwendig, um die Ströme in akzeptablen Grenzen zu halten, dadurch die Ohm'schen Verluste zu reduzieren und Material für die Kabel einzusparen. Typische Batteriespannungen liegen in Elektrofahrzeugen heute bei 400 V. Modulare Batteriekonzepte mit Spannungen bis 60 V und nachgeschaltetem Hochsetzsteller sind interessant, weil die Spannung unter der Berührungsschutzspannung liegt und sich dadurch erhebliche Erleichterungen im Bereich der elektrischen Sicherheit ergeben.

Die Energiekapazität ist der zweite Auslegungsparameter. Diese Größe wird bestimmt durch die gewünschte nutzbare Energiemenge und die erlaubte Zyklentiefe, um die gewünschte Zyklenlebensdauer zu erreichen. Daher kann eine Batterie deutlich größer sein, als es aus energetischen Gründen notwendig ist. Bei vollelektrischen Fahrzeugen wird die Größe der Batterie im Wesentlichen durch wirtschaftliche Erwägungen und durch das Mobilitätsbedürfnis des Kunden bestimmt. Bruttobatteriekapazitäten liegen heute im Bereich von 15–25 kWh für etwa 100–150 km elektrische Reichweite. Größere Batterien sind technisch realisierbar, in der Regel aber nicht wirtschaftlich.

Der dritte Auslegungsparameter ist die Leistung. Bei Elektrofahrzeugen ist die Leistung durch die gewünschte Beschleunigungsleistung und die maximale Fahrzeuggeschwindigkeit definiert. Typischer Leistungsbedarf sind hier 30–70 kW, besonders sportliche Fahrzeuge können auch höheren und Kleinwagen für die Stadt weniger Leistungsbedarf haben.

### **6.3.1.2 Typische Batteriebelastung und Anforderungen an die Lebensdauer**

Die Lebensdauer von Batterien wird über zwei Kriterien definiert:

- kalendarische Lebensdauer – gibt an, wie lange die Batterie auch ohne Belastung leben würde
- Zyklenlebensdauer – gibt an, welchen Ladungsdurchsatz die Batterie liefern kann

Das Ende der Lebensdauer wird einerseits über die Zunahme des Innenwiderstands und andererseits über die Abnahme der nutzbaren Kapazität definiert. Typischerweise

wird das Lebensdauerende bei einer Zunahme des Innenwiderstands um 100 % oder der Abnahme der Kapazität auf 80 % der Nennkapazität definiert. In Hybridfahrzeugen ist der Innenwiderstand die begrenzende Größe, während in Elektrofahrzeugen die Kapazität und damit die Reichweite aus Sicht des Nutzers das Lebensdauerende definiert.

Während die Zyklenlebensdauer primär von der Zyklientiefe DOD (= depth of discharge) abhängt, sind dies bei der kalendarischen Lebensdauer vor allem die Temperatur und der Ladezustand. Dabei gilt, dass Batterien umso mehr Ladungsumsatz erreichen, je kleiner die Zyklientiefe ist („Wöhlerkurve“), und die Lebensdauer sich in etwa halbiert bei einer Temperaturzunahme von 10 K.

Die typische kalendarische Lebensdaueranforderung für eine Fahrzeuganwendung liegt zwischen 8 und 12 Jahren. Die Zyklenlebensdauer in Elektrofahrzeugen soll rund 3.000 Vollzyklen betragen. De facto kann der Durchschnittsfahrzeugnutzer diese Zahl über 10 Jahre Fahrzeuglebensdauer nicht realisieren. Bei einer elektrischen Reichweite des Fahrzeugs von 100 km entsprechen 3.000 Zyklen einer Fahrleistung von 300.000 km.

### 6.3.1.3 Speichertechnologien

In der Fahrzeugtechnik werden eine Reihe verschiedener Speichertechnologien für elektrische Energie diskutiert und eingesetzt. Für fast alle Anwendungen wird große Hoffnung auf die Lithium-Ionen-Technologie gesetzt, sie werden ausführlich diskutiert. Daneben kommen in verschiedenen Fahrzeuganwendungen auch Bleibatterien, NiMH-Batterien, Supercaps oder Schwungräder infrage. Diese Technologien werden in den nachfolgenden Abschnitten kurz besprochen.

#### *Bleibatterien*

Blei-Säure-Batterien in den Ausführungen als geschlossene Batterien mit flüssigem Elektrolyt und als verschlossene Batterie mit festgelegtem Elektrolyt in Gel oder Vlies stellen die mit Abstand kostengünstigste Speichertechnologie bei den Investitionskosten für die Speicherkapazität dar. Aus diesem Grund werden Bleibatterien als Starterbatterie heute in allen Fahrzeugen eingesetzt und für die Mikro-Hybrid-Fahrzeuge als wichtigste Technologie angesehen.

Probleme bestehen vor allem in Bezug auf die Energiedichte (ein Problem, das sich kaum lösen lässt), die schlechte Kapazitätsausnutzung bei hohen Strömen und die Lebensdauer. Aufgrund der geringen Basismaterialkosten und damit der Marktpreise werden nach wie vor verschiedene Fahrzeugkonzepte, insbesondere im Bereich von Transportfahrzeugen für den Stadtverteilverkehr, sehr kostengünstige Kleinfahrzeuge oder Elektroscooter entwickelt und in den Markt gebracht.

#### *Nickel-Metall-Hybrid-(NiMH-)Batterien*

In nahezu allen Hybridfahrzeugen, die derzeit kommerziell am Markt angeboten werden, kommen NiMH-Batterien zum Einsatz. Dies entspricht einem Markt von mehreren 100.000 Fahrzeugen pro Jahr. Die Technologie ist weitgehend ausgereift und ergibt gute Lebensdauerergebnisse. Der Anwendungsbereich beschränkt sich aber

auf die Medium- und Vollhybridfahrzeuge. Ein Einsatz in Plug-in-Hybrid- oder voll-elektrischen Fahrzeugen ist nicht vorgesehen, da weder die Energiedichten noch die Kostensenkungspotenziale ausreichend hoch sind. Letzteres liegt vor allem an den hohen Materialkosten. Daher wird zwar in den kommenden 3–5 Jahren noch von wachsenden Stückzahlen von NiMH-Batterien für Hybridfahrzeuge ausgegangen, mittelfristig ist aber von einer Verdrängung durch Lithium-Ionen-Batterien auszugehen.

#### *Elektrochemische Doppelschichtkondensatoren (Supercaps)*

Supercaps sind interessant, weil hohe Zyklenlebensdauern bis zu einer Mio. Zyklen bei voller Kapazitätsausnutzung erreicht werden können. Gleichzeitig gibt es sehr hohe Leistungsdichten, die relevant für die Bereitstellung von Leistung für die Beschleunigungsunterstützung und die Rückgewinnung von Bremsenergie sind. Dies ist vor allem für Busse und Bahnen oder andere Maschinen wie Kräne oder Baumaschinen mit Hybridantrieb interessant. Aufgrund der sehr hohen spezifischen Kosten pro gespeicherter Energie und der geringen Energie macht der Einsatz von Supercaps als Hauptspeicher in reinen Elektrofahrzeugen keinen Sinn. Diskutiert werden die Supercaps auch als ergänzender Leistungsspeicher.

#### *Schwungräder*

Schwungräder werden in verschiedenen Bauformen und Drehgeschwindigkeiten angeboten. Die Einsatzbereiche überschneiden sich weitgehend mit denen von Supercaps (hohe Leistung für kurze Zeiten, hohe Zyklenzahlen). Grundsätzlich werden Schwungräder mit elektrischem Antrieb und vollständiger mechanischer Entkopplung zwischen Anwendung und der Schwungmasse verwendet. Ein Einsatz in vollelektrischen Fahrzeugen ist nicht sinnvoll.

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

#### *Technologie*

„Lithium-Batterie“ ist der Überbegriff für eine Vielzahl von Materialkombinationen, aus denen Batteriezellen aufgebaut werden. Gemeinsam ist den Zellen, dass sie rund 3–5 Gewichtsprozent Lithium enthalten und die Ionenleitung zwischen den Elektroden über Lithium-Ionen erfolgt. Lithium als Element Nr. 3 des Periodensystems und als leichtestes Element, das bei Raumtemperatur fest ist, ist als Elektrodenmaterial sehr attraktiv, da es sowohl ein hohes elektronegatives Potenzial als auch eine hohe gewichtsbezogene Kapazität aufweist.

Unterschieden werden Lithium-Metall-Batterien von Lithium-Ionen-Batterien. Während die Lithium-Metall-Batterien eine metallische Lithium-Elektrode (Anode) enthalten, beinhalten Lithium-Ionen-Batterien das Lithium nur in ionischer Form oder als Bestandteil von oxidischen Materialien. Lithium-Metall-Batterien können theoretisch höhere Energiedichten erreichen, da in der Anode kein Trägermaterial für die Lithium-Ionen benötigt wird. In der Praxis führen aber erhebliche Sicherheitsprobleme mit dem metallischen Lithium und irreversible Nebenreaktionen an der Lithium-Elektrode dazu,

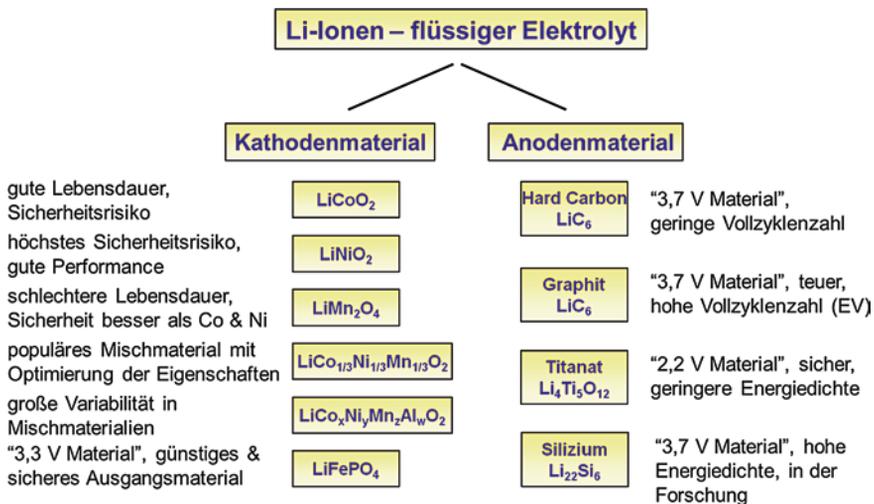
dass diese Technologie heute nur noch von wenigen Batterieherstellern im Hinblick auf den Einsatz im Fahrzeug verfolgt wird. Aktuell basieren alle bekannten und angekündigten Projekte zum Einsatz von Lithium-Batterien in Fahrzeugen ausschließlich auf der Lithium-Ionen-Technologie, die im Folgenden auch als einzige betrachtet wird.

Abbildung 6.61 zeigt eine Auswahl populärer Materialien, die in verschiedenen Zusammensetzungen und Stöchiometrien heute in kommerziellen Produkten eingesetzt oder für zukünftige Produkte entwickelt werden.

Als Anode werden derzeit verschiedene Kohlenstoffmodifikationen eingesetzt, in deren Kristallstruktur während der Lade-/Entladezyklen Lithium-Ionen ein- bzw. ausgelagert werden. Dabei nehmen sechs Kohlenstoffatome ein Lithium-Ion auf, was zu einer geringen Energiedichte der Elektrode führt. Als Alternativen werden Titanate oder Silizium diskutiert. Silizium hat bspw. ein Verhältnis von einem Silizium-Atom zu etwa fünf Lithium-Atomen und damit theoretisch eine 11-mal höhere Energiedichte. Allerdings dehnen sich die Siliziumkristalle dabei um bis zu 400 % aus, was in der Konsequenz bislang zu sehr geringen Zyklenlebensdauern führt.

Als Elektrolyte werden organische Lösungsmittel mit Lithium-Leitsalzen eingesetzt. Aufgrund des hohen Potenzials von modernen Lithium-Ionen-Batterien im Bereich von 4 V müssen die Elektrolyten wasserfrei sein, da das Wasser andernfalls unmittelbar in Wasserstoff- und Sauerstoffgas zersetzt werden würde. Die Reinheit der Elektrolyte ist ein wichtiger Kostenfaktor.

Die Separatoren sind ebenfalls ein wichtiger Kostenfaktor und liefern durch ihre Eigenschaften einen zentralen Beitrag zur Sicherheit der Zellen. So wird bspw. ein keramischer Separator (Separion®) angeboten, der auch bei höheren Temperaturen



**Abb. 6.61** Auswahl von populären Materialkombinationen für Lithium-Ionen-Batterien, die heute gefertigt oder entwickelt werden

nicht schmilzt. Dadurch führt ein punktueller Kurzschluss, wie er bspw. durch einen Dendriten erzeugt werden kann, nicht zu einem lawinenartigen Ausbreiten der Kurzschlussregion durch den schmelzenden Separator.

Für die Kathode (positive Elektrode) werden Lithium-Metall-Oxide oder Metall-Phosphate verwendet. Die grundsätzliche Auswahl an Materialien ist groß. Diese unterscheiden sich in ihrer Energiedichte und ihrem Potenzial, aber auch ganz wesentlich in den elektrischen Eigenschaften, der Lebensdauer und den Sicherheitsaspekten.  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiNiO}_2$  und  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ -Spinell stellen derzeit die wichtigsten Materialien dar.  $\text{LiCoO}_2$  ist lange das bevorzugte Material für Lithium-Ionen-Batterien im Konsumerbereich gewesen. Aufgrund der hohen Kobalt-Kosten wird jedoch versucht, andere Materialien einzusetzen. So werden heute verstärkt Mischmaterialien verwendet, bei denen bspw. jeweils ein Drittel der verschiedenen Metalloxide gemischt wird ( $\text{LiCo}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ ).

Großes Interesse zieht auch  $\text{LiFePO}_4$  auf sich. Bei etwas geringerer Energiedichte durch eine tiefere Spannungslage weist das Material eine deutlich höhere Sicherheit auf. Es zersetzt sich nicht unter Wärme- und Sauerstofffreisetzung. Zudem sind die Rohmaterialien günstiger als die oben aufgeführten Materialien.  $\text{LiFePO}_4$  hat eine sehr schlechte elektrische Leitfähigkeit, daher müssen die  $\text{LiFePO}_4$ -Kristalle mit einer Kohlenstoffhülle umgeben werden („coating“), die die elektrische Leitfähigkeit verbessert und den Einsatz in Hochleistungsbatterien ermöglicht.

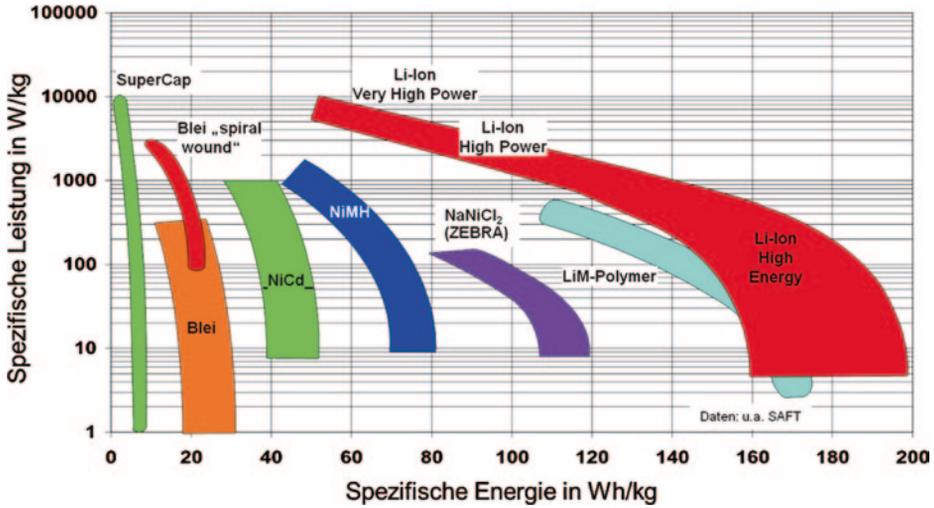
Lithium-Ionen-Batterien verfügen in den heute verwendeten Materialkombinationen nicht über einen definierten Überlademechanismus, der bei Überladung Strom aufnehmen könnte, ohne dabei die Batterie zu schädigen. Dies führt zwar zu einem sehr hohen Coulomb'schen Wirkungsgrad von nahezu 1, andererseits führt eine Überladung in der Regel zu irreversiblen Reaktionen, die eine direkte Alterung auslösen und im Extremfall ein Sicherheitsrisiko sind.

Die vorstehenden Betrachtungen zeigen, dass es viele verschiedene Materialkombinationen gibt, die eingesetzt und erforscht werden. Die Eigenschaften in den Bereichen elektrische Leistungsfähigkeit, Lebensdauer und Sicherheit hängen erheblich von der genauen Materialkombination und der Elektrolytzusammensetzung ab, über die der private Batteriekunde anhand der Angaben des Herstellers kaum Auskunft bekommt. Daher lassen sich allgemeine Aussagen über die vorgenannten Eigenschaften nur begrenzt machen. Andererseits ist ein sehr spezifisches Design der Zellen aufgrund der jeweiligen Anforderungen in den Anwendungen möglich. Daher ist die Analyse der Kundenwünsche zentral, um diese Spezifikationen dann in der Entwicklung zu verfolgen.

### *Elektrische Leistungsfähigkeit*

Lithium-Ionen-Batterien werden aktuell in zwei Hauptproduktlinien entwickelt und angeboten: Hochenergie-Batterien für den Elektrofahrzeugmarkt und Hochleistungsbatterien für Hybridfahrzeuge (s. Abb. 6.62 und 6.63).

Während für Hybridfahrzeuge eine hohe Leistungsdichte im Vordergrund steht (angeboten werden Zellen für eine Lade-/Entladebelastung im Bereich von 20–30 C, also 200–300 A für eine 10-Ah-Zelle), benötigen Elektrofahrzeuge hohe Energiedichten.



**Abb. 6.62** Spezifische Leistung und spezifische Energie für verschiedene Speicher-technologien (Quelle Ragone-Plot: Saft) und Angabe von verschiedenen kommerziellen Lithium-Ionen-Zellen (Leistungsdaten aus Datenblättern oder eigenen Messungen)

	Hochenergiezellen	Hochleistungszellen
Leistungsdichte (25 °C)	200–400 W/kg	2.000–000 W/kg
Energiedichte	120–200 Wh/kg	70–100 Wh/kg
Wirkungsgrad	~ 95 %	~ 90 %
Selbstentladung	< 5 %/Monat (25 °C)	< 5 %/Monat (25 °C)
Lebensdauer	1.500–5.000 äquivalente Vollzyklen (spezielle Zellen auch mehr)	bis 1.000.000 $\mu$ -Zyklen (ca. 3–5 % DOD)

**Abb. 6.63** Vergleich der elektrischen Eigenschaften von Hochenergie- und Hochleistungs-batteriezellen

Die Strombelastbarkeit liegt hier nicht über 3 C. Entsprechend unterscheiden sich die Energiedichten. Hochleistungsbatterien haben auf die Zelle bezogen Energiedichten von 80–100 Wh/kg, Hochenergiebatterien etwa 150–180 Wh/kg (s. Abb. 6.62). Die volumenspezifische Energiedichte liegt etwa 2,5-mal höher. Der Unterschied betrifft vor allem die Dicken der Elektrodenmaterialien. Für die Hochleistungsbatterien werden sehr dünne Aktivmassen eingesetzt, damit steigt aber der relative Anteil an Metallfolien für die Stromableitung und von Separatoren bzw. Elektrolyt pro Aktivmassenvolumen. Für die Hochleistungszellen ist also ein viel höherer Materialeinsatz notwendig, was sich bei den Kosten bemerkbar macht.

Auch bei großen Stromraten kann ein sehr hoher Anteil der bei kleinen Strömen verfügbaren Kapazität genutzt werden. Damit eignen sich Lithium-Batterien sehr gut für Hochstrombelastungen, wie sie bspw. auch in PowerTools oder unterbrechungsfreien Stromversorgungen auftreten.

Wirkungsgrade liegen infolge des geringen Innenwiderstands und der hohen Zellspannung von 3,3–3,7 Volt für die Standardmaterialien bei 90–95 % und damit im Verhältnis zu anderen Batterie- und Energiespeichertechnologien sehr hoch. Die Leistungsdaten fallen bei Temperaturen unterhalb von 0 °C zunächst leicht und dann sehr deutlich ab. Bei –30 °C kann man von weniger als einem Zehntel der Leistung, die bei +20 °C erzielt wird, ausgehen.

Die Aufladung von Lithium-Ionen-Batterien wird mit Konstantstrom/Konstantspannungsladeverfahren durchgeführt. Durch den sehr hohen Coulomb'schen Wirkungsgrad (nahezu 100 %) sinkt der Strom während der Konstantspannungsladung auf nahezu 0 ab. Die Ladung kann als beendet angesehen werden, wenn der Ladestrom bspw. unter 1 % des Stroms zu Beginn der Ladung fällt. Wichtig ist allerdings, dass die vom Hersteller für eine bestimmte Temperatur vorgegebene Spannung nicht überschritten wird. Dies gilt für jede einzelne Zelle. Auch kurzfristige Überschreitungen gelten für die Standardmaterialien als nicht tolerabel, denn es besteht das Risiko einer Überladung und damit eines gefährlichen Fehlerfalls der Zelle. Daher muss bei der Ladung von Batteriesträngen jede einzelne Zelle überwacht und das Ladegerät auf die höchste Zellspannung geregelt werden. Vom Ladegerät wird eine hohe Zuverlässigkeit verlangt, um sicherzustellen, dass die Spannungslimits stets eingehalten werden. Typische Ladespannungen liegen heute für die Standardmaterialien bei 4,0–4,2 V/Zelle. Die Spannungslage von  $\text{LiFePO}_4$  ist etwa ein halbes Volt geringer.

Die Stromstärken bei einem Ladevorgang liegen je nach Zelltyp meist zwischen 1 und 10 C, in Ausnahmefällen auch höher. Wichtig ist, darauf zu achten, dass die Zellen nicht überhitzen. Somit kommt dem Kühlsystem bzw. der Kühlstrategie eine große Bedeutung zu, dies bestimmt auch die maximale Laderate. Die maximale Temperatur wird in der Regel am Ende des Entladevorgangs erreicht.

Bei der Entladung sind Spannungen unterhalb des von Herstellern angegebenen Spannungswertes ebenfalls zu vermeiden. Allerdings führt eine kurzfristige Unterschreitung in der Regel nicht direkt zu einem Sicherheitsproblem, beschleunigt aber die Alterung erheblich und kann indirekt ein Sicherheitsproblem verursachen.

### *Zelldesigns*

Aktuell werden drei verschiedene Zelldesigns entwickelt und hergestellt (s. Abb. 6.64). Für die Rundzellen werden die Elektroden und die Separatoren von Endlosrollen aufgewickelt und in ein zylindrisches Gehäuse eingebracht. Viele wiederaufladbare Batterien, aber auch Supercaps werden so gefertigt. Bei den Flachzellen werden die Elektroden aufgeschichtet und in einer Folie verschweißt (vgl. Kap. 6.3.2). In prismatischen Zellen sind sowohl oval gewickelte Zellstacks als auch geschichtete Designs bekannt.

Der Vorteil der Rundzellen liegt in der großen Erfahrung mit dem Produktionsprozess. Das Gehäuse ist dicht und hält 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



**Abb. 6.64** Prismatisches Zelldesign, Flachzelle und Rundzelle

kommen. Flachzellen haben ein besseres Verhältnis Oberflächen-Volumen und erlauben effizientere Kühlkonzepte. Auf der anderen Seite sind die langfristige Dichtigkeit und Aufblähungen bei Druckaufbau mögliche Probleme. Langfristig könnten die Flachzellen geringere Produktionskosten und etwas höhere Energiedichten erreichen, da die Folien leichter als die Gehäuse der Rundzellen sind. Die prismatische Zelle vereint Eigenschaften der beiden anderen Zelltypen und ist aufgrund der hohen Packungsdichte bei gleichzeitig höherer Biegesteifigkeit als die Flachzellen interessant. Derzeit werden in der Automobilindustrie alle drei Zellbauformen untersucht und in den ersten Serienfahrzeugen eingesetzt.

#### *Kosten und Verfügbarkeit*

Die Kosten für Lithium-Ionen-Zellen sind heute noch sehr hoch und liegen für Qualitäts-Hochleistungszellen, die für den Einsatz im Kraftfahrzeug infrage kommen, noch in der Größenordnung von 1.000 Euro/kWh. Durch Massenfertigung sind erhebliche Economy-of-scale-Effekte zu erwarten, und es wird heute schon von Preisen um 550 Euro/kWh für Qualitätsprodukte mit Produktionsstart in 2013 berichtet. Es steht nicht fest, ob dies kostendeckende oder Markteinführungspreise sind.

Die Abschätzung der Preise für das Ende des Jahrzehnts basieren auf der Betrachtung der Rohmaterialkosten, der Auswertung der Kostenreduktion bei den Lithium-Ionen-Batterien für portable Anwendungen in den letzten 20 Jahren seit Markteinführung und der Marktbeobachtung des Billigmarktsegments, bspw. aus China. Daraus lässt sich abschätzen, dass Batteriezellen zu Preisen um etwa 200 Euro/kWh und damit Batteriepackkosten von unter 300 erreichbar sind. Dafür ist aber eine Produktion in sehr großem Umfang und mit vollautomatisierten Fertigungsanlagen notwendig, die eine gleichbleibende Qualität bei sehr geringem Ausschuss ermöglicht.

Für Hochleistungsbatterien ist wesentlich mehr Material pro Kapazität notwendig, da mit dünneren Elektroden gearbeitet wird und die Elektrodenfolien aus Kupfer und

Aluminium sowie die Separatorfläche und die Elektrolytmenge relativ zur Kapazität deutlich ansteigen. Für Hybridfahrzeuge werden daher die Kosten rund 50 % höher liegen. Dies gilt auch für Batterien in Elektrofahrzeugen, die sehr hohe Ladeleistungen aufnehmen sollen, wie es bei echten Schnellladungen im Bereich einiger Minuten notwendig ist.

Kontrovers diskutiert wird die Frage der Reichweite von Lithium bei einer stark steigenden Nachfrage durch den Verkehrssektor. Die aktuelle Jahresproduktion von Lithium liegt bei rund 25.000 Tonnen. Geht man von einem Lithiumbedarf von 200 g pro kWh aus (konservative Abschätzung), werden für eine 10-kWh-Batterie rund 2 kg Lithium benötigt. Bei einer geschätzten Verfügbarkeit von etwa 6 Mio. Tonnen Lithium würden sich daraus nach der obigen Abschätzung bei Vernachlässigung anderer Anwendungsbereiche rund 3 Mrd. Elektrofahrzeuge mit jeweils einer Kapazität von 10 kWh (ausreichend für 50–70 km elektrische Reichweite je nach Fahrzeug) ergeben. Dies ist zunächst eine ausreichend große Menge, bedeutet aber auch, dass mittelfristig ein effizientes Recyclingsystem etabliert werden muss, das die Rückgewinnung von Lithium vorsieht, und weitere Vorkommen erschlossen werden sollten. Es ist auch zu beachten, dass sich die Lithium-Vorkommen auf relativ wenige Länder mit einem Schwerpunkt in Südamerika verteilen. Es muss also frühzeitig Planungssicherheit für die Betreiber der Lithium-Minen hergestellt werden, um die Produktionskapazitäten rechtzeitig erweitern zu können und Preisspitzen beim Lithium zu vermeiden.

#### *Weitere Entwicklungstendenzen*

Lithium-Ionen-Batterien stellen die wichtigste Technologie für die Elektrifizierung von Kraftfahrzeugen dar. Die Potenziale dieser Technologie sind die Grundlage des aktuellen Optimismus für die Einführung von Elektrofahrzeugen. Die große Zahl von Materialkombinationen, die eingesetzt werden, und die große Zahl von Herstellern weltweit führen zu einem Wettbewerb der Anbieter. Daher ist auch in den kommenden Jahren mit einer dynamischen Weiterentwicklung sowohl in Bezug auf technische Verbesserungen als auch Kostensenkungen zu rechnen.

Leistungs- und Energiedaten sind bereits heute so gut, dass die Einführung in den Fahrzeugmarkt beginnen kann. Entscheidend für den Markterfolg werden die im Feld erzielten Lebensdauern einerseits und die Kosten bei der Volumenproduktion andererseits sein. Die Sicherheit wird durch neue Materialien für die Elektroden (bspw.  $\text{LiFePO}_4$ ) oder Separatoren (bspw. keramischer Separator Separion®) sowie optimierte Batteriemagementsysteme, zu denen auch das thermische Management gehört, kontinuierlich verbessert.

Für die Hersteller der Zellen besteht die Herausforderung in der Reduktion der Kosten und in der Produktion einer gleichbleibenden Qualität der Zellen. Die Kapazitäten für die Gewinnung von Lithium als Rohmaterial müssen erheblich ausgebaut und gleichzeitig die Recyclingprozesse weiter entwickelt und etabliert werden, die eine Rückführung des Lithiums in den Produktionskreislauf ermöglichen. Realistische Alternativen zur Lithium-Ionen-Technologie gibt es für einen Massenmarkt von Elektrofahrzeugen in den kommenden Jahren kaum.

Die wichtigsten Entwicklungsziele in den nächsten Jahren, die eine schnelle Markteinführung ermöglichen sollen, werden sein:

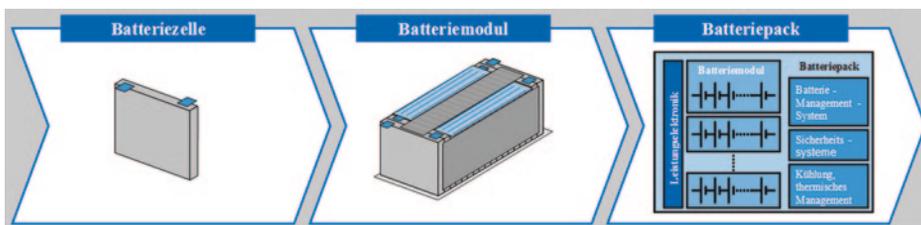
- Maximierung der Sicherheit und Zuverlässigkeit
- Reduktion der Kosten durch Materialauswahl und Economy of scale
- Minimierung der Qualitätsschwankungen in der Zellproduktion
- Erhöhung des nutzbaren Kapazitätsbereichs bei hoher Lebensdauer
- Optimierung der Systemtechnik (insbesondere Kosten)
- Erhöhung der Energiedichte

Gerade die Gleichmäßigkeit in der Qualität der Zellfertigung ist bei Lithium-Ionen-Batterien zentral. Während in allen anderen bekannten Batterietechnologien das Verhalten der einzelnen Zellen kaum beachtet wird, muss die Leistung in einer Lithium-Ionen-Batterie immer auf die schlechteste Zelle in einem Serienverbund reduziert werden. Daraus ergibt sich die besondere Verantwortung der Fertigungs- und Prozessqualität.

### 6.3.2 Produktionsverfahren Batteriezellen und -systeme

Speichersysteme im Elektromobilbereich basieren aufgrund ihrer hohen Energiedichte vorwiegend auf Lithium-Ionen-Zellen. Diese werden, wie Abb. 6.65 zu entnehmen ist, zu Batteriemodulen zusammengefügt und anschließend zu einem Batteriepack assembliert.

Die Anzahl der Batteriemodule, die zusammen mit dem Batterie-Management-System, dem Kühlsystem, dem Thermo-Management und der Leistungselektronik zu einem Batteriepack montiert werden, hängt vom Verwendungszweck ab. In den meisten Fällen wird eine Anzahl von fünf Batteriemodulen nicht überschritten. Bei den verwendeten Zellenformen wird zwischen drei Bauformen unterschieden: Rundzelle, prismatische Zelle und Flachzelle. Aufgrund des vergleichsweise geringen Gewichts, der Flexibilität in der Formgebung und der guten Kühleigenschaften finden Flachzellen im Bereich der Elektromobilität verstärkt Verwendung.



**Abb. 6.65** Von der Zelle zum Batteriepack

### 6.3.2.1 Herstellungsprozess der Batteriezelle

Im Folgenden wird der Herstellungsprozess der Batteriezelle, vornehmlich der Flachzelle, näher betrachtet.

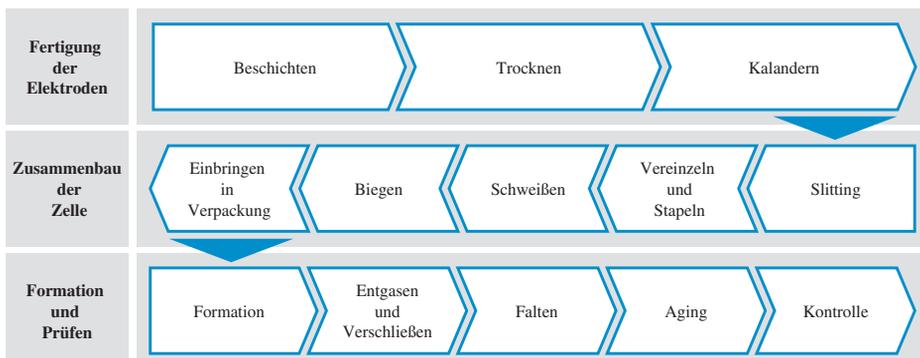
Abbildung 6.66 zeigt den Herstellungsprozess einer Flachzelle. Er gliedert sich in die drei Hauptprozessschritte Fertigung der Elektroden, Zusammenbau der Zelle sowie Formation und Prüfen.

Bei der *Fertigung der Elektroden* wird das Aktivmaterial der Anode und Kathode auf eine metallische Trägerfolie, die als Stromsammler dient, aufgetragen, getrocknet und auf die richtige Dicke gewalzt. Die beschichteten Elektrodenfolien werden daraufhin zu Zellstapeln weiterverarbeitet und in einer Aluminiumverbundfolie verpackt. Diese Arbeitsschritte sind unter *Zusammenbau der Zelle* zusammengefasst. Im letzten Abschnitt, *Formation und Prüfen*, wird die Zelle in mehreren Zyklen geladen, um ihre volle Leistungsfähigkeit zu erhalten. Abschließend werden die definierten Zelleigenschaften kontrolliert.

Im Folgenden werden die einzelnen Prozessschritte des Beschichtungsvorgangs analysiert. Sie finden komplett in evakuierten Räumlichkeiten statt, um ein Reagieren des Lithiums mit der Feuchtigkeit der Luft zu verhindern (Sauer 2010).

#### Beschichten

Während des Beschichtungsprozesses wird die Beschichtungsmasse, die aus dem Aktivmaterial, einem elektronischen Leiter, Bindemittel sowie einer Vielzahl von Additiven besteht, auf die Kupferfolie der Anode und auf die Aluminiumfolie der Kathode aufgetragen. Die Metallfolien dienen dabei als Elektrodengrundlage und Stromsammler. Dem Binder kommt die Aufgabe zu, die Elektrodenstruktur zusammenzuhalten und für ausreichend Haftung der Masse an der Kupfer- und Aluminiumfolie zu sorgen. Additive hingegen erhöhen bspw. die Leitfähigkeit. Diese Komponenten werden zusammen mit einem Lösungsmittel in einem Mischer gleichmäßig zu einer Paste vermischt. Das Lösungsmittel übernimmt die Aufgabe, alle Komponenten zu lösen und die rheologischen Eigenschaften so zu beeinflussen, dass es möglich ist, die Beschichtungspaste auf die Metallfolie aufzutragen (Nazri 2009; Sauer 2010; Ceder 1998).



**Abb. 6.66** Herstellungsprozess einer Flachzelle

Die Kapazität einer Flachzelle wird weitestgehend durch die Schichtdicke des Aktivmaterials auf der Trägerfolie bestimmt. Bei Hochenergiezellen finden Elektroden mit einer Gesamtdicke in der Größenordnung von 200  $\mu\text{m}$  Verwendung. Dabei entfallen ungefähr 10 – 15  $\mu\text{m}$  auf die zugrunde liegende Folie und der Rest auf die Dicke der Beschichtungspaste (Sauer 2010).

Beim Beschichten wird eine Beschichtungsmasse, die pastenartig oder fast flüssig sein kann, mithilfe unterschiedlichster Auftragsverfahren auf das Substrat appliziert. Im Folgenden werden drei Verfahren näher betrachtet: der Rakel, die Schlitzdüse sowie die Rasterwalze.

Bei dem *Rakel* handelt es sich um ein selbstdosierendes Verfahren. Der Beschichtungsvorgang findet mithilfe eines scharfen Streichmessers (Rakel/Doctor Blade) statt, das als Abstreifvorrichtung der Beschichtungsmasse dient. Der Rakel ist an dem sog. Rakelbalken orthogonal zur Bewegungsrichtung des Substrats angebracht. Die Beschichtung entsteht durch den Spalt zwischen Warenbahn und Rakel. Die Bahnbreite der aufzubringenden Beschichtungsmasse wird durch Seitenbegrenzer bestimmt. Diese können in Fällen niedrig viskoser Beschichtungsmaterialien zu einem geschlossenen Pastenbecken ergänzt werden. Die verwendeten Rakeln sind keilförmig und hinterschnitten, damit sich keine Paste an der Rückseite des Rakels sammelt und ein Schichtabriss verhindert wird (Groover 2010; Gries 2007).

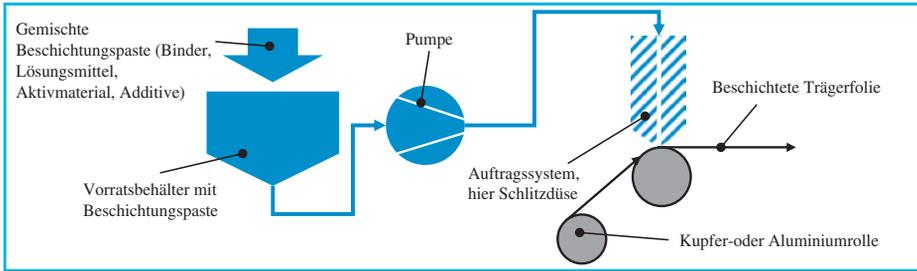
Das *Schlitzdüsenverfahren* ist ein geschlossenes, vordosiertes Beschichtungsverfahren. Dies hat u. a. den Vorteil, dass das Fluid vor Verunreinigungen aus der Umgebung geschützt ist und das stetige Verdunsten des Lösungsmittels verhindert wird. Prinzipiell wird die Düse aus zwei gegeneinander montierten Platten, die in ihrem Innern eine beliebig komplexe Düsenkammer formen, gebildet.

Beim Substratbeschichten durch Schlitzdüsen sind zwei Methoden zu unterscheiden. Zum einen kommt das Curtain Coating (Vorhanggießen) zum Einsatz, zum anderen das Bead Coating (Schlitzbeschichtung). Beide Methoden greifen auf dieselbe Art von Schlitzdüse zurück. Der Unterschied besteht in der Entfernung der Düse zur Warenbahn. Befindet sich die Düse kurz oberhalb des Substrats, handelt es sich um den „Bead Coating Mode“. Ist die Düse in gewissem Abstand zum Substrat positioniert, ist dies charakteristisch für den „Curtain Coating Mode“ (Schweizer 2000) (Abb. 6.67).

Bei *Walzenauftragssystemen* erfolgt der Beschichtungsvorgang in direktem Kontakt zum Substrat. Die in einem Vorratsbehälter lagernde Beschichtungspaste wird durch die Rasterwalze aufgenommen. Anschließend wird mit einem Abstreifmesser die überschüssige Pastenmasse von der Walze entfernt, sodass nur die Vertiefungen der Rasterung gefüllt sind. Die Rasterwalze wiederum rollt auf einer zweiten Walze ab und trägt so die Beschichtung direkt auf das Substrat auf (Wicks 2007).

### *Trocknen*

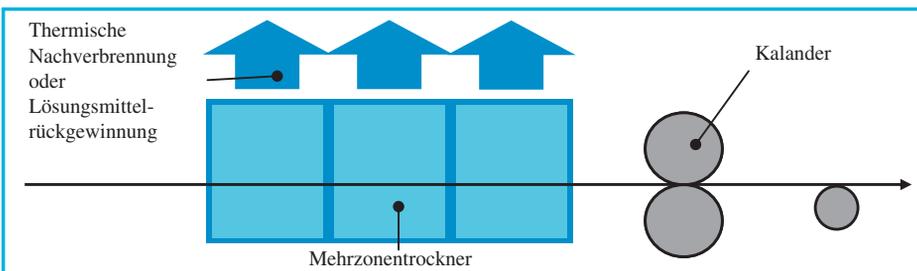
Die im vorherigen Arbeitsgang hergestellte Beschichtung muss für kommende Prozessschritte getrocknet werden. Die Bedingungen des Trocknungsprozesses nehmen großen Einfluss auf die Struktur und die Eigenschaften der Elektroden (Wypych 2001).



**Abb. 6.67** Beschichtungsvorgang

Aufgabe des Trocknungsprozesses ist es, die in der Beschichtung vorhandenen Lösungsmittel zu entfernen und die Beschichtung selbst zu trocknen. Darüber hinaus stellt die Trocknung den letzten Prozess dar, in dem die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Beschichtung beeinflussbar sind. Die Energie für das Verdampfen des Lösungsmittels und das Trocknen der Beschichtungsmasse kann auf unterschiedliche Weise bereitgestellt werden (Abb. 6.68).

Die *Konvektionstrocknung* wird in der Praxis am häufigsten angewendet, da mit heißer Luft nicht nur ein Gut getrocknet, sondern auch im selben Arbeitsgang die entweichenden Lösungsmittel abtransportiert werden können. Es ist kein zusätzlicher Luftstrom für den Abtransport erforderlich. Bei vielen Konvektionstrocknern wird der Luftstrom zur Trocknung ständig im Kreis geführt. Nach dem Überströmen des Trocknungsguts wird ein Teil der mit Lösungsmittel beladenen Luft durch Frischluft ausgetauscht und erneut zugeführt. Das heißt: Ein Teil des Umluftstroms wird entfernt (Abluft) und durch einen Zuluftstrom (Frischluft) ersetzt. Oft wird der Schwebetrockner verwendet und das Trocknungsgut durch Luftpolster in der Horizontalen schwebend getrocknet. Ferner gibt es Rollenbahntrockner, bei welchen der Transport der Warenbahn durch den Trockner nicht schwebend, sondern kontaktbehaftet auf Rollen stattfindet und währenddessen von beiden Seiten durch Luftstrahlen getrocknet wird. Die austretenden Lösungsmitteldämpfe werden entweder durch eine thermische Nachverbrennung entfernt oder durch eine Lösungsmittelrückgewinnung zurückgewonnen (Meuthen 2005; Guttoff 2006; Kröll 1978).



**Abb. 6.68** Trocknungsvorgang

### *Kalandern*

Ein Kalandern (franz.: calandre = Rolle) ist ein System von zwei übereinander positionierten Walzen, die temperiert werden können. Sie werden genutzt, um die Elektroden nach der Trocknung auf die richtige Dicke und Dichte zu walzen. Die sukzessive Reduzierung der Dicke durch das Hintereinanderschalten mehrerer Walzen bietet ein hohes Maß an Kontrolle (s. Abb. 6.70, Kalandern) (Schalkwijk 2002).

Die Dicke der einzelnen Elektrodenschichten hängt von der benötigten Kapazität der Batterie ab. Durch das Kalandern ist es möglich, auf eine signifikante Kennzahl der Lithium-Ionen-Batteriezelle einzuwirken, ohne die restlichen Parameter des Produktionsprozesses zu verändern. Dies ermöglicht bei einem sonst gleichbleibenden Batterieherstellungsprozess eine Vielzahl von Leistungsvariationen (Nazri 2009).

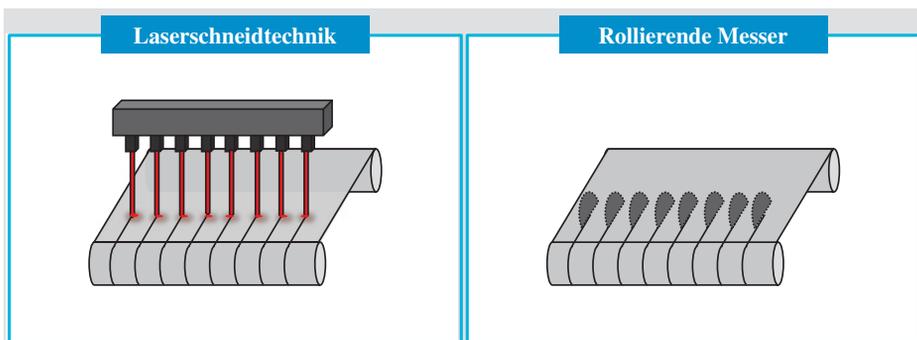
Kalandern für die Batterieelektroden verfügen über Liniendrucke von 40–60 Tonnen, wobei die Spaltverstellung motorisch mit  $\mu$ -Genauigkeit erfolgt (Eschenbruecher 2010).

### *Slitting*

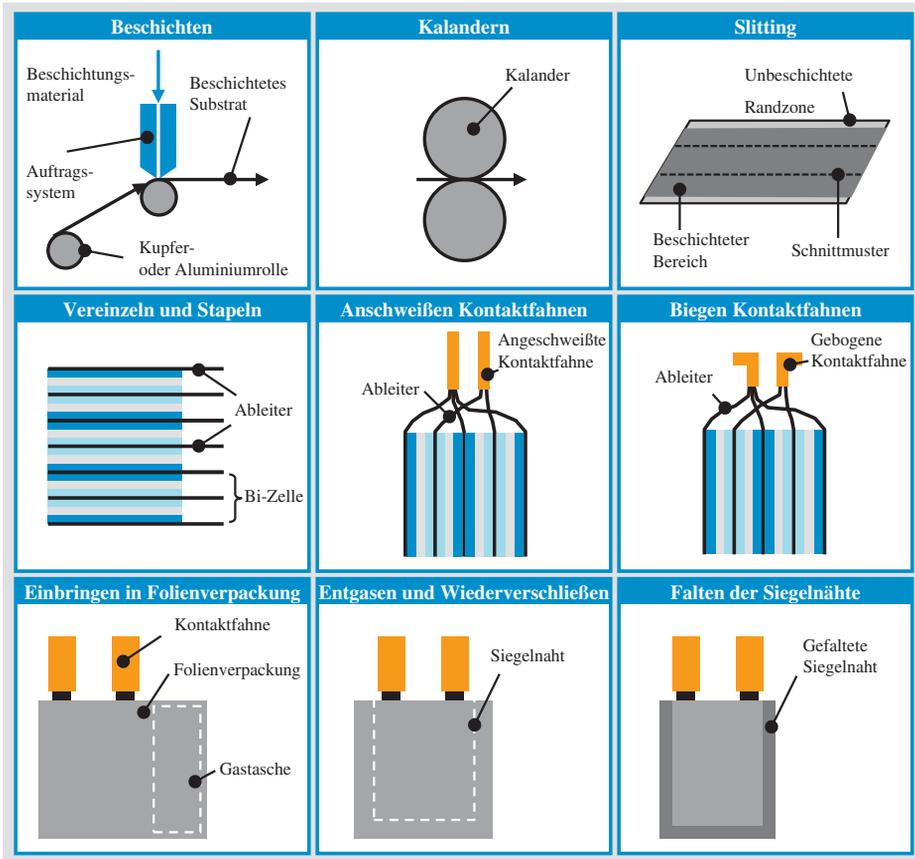
Im Prozessschritt Slitting werden die getrockneten und verdichteten Elektrodenfolien zu schmaleren Bahnen geschnitten. Die Folie wird dazu von der Rolle abgewickelt und durch die Slittingmaschine geführt. Diese schneidet die Bahn parallel zu ihrer Bewegungsrichtung. Zum Einsatz kommen Rollenmesser oder Laserschneidtechnik (siehe Abb. 6.69). Anschließend werden die schmaleren Bahnen wieder aufgewickelt. Dabei muss beachtet werden, dass der eventuell entstandene Grat entfernt wird. Dieser könnte ansonsten den Separator, welcher nur eine Dicke von ca. 30  $\mu\text{m}$  aufweist, durchstechen. Der Separator würde dadurch teilweise durchlässig für Elektroden, was zu inneren Kurzschlüssen führen kann.

### *Vereinzeln und Stapeln der Bi-Zellen*

Dem optionalen Slittingprozess schließt sich die Vereinzeln an. Die Bahnen werden auf die finale Form zugeschnitten. Auch dieser Vorgang wird mit klassischen Schneidverfahren (Keilschnitt oder Stanzen) oder Lasertechnik durchgeführt. Die vereinzelt Sheets werden im Folgenden gestapelt (siehe Abb. 6.67,



**Abb. 6.69** Alternative Slittingverfahren



**Abb. 6.70** Entwicklungsstadien zur Flachzelle

Vereinzeln und Stapeln). Dieser Schritt ist komplex und wird durch Roboter- und Automatisierungstechnik erledigt. Je nach Oberfläche und geforderter Zellenkapazität kann der Stapel aus mehr als 150 Einzelschichten bestehen. Eine exemplarische Stapelabfolge von Bi-Zellen ist in Abb. 6.67 skizziert.

Nach der Prüfung der Höhe der Bi-Zellen-Stapel erfolgt das Ablängen der Stromableiter auf eine festgelegte Länge. Dieser Vorgang wird mittels Laserzuscchnitt oder Stanzen durchgeführt. Ableiter ist der überstehende Teil einer jeden Elektrode, der im nächsten Schritt mit den anderen Ableitern zu einem Minus- und einem Pluspol der Flachzelle zusammengeführt wird.

#### *Schweißen der Kontaktfahnen*

Das Schweißen der Kontaktfahnen (auch Stromableiterfahnen) als Fertigungsschritt hat die Aufgabe, die Ableiter der gestapelten und laminierten Bi-Zellen mit den beiden

Kontaktflächen, die jeweils ca. 0,5 mm dick sind, zu verbinden und dabei zu schalten (s. Abb. 6.70, Anschweißen Kontaktflächen). Die Länge der als Zungen ausgebildeten Kontaktflächen ist so bemessen, dass sie ungefähr einem Drittel der Zellkantenlänge entspricht. Die Wahl des Schweißverfahrens ist relevant, da die Ableiter extrem dünn und temperaturempfindlich sind. Außerdem bietet nicht jedes Verfahren die nötige Präzision. Prinzipiell sind das Widerstandsschweißen, das Plasmaschweißen, das Ultraschallschweißen und das Laserstrahlverfahren einsetzbar. In der Praxis werden zumeist die beiden letztgenannten Verfahren angewendet.

#### *Biegen der Kontaktflächen*

Abhängig von der weiteren Nutzung der Flachzelle ist es u. a. notwendig, dass die angeschweißten Kontaktflächen umgebogen werden (bspw. bei Verschaltung in einem Batteriemodul).

Der Abstand der Kontaktflächen der hintereinander angeordneten Zellen zu den beiden Anschlusspolen des Batteriemoduls kann so groß sein, dass es zu einer starken Biegebelastung der Kontaktflächen kommt. Abhilfe schafft hier die horizontale Vorverformung (Biegen) der Stromableiterflächen, sodass ein Aufschieben einer Sammelschiene über alle Kontaktflächen und somit die ganzheitliche Kontaktierung realisierbar ist (s. Abb. 6.70, Biegen Kontaktflächen) (Schutzrecht EP 0 766 327 B1 1999).

#### *Einbringen der Elektrodenstapel in Folienverpackung*

Nachdem die Bearbeitung der Bi-Zellen abgeschlossen ist, folgen das Einbringen der Bi-Zellen-Stapel in die Verpackung, die Elektrolytbefüllung und das Siegeln (s. Abb. 6.70, Einbringen in Folienverpackung). Damit schließen sich die Fertigungsschritte an, die aus einem Stapel von Bi-Zellen einen Rohling der Folienzelle machen. An das exakte Siegeln und Einbringen in eine inline hergestellte Verpackung sind große Voraussetzungen hinsichtlich der ablaufenden Prozesse geknüpft, um eine einwandfreie Funktion der Batterie zu garantieren. Kleinste Abweichungen in den Einstellparametern können zu eklatanten Sicherheitsmängeln und zur Zerstörung der Batterie führen. Wichtig sind hier die absolute Dichtigkeit der Verpackung sowie die genaue Positionierung der Bi-Zellen in der Verpackung, um Kurzschlüsse an den Kontaktflächen bei Berührung der Aluminiumverbundfolie zu vermeiden. Für die Fertigung der Folienverpackung gibt es verschiedene Methoden. Die Elektroden können in einen separat tiefgezogenen Deckel- und Bodenteil eingefügt werden. Oder sie werden in den tiefgezogenen Bodenteil eingelegt und dann der Deckel aufgefaltet. Bei dem dritten Verfahren wird der Elektrodenstapel in einen aus einer Folienbahn kontinuierlich hergestellten Beutel gefügt. Jeder dieser Methoden zur Herstellung der Verpackung folgen dieselben weiterführenden Bearbeitungsschritte. Die genaue Abfolge kann in Einzelfällen abweichen. Nach dem Einbringen in die Verpackung folgt das Siegeln dreier Seiten des Batteriebeckens. Durch die vierte, offene Seite wird dann das Elektrolyt eingefüllt und die Seite durch einen Siegelvorgang geschlossen (Harro Höfliger 2010, 2009).

### *Formation*

Bei der Formation wird die Flachzelle zum ersten Mal geladen und erhält so ihre Leistungseigenschaften. Der Formation kommt aus zwei Gründen besondere Beachtung zu: Erstens bildet sich bei den ersten Ladezyklen die Solid-Electrolyte-Interface-(SEI-) Schicht auf den Anodenfolien, die dafür zuständig ist, dass die Anode während des Betriebs nicht mit dem Elektrolyt reagiert. Außerdem hat sie als eine Art Hülle um die Anodenfolien eine stabilisierende Funktion. Zweitens wird durch die Formation guter Kontakt zwischen dem Elektrolyt und dem Aktivmaterial hergestellt. Der erste Ladezyklus beginnt bei einer geringen Stromstärke, damit die SEI-Schicht sich auf dem Graphit der Anoden sukzessiv formen kann. Die Ausbildung einer SEI-Schicht ist unvermeidbar und erst nach mehreren Ladezyklen vollständig abgeschlossen. Die Anzahl der aufeinanderfolgenden Ladezyklen – während dieser Zyklen wird die Stromstärke kontinuierlich gesteigert – hängt vom jeweiligen Hersteller ab (Schalkwijk 2002).

### *Entgasen und Wiederverschließen*

Während der Formation entsteht Gas im Inneren der Batteriezelle, das über die nur teilweise gesiegelte Verbindung in die angrenzende und dafür vorgesehene Gastasche übertritt. Bei diesem Vorgang wird die Gastasche gefüllt. Ist der Formationsprozess vollständig abgeschlossen, wird die Gastasche angestochen und das Gas kann in die Umgebung entweichen. Die teilgesiegelte Naht zwischen der Zelle und der Gastasche wird dann endgültig geschlossen. Dieser letzte Siegelvorgang hat in einer Vakuum-Siegeleinheit stattzufinden, in der die Batteriezelle vakuumiert und unter Schutzatmosphäre fertig gesiegelt wird. Das Siegeln unter Vakuum führt dazu, dass sich die laminierten Schichten nicht so einfach wieder voneinander lösen können. Bewegungen der Flachzelle innerhalb der Verpackung werden unterbunden und die Flachzelle wird durch den Unterdruck versteift. Die jetzt leere Gastasche wird im nächsten Schritt abgetrennt und entsorgt (s. Abb. 6.70, Entgasen und Wiederverschließen) (Schalkwijk 2002).

### *Falten der Siegelnähte*

Zum Schutz der Zelle vor dem Eindringen von Feuchtigkeit über den gesamten Lebenszyklus ist es wichtig, dass die Siegelnähte rund um die Batteriezelle nicht zu klein dimensioniert sind. Umso breiter die Arbeitsfläche beim Siegelvorgang gehalten ist, desto besser ist die Verbindung zwischen der Ober- und Unterseite der Folienverpackung ausgeprägt. Folglich ist ein größeres Maß an Dichtigkeit gegenüber dem Eindringen von Luft oder Wasser garantiert. In der Praxis sind Nahtbreiten von 1 cm keine Seltenheit. Mit zunehmender Nahtbreite nimmt die Projektionsfläche zu und gleichzeitig die volumenbezogene Energiedichte pro Zelle ab. Somit besteht eine Trade-Off-Beziehung zwischen volumenbezogener Energiedichte und der Zuverlässigkeit der Batterie. Um trotz gut dimensionierter Siegelnähte nicht ungenutztes Batterievolumen zu verschenken, werden die Nähte der Verpackung nach innen gefaltet (s. Abb. 6.70, Falten der Siegelnähte). Dies wirkt der Trade-Off-Beziehung entgegen.

### *Aging*

Dem Aufladeprozess folgt eine Messung der Zellspannung und der Kapazität. Während der Zellalterung (engl.: Aging) lagern die Zellen zwischen zwei Wochen und einem Monat in einem dafür vorgesehenen temperierten Raum. Danach findet eine erneute Messung der Zellspannung statt. Die Werte werden miteinander verglichen, um Batteriezellen mit signifikanten Abweichungen gegenüber dem Durchschnittswert auszusortieren. Diese Zellen können kleine interne Kurzschlüsse aufweisen, die die Ursache für die geringere Kapazität bzw. Zellspannung sind.

### *Kontrolle*

Bevor die Flachzellen weiter in Batteriemodulen Verwendung finden, durchläuft jede Zelle die Endkontrolle. Zudem werden die Flachzellen gereinigt und mit einer Seriennummer versehen. Diese ermöglicht später Rückschlüsse auf das Herstellungsdatum, die verbauten Zellkomponenten sowie die gemessene Zellspannung und Kapazität. Zum Schluss werden die Flachzellen nach ihren Leistungsdaten sortiert, um bei der Assemblierung der Batteriemodule Batteriezellen zu verwenden, die dieselben Leistungseigenschaften besitzen.

## **6.3.2.2 Assemblierung des Batteriemoduls**

Nachdem die Flachzellen hinsichtlich ihrer Leistungsdaten sortiert sind, werden sie in der Folge zu einem Batteriemodul zusammengesetzt. Der Assemblierungsvorgang ist Abb. 6.71 zu entnehmen.

Wichtig bei der Auswahl der Zellen ist, dass die verwendeten Zellen dieselben Leistungsdaten haben. Ist dies nicht der Fall und es gibt signifikante Unterschiede, hat dies negative Auswirkungen auf das gesamte Modulverhalten. Die Gesamtleistung des Batteriemoduls orientiert sich, bedingt durch die Verschaltung der Zellen, an den Leistungseigenschaften der schwächsten Zelle.

Zunächst werden die ausgewählten Zellen in einen Rahmen vormontiert, d. h. hintereinander aufgereiht und befestigt. Die Kontaktfahnen der Zellen werden daraufhin kontaktiert, sodass die Zellen über eine Parallel- oder Reihenschaltung miteinander verbunden sind (Abb. 6.72).

Bei der Anbindung der Kontakte an die Stromleiterschiene sind derzeit gängige Verbindungsmethoden das Schweißen oder Verschrauben. Dem guten Handling bei der Montage und der schnellen Austauschbarkeit der Zellen bei Schraubverbindungen steht die geringe Vibrationsbeständigkeit gegenüber. Dauerhafte Schweißverbindungen



**Abb. 6.71** Montageprozess des Batteriemoduls



**Abb. 6.72** Entwicklung bei der Assemblierung des Batteriemoduls



**Abb. 6.73** Montageprozess des Batteriepacks

verfügen hier klar über Vorteile. Darüber hinaus ist der Stromfluss weitaus besser als bei einer geschraubten Verbindung. Auf das vormontierte Batteriemodul wird nun die Cell-Supervision-Circuit-(CSC-)Platine in Verbindung mit Kühlplatten aufgebracht. Der CSC überwacht die Zellen und sorgt dafür, dass ein optimales Zusammenspiel zwischen den einzelnen Zellen gewährleistet ist. Darüber hinaus gleicht er die Ladezustände der Batteriezellen aneinander an. Der fertiggestellte Rahmen wird in das Gehäuse eingebracht und das Batteriemodul einer abschließenden Kontrolle unterzogen.

### 6.3.2.3 Assemblierung des Batteriepacks

Der letzte Schritt zum fertigen Batteriepack ist die Montage der geprüften Batteriemodule mit den peripheren elektronischen Komponenten (Abb. 6.73).

Dabei werden die Batteriemodule in das Batteriegehäuse eingesetzt. Anschließend werden die Kontaktschienen montiert. Diese verbinden die einzelnen Module des Batteriepacks. Im Weiteren werden die Batteriemodule fest im Gehäuse verschraubt. Zusätzlich zu den Batteriemodulen werden das Battery-Management-System (BMS) und die Leistungselektronik eingebaut. Das BMS stellt den Kontakt zwischen der Batterie und anderen Komponenten des Fahrzeugs her. Weitere Funktionen des BMS sind bspw. die Messungen und Regelung von Temperatur, Ladezustand und Spannung. Abschließend wird das Batteriepack mit einem Hoch-Volt-Anschluss versehen, eine End-of-Line-(EOL-)Prüfung durchgeführt, abgedichtet und vollständig geladen.

## 6.4 Thermomanagement

Dirk Müller und Björn Flieger

Die flächendeckend erfolgreiche Elektrifizierung im Automobilmarkt wird in hohem Maß von der Integration der für die Fahrzeugnutzer gewohnten Bestandteile eines Fahrzeugs mit gewöhnlichem Verbrennungsmotor abhängen. Dazu gehören neben den verschiedenen Fahrassistenzsystemen vor allem Komponenten für Unterhaltungsmedien und

die Gewährleistung thermischer Behaglichkeit im Innenraum. Daraus ergeben sich Herausforderungen für das Energie- und Thermomanagement zukünftiger Automobile, die nur mithilfe interdisziplinärer Ansätze und Maßnahmen konsequenter Innovation gemeistert werden können.

## **6.4.1 Herausforderung Thermomanagement im Fahrzeug**

### **6.4.1.1 Energiemanagement**

Hocheffiziente Antriebe von Elektrofahrzeugen bieten für das Energiemanagement große Möglichkeiten als auch Herausforderungen. Die bei der Verwendung von Verbrennungsmotoren üblicherweise genutzte Energie für das Heizsystem eines Fahrzeugs wird als Abfallprodukt des Antriebs gewonnen. Somit bedeutet eine Nutzung der Abwärme eine Steigerung der Gesamteffizienz im Sinne des Energiemanagements. Dieses Prinzip kann für Wirkungsgrade des Antriebs von jenseits der 90 % so nicht mehr angewendet werden. Die Möglichkeiten einer Verschiebung von Wärmemengen innerhalb eines Systems aus Erzeugung und Nutzung der bereitgestellten Energie eines Fahrzeugs werden sich damit grundlegend ändern.

Bei der Auslegung des Thermomanagements von Elektrofahrzeugen müssen nicht nur neue Wege der Bereitstellung von Wärme- und Kälteenergie für die Klimatisierung des Innenraums gefunden werden. Auch die Batterien stellen komplexe Anforderungen für die Be- und Entladezyklen, die möglichst gewinnbringend in das Energiesystem integriert werden müssen. Die verschiedenen Erzeuger und Verbraucher von thermischer Energie können entsprechend gekoppelt und über ein effizientes Zusammenspiel der Wärmeströme im Sinne einer Gesamteffizienz genutzt werden (Abb. 6.74).

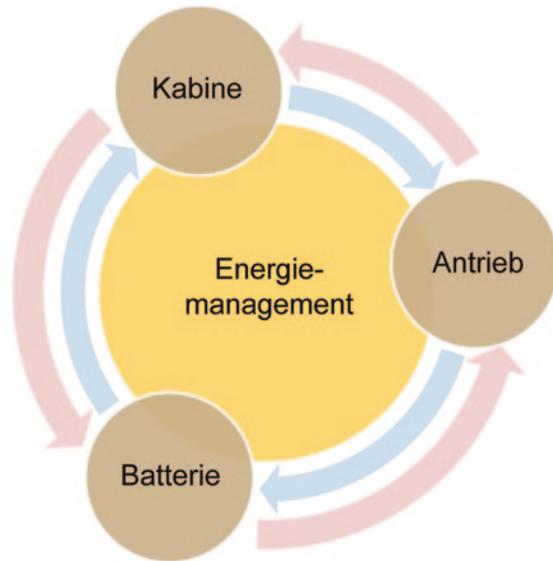
Die aktuell verfügbaren Speicher elektrischer Energie für Elektrofahrzeuge wie z. B. beim Chevy Volt haben mit ihren stark begrenzten Batteriekapazitäten nur bedingt Möglichkeiten zur Innenraumklimatisierung. Eine direkte Nutzung elektrischer Energie zur Erzeugung von Wärme kann nicht die Zukunft der Elektromobilität sein. Stattdessen sind sog. LowEx-Systeme, wie sie im Gebäudesektor bereits etabliert sind, interessant. Hier können verschiedene Konzepte zur Erzeugung, für den Transport und die Übergabe von Wärme- und Kälteenergie auch auf ein Fahrzeug übertragen werden. Neben den aktiven Komponenten der Heizung, Kühlung und Lüftung können auch passive Systeme angewendet werden.

Die Fahrzeugkabine besitzt hier großes Entwicklungspotenzial und kann in ihren thermischen Eigenschaften stark verbessert werden. Sicherlich wird ein klassischer außenliegender Sonnenschutz auch im zukünftigen Design von Elektrofahrzeugen keine Rolle spielen, trotzdem können die zugrunde liegenden Mechanismen auch im Fahrzeugsektor genutzt werden.

### **6.4.1.2 Komfort/Sicherheit**

Der Mensch verbringt rund 90 % seiner Zeit in Innenräumen. Neben Gebäuden zählen dazu Kabinen in Flugzeugen, Bahnen oder Kraftfahrzeugen. Die in der menschlichen Wahrnehmung maßgeblichen Kriterien für die Zufriedenheit mit der Umgebung sind die thermische Behaglichkeit und die Luftqualität. Sie können direkt durch eine

**Abb. 6.74** Interaktion von Komponenten im globalen Energiemanagement



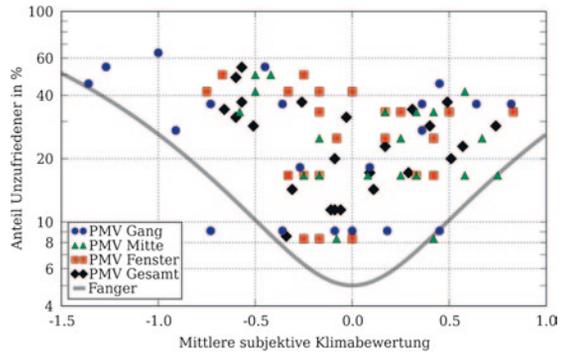
Klimaanlage beeinflusst werden. Die zwei dominierenden Faktoren der thermischen Behaglichkeit sind die Lufttemperatur sowie die Temperatur der Umschließungsflächen. Die sich nahezu aus dem arithmetischen Mittel ergebene Empfindungstemperatur ist insbesondere bei inhomogenen Umgebungsbedingungen relevant. Die Fahrzeugkabine stellt hier vor allem im Winter hohe Anforderungen an die Heiztechnik. Eine einfache Berechnung des PMV (Predicted mean vote = Vorhersage des Empfindens) oder des PPD (Predicted percentage of dissatisfied = Vorhersage des Anteils unzufriedener Personen) (Fanger 1970) ist hier nicht zielführend.

Abbildung 6.75 zeigt das Ergebnis von Probandenversuchen innerhalb einer Flugzeugkabine für verschiedene Sitzpositionen. Ermittelt wurde der Anteil der mit den Klimabedingungen unzufriedenen Personen (PD) und das thermische Empfinden (MV) der Personen auf einer Skala von heiß (+3) bis kalt (−3). Die Verteilung der Aussagen zeigt eine starke Abweichung von dem durch Fanger eingeführten Zusammenhang aus PMV und PPD (Fanger 1970). Zur Vorhersage der thermischen Behaglichkeit in einer Kabinenumgebung sind komplexe Modelle notwendig. Damit lassen sich für einzelne Körperteile das lokale thermische Empfinden und mit entsprechenden Wichtungsfunktionen eine globale Vorhersage des thermischen Komforts berechnen.

Die thermische Behaglichkeit und die Luftqualität stehen in direktem Zusammenhang mit der Leistungsfähigkeit von Personen. Dies wurde in zahlreichen Untersuchungen nachgewiesen (Wargoeki et al. 2000; Bako-Biro 2004).

Während die Konzentrationsfähigkeit für Passagiere eine untergeordnete Rolle spielt, muss sie für die Fahrzeugführer unbedingt gewährleistet sein. Demnach ist neben den üblichen Komponenten der aktiven und passiven Sicherheit die Bereitstellung von thermischer Behaglichkeit in Verbindung mit einer guten Luftqualität auch für den Fahrer

**Abb. 6.75** Ergebnis einer Probandenbefragung zum PD und MV für verschiedene Positionen in einer Flugzeugkabine und der nach Fanger berechnete Verlauf zum Zusammenhang von PMV und PPD



eines Automobils von großer Bedeutung. Diese erhöht maßgeblich die Konzentrations- und Leistungsfähigkeit sowie die Reaktionsschnelligkeit im Straßenverkehr. Eine energetische Betrachtung von Klimatisierungskonzepten darf also nicht nur auf die Effizienz beschränkt werden.

### 6.4.1.3 Reichweite

In der breiten Diskussion über die erfolgreiche Elektrifizierung des Automobilmarktes steht die Reichweite der Fahrzeuge im Mittelpunkt. Die von Herstellerseite angegebenen maximalen Reichweiten werden nur ohne Zuschaltung von Stromverbrauchern unter optimalen Betriebsbedingungen für das Gesamtsystem erreicht. Dagegen kann ein Fahrzyklus in Temperaturbereichen unterhalb von 0 °C und bei Zuschaltung von Stromverbrauchern bis zu einer Halbierung der Reichweite führen (TÜV Süd 2010).

Reichweite unter Komfort- und Sicherheitsaspekten kann nicht diskutiert werden ohne Nebenaggregate. Denn die Diskrepanzen der Verbrauchswerte, die von den Herstellern angegeben werden, und denjenigen, die unter realistischen Randbedingungen ermittelt wurden, ist bei Elektrofahrzeugen deutlich höher als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Daher ist es notwendig, angepasste Fahrzyklen zu entwickeln. Unter Berücksichtigung realistischer Randbedingungen werden sich intelligente Lösungen für das Zusammenspiel aus passiven und aktiven Techniken zur Bereitstellung von Sicherheit und Komfort der Passagiere durchsetzen.

## 6.4.2 Systembetrachtung zum Thermomanagement

### 6.4.2.1 Bedarfsprofil Mitteleuropa

Zur Berechnung eines Heiz- und Kühlbedarfs bei Gebäuden ist die Einordnung des Standorts mit seinen klimatischen Bedingungen die Voraussetzung zur Ermittlung der thermischen Randbedingung. Daraus ergeben sich die Bedarfsprofile für die Kühl- und Heizlast eines Gebäudes. Ähnliche Anforderungen lassen sich auch für Fahrzeuge ermitteln.

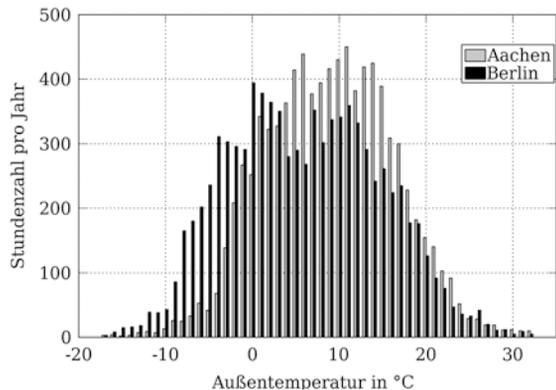
Die in der ECE R101 definierten Randbedingungen zur Ermittlung der elektrischen Reichweite beruhen nicht auf realitätsnahen Betriebsbedingungen. Bei Reichweitentests in geschlossenen Rollenprüfständen werden Umgebungstemperaturen zwischen 20 und 30 °C eingehalten.

Die in Abb. 6.76 dargestellte Häufigkeit der Außentemperatur in Stunden pro Jahr zeigt für die Städte Aachen und Berlin die tatsächlich zu erwartenden Randbedingungen für Fahrten mit einem Elektrofahrzeug. Die in Abb. 6.77 gezeigte entsprechende Summenhäufigkeit weist für mehr als 8.000 h/Jahr Temperaturen unterhalb der für die Reichweitenbestimmung verwendeten 20 °C auf. Für den Standort Berlin können für mehr als 50 % eines Jahres Temperaturen von unter 4 °C angenommen werden.

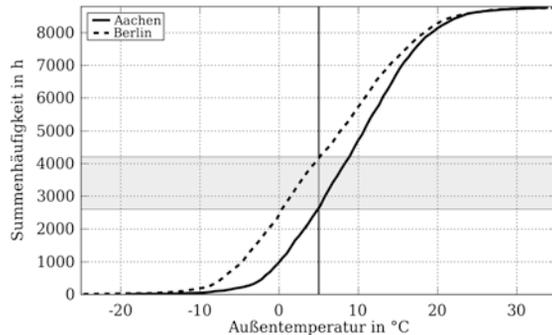
Mithilfe eines Simulationsmodells für einen Fahrzeuginnenraum kann für unterschiedliche Randbedingungen der Leistungsbedarf zur Beheizung einer Fahrzeugkabine berechnet werden. Für eine Außentemperatur von 4 °C ergibt sich selbst im stationären Betrieb ein Bedarf von ca. 3,6 kW Beheizung, sodass eine Lufttemperatur von 20 °C in der Kabine gehalten werden kann. Durch die kalten Oberflächen in der Kabine muss sogar davon ausgegangen werden, dass für eine empfundene Temperatur von 20 °C die Lufttemperatur deutlich erhöht werden muss. Für die Bereitstellung einer entsprechend empfundenen Temperatur kann ein deutlich höherer Energiebedarf angenommen werden.

Für eine Reichweitenberechnung wird von einem Standardheizsystem (Luftheizung) mit elektrischer Direktheizung ausgegangen. Die damit einhergehende Reduzierung der Reichweite beträgt rund 25–30 %. Diese Berechnung beinhaltet lediglich den tatsächlichen Bedarf zur Deckung der Heizlast. Unter Berücksichtigung von Verlusten im Transportnetz sowie bei der Lüftungseffektivität (Kurzschlussströmungen) sind Reichweitenreduzierungen von bis zu 40 % anzunehmen. Darüber hinaus können weitere Einbußen in der Leistungsfähigkeit der Batterie angenommen werden.

**Abb. 6.76** Häufigkeit der Außentemperatur in Stunden pro Jahr laut Testreferenzjahr des Deutschen Wetterdienstes für die Städte Aachen und Berlin



**Abb. 6.77** Summenhäufigkeit der Außentemperatur laut Testreferenzjahr des Deutschen Wetterdienstes für Aachen und Berlin



### 6.4.2.2 Reduzierung des Energiebedarfs

Zur Reduzierung des Energiebedarfs einer Fahrzeugklimatisierung können im Bereich der passiven Maßnahmen, wie bspw. Wärmedämmung und Fensterscheiben, und im Bereich der aktiven Elemente, wie bspw. der Luftführung und der Wärmerückgewinnung, große Potenziale identifiziert werden.

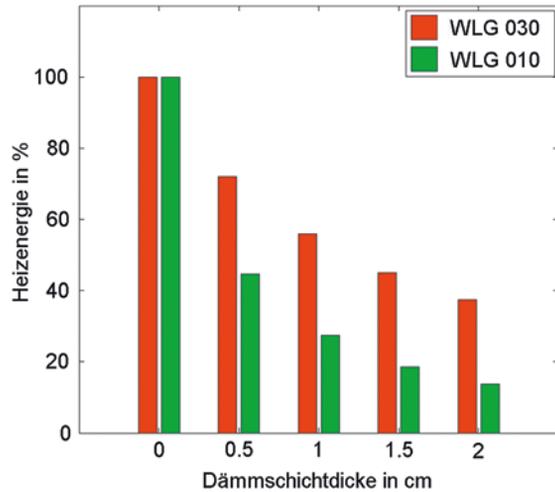
#### *Dämmung*

Die Ausstattung aktueller Fahrzeuge mit Dämmungsmaterialien richtet sich hauptsächlich gegen auftretende Geräuschemissionen. Neben der Geräuschbelastung kann durch eine geeignete Ausführung von Dämmverbundsystemen auch eine Verbesserung der thermischen Behaglichkeit erreicht werden. Die speziellen sicherheitstechnischen Anforderungen an die Fahrzeugkarosserie erfordern geeignete Methoden zur Vermeidung von Wärmebrücken.

Im Bereich der Karosserie können zur Reduzierung von Transmissionswärmeverlusten neue Dämmungskonzepte eingesetzt werden. Nicht transparente Bauteile werden dann mit leichten und kompakten Vakuumdämmplatten ausgestattet. Die eingesetzte Technologie benötigt als Basis angemessene Maßnahmen zum Schutz der Isolationsschicht, um bei leichten Beschädigungen der tragenden Konstruktionen die Leistungsfähigkeit zu erhalten.

Abbildung 6.78 zeigt die mögliche Reduzierung des Heizwärmebedarfs durch das Aufbringen zusätzlicher Dämmschichten im Bereich nicht transparenter Bauteile für verschiedene Wärmeleitgruppen (WLG) und die entsprechenden Wärmeleitfähigkeiten von 0,03 W/mK bzw. 0,01 W/mK. Den Berechnungen liegen Bauteilkennwerte zugrunde, die in Messungen an einem Testfahrzeug (Mercedes C-Klasse W204, Bj. 2007) ermittelt wurden. Die Parameter werden innerhalb eines Simulationsmodells für einen Fahrzeuginnenraum zur Ermittlung des Heizwärmebedarfs variiert. Für die zwei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten von 0,03 W/m<sup>2</sup>K und 0,01 W/m<sup>2</sup>K ist der relative Heizwärmebedarf aufgetragen. Deutlich wird, dass schon eine Erweiterung der bestehenden Dämmung um 1–2 cm zu einer Halbierung des Heizwärmebedarfs führen kann. Bei der Verwendung von Vakuumdämmplatten lassen sich rund 80 %

**Abb. 6.78** Reduzierung des Heizbedarfs durch Verwendung zusätzlicher Dämmschichten im Bereich nicht transparenter Bauteile für verschiedene Wärmeleitgruppen (WLG) und die entsprechenden Wärmeleitfähigkeiten



der Heizenergie einsparen. Für eine gute Entkopplung des Innenraums von der Karosserie werden die Isolationspaneele als Innendämmung ausgeführt. In den üblicherweise kurzen Nutzungsphasen des Fahrzeugs kann somit ein unnötiges Aufheizen oder Abkühlen der umgebenen Massen vermieden werden. Aufgrund der geringeren Transmissionswärmeströme wird eine Aufheizung des Innenraums im Sommer bspw. durch eine Standlüftung mit einem kleinen Volumenstrom vermieden.

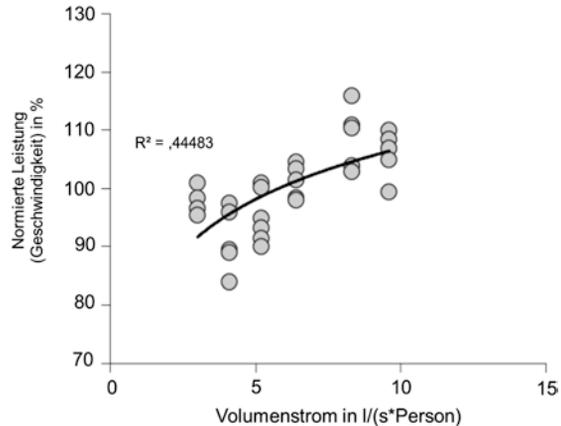
### *Fenster*

Die mit Abstand größten Transmissionswärmeverluste des vermessenen Testfahrzeugs weisen die transparenten Bauteile auf. Die Wärmedurchgangskoeffizienten der verwendeten Sicherheitsgläser entsprechen im Allgemeinen den Koeffizienten normaler Einfachverglasung. Aufgrund hoher Wärmeübergangskoeffizienten während der Fahrt ist vor allem für die Windschutzscheibe eine Verringerung der Wärmeleitfähigkeit erreichbar. Der Wärmedurchgang kann durch den Einsatz von Vakuumisolierverglasung mit selektiver Beschichtung stark reduziert werden. Der solare Eintrag wird drastisch herabgesetzt und der Heiz- und Kühlbedarf minimiert. Neben einer Anhebung der Fensteroberflächentemperatur können Beschichtungen der Gläser auch Kondensatbildungen verzögern bzw. verhindern und den dadurch notwendigen Frischluftanteil reduzieren. Dabei sind die besonderen Anforderungen an die optischen Eigenschaften der verwendeten Gläser und die damit verbundene Gewichtssteigerung zu berücksichtigen.

### *Lüftung*

Zur Reduzierung der Zuluftmenge kann die Frischluftmenge dem tatsächlichen Bedarf angepasst werden. Abbildung 6.79 zeigt die Ergebnisse einer von Wargocki und Wyon im Jahr 2006 durchgeführten Untersuchung zur Produktivität bzw. Leistungsfähigkeit von Probanden bei unterschiedlichen Außenluftvolumenströmen

**Abb. 6.79** Darstellung der normierten Leistung („Rechnen“, „Texte korrigieren“ und „Texte tippen“) in Abhängigkeit vom Außenluftvolumenstrom in Litern pro Sekunde und Person



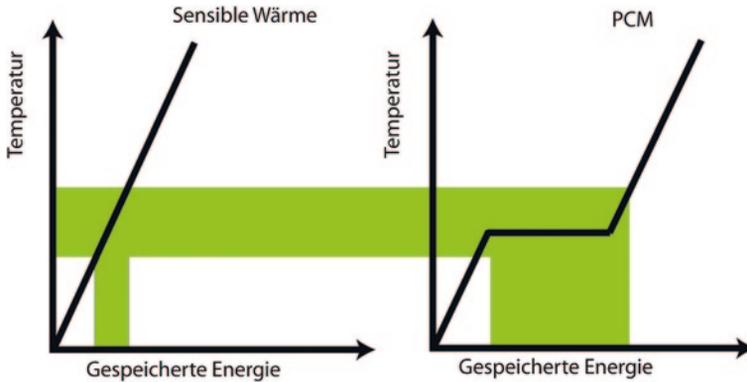
für Bürogebäude (Wargocki und Wyon 2006). Als Maß für die Leistungsfähigkeit wird die Geschwindigkeit beim Lösen einfacher Aufgaben im Bereich Rechnen, Texte korrigieren und Texte tippen verwendet. Für eine Außenluftströmung von 10 l/s\*Person wird eine optimale Leistungsfähigkeit der Probanden erreicht. Die bei aktuellen Luftheizsystemen auftretenden Volumenströme im Kraftfahrzeug betragen für gewöhnlich ein Vielfaches davon. Durch die Verwendung von flüssigen Energieträgern in Verbindung mit alternativen Wärmeübergabesystemen können die zu bewegenden Luftmengen drastisch reduziert werden, ohne die Luftqualität zu verschlechtern. Der Einsatz von effizienten Lüftungssystemen in Kombination mit hinreichend gedämmten Umschließungsflächen kann darüber hinaus eine Kondensatbildung im Inneren der Kabine verhindern.

### Speicher

Das typische Nutzungsprofil eines Pkw bietet große Potenziale für den Einsatz von Speichertechnologien. Die durchschnittlich kurze Nutzungsdauer im Tagesgang ermöglicht neben der Batterieladung auch eine thermische Speicherung von Energie während der Standzeiten. Dabei ist für zusätzlich benötigte Massen eine große spezifische Wärmekapazität notwendig. Für diese Anforderung weisen sog. Phasen-Wechsel-Materialien (Phase-Change-Material im folgenden PCM) im Bereich der angestrebten Innenraumtemperaturen große Vorzüge auf. Abbildung 6.80 zeigt das zugrunde liegende Verhalten von PCM.

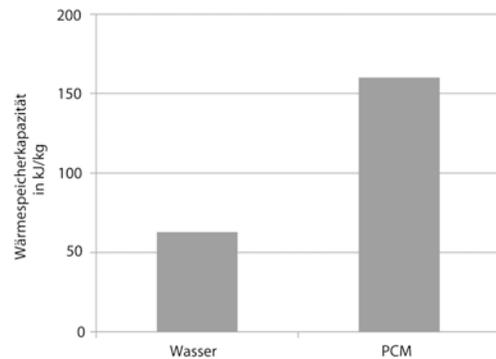
PCM weisen im für raumlufttechnische Anwendungen relevanten Temperaturbereich um 20 °C eine fast 3-mal so hohe Wärmespeicherkapazität auf wie Wasser (s. Abb. 6.81). Möglich wird dies durch die Nutzung latenter Wärmespeicherung. In einem schmalen Temperaturbereich von 4–5 K kann durch Schmelzen und Kristallisation eine große Energiemenge gespeichert werden.

Grundsätzlich können für PCM verschiedene Stoffe verwendet werden. Schmelztemperaturen von ungefähr 20–30 °C werden allerdings nur bei Paraffinen und Salzhydraten erreicht (s. Abb. 6.82). Die Stoffe unterscheiden sich in Wärmeleitfähigkeit,



**Abb. 6.80** Thermisches Verhalten von Phase-Change-Materials (PCM)

**Abb. 6.81** Vergleich der Wärmespeicherkapazität verschiedener Materialien bei einer Referenztemperatur von 20 °C und einer Temperaturdifferenz von 15 K

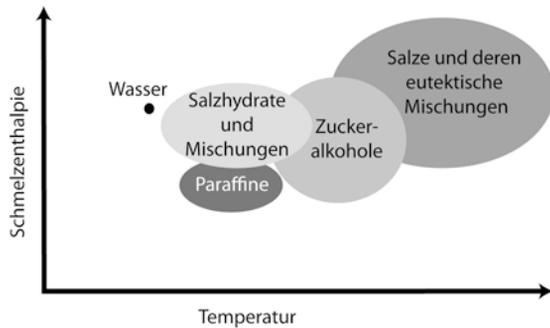


Dichte und Wärmekapazität. Die thermischen und chemischen Eigenschaften der Stoffe sind in Tab. 6.1 aufgeführt.

Für die Anwendung im Fahrzeug können in Kombination mit entsprechenden Dämmungssystemen Schichten des PCM auf den zur Verfügung stehenden Flächen aufgebracht werden. Das Material kann makroverkapselt installiert werden. Für die Flächennutzung ist eine Verknüpfung mit aktiven Heiz- und Kühlsystemen möglich. Während der Standzeiten wird das PCM verflüssigt oder verfestigt und kann während der Fahrt ohne weitere Hilfsenergie zur Raumklimatisierung beitragen. Verflüssigung und Verfestigung bilden in ihrem Verlauf eine Hysterese, d. h., Schmelz- und Erstarrungstemperatur sind nicht gleich. Für das Material kann aufgrund der Abhängigkeit von der Verkapselung und vom realisierten Wärmeübergang nur ein Schmelz- bzw. Erstarrungsbereich angegeben werden.

Neben der Flächenanwendung können PCM auch in konventionellen Speichergefäßen im Fahrzeug verwendet werden. Die latente Wärmespeicherung kann für die Batterie genutzt werden und gewährleistet die Leistungsfähigkeit der Batterie auch für längere Entladezeiten.

Sorptionsspeicher wie bspw. Zeolithe können ebenfalls zur Speicherung von thermischer Energie eingesetzt werden. Das Einspeichern der Wärme erfolgt in einer

**Abb. 6.82** Einsatzbereiche verschiedener PCMs**Tab. 6.1** Vergleich von Paraffinen und Salzhydraten

Eigenschaften	Paraffin	Salzhydrate
Thermische Eigenschaften		
Latente Wärmekapazität in kJ/kg	100–130	160–200
Wärmeleitfähigkeit in W/(mK)	0,3	0,6–0,8
Chemische Eigenschaften		
brennbar	ja	nein
korrosiv	nein	ja

endothermen, das Ausspeichern in einer exothermen Reaktion. Aufgrund ihrer Arbeitstemperaturen im Bereich bis 100 °C eignen sich neben Zeolithen auch Silicagele.

### Wärmerückgewinnung

Bei der Klimatisierung von Gebäuden wird seit Langem mit verschiedenen Formen der Wärmerückgewinnung gearbeitet. Diese Konzepte können auch für den Fahrzeugbereich verwendet werden. Ein Schwerpunkt liegt auf einer drastischen Gewichtsreduktion gegenüber konventionellen Ausführungen. Außerdem wird die Anpassung an die zur Verfügung stehenden Volumina über eine Steigerung der Effizienz möglich.

Hier können hocheffiziente Kunststoffwärmeübertrager eine Alternative zu konventionellen Komponenten aus Metall sein. Bei einer deutlichen Reduzierung des Gewichts können so Rückwärmehzahlen im Bereich herkömmlicher Wärmeübertrager aus Metall erzielt werden. Darüber hinaus bieten Kunststoffwärmeübertrager auch aus produktionstechnischer Sicht viele Vorteile.

Der Einsatz von Wärmerückgewinnungssystemen kann mit einer alternativen Anordnung der Komponenten für die Klimatisierung realisiert werden. Über ein hydraulisches Netz wird die Aufnahme von Energiemengen von der Abgabe entkoppelt.

Die beschriebenen Maßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs einer Fahrzeugklimatisierung können einzeln und in Kombination eingesetzt werden. Die Bewertung der Effektivität der zu installierenden Komponenten erfordert grundsätzlich eine Betrachtung des Gesamtsystems. Die Interaktion der verschiedenen Technologien

in den Bereichen Erzeugung, Transport und Übergabe von Wärme und Kälte muss in einem Energie- und Thermomanagement abgestimmt sein.

#### **6.4.2.3 Erzeugung von Wärme und Kälte**

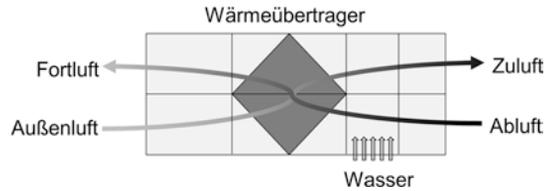
Für die Erzeugung von Wärme und Kälte können verschiedene Konzepte der Gebäudetechnik unter Berücksichtigung der komplexen Aufgabenstellung und Sicherheitsaspekte im Automobilbereich eingesetzt werden. Wie in der gängigen Praxis in der Gebäudetechnik werden zunehmend LowEx-Systeme den Weg in den Fahrzeugsektor finden.

Die derzeit verbreitet eingesetzte elektrische Direktheizung als reiner Lufterhitzer bietet aufgrund ihrer guten Regelbarkeit, ihres geringen Gewichts und der kompakten Bauform viele Vorteile. Darüber hinaus ist eine mögliche Anwendung als Flächenheizsystem in Kombination mit einem Lüftungssystem vorteilhaft, wenn die empfundene Temperatur für die Fahrzeuginsassen mit einer beheizten Fläche erhöht werden kann. Versuche haben gezeigt, dass der Einsatz von großflächigen Heizmatten unmittelbar unter der Oberfläche von Umschließungsflächen zu optimalen Ergebnissen führt (Wriske 2005). Die Verwendung der direkten Kontaktstellen zu einem Fahrzeuginsassen ist bereits Stand der Technik. Zudem werden vielfach Scheibenheizungen zur Unterstützung eines Enteisungsvorgangs eingesetzt. Eine Erhöhung der Temperatur der Fensteroberflächen stellt mit Blick auf etwaige Kondensatbildung einen zusätzlichen Vorteil dar. Durch den Einsatz von Heizdrahtgeflechten können bspw. auch der Himmel oder das Armaturenbrett als Heizflächen ausgestattet werden. Die niedrigen Spannungen stellen auch im Schadensfall kein Sicherheitsrisiko dar. Die gewünschte empfundene Temperatur in der Kabine kann mit hoher Regelgüte bei kurzen Ansprechzeiten erreicht werden. Der Einsatz der Direktheizung als Flächensystem ist dabei an einen hohen Dämmstandard und minimierte Lüftungswärmeverluste gebunden. Setzt man also eine hinreichende Dämmung der Umschließungsflächen inklusive der Fensterflächen voraus, kann die Direktheizung für den Betrieb im Fahrzeug auch energetisch eine sinnvolle Alternative darstellen.

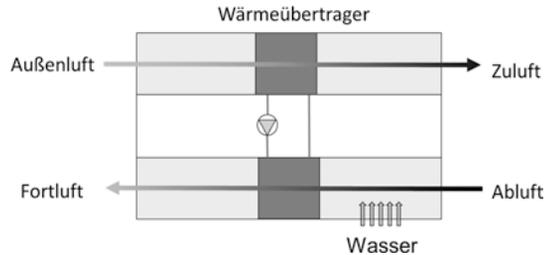
Großes Potenzial unter den derzeit verfügbaren Erzeugungskonzepten hat die Wärmepumpe. Weitreichende Erfahrungen in der Verwendung von Kompressionskältemaschinen können auf die Wärmeerzeugung für Elektrofahrzeuge übertragen werden. Die eingesetzten Systeme zeigen jedoch starke Abhängigkeiten von den Randbedingungen, sodass sich Leistungszahlen jenseits von 2,5 bei Luftwärmepumpen nur schwer erreichen lassen. Der zusätzliche Aufwand bei installierten Aggregaten bzw. Massen und der erforderlichen Regelung braucht aber vergleichsweise hohe Leistungszahlen. Eine Kombination mit thermischen Speichern erbringt hier eine Steigerung der Leistungsfähigkeit. Eine konstruktive Kombination von Kältemaschine und Wärmepumpe bietet deutliche Gewichtsersparnisse und Bauraumreduzierungen. Trotz des zusätzlichen Installationsbedarfs und des Regelungsaufwands können bei geeigneter Auswahl die System- und Wartungskosten deutlich reduziert werden.

Neben den aktiven Systemen zur Bereitstellung von Kälte können auch passive Maßnahmen mit geringem Leistungsbedarf im Fahrzeugsektor eingesetzt werden. Ein

**Abb. 6.83** Adiabate  
Kühlung mittels  
Kreuzstromwärmeübertrager



**Abb. 6.84** Adiabate Kühlung  
mit örtlich getrennten  
Wärmeübertragern für  
Ab- und Zuluft



passendes Verfahren ist die adiabate Kühlung. Bei der indirekten adiabaten Kühlung wird der Abluftvolumenstrom mittels Verdunstung von Wasser gekühlt. Über Wärmeübertrager kann die tatsächlich zu kühlende Frischluft geregelt werden.

Abbildung 6.83 zeigt ein System der adiabaten Kühlung mithilfe eines Kreuzstromwärmeübertragers. Im Heizfall ist das System als einfaches Wärmerückgewinnungssystem verwendbar. Der kompakten Bauweise steht die Notwendigkeit der örtlichen Zusammenlegung von Zu- und Abluftkanälen gegenüber.

Abbildung 6.84 zeigt eine weitere Form der adiabaten Kühlung, für die ausschließlich Wasser und die entsprechende Pumpenenergie für einen Wasserkreislauf der Wärmeübertrager bereitgestellt werden muss.

Die zusätzlichen Wärmeübertrager müssen im Gewicht sehr leicht ausgeführt sein und erlauben trotzdem hohe Wärmerückgewinnungsgrade. Zur Minimierung der notwendigen Masse können hier Kunststoffwärmeübertrager genutzt werden. Die gegenüber Metallen schlechtere Leitfähigkeit der Materialien kann durch eine optimierte Strömungsführung und einen für Kunststoffe abgestimmten Aufbau ausgeglichen werden. Die Druckfestigkeit der Materialien erfüllt ebenfalls die für die Anwendung gestellten Anforderungen. Die für das System notwendigen Wärmeübertrager sind im abgebildeten Schema (s. Abb. 6.84) getrennt ausgeführt und erlauben auch für die Positionen von Zu- und Abluftöffnungen eine örtliche Trennung. Aus diesem Grund wird eine zusätzliche Medienleitung notwendig, die in das Thermomanagementsystem des Fahrzeugs eingebunden sein muss.

#### 6.4.2.4 Verteilung und Transport

Die bereits vorgestellten Methoden zur Erzeugung von Wärme und Kälte ermöglichen verschiedene Formen des Energietransports zur Klimatisierung in Elektrofahrzeugen. Neben den üblicherweise verwendeten Luftsystemen bieten vor allem Wasser-Glykol-Systeme Vorteile.

Die Verwendung von Luft als Energieträger verbindet die zwei grundsätzlichen Aufgaben der Fahrzeugklimatisierung. Zum einen werden thermische Lasten

(Heiz- und Kühlfälle) abgeführt. Zum anderen wird eine notwendige Luftqualität hergestellt. Für die Abführung thermischer Lasten sind aufgrund der kleinen Energiedichte große Volumenströme notwendig. Die für eine ausreichende Luftqualität erforderlichen Frischluftmengen sind dagegen sehr klein. Durch geeignete Anpassungen des Umluftanteils kann die Menge der angestrebten Frischluft reduziert werden.

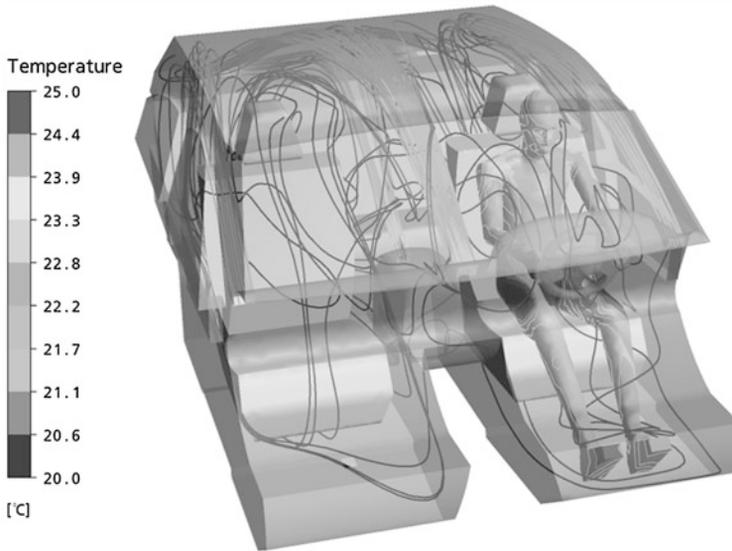
Eine dritte Aufgabe der Fahrzeugklimatisierung besteht in der Abführung von Wasserdampf. Die Reduzierung der Frischluftmenge funktioniert bei reinen Luftheizungssystemen nur begrenzt, da Kondensatbildung im Bereich der Fenster aus Sicherheitsgründen auszuschließen ist. Hier können die bereits dargestellten Maßnahmen zur Wärmedämmung eine mögliche Taupunktunterschreitung verhindern.

Gegenüber den reinen Luftsystemen bieten Wasser-Luft-Systeme einen wesentlichen Vorteil: die Entkopplung von thermischer Last und der benötigten Luftqualität. Darüber hinaus können Einsparungen bei der Ventilatorleistung erzielt werden. Die Abführung von Heiz- und Kühllasten kann auf der Basis von Wasserkreisläufen mit hoher Energiedichte realisiert werden. Die dabei möglichen Systeme der Wärme-/Kälteübergabe werden im folgenden Abschnitt diskutiert. Neben dem Medium Wasser können Medien mit erheblich gesteigerter Wärmekapazität wie z. B. PCM verwendet werden. Mithilfe von Dispersionen aus Wasser und PCM können die zu transportierenden Energiemengen erheblich gesteigert werden.

Neben der guten Regelgüte wasserbasierter Systeme können flüssige Medien ebenfalls andere Wärmequellen in einfacher Weise in ein globales Thermomanagement einbinden. Die derzeit verwendeten Batterien von Elektrofahrzeugen weisen in ihrer Leistungsfähigkeit eine starke Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur auf. Durch die Einbindung von Batterie und Antriebsstrang in einen Heiz- und Kühlkreis können die unterschiedlichen Temperaturniveaus der verschiedenen Komponenten innerhalb eines hydraulischen Netzes optimal genutzt werden. Das Hydrauliknetz selbst kann dabei entweder als Wasser-Glykol-Gemisch oder als Wasser-PCM-Glykol-Gemisch ausgeführt werden. Darüber hinaus können für die Batterie- und Innenraumtemperierung getrennte Kühlmittelkreisläufe integriert werden. Diese bieten ebenfalls die Möglichkeit einer Kopplung mit dem Antriebsstrang, insbesondere mit einem evtl. installierten Range-Extender.

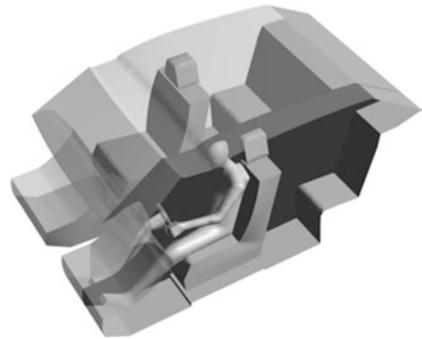
### 6.4.2.5 Übergabe

Gegenwärtige Lüftungskonzepte im Fahrzeugsektor arbeiten mit großen Luftvolumenströmen, die bei begrenzten Querschnitten der Zuluftdurchlässe zu hohen Geschwindigkeiten im Innenraum führen und ein erhöhtes Zugrisiko sein können. Außerdem treten starke Kurzschlussströmungen auf, wodurch sich trotz hoher Luftwechsel nicht die gewünschte Luftqualität einstellt. CFD-Berechnungen aktueller Lüftungskonzepte ergeben aufgrund großer Kurzschlussströme Luftaustauschwirkungsgrade von rund 40 %. Der Luftaustauschwirkungsgrad dient als Maß für die Effektivität eines Lüftungssystems und gibt das Verhältnis der theoretisch möglichen Zeit zur tatsächlich benötigten Zeit für den Luftaustausch in einem Raum an. Abbildung 6.85 zeigt Streichlinien des Strömungsfeldes



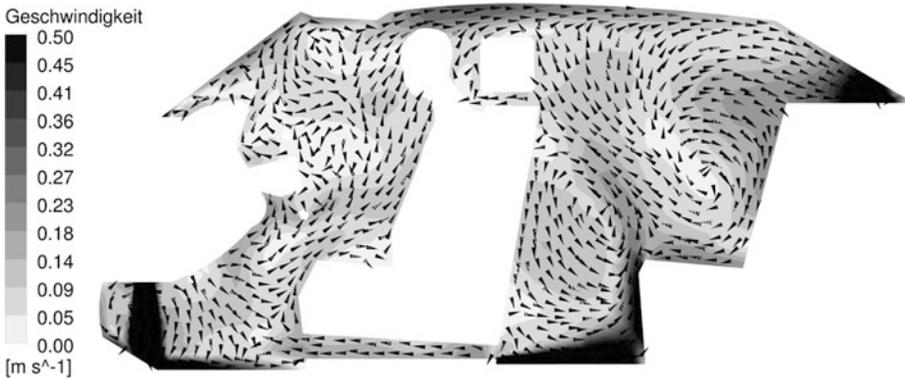
**Abb. 6.85** Simulation der Raumluftströmung in einer Fahrzeugkabine: Streichlinien beginnend an den oberen Zuluftdurchlässen

**Abb. 6.86** Ebene durch eine Fahrzeugkabine auf der Fahrerseite zur Analyse der Innenraumströmung

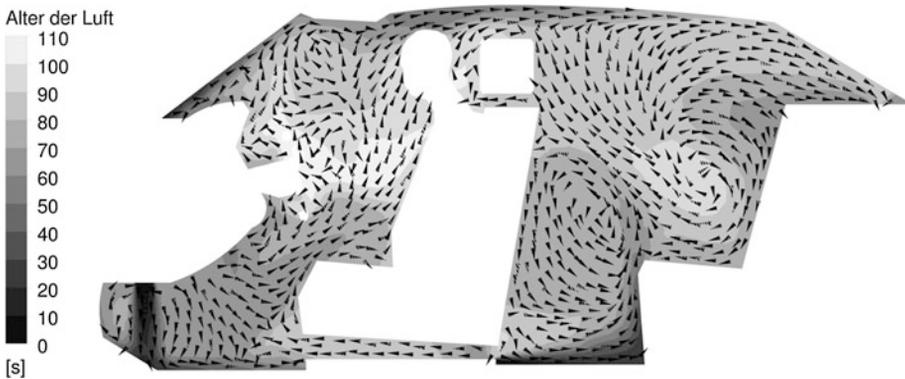


innerhalb der Kabine, beginnend an den Zuluftdurchlässen im oberen Bereich des Fahrzeuginnenraums. Ein Großteil der geförderten Luft wird entlang des Himmels zu den Abluftdurchlässen geführt und trägt nur ungenügend zum Austausch der Raumluft bei (Abb. 6.86).

Abbildung 6.87 zeigt einen Konturplot der Geschwindigkeit in einer Ebene (s. Abb. 6.87) innerhalb einer Fahrzeugkabine für einen Heizfall. Dabei wird ein großer Anteil warmer Luft im unteren Bereich der Kabine eingebracht. Abbildung 6.88 zeigt das lokale Alter der Luft für den betrachteten Fall. Es gibt das statistische Durchschnittsalter der Luft an einem Ort an. Vor allem der Bereich des Oberkörpers und des Kopfes des Fahrers erfährt eine unzureichende Zuführung von Frischluft.



**Abb. 6.87** Konturplot der Geschwindigkeit in einer Analyseebene auf der Fahrerseite einer Fahrzeugkabine



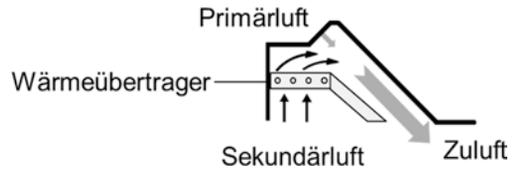
**Abb. 6.88** Konturplot des lokalen Alters der Luft in einer Analyseebene auf der Fahrerseite einer Fahrzeugkabine

Beim Einsatz einer aktiven Flächenkühlung können wasserdurchströmte Kapillarrohrmatten verwendet werden. Für den Einsatz der Flächenkühlung oder -heizung kommen der Cockpitbereich zwischen den A-Säulen und der Dachhimmel infrage.

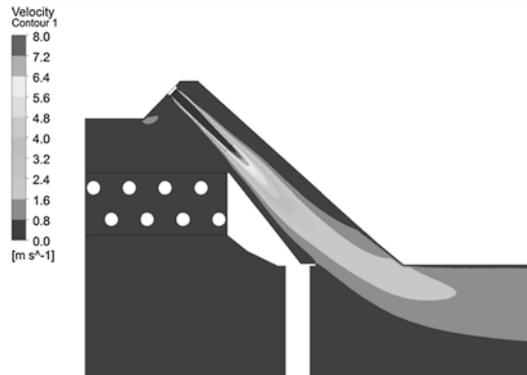
Die zur Verfügung stehenden großen Flächen ermöglichen das Arbeiten mit kleinen Temperaturdifferenzen gegenüber der Innenraumluft. Das niedrige Temperaturniveau des Vorlaufs stellt eine ideale Kombination für den Einsatz von Wärmepumpen dar. Die Leistungsfähigkeit solcher Niedrigexergiesysteme konnte im Gebäudesektor bereits erfolgreich nachgewiesen werden.

Neben den Flächensystemen können Induktionssysteme im Fahrzeug eingesetzt werden. Abbildung 6.89 zeigt eine schematische Darstellung eines solchen Gerätes. Im oberen Bereich wird über eine Reihe von Düsen ein Frischluftvolumenstrom, der dem hygienisch notwendigen Mindestzuluftvolumenstrom entsprechen kann, mit hoher

**Abb. 6.89** Schematische Darstellung eines Deckeninduktionsgerätes



**Abb. 6.90** Konturplot der Geschwindigkeit in einem Querschnitt durch einen Deckeninduktionsdurchlass



Geschwindigkeit in das Gerät eingebracht. Durch einen Induktionseffekt im Bereich der Freistrahlen wird Luft aus der Umgebung angesaugt. Diese kann durch geeignete Positionierung eines integrierten Wärmeübertragers geregelt werden.

Abbildung 6.90 zeigt das Ergebnis einer numerischen Strömungssimulation eines Deckeninduktionsdurchlasses. Dargestellt ist ein Konturplot der Geschwindigkeit im Querschnitt.

Das Gerät kann als sogenanntes Zwei- oder Vierrohr-Induktionsgerät mit Anschlüssen für einen oder zwei hydraulische Kreise ausgeführt werden. Dadurch kann die Luft mit dem Wärmeübertrager wahlweise gekühlt oder erwärmt werden.

Neben den hier vorgestellten Mischlüftungssystemen, durch die eine möglichst homogene Verteilung der Luft erzielt werden soll, können für die Fahrzeugklimatisierung auch Quelllüftungssysteme genutzt werden.

Grundlegendes Prinzip der Quelllüftung ist die impulsarme Einbringung der Luft im unteren Bereich eines Raums. In der Folge bildet sich eine Frischluftschicht aus. Sie steigt an vorhandenen Wärmequellen wie bspw. Personen auf und sorgt für eine bedarfsgerechte Versorgung.

Untersuchungen von Quellluftsystemen für Flugzeugkabinen mit ähnlichen Kühlleistungsdichten wie in Pkws zeigen positive Resultate (Schmidt et al. 2008). Das Zugluftrisiko für Personen kann durch sehr niedrige Einblasgeschwindigkeiten vermieden und die thermischen Lasten können effizient abgeführt werden. Ein solches Konzept lässt sich auf die Fahrzeugklimatisierung übertragen. Dafür müssen Abluftöffnungen im oberen Bereich der Kabine integriert werden, um die warme Luft

entsprechend der sich einstellenden Schichtung abzuführen. Die abgeführte Luft kann für eine Wärmerückgewinnung genutzt werden. In diesem Zusammenhang sind neben der Anlagentechnik auch neue Konzepte für die Geometrie und den Aufbau von Fahrzeuginnenräumen und die Umschließungsflächen erforderlich.

#### **6.4.2.6 Regelung**

Für die effiziente Nutzung der vorgestellten Systeme ist eine hohe Regelgüte erforderlich. Für die Innenraumklimatisierung eignen sich Regelkonzepte wie bspw. adaptive Regler. Die Möglichkeiten, die sich durch normale lange Standzeiten von Fahrzeugen ergeben, können durch entsprechendes Energiemanagement genutzt werden. Eine Einbindung des Fahrzeugs in Smart Grids und die Adaption von Regelanforderungen dienen der Effizienzsteigerung.

### **6.4.3 Entwicklung und Produktion im Netzwerk**

#### **6.4.3.1 Integration von Klimamodulen**

Für die Optimierung der Produktionsprozesse von Klimamodulen ist eine intensive Verbindung zum Entwicklungsprozess notwendig. Die Konstruktion und Auswahl der beteiligten Aggregate zur Fahrzeugklimatisierung müssen unter energetischen und produktionstechnischen Aspekten abgestimmt werden. Für die Gestaltung unterschiedlicher Heizungs-, Kühlungs- und Lüftungskonzepte müssen entsprechende Schnittstellen zur tragenden Konstruktion und zu allen Komponenten des Thermomanagements definiert sein.

Eine modulare Fahrzeugstruktur für alle beteiligten Disziplinen auf der Basis von festgelegten Randbedingungen ermöglicht eine kostengünstige Fertigung des Gesamtsystems. Der modulare Charakter begünstigt zudem eine ständige Weiterentwicklung vorhandener Module oder einzelner Komponenten.

Das Thermomanagement der Innenraumklimatisierung benötigt einen integralen Ansatz zur Konstruktion der Fahrzeughülle und der installierten Anlagentechnik. Für eine hohe Leistungsfähigkeit von Niedrigexergiesystemen, wie bspw. ein Wärmepumpensystem mit angeschlossener Flächenheizung oder -kühlung, muss ein hoher Isolationsstandard erreicht werden. Die komplexen Abhängigkeiten bieten dabei eine Reihe von Lösungsansätzen zur Bereitstellung thermischer Behaglichkeit im Innenraum von zukünftigen Elektrofahrzeugen.

#### **6.4.3.2 Aufteilung des Bauraums**

Die begrenzten Energiedichten der aktuellen Batterieentwicklungen erfordern erheblichen Platzbedarf. Der integrale Ansatz zur Entwicklung und Produktion von Elektrofahrzeugen spiegelt sich auch in der Gestaltung der Fahrzeugplattform wider. Daneben erfordert die Integration von Elektromotoren und die mögliche Ergänzung mit Range-Extendern ein grundsätzliches Umdenken für die Ausnutzung des Bauraums zukünftiger Automobile. Die gegenüber konventionellen Fahrzeugen veränderte Lastverteilung und Notwendigkeit von zusätzlichen Komponenten der Klimatisierung bedarf einer frühzeitigen Koordinierung der verfügbaren Volumina zur Anpassung der Geometrie eingesetzter Aggregate.

Für eine Minimierung des Heiz- und Kühlbedarfs muss der Fahrzeuginnenraum von der Umgebung thermisch entkoppelt werden. Eine konsequente Isolation und die Integration von Speichermaterialien führen zu neuartigen Wandaufbauten. Sie müssen im Bereich Tragfähigkeit, aber auch aufgrund steigender Wanddicken auf das Fahrzeugdesign abgestimmt sein.

Der Einsatz eines Hydrauliknetzes kann die Leitungsquerschnitte für Transportmedien gegenüber Luftkanälen stark reduzieren. Dagegen erfordern die dafür notwendigen Wärmeübertrager, wie solche für die Wärmerückgewinnung, zusätzlichen Platz. Auch müssen bei der Verwendung von Induktionsgeräten neue Positionen für die Zuluftdurchlässe definiert werden, um eine möglichst hohe Lüftungseffektivität zu erreichen.

---

## Literatur

- Appunn R, Hameyer K (2010) Simulation of a high voltage system in a hybrid electrical vehicle. In: 12th international conference on optimization of electrical and electronic equipment (OPTIM), 20–22 May 2010 S 315–320
- Bako-Biro Z (2004) Human perception, SBS symptoms and performance of office work during exposure to air polluted by building materials and personal computers. Ph.D. thesis, Technical University of Denmark, International Centre for Indoor Environment and Energy
- Baliga BJ (2008) Fundamentals of power semiconductor devices. Springer, Berlin
- Barenschee E (2010) Wie baut man Li-Ionen-batterien? Welche Herausforderungen sind noch lösen? In: Automatica Forum, München, 10. Juni 2010
- Barnes M, Pollock C (1998) Power electronic converters for switched reluctance drives. IEEE Trans Power Electron 13(6):1100–1111
- Blaschke F (1972) Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Asynchronmaschine. Siemens Forsch Entw Berichte 1(72):184–193
- Ceder G (1998) Lithium-intercalation oxides for rechargeable batteries. J Miner Met Mater Soc 50(9):35:40
- Coenen I et al (2010) Influence and evaluation of non-ideal manufacturing process on the cogging torque of a permanent magnet excited synchronous machine. In: Symposium on electromagnetic phenomena in nonlinear circuits, EPNC, Poznan University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, 29 June–02 July 2010
- Coenen I et al (2011) Influence and evaluation of non-ideal manufacturing process on the cogging torque of a permanent magnet excited synchronous machine. COMPEL 30(3):876–884
- David F et al (2011a) Active reduction of audible noise exciting radial force-density waves in induction motors. In: IEEE international electric machines and drives conference (IEMDC 2011), CD-ROM
- David F et al (2011b) Computational cost-effective modelling of non-linear characteristics in permanent magnet synchronous motors. COMPEL 30(3):885–893
- De Doncker RW (2006) Modern electrical drives: design and future trends. In: 5th international power electronics and motion control conference (IPEMC 2006), 14–16 Aug 2006
- De Doncker RW et al (2011a) Geschaltete Reluktanzmaschine als Antriebsalternative. Etz Elektrotechnik + Automation, Juni 2011, S 72–74
- De Doncker RW et al (2011b) Advanced electrical drives. Springer, Berlin
- Dietrich A (1998) Produktionsmanagement. Gabler, Wiesbaden
- Doege E, Behrens B-A (2010) Handbuch Umformtechnik – Grundlagen, Technologie Maschinen. Springer, Berlin

- Energietechnische Gesellschaft (ETG) (2010) VDE-Studie Elektrofahrzeuge – Gesamttext. VDE Verband der Elektrotechnik
- Eschenbruecher (2010) Coatema Kalender. Lösungen für alle Arbeitsbereiche und Anforderungen!
- Eversheim W (1998) Organisation in der Produktionstechnik – Konstruktion, 3. Aufl. Springer, Berlin
- Fanger PO (1970) Thermal comfort. Danish Technical Press, Copenhagen
- Fiedler J (2007) Design of low-noise switched reluctance drives. Shaker, Aachen
- Finken T, Hameyer K (2010) Computation of Iron- and Eddy-current losses in IPM motors depending on the field-weakening angle and current waveform. *Przeglad Elektrotechniczny* 5:123–128
- Flemming M, Ziegmann G, Roth S (1999) Faserverbundbauweisen – Verfertungsverfahren mit duroplastischer Matrix. Springer, Berlin
- Franck D et al (2010) Towards low audible noise drives for FEV applications. In: 14th international power electronics and motion control conference 2010, EPE/PEMC, EPE-PEMC Council, S 25–30
- Fricker IC (2005) Strategische Stringenz im Werkzeug- und Formenbau. Shaker, Aachen
- Fritz AH, Kuhn K-D (2010) Fertigungstechnik. Springer, Berlin
- Fuengwardodsakul N (2007) Predictive PWM-based direct instantaneous torque control for switched reluctance machines. Shaker, Aachen
- Fuengwardodsakul N et al (2005) High-dynamic four-quadrant switched reluctance drive based on DITC. *IEEE Trans Ind Appl* 41(5):1232–1242
- Gaus F (2010) Methodik zur Überprüfung der Logik eines Geschäftsmodells im Werkzeugbau Apprimus, Aachen
- Geiger W, Kotte W (2005) Handbuch qualität. Vieweg und Sohn, Wiesbaden
- Gries T (2007) Füge- und Oberflächentechnologien für Textilien Verfahren und Anwendungen. Springer, Berlin
- Groover MP (2010) Fundamentals of modern manufacturing materials, processes, and systems. Wiley, New Jersey
- Gutoff E (2006) Coating and drying defects: troubleshooting operating problems. Wiley, New Jersey
- Hafner M et al (2011) Automated virtual prototyping of permanent magnet synchronous machines for HEVs. *IEEE Trans Magn* 47(5):1018–1021
- Hameyer K, Belmans R (1999) Numerical modelling and design of electrical machines and drives. Computational Mechanics Publications, WIT Press, Southampton
- Harro Höfliger Verpackungsmaschinen GmbH (2009) Herstellen von Lithium-Ionen-Polymer-Batterien. Sonderlösung von A bis Z
- Harro Höfliger Verpackungsmaschinen GmbH (2010) Batterieherstellung mit Siegelrand Beuteln. Technologie für sichere Produkte
- Hasse K (1969) Zur Dynamik drehzahl geregelter Antriebe mit stromrichter gespeisten Asynchron-Kurzschlussläufermaschinen. Dissertation, Faculty of Electrical Energy, TH Darmstadt
- Hering E (Hrsg) (2009) Taschenbuch für Wirtschaftsingenieure. Hanser, München
- Ilshner B, Singer RF (2010) Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik – Eigenschaften, Vorgänge Technologien. Springer, Berlin
- Industrievereinigung verstärkter Kunststoffe e.V. (2010) Handbuch Faserverbundkunststoffe. Vieweg + Teubner, Wiesbaden
- Jaroschek C (2008) Spritzgießen für Praktiker. Hanser, München
- Kalpalkjian S, Schmid SR, Werner E (2011) Werkstofftechnik – Herstellung, Verarbeitung. Fertigung Pearsons, München
- Kasper K (2011) Analysis and control of the acoustic behavior of switched reluctance drives. Shaker, Aachen
- Kern D et al (2009) FlexBody© – Entwicklung eines Baukastensystems für Karosseriestrukturen von kleineren Fahrzeuglosgrößen. *mobiles*, 35
- Klotzbach C (2006) Gestaltungsmodell für den industriellen Werkzeugbau. Shaker, Aachen

- Kröll K (1978) Trockner und Trocknungstechnik. In: Kröll K (Hrsg) Trocknungstechnik, Bd 2. Springer, Berlin
- Le-Jaouen G, Breat J-L (2011) New sustainable mobility and its transposition to the Renault Twizy body in white. In: Future car body 2011, Automotive circle international, Bad Nauheim, 22–23 Nov 2011
- Likar U (2011) i-MiEV EU Production Vehicle. In: Dritter Deutscher Elektro-Mobil Kongress, Bonn 2011
- Lotter B, Wiendahl H-P (Hrsg) (2006) Montage in der industriellen Produktion. Springer, Berlin
- Lutz J et al (2011) Semiconductor power devices physics, characteristics, reliability. Springer, Berlin
- März M et al (2007) Mechatronische Integration von Hochleistungselektronik in Komponenten des Antriebsstrangs von Hybridfahrzeugen. Neue elektrische Antriebskonzepte für Hybridfahrzeuge. In: Haus der Technik Fachbuchreihe, Bd 80
- Meuthen B (2005) Coil coating Verfahren, Produkte und Märkte. Vieweg, Wiesbaden
- Mollestad E (2010) Egil: Think City – an innovative combination of high strength steel, extruded aluminium space frame and thermoplastic body panels. Aachener Karosserietage, Aachen, 21–22 Sept 2010
- Nazri GA (2009) Lithium batteries: science and technology. Springer, New York
- Orlowski PF (2009) Praktische Regeltechnik – Anwendungsorientierte Einführung für Maschinenbauer und Elektrotechniker. Springer, Berlin
- Quick R, Büttner C (2008) Die neue Ford Kuga Karosserie in Entwicklung und Produktion, Aachener Karosserietage 2008, Aachen, Sept 2008
- Röth T (2011) Der intelligente Karosseriestrukturbaukasten für das weltweit erste e-CarSharing Fahrzeug „ec2go“. Strategien des Karosseriebaus 2011, Automotive Circle International-Fachkonferenz Bad Nauheim, 22.–23. März 2011
- Röth T, Göer P (2011) Smart application kit for lightweight multi-material body structures for EV, Future Car Body 2011, Automotive Circle International, Bad Nauheim, 22–23 Nov 2011
- Röth T, Piffaretti M (2012) Internes Informationsmaterial der Protoscar SA und der Imperia GmbH, April
- Rothe R, Hameyer K (2011) Life expectancy calculation for electric vehicle traction motors regarding dynamic temperature and driving cycles. In: IEEE international electric machines and drives conference (IEMDC 2011), CD-ROM
- Sauer DU (2010) Produktionstechnik für die Batterieproduktion. Produktionstechnik auf dem Weg zur Elektromobilität. METAV 2010. Messe Düsseldorf, 24. Feb 2010
- Schalkwijk WA (2002) Advances in lithium-ion batteries. Springer, New York
- Schicker H (2002) Fräsmaschinen und Fräsen. Grin-Verlag, München
- Schlosser R et al (2011) Assessment of energy and resource consumption of processes and process chains within the automotive sector. In: 18th CIRP international conference on life cycle engineering (LCE), Springer, Berlin, S 45–50
- Schmidt M, Muller D, Markwart M (2008) Numerical study of different air distribution systems for aircraft cabins. In: Proceedings of indoor air 2008, ID: 922, Copenhagen
- Schoenen T et al (2010) Advantages of a variable DC-link voltage by using a DC-DC converter in hybrid-electric vehicles. In: Vehicle power and propulsion conference (VPPC), 1–3 Sept 2010
- Schutzrecht EP 0 766 327 B1 (03.03.1999) Bechthold, D.: Prismatische, galvanische Zelle
- Schutzrecht EP 1 528 972 B1 (17.10.2007) Bonfanti, F.: Mit einem Stanzmuster versehene Folien und Folienverbände, insbesondere für die Fertigung von elektrochemischen Bauelementen
- Schutzrecht US 6 235 065 B1 (22.05.2001) Pasquier, E.: Room temperature lamination of Li-ion polymer electrodes
- Schweizer PM (2000) Vorhanggiessverfahren. Coating 6:227–230
- Ségaud M (2011) Nachhaltigkeit und deren Auswirkung auf die Leichtbaukonzepte und Prozesskette. In: 11. Internationaler Druckgusstag, Nürnberg, 23. Feb 2011

- Spath D, Nesges D, Demuss L (2002) Fabrik in der Fabrik – Wie Betreiberkonzepte die Maschinen- und Anlagenutzung rationalisieren. *New Manage* 3:44–50
- Throne JL, Beine J (1999) *Thermoformen – Werkstoffe, Verfahren, Anwendung*. Hanser, München
- TÜV SÜD Automotive GmbH (2010) Normangaben bei Reichweiten von E-Cars nicht ausreichend. <http://www.presseportal.de/pm/38406/1735230/tuev-sued-normangaben-bei-reichweiten-von-e-cars-nicht-ausreichend-tuev-sued-entwickelt-neuen>. Zugegriffen: 15. Dec 2010
- Van der Giet M et al (2011) Auralization of electrical machines in variable operating conditions. In: *IEEE international electric machines and drives conference (IEMDC 2011)*, CD-ROM
- Van Hoek H et al (2010) Power electronic architectures for electric vehicles. In: *VDE-Kongress*, 8–9 Nov 2010
- Wargocki P, Wyon DP (2006) Research report on effects of HVAC on student performance. *ASHRAE J* 48:22–28
- Wargocki P, Wyon DP, Sundell J, Clausen G, Fanger PO (2000) The effects of outdoor supply rate in an office on perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms, and productivity. *Indoor Air* 10:222–236
- Wicks ZW (2007) *Organic coatings, science and technology*. Wiley, New Jersey
- Wiendahl H-P, Reichardt J, Nyhuis P (2009) *Handbuch Fabrikplanung – Konzept Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*. Hanser, München
- Wriske J (2005) *Bedarfsorientierte Raumwärmerversorgung durch dynamische Elektroflächensysteme*. Dissertation, RWTH Aachen
- Wypych G (2001) *Handbook of solvents*. ChemTec Publishing, Toronto, New York
- Yasutsune T, Yoshinori T (2011) Nissan leaf – 100 % electric, no gas, no tailpipe. In: *Euro car body 2011*, Automotive circle international, Bad Nauheim, 18–20 Oct 2011