

The top half of the cover features a wireframe illustration of a car's front end, including the headlights and wheels, set against a background of overlapping, semi-transparent rectangular blocks in shades of teal, 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

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	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	Netzinfrasturktur	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
3	Infrastruktur	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 Anschübe 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	Servicenet.	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
4	Geschäftsmodelle entlang der elektromobilen Wertschöpfungskette	103
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
5	Fahrzeugkonzeption für die Elektromobilität	149
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
6	Entwicklung von elektrofahrzeugspezifischen Systemen	235
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	Antriebsstrangkonzeppte	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, Kackertstraße 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 Bleiakкумуляtors 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 Dampfeisenbahn 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 Dampfbetrieb. 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 Autolandes 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 Automobylantrieb 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 Nützlichkeitssphäre 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 Benzin-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 Gaubshat, Lloyd und Esslingen die Produktion einstellen ließ. Ein Gaubshat 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 CO₂-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 (CO₂) 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 CO₂-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 zusammengefasst 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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-Emission von ca. 95 g CO₂/km in 2050 kein unmittelbarer Innovationsdruck. Gleichzeitig ist jedoch langfristig die Entwicklung alternativer und CO₂-sparender Antriebe unumgänglich. Anders sieht es bei einer mittleren Beschränkung mit vorgegebenen Grenzwerten für Emissionen von ca. 40 g CO₂/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 CO₂-Ausstoß, so käme eine sehr strikte Regelung zustande. Mit Emissionswerten von ca. 10 g CO₂/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

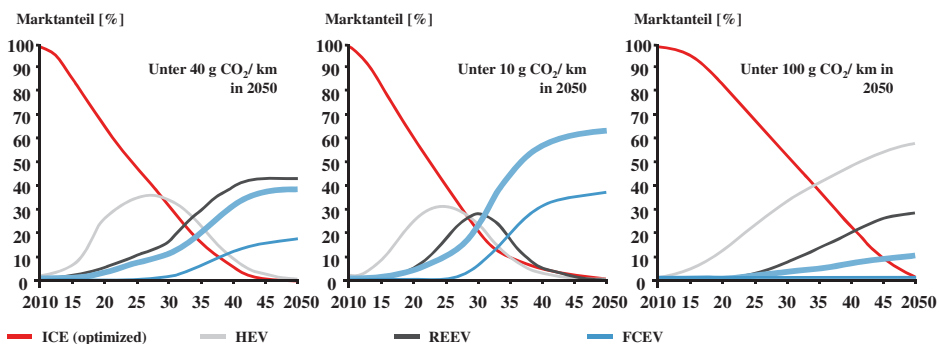


Abb. 2.1 Die zukünftigen Marktanteile der Antriebskonzepte sind abhängig von der Entwicklung der gesetzlichen CO₂-Grenzwerte. *Legende* ICE Internal Combustion Engine, HEV Hybrid Electric Vehicle, REEV Range Extended Electric Vehicle, FCEV Fuel Cell Electric Vehicle, BEV Battery Electric Vehicle. *Quelle* 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 starken 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.

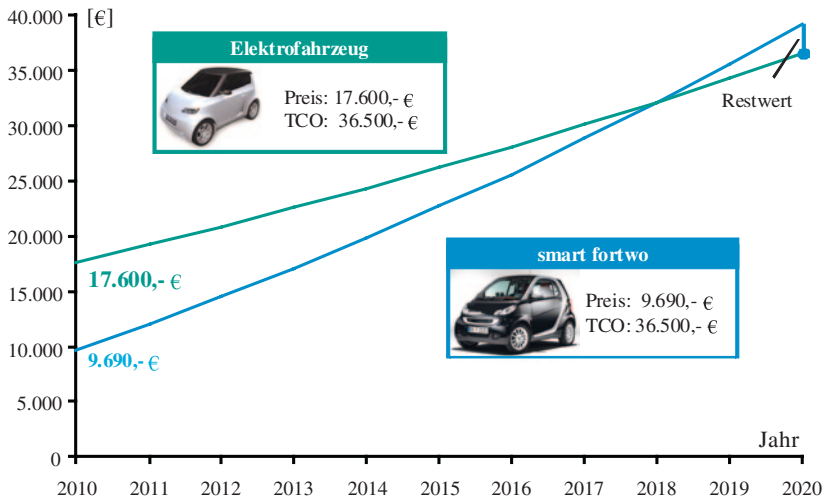


Abb. 2.3 Durch die identifizierten Kostentreiber liegt der Anschaffungspreis eines Elektroautos noch deutlich über dem eines vergleichbaren Autos mit Verbrennungsmotor. *Quellen* eigene Berechnungen, smart, ADAC, RWTH Aachen, *BMW i BEV* Battery Electric Vehicle, TCO Total Costs of Ownership

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