



Achim Kampker
Dirk Vallée
Armin Schnettler *Hrsg.*

Elektromobilität

Grundlagen einer Zukunftstechnologie

2. Auflage

Elektromobilität

Achim Kampker • Dirk Vallée
Armin Schnettler
Hrsg.

Elektromobilität

Grundlagen einer Zukunftstechnologie

2. Auflage



Springer Vieweg

Hrsg.

Achim Kampker

Chair of Production Engineering of E-Mobility
Components (PEM) der RWTH
Aachen University
Aachen, Deutschland

Dirk Vallée

Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr der
RWTH Aachen University
Aachen, Deutschland

Armin Schnettler

Institut für Hochspannungstechnik der RWTH
Aachen University
Aachen, Deutschland

ISBN 978-3-662-53136-5

ISBN 978-3-662-53137-2 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-53137-2>

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 GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2013, 2018

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 dürfen.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Autorenverzeichnis

- Kap. 1 Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Vallée,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler
- Abschn. 2.1.1 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Paul Thomes
- Abschn. 2.1.2 Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker, Dr.-Ing. Christoph Deutskens,
Dipl.-Ing. Kai Kreisköther, Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Alexander
Meckelnborg, Sarah Fluchs, M. Sc.
- Abschn. 2.1.3 Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker, Dr.-Ing. Christoph Deutskens,
Dipl.-Ing. Kai Kreisköther, Sarah Fluchs, M. Sc.
- Abschn. 2.2 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Vallée, Dipl.-Ing. Waldemar Brost, Univ.-Prof.
Dr.-Ing. Armin Schnettler
- Abschn. 2.3 Dr. rer. pol. Garnet Kasperk, Sarah Fluchs, M. Sc., Ralf Drauz, M. Sc.
- Abschn. 2.4 Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker, Dr.-Ing. Christoph Deutskens,
Dipl.-Ing. Kai Kreisköther, Dipl.-Ing. Ruben Förstmann,
Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Carsten Nee
- Abschn. 3.1 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Vallée, Dipl.-Ing. Waldemar Brost
- Abschn. 3.2 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler
- Abschn. 3.3 Dr.-Ing. Ralf Kampker, Mitja Bartsch
- Kap. 4 Dr. rer. pol. Garnet Kasperk, Sarah Fluchs, M. Sc., Ralf Drauz, M. Sc.
- Abschn. 5.1 Dipl. Ing. Dirk Morche
- Abschn. 5.2 Dipl. Ing. Fabian Schmitt
- Abschn. 5.3 Dipl. Ing. Fabian Schmitt
- Abschn. 5.4.1 Prof. Dr.-Ing. Klaus Genuit
- Abschn. 5.4.2 Dipl.-Ing. Olaf Elsen
- Abschn. 5.5 Dipl. Ing. Fabian Schmitt
- Abschn. 5.6 Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker, Dr.-Ing. Christoph Deutskens,
Dr.-Ing. Heiner Hans Heimes, Ansgar vom Hemdt, M. Sc.;
Christoph Lienemann, M. Sc.; Andreas Haunreiter, M. Sc.; Saskia
Wessel, M. Sc.; Dipl.-Ing. Mateusz Swist, Dipl.-Ing. Andreas Maue
- Abschn. 5.7 Prof. Dr.-Ing. Bernd Friedrich, Dipl.-Ing. Matthias Vest, Dr.-Ing. Tim
Georgi-Maschler, Dr.-Ing. Honggang Wang

- Abschn. 5.8 Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker, Dr.-Ing. Christoph Deutskens,
Dr.-Ing. Heiner Hans Heimes, Ansgar vom Hemdt, M. Sc.,
Christoph Lienemann, M. Sc., Ansgar Hollah, M. Sc.
- Abschn. 6.1.1 Prof. Dr.-Ing. Thilo Röth
- Abschn. 6.1.2 Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker, Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen,
Dipl.-Wirt. Ing. Bastian Schittny, Dipl.-Wirt. Ing. Regina Thiele
- Abschn. 6.2 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kay Hameyer, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rik W. De
Doncker, Dipl.-Ing. Hauke van Hoek, Dipl.-Ing. Mareike Hübner,
Dr.-Ing. Martin Hennen, Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker, Dr.-Ing.
Christoph Deutskens, Dipl.-Ing. Kai Kreisköther, M. Eng. Sebastian
Ivanescu, Dipl.-Ing. Thilo Stolze, Dipl.-Ing. Andreas Vetter,
Dipl.-Ing. Jürgen Hagedorn, Max Kleine Büning, M. Sc., M. Sc.;
Christian Reinders, M. Sc.
- Abschn. 6.3 Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker, Prof. Dr.-Ing. Uwe Sauer, Dr.-Ing.
Christoph Deutskens, Dr.-Ing. Heiner Hans Heimes, Saskia Wessel,
M. Sc.; Andreas Haunreiter, M. Sc.
- Abschn. 6.4 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller, Dipl.-Ing. Björn Flieger, Dipl.-Ing.
Kai Rewitz, Dipl.-Ing. Mark Wesseling

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
Achim Kampker, Dirk Vallée und Armin Schnettler	
2 Grundlagen	3
Achim Kampker, Dirk Vallée, Armin Schnettler, Paul Thomes, Garnet Kasperk, Waldemar Brost, Christoph Deutskens, Kai Kreisköther, Sarah Fluchs, Ruben Förstmann, Carsten Nee, Alexander Meckelnborg und Ralf Drauz	
2.1 Elektromobilität – Zukunftstechnologie oder Nischenprodukt?	3
2.1.1 Elektromobilität – eine historisch basierte Analyse	3
2.1.2 Aktuelle Herausforderungen der Elektromobilität	15
2.1.3 Elektromobilität als Zukunftstechnologie	21
2.2 Infrastruktur für die Elektromobilität	29
2.2.1 Netzinfrastruktur	31
2.2.2 Fahrzeuge, Einsatzmuster und Infrastrukturbedarf	34
2.2.3 Implikationen für die Infrastruktur	41
2.3 Die neue Wertschöpfungskette	42
2.3.1 Wertschöpfungskette als System von Aktivitäten	42
2.3.2 Aufbau und Veränderungen upstream	44
2.3.3 Aufbau und Veränderungen downstream	47
2.3.4 Verschiebung der Wettbewerbslandschaft	48
2.3.5 Verteilung der neuen Wertschöpfungskette nach Ländern	50
2.3.6 Zusammenspiel von Akteuren	52
2.4 Produktion von Elektrofahrzeugen	53
2.4.1 Conversion Design vs. Purpose Design für Elektrofahrzeuge	54
2.4.2 Technologische Trends von Gesamtfahrzeug und Komponenten ..	56
2.4.3 Montage von Elektrofahrzeugen	65
2.4.4 Herausforderungen für die Produktion von E-Fahrzeugen	67
2.4.5 Lösungsstrategien für die Elektromobilproduktion	69
2.4.6 Fazit	78
Literatur	78

3 Infrastruktur	87
Dirk Vallée, Waldemar Brost, Armin Schnettler, Ralf Kampker und Mitja Bartsch	
3.1 Mobilitätskonzepte	87
3.1.1 Einführung	87
3.1.2 Einsatzfelder von Elektromobilität	88
3.1.3 Nutzergruppen und Nutzungsmuster	94
3.1.4 Mobilitätskonzepte	99
3.1.5 Externe Anschlüsse und weitere Wirkungen	105
3.1.6 Fazit	107
3.2 Stromnetze	108
3.2.1 Struktur der Stromversorgung in Deutschland	108
3.2.2 „Intelligente Netze“	117
3.3 Servicenetz	118
3.3.1 Service und Mobilität	118
3.3.2 Komponenten eines Mobilitäts-Servicenetzes	119
3.3.3 Servicestruktur im freien Automarkt und OES	121
3.3.4 Werkstattkonzepte	123
3.3.5 Elektro-Servicekonzepte	127
3.3.6 Fazit	129
Literatur	130
4 Geschäftsmodelle entlang der elektromobilen Wertschöpfungskette	133
Garnet Kasperk, Sarah Fluchs und Ralf Drauz	
4.1 Gezeitenwende in der Automobilindustrie	133
4.1.1 Einflussfaktoren auf die Marktentwicklung	135
4.1.2 Absatzprognosen für Elektrofahrzeuge	143
4.2 Herausforderungen für Akteure entlang der Wertschöpfungskette	144
4.2.1 Herausforderungen für Automobilhersteller und -zulieferer	144
4.2.2 Herausforderungen für Energieversorgungsunternehmen	150
4.2.3 Herausforderungen für Dienstleistungsunternehmen	151
4.2.4 Das elektromobile Wertschöpfungssystem	152
4.3 Geschäftsmodelle der Elektromobilität	154
4.3.1 Geschäftsmodelloptionen	154
4.3.2 Wertschöpfungsarchitekturen	163
4.3.3 Kompetenzgetriebene Kooperationen	165
4.3.4 Neue Geschäftsmodelle der Elektromobilität	170
4.4 Zusammenfassung	178
Literatur	179

5 Fahrzeugkonzeption für die Elektromobilität	181
Dirk Morche, Fabian Schmitt, Klaus Genuit, Olaf Elsen, Achim Kampker, Christoph Deutskens, Heiner Hans Heimes, Mateusz Swist, Andreas Maue, Ansgar vom Hemdt, Christoph Lienemann, Andreas Haunreiter, Saskia Wessel, Ansgar Hollah, Bernd Friedrich, Matthias Vest, Tim Georgi-Maschler und Wang Honggang	
5.1 Fahrzeugklassen	181
5.1.1 Zulassungspflicht und Typgenehmigung	181
5.1.2 Fahrzeugklassen	184
5.1.3 Fahrzeugklassen für Elektrofahrzeuge	186
5.2 Entwicklungsprozess	187
5.3 Package für Elektrofahrzeuge	191
5.4 Funktionale Auslegung	195
5.4.1 Noise, Vibration, Harshness (NVH)	195
5.4.2 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	206
5.5 Leichtbau	220
5.6 Industrialisierung	230
5.6.1 Normen und Standards	231
5.6.2 Produkt- und Prozessentwicklungsprozess	235
5.6.3 Vom Prototyp zur Serienfertigung – Anlaufmanagement in der Elektromobilproduktion	239
5.6.4 Zulassung und Zertifizierung von Batteriepacks	245
5.7 Recycling als Teil der Wertschöpfungskette	250
5.7.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen	250
5.7.2 Generelles zu Batterierecyclingverfahren	253
5.7.3 Stand der Technik von Forschung und Entwicklung	254
5.7.4 Stand der Technik industrieller Recyclingverfahren	256
5.8 Remanufacturing als ergänzender Teil der Wertschöpfung	263
5.8.1 Konzeptansätze zum Remanufacturing von Lithium-Ionen-Batterien	266
5.8.2 Herausforderungen des Remanufacturing in der Batterie	266
5.8.3 Potenziale von Remanufacturing für Batterien	267
5.8.4 Zusammenfassung und Ausblick	269
Literatur	269

6 Entwicklung von elektrofahrzeugspezifischen Systemen	279
Thilo Röth, Achim Kampker, Christoph Deutskens, Kai Kreisköther, Heiner Hans Heimes, Bastian Schittny, Sebastian Ivanescu, Max Kleine Büning, Christian Reinders, Saskia Wessel, Andreas Haunreiter, Uwe Reisgen, Regina Thiele, Kay Hameyer, Rik W. De Doncker, Uwe Sauer, Hauke van Hoek, Mareike Hübner, Martin Hennen, Thilo Stolze, Andreas Vetter, Jürgen Hagedorn, Dirk Müller, Kai Rewitz, Mark Wesseling und Björn Flieger	
6.1 Fahrzeugstruktur	279
6.1.1 Body für Elektrofahrzeuge	279
6.1.2 Produktionsprozesse der Fahrzeugstruktur	295
6.2 Elektrischer Antriebsstrang	309
6.2.1 Antriebsstrangkonzepte in Elektrofahrzeugen	310
6.2.2 Elektrische Maschinen	316
6.2.3 Leistungselektronik	323
6.2.4 Prozesskette und Kosten elektrischer Maschinen	330
6.2.5 Aktuelle Produktionsprozesse für Leistungshalbleitermodule ..	335
6.3 Batteriesysteme und deren Steuerung	342
6.3.1 Entwicklung eines Batteriesystems	342
6.3.2 Produktionsverfahren Batteriezellen und -systeme	352
6.4 Thermomanagement	361
6.4.1 Herausforderung Thermomanagement im Elektrofahrzeug	361
6.4.2 Systembetrachtung zum Thermomanagement	365
6.4.3 Entwicklung und Produktion im Netzwerk	381
Literatur	383
Stichwortverzeichnis	387

Mitarbeiterverzeichnis

Mitja Bartsch Hans Hess Autoteile GmbH, Köln, Deutschland

Waldemar Brost Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Christoph Deutskens Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Rik W. De Doncker ISEA – Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Ralf Drauz Center for International Automobile Management (CIAM) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Olaf Elsen StreetScooter GmbH, Aachen, Deutschland

Björn Flieger E.ON Energy Research Center (E.ON ERC) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Sarah Fluchs Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland und Center for International Automobile Management (CIAM) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Ruben Förstmann Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Bernd Friedrich IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Klaus Genuit HEAD acoustics GmbH, Herzogenrath, Deutschland

Tim Georgi-Maschler IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Jürgen Hagedorn Aumann GmbH, Espelkamp, Deutschland

Kay Hameyer Institut für Elektrische Maschinen der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Andreas Haunreiter Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Heiner Hans Heimes Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Ansgar vom Hemdt Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Martin Hennen ISEA – Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Hauke van Hoek ISEA – Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Ansgar Hollah Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Wang Honggang IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Mareike Hübner ISEA – Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Sebastian Ivanescu Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Achim Kampker Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Ralf Kampker Hans Hess Autoteile GmbH, Köln, Deutschland

Garnet Kasperk Center for International Automobile Management (CIAM) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Max Kleine Büning Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Kai Kreisköther Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Christoph Lienemann Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Andreas Maue Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Alexander Meckelnborg Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Dirk Morche StreetScooter GmbH, Aachen, Deutschland

Dirk Müller E.ON Energy Research Center (E.ON ERC) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Carsten Nee Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Christian Reinders Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Uwe Reisgen Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Kai Rewitz E.ON Energy Research Center (E.ON ERC) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Thilo Röth FH Aachen – University of Applied Sciences, Lehr- und Forschungsgebiet Karosserietechnik, Aachen, Deutschland

Uwe Sauer ISEA – Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Bastian Schittny Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Fabian Schmitt StreetScooter GmbH, Aachen, Deutschland

Armin Schnettler Institut für Hochspannungstechnik der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Thilo Stolze Infineon Technologies AG, Warstein, Deutschland

Mateusz Swist Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Regina Thiele Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Paul Thomes Lehr- und Forschungsgebiet Wirtschafts-, Sozial- und Technologiegeschichte der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Dirk Vallée Institut für Städtebauwesen und Stadtverkehr der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Matthias Vest IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Andreas Vetter Infineon Technologies AG, Warstein, Deutschland

Saskia Wessel Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Mark Wesseling E.ON Energy Research Center (E.ON ERC) der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

Einleitung

1

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 Antrieb ab. Aufgrund der Mehrkosten der Batterie sind Elektrofahrzeuge jedoch deutlich teurer in der Herstellung und unterliegen damit in der Folge einem hohen Kostendruck.

A. Kampker (✉)

Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH
Aachen University, Aachen, Deutschland
E-Mail: a.kampker@pem.rwth-aachen.de

D. Vallée

Institut für Städtebauwesen und Stadtverkehr der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

A. Schnettler

Institut für Hochspannungstechnik der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland
E-Mail: schnettler@rwth-aachen.de

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.

Kap. 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.



Grundlagen

2

Achim Kampker, Dirk Vallée, Armin Schnettler, Paul Thomes,
Garnet Kasperk, Waldemar Brost, Christoph Deutskens,
Kai Kreisköther, Sarah Fluchs, Ruben Förstmann, Carsten Nee,
Alexander Meckelnborg und Ralf Drauz

2.1 Elektromobilität – Zukunftstechnologie oder Nischenprodukt?

2.1.1 Elektromobilität – eine historisch basierte Analyse

2.1.1.1 Motivation und Methode

Elektromotoren als automobile Antriebe besitzen eine rund 190-jährige Tradition. Ihre Ursprünge, und zwar auf der Straße, der Schiene und dem Wasser, fallen unmittelbar mit der Praxistauglichkeit des Elektromotors in den 1830er-Jahren zusammen, technisch ergänzt in den 1850ern durch brauchbare Bleiakkumulatoren und die Siemens'sche Entwicklung des dynamo-elektrischen Prinzips im Jahr 1866. Das Konzept ist damit älter als die mobile Anwendung von Verbrennungsmotoren. Mit ihnen fuhren erste Fahrzeuge in den 1860er-Jahren zu Wasser und zu Lande mit Hilfe des Lenoir'schen Gasmotors.

A. Kampker · C. Deutskens · K. Kreisköther · R. Förstmann · A. Meckelnborg
Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen
University, Aachen, Deutschland
E-Mail: a.kampker@pem.rwth-aachen.de; c.Deutskens@pem.rwth-aachen.de;
k.kreiskoether@pem.rwth-aachen.de; r.foerstmann@pem.rwth-aachen.de;
a.meckelnborg@pem.rwth-aachen.de

D. Vallée · W. Brost
Institut für Städtebauwesen und Stadtverkehr der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

A. Schnettler
Institut für Hochspannungstechnik der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland
E-Mail: schnettler@rwth-aachen.de

P. Thomes (✉)
Lehr- und Forschungsgebiet Wirtschafts-, Sozial- und Technologiegeschichte der RWTH Aachen
University, Aachen, Deutschland
E-Mail: thomes@wisotech.rwth-aachen.de

Den Durchbruch schaffte das Konzept auf Basis des 1876 patentierten Ottomotors in Form der Fahrzeugkonstruktionen von Daimler und Benz aus den Jahren 1885/1886.

Allerdings ist es weitaus jünger als das Antriebskonzept mittels Dampf. Die erste Wärmelektrikmaschine realisierte erstmals auch das Konzept des ermüdungsfreien Antriebs. Dessen Anfänge lassen 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, nicht nur die Effizienz und die Qualität des Transports von Menschen und Gütern, sondern auch die Menschheit geradezu disruptiv in ungeahnte Dimensionen und generierte damit auch neue Anreize für den bis dato überwiegend pferdebewegten Straßenverkehr. (Schiedt et al. 2010; Voigt 1965; Weiher und Goetzeler 1981)

Auch das erste bis heute bekannte seriengefertigte Auto setzte 1878 auf Dampfbetrieb. 1879 präsentierte Siemens bereits die weltweit erste elektrisch betriebene Lokomotive. Das erste E-Auto fuhr wahrscheinlich 1881 in Frankreich als Drei- und Vierrad. Im gleichen Jahr ging die erste Straßenbahn, ebenfalls ein Siemensprodukt dauerhaft in Betrieb. Ein Jahr später folgte mit dem „Elektromote“ in Berlin der weltweit erste Oberleitungsbus; die erste O-Buslinie startete 1900 im Kontext der Pariser Weltausstellung. Ein E-Auto mit dem bezeichnenden Namen „La Jamais Contente“ (frz: *Die nie Zufriedene*) wiederum bewegte 1899 erstmals einen Menschen auf der Straße schneller als 100 km/h. Ein Wagen der französischen Marke Krieger, die ihre Spezialität E-Taxis auch 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; Georganos 1996; Kirsch 2000; Mom 1997, 2004; Weiher und Goetzeler 1981)

Die zitierten Schlaglichter indizieren mehrerelei: Mobilität darf als menschliches Grundbedürfnis gelten. Die Erfindung des mechanischen Antriebs erhöhte die Geschwindigkeit im Landverkehr, die zuvor über Jahrtausende quasi konstant verharrte, rasant und führte zu einem geänderten Mobilitätskonsum und -erleben. Es gab die typischen boomartigen Aktivitäten auf einem sich gerade entwickelnden, neuen Wachstumsmarkt. Im Bereich der Automobilität fielen sie zusammen mit einem Kopf-an-Kopf-Rennen dreier automobiler Antriebskonzepte. Dieser Prozess dauerte rund zwei Jahrzehnte, ehe sich seit Anfang des 20. Jahrhunderts die bis heute gültigen Pfadstrukturen herauszubilden begannen, geprägt vom, in Anlehnung an

G. Kasperk · R. Drauz

Center for International Automobile Management (CIAM) der RWTH Aachen University,
Aachen, Deutschland

E-Mail: garnet.kasperk@rwth-aachen.de; ralf.drauz@rwth-aachen.de

S. Fluchs

Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen University,
Aachen, Deutschland

Center for International Automobile Management (CIAM) der RWTH Aachen University,
Aachen, Deutschland

E-Mail: s.fluchs@pem.rwth-aachen.de

C. Nee

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

E-Mail: c.nee@wzl.rwth-aachen.de

Kuhn (1962) so bezeichneten Verbrenner-Paradigma. (Canzler und Knie 1994; Dienel und Trischler 1997; Möser 2002; Rammler 2004) Die seinerzeit noch als verheißungsvoll zu bezeichnenden Marktchancen des E-Autos – Georgano (1996) charakterisiert die Jahre zwischen 1900 und 1920 als „Golden Age“ des E-Autos – fielen in sich zusammen.

Insbesondere der Technikhistoriker Gijs 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 zugunsten des Verbrennungskonzepts verantwortlich, die gleichzeitig, quasi dialektisch, das Auto als Mobilitätssystem zum Erfolg führte. (Canzler und Knie 1994; Möser 2002)

Ausgehend von der Annahme einer wechselwirksamen Mensch-Technologie-Beziehung, lässt sich das Auto als sozio-technisches Konstrukt definieren. Entsprechend findet hier methodisch 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 Rahmenbedingungen eine bestimmende Rolle spielen und spielen.

Ziel ist die Analyse der prozessbestimmenden Faktoren und Bedingungen von Elektromobilität im Vergleich zum auf fossiler Energie basierenden Verbrenner-Paradigma. Die Leitfrage ist, weshalb das moderne Normalauto zwar voll elektrifiziert ist, seine Antriebsquelle aber (immer) noch ganz überwiegend konventionell arbeitet – und ein regenerativ-energetischer Paradigmenwechsel, verbunden mit der Durchbrechung des derzeitigen Wegs, noch auf sich warten lässt, und zwar trotz aller Dringlichkeit angesichts des Klimawandels und endlicher fossiler Energievorräte.

2.1.1.2 Paradigmenbildung – Öl statt Strom

Die Ausgangsbasis der Untersuchung bildet neben einer vergleichenden quantitativen Bestandsaufnahme eine Stärken-Schwächen-Analyse der beiden Antriebskonzepte Verbrennungs- und Elektromotor. Sie erfasst zunächst die Phase 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 E-Autos 1901 eine Quote von 50 %, gefolgt von Dampfautos mit etwa 30 %. Was absolute Zahlen angeht, bauten in den USA 1912, auf dem Höhepunkt des E-Mobilitätsbooms, 20 Hersteller beachtliche 33.842 E-Autos. Allein in Detroit, der E-Auto-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 E-Auto. 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 1800 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, etwa dem zehnfachen Jahresschnittslohn eines Arbeiters. Abnehmer war die europäische Avantgarde der Adligen, Unternehmer und Künstler. Insgesamt wurden von dem Prestige-objekt 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)

Diese kurorische Bestandsaufnahme spiegelt nicht zuletzt das ausgeprägte individuelle menschliche Mobilitätsbedürfnis wider. Denn zum einen verging jeweils nur eine kurze Zeit zwischen der Erfindung der Antriebstechnologie und ihrer mobilen Anwendung. Zum anderen offenbart sie die prinzipielle Offenheit des Antriebsspektrums. Dieses Schema sollte sich bald ändern. Denn wie bereits angedeutet trat nicht viel später der Ottomotor seinen Siegeszug als Automobilantrieb an, während das Dampfkonzept vor allem aufgrund seiner limitierten Handhabbarkeit für den Straßeneinsatz komplett ausschied. (Abt 1998; Kloss 1996; Lewandowski 2000; Möser 2002)

Die Stärken-Schwächen-Analyse ergibt für die Zeit der Jahrhundertwende folgendes Ergebnis: Als Stärken des E-Autos galten insbesondere sein 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 auch, die verbreiteten Widerstände gegen das Auto generell aufzuweichen. Man denke etwa an den „Red Flag Act“. Als bis 1896 im Vereinten Königreich geltendes Gesetz zur Verminderung von Unfällen im Straßenverkehr begrenzte er die maximal zulässige Geschwindigkeit von Dampfwagen auf vier bzw. in Ortschaften auf zwei Meilen pro Stunde. Zusätzlich schrieb er vor, dass immer zwei Personen das Fahrzeug führen und ein Fußgänger zur Warnung der Bevölkerung mit einer roten Flagge voranvorangehen müsse. Wir sehen hier auch einen Aspekt der Aushandlung der Straßennutzungsrechte unter den Verkehrsteilnehmern; und da war das bezüglich Geräusch- und Geruchswahrnehmung eher sanfte E-Auto kompatibler, ebnete aber indirekt auch dem Benzinauto den Weg.

Als Schwächen galten die zunehmend als begrenzt empfundene Reichweite sowie die recht kurze Batterielebensdauer aufgrund von Kälteempfindlichkeit und Erschütterungsanfälligkeit. Ein Lebenszyklus von 6.000 km war aber wohl bereits machbar. Als psychologisches

Moment wird noch aus der männlichen Nutzerperspektive gemeinhin der geringe Spaßfaktor angeführt, der aus der Kombination von leichter Beherrschbarkeit und Zuverlässigkeit resultierte. Auch zum geschwindigkeitsfixierten „Sport“ taugte das E-Auto nur bedingt. Die spezifischen Produktionsstrukturen mögen ebenfalls nachteilig gewirkt 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 E-Autos sollte sich die rasche Entwicklung der Verbrennungsmotorentechnologie erweisen. Das Benzinauto eignete sich so einerseits positive Eigenschaften seines elektrischen Konkurrenten an. Insbesondere die verbesserte Zuverlässigkeit und Handhabbarkeit verkürzten den Komfortvorsprung des E-Autos. Andererseits konnten die Fahrer gleichwohl der „Lust an den Vibrationen des Verbrennungsmotors“ ebenso wie dem geschwindigkeitsaffinen „joy riding“ frönen (Mom 1997), während die Reichweite trotz höherer Geschwindigkeiten wuchs. Dies korrespondierte mit sich verändernden individuellen mobilen Bedürfnissen, die ebenfalls zu Lasten des E-Autos gingen.

Die Herausforderungen für das E-Auto-Konzept zu Beginn des 20. Jahrhunderts lassen sich leicht identifizieren. Es musste sich dem Benzinkonkurrenten anpassen und zugleich weiter an eigener Kontur gewinnen. Es galt, den Ausbau der Versorgungsinfrastruktur ebenso rasch voranzutreiben wie die Batterietechnik, und vielleicht würde ja ein kritisches 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 zunehmend abzeichnenden Preisnachteil gegenüber dem Benzinauto kompensieren.

Vor diesem Hintergrund veränderte sich das E-Auto zwischen 1905 und 1925 in vielerlei Hinsicht. Letztlich lassen sich alle Applikationen identifizieren, die auch heute Relevanz beanspruchen. 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 gelangen erstaunliche Ergebnisse im Bereich Schnellladung ebenso wie die Weiterentwicklung der Ladeinfrastruktur. So entstand u. a. eine Schnellladestationskette zwischen Philadelphia und Boston. Solche Anlagen trugen einerseits dazu bei, das E-Auto von seinem Image als reinem Nahverkehrsvehikel 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 gravierende Rückschläge: Der seit 1912 zunehmend in Serie verbaute elektrische Anlasser für Benzinmotoren, seit 1919 auch in Ford's Modell T, bedeutete den Verlust eines wichtigen Komfortvorteils des E-Autos. Das gern zitierte „lady image“ des E-Autos mutierte zum „old lady image“ (Georgano 1996), obwohl nicht gesichert ist, inwieweit 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 fortgeschrittene 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 schneller sinken ließ und das E-Auto auch bezüglich der Kosten 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 hauptsächlich auf der Wiederaufnahme der zivilen Produktion nach dem Krieg. Ein neuer Boom blieb aus. Mehr noch, bald darauf folgte der Rückzug des E-Auto-Konzeptes in bestimmte Nischen, wo es dem Benziner eindeutig überlegen war und bis heute ist, wie das folgende Kapitel dokumentiert.

Bezogen auf die 1920er-Jahre, fällt die Analyse 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 E-Auto-Konzept als Zukunftstechnologie verhalf zwar dem Auto entscheidend zum Durchbruch und ist deshalb als Erfolg zu werten. Es konnte sich aber trotz beachtlicher Technikfortschritte vor allem aufgrund der geringen Energiespeicherdichte der Batterien in einem unregulierten Markt nicht durchsetzen.

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

Trotzdem wurde das Konzept weiterentwickelt, und zwar dort, wo es auf die Bereitstellung von sauberer Leistung in vorhersehbaren Betriebsabläufen und einem fest definierten Aktionsradius ankam. In dieser Nützlichkeitssphäre lebte das Prinzip des „elektrischen Pferdes“ fort. (Mom 2004) Seit den 1920er-Jahren begegnen E-Autos überwiegend kommerziell genutzt, z. B. als Kleintransporter in geschlossenen Räumlichkeiten wie Hallen und Lagern, wo Emissionsfreiheit ein Muss war. Im Außeneinsatz stabilisierten sie vor allem im urbanen Umfeld in Form von Omnibussen, Kranken-, Feuerwehr- und Müllwagen sowie bei der Auslieferung von Milch, Post und Zeitungen ihre Position. Auch 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 der Firma Bergmann gebauten 2,5-Tonner-Kleinlastwagen zu sehen gewesen sein; auch ein Indiz für die Langlebigkeit der Technologie. (Georgano 1996)

Der exemplarische Blick auf den deutschen Markt zeigt folgende Resultate: Es existierten in der Zwischenkriegszeit mindestens zwölf Hersteller. Für die zweite Hälfte der 1930er-Jahre geht man von etwa 5.000 zugelassenen E-Autos aus, wovon etwa die Hälfte auf die lokale Postzustellung entfielen. Als spezielle deutsche Entwicklung gelten Elektrotraktoren. Als flexiblere Alternative zur zwischenzeitlich komplett elektrifizierten Straßenbahn verbreiteten sich Oberleitungsbussysteme. Die auf Importunabhängigkeit vom Erdöl zielende kriegsvorbereitende NS-Autarkiepolitik spielte hier eine erhebliche Rolle. Gleicher-

gilt für die erstmalige Normung von Batterien. Die bekannten konzeptionellen Schwächen blieben davon unberührt. (Abt 1998; Georgano 1996; Möser 2002)

Als besonders E-Auto-affiner Markt erwies sich Großbritannien. Hier dominierte ebenfalls der Einsatz im lokalen „stop and go“-Liefer- und Entsorgungsgeschäft. Die Stadt Birmingham hatte von 1917 bis 1971 ununterbrochen E-Autos im Fuhrpark, das letzte Fahrzeug wurde 1948 angeschafft. Das 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 E-Autos in GB registriert. Zwei britische Milchwagen-Hersteller starteten sogar einen E-PKW-Neuanfang. Ein viersitziges Coupé im „petrol-car styling“, basierend auf einer 64-Volt-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 hohe Preis von 385 Pfund den Ausschlag gab. Er lag fast das Doppelte über dem des populären Morris Ten, der annähernd 100 km/h bei beliebiger Reichweite versprach. 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 rigiden Kraftstoffknappheit führte in Frankreich zu einer mangelgetriebenen kleinen Blüte des leichten E-Autos. 50 verschiedene Typen sollen bis 1942 entstanden sein, keiner davon erreichte auch nur annähernd Großserienstatus. Interessant ist diese Entwicklung deshalb, weil man Elektroantriebe in Verbrennermodelle implementierte; eine fortan häufig geübte Praxis. Die Dominanz des Verbrenner-Paradigmas 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 trotz Reichweiten von knapp 200 km. (Georgano 1996; Möser 2002)

Die Ursachen des neuerlichen Scheiterns lagen nach wie vor im Verhältnis von Kosten und Nutzen, das sich nach 1945 noch einmal deutlich zugunsten des Verbrenners veränderte. Ähnliches gilt für den Omnibus- und LKW-Bereich, wo seit den 1920er-Jahren der sparsame und in der Leistungscharakteristik dem Elektromotor durchaus ähnliche Dieselantrieb vermehrt zum Einsatz kam. Die deutsche Post stoppte aus diesem Grund beispielsweise ein nach dem Krieg gestartetes E-LKW-Projekt. Ein Übriges tat in der BRD die seit 1955 geltende Besteuerung der E-Autos nach Gewicht. Sie wirkte in der Tat diskriminierend und ließ die verbliebenen Hersteller wie etwa Gaubschat, Lloyd und Esslingen die Produktion einstellen. 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 Großbritannien behauptete sich dagegen die Tradition der Milchwagen und erreichte in den 1970er-Jahren mit mehr als 50.000 Einheiten den höchsten Stand. In keinem anderen Staat der Erde waren bis dahin mehr E-Autos im Einsatz. Auch die berühmten Londoner Doppeldecker fuhren zeitweise oberleitungsgespeist elektrisch, wie überhaupt die kostengünstigen Trolleybusssysteme in den 1950er- und 1960er-Jahren weltweit ihre

Blüte erlebten, und zwar oft als Ergänzung oder Ersatz der elektrischen Straßenbahn. (Abt 1998; Barthel und Lingnau 1986; Bonin et al. 2003; Fersen 1986; Georgano 1996; Voigt 1965)

E-Mobilitätsinseln entstanden in autofreien Erholungsorten der Schweiz. In Zermatt, wo seit 1931 ein Autoverbot gilt, wuchs die Zahl der E-Autos seit 1947 beständig, als sich ein Privatmann das erste Exemplar, wahrscheinlich aus britischer Produktion, zulegte. Mehrere Kleinbetriebe bauten die E-Autos vor Ort bei wachsender Variantenvielfalt. Da die Elektrizität zudem ganz überwiegend aus Wasserkraft stammte, sehen wir hier frühe regenerative emissionsfreie Verkehrskonzepte.

Die weltpolitischen Krisen der 1950er-Jahre, wie der Koreakrieg und die Suezkrise 1956, führten zwar zu ersten kleinen Ölpreisschocks, hatten aber keine Auswirkungen auf das Paradigma. Öl überschwemmte als billige Energie geradezu die Märkte. Es gab also keine Notwendigkeit, sich vom Verbrennungsmotor abzuwenden, der im PKW-Diesel eine noch wirtschaftlichere Ergänzung bekommen hatte.

Zugleich begann mit dem wachsenden Wohlstand das Zeitalter der individuellen Massenmobilisierung. Der Verbrenner war dafür der ideale Antrieb. (Andersen 1999; Bonin et al. 2003; Möser 2002; Thomes 1996; Voigt 1965) Dass der Landmaschinenhersteller Allis-Chalmers 1959 erstmals einen auf dem seit den 1830er-Jahren bekannten Brennstoffzellenprinzip basierenden, einsatzfähigen Traktor mit 20 PS und einem Wirkungsgrad von 90 % zeigte, ging völlig unter.

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

2.1.1.4 Renaissance eines Zukunftsconceptes

Eher unverhofft öffnete das sich im Zeitalter des Überflusses entwickelnde Umweltbewusstsein dem E-Auto-Konzept eine neue Chance, das Verbrenner-Paradigma aufzuweichen. Den Anfang machten einmal mehr die USA. Dort verstärkte die wachsende ökologische Sensibilisierung (Smog) seit Mitte der 1960er-Jahre getrieben durch einen ersten „Clean Air Act“ die Suche nach Alternativen, 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 geringer Stückzahl. 1968 präsentierte General Electric einen Versuchsträger, der zur Beschleunigung innovativ Zink- und zum Fahren 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 national verbindliche gesetzliche Regelungen einigen konnte, blieb es wie in der Anfangszeit bei unkoordinierten Initiativen einzelner Autoanbieter und Interessengruppen wie der Elektroindustrie, Elektrizitätserzeugern und

Batterieherstellern. Eine systematische Forschung kam ebenfalls 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 etwa 25 km/h. Da besaß der fast gleichzeitig ebenfalls in den USA von Jerry Kugel in Kooperation mit Ford erzielte Geschwindigkeitsrekord von rund 223 km/h nur statistischen Wert. Erst die weitere Verschärfung des Umweltrechts zu Beginn der 1970er motivierte zu koordinierterer Aktion.

Die US-Aktivitäten regten auch weltweit das Interesse an E-Autos 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 Nutz- und Personenwagen als Versuchsträger gebaut wurden und sich gewisse koordinierte Strukturen bildeten. (Georgano 1996) Beteiligt war der komplette Fahrzeug- und Zuliefermarkt. Bei den Fahrzeugen handelte es sich in der Regel um umgerüstete Verbrenner, wie etwa seit 1976 die CitiSTROMER auf Basis des VW Golf. Ausnahmen bildeten in den 1960er-Jahren der Comuta der Ford-Werke, der durch einen griechischen Reeder finanzierte, auf der Insel Syros seit 1972 produzierte Kleinstwagen Enfield-Neorion, ein 1969 in Amsterdam als Witkar lanciertes kommunales Micro-E-Carsharing-Konzept oder ein Stadtauto-Prototyp von Fiat 1976. (Abt 1998; Georgano 1996; Wikipedia o. J.)

Auf der Schiene stellte die Deutsche Bundesbahn 1977 den regulären Dampflokbetrieb ein. Alle Hauptstrecken waren seinerzeit elektrifiziert. Der Fahrrad- und Motorradhersteller Hercules baute zwischen 1973 und 1977 immerhin mehrere tausend elektrisch betriebene Kleimotorräder des Typs E1. Die Serienproduktion von E-Autos lag dagegen nach wie vor in weiter Ferne. Neben ungelösten Problemen wie Reichweite, Kosten und Ladeinfrastruktur verhinderte die dominante konventionelle fossile Stromerzeugung den Erfolg auf der Straße. Folglich bot die Elektromobilität auch keine Antwort auf die Forderung nach globaler Emissionsreduktion.

Mitte der 1980er-Jahre, als die zweite Ölkrise die Gesellschaft erneut kurzzeitig für das Thema nachhaltige Mobilität sensibilisierte, definierten Experten den Fahrzeugtyp des Vans und das Anwendungsgebiet der Elektromobilität in Firmenflotten als optimale Kombination für die dauerhafte Etablierung eines E-Auto-Marktes. Zudem gelang eine Steigerung der Batterieenergiedichte und mit der Wiederentdeckung der Brennstoffzelle als Antriebsmodul tauchte eine Alternative zur Batterieelektrik auf.

Parallel zum stetig wachsenden Umweltbewusstsein etablierten sich auch wieder E-Auto-Hersteller. Sogar Selbstbaukits erschienen auf dem Markt, während etablierte Produzenten vermehrt wieder Kleinwagen umrüsteten. (Canzler und Knie 1994; Georgano 1996; Möser 2002)

Im Zweiradsegment machte 1985 der Pionier Hercules erneut mit einer Weltneuheit auf sich aufmerksam, einem E-Rad mit Nabenzugmotor und Scheibenbremse. Über mehr als 20 Prototypen kam der Anlauf nicht hinaus. Als Erfolg erwies sich dagegen fünf Jahre später das elektrische Leichtmofa Electra, von dem sich etwa 19.000 Exemplare verkauften. (www.hercules-bikes.de)

Die sich verdichtende und verschärfere Gesetzgebung, verbunden mit immer konkreteren Maßnahmen, verbesserte zwar in den Folgejahren die Rahmenbedingungen für Elektromobilität, aber eine flächendeckende Diffusion scheiterte erneut an den bekannten technischen Schwachpunkten in Verbindung mit dem politischen Unwillen zu einer anreizorientierten Marktsteuerung, dem freiheitsgeprägten, individuellen Mobilitätsbedürfnis und dem letztlich fehlenden Nutzermehrwert. (Abt 1998; Möser 2002; Norton 1985; Sauter-Servaes 2011)

Als 1990 Kalifornien das „Zero Emission Vehicle“ gesetzlich verankerte, setzte dieser Akt ein weltweites Zeichen, begleitet von der Forderung nach ökologischer Stromerzeugung. Als Konsequenz feierten auf IAA 1991 eine Reihe von Studien und Prototypen, u. a. von BMW, Mercedes, Opel und VW, Premiere.

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 E-Autos befasste.

Als ein 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. Der zwischen 1993 und 1996 gebaute Kleinwagen Hotzenblitz blieb bis zum seit 2013 angebotenen BMW i3 das einzige in Deutschland entwickelte und in Kleinserie produzierte E-Auto. Rund 140 Exemplare mit 12 kw Motoren wurden gefertigt (www.E-Auto-tipp.de).

Die Aufbruchsstimmung spiegelte sich auch in neuen E-Flottenversuchen von Post und Telekom wider. Auf der Insel Rügen startete ein von der Bundesregierung finanziertes E-Auto-Feldprojekt, an dem sich fast alle namhaften Hersteller von Fahrzeugen und Komponenten beteiligten. Das Verbrenner-Paradigma schien zu wanken, das Auto sich nachhaltig-neu zu definieren. Doch einmal mehr ließen die Praxisresultate das Unterfangen scheitern. Bezeichnend für die Problematik ist, dass der Vorreiter Kalifornien die gesetzlichen Ziele lockern musste. (Abt 1998; Sauter-Servaes 2011; o.V. 1996)

Das in Deutschland 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 2.000 E-Autos in 1996. 15 Jahre später, Anfang 2011, bewegten sich ganze 2307 batterieelektrische Autos und 37.256 Hybrid-Autos auf Deutschlands Straßen. (Kraftfahrt-Bundesamt 2011)

In der Folge versuchten sich immer wieder auch unabhängige Unternehmen an dem Thema. Spätestens 2006 setzte Tesla, Inc. mit der Präsentation des Tesla Roadsters neue Maßstäbe: ein Sportwagen, der durchaus mit konventionellen Modellen mithalten konnte. Als erstes E-Auto mit innovativen Lithium-Ionen-Batterie legte er nicht nur die Basis für

den bis heute anhaltenden Erfolg des Unternehmens, sondern gab auch der gesamten Branche wichtige Impulse. Die seit 2012 gebaute Luxuslimousine Model S schaffte es 2015 mit über 42.000 Verkäufen sogar an die Spitze der weltweiten Zulassungsstatistik. Ein SUV ergänzt seit kurzem die Palette. Die Reichweite beträgt bis zu 500 km. Tesla zählt überdies zu den Pionieren des autonomen Fahrens.

Mittlerweile haben quasi sämtliche Automobilhersteller ihr Portfolio um Serienmodelle im Bereich der Elektromobilität ergänzt (für aktuelle Produzenten- und Modelllisten vgl. www.elektroauto-tipp.de bzw. www.ecomento.tv). Die Ursachen liegen in einer Mischung aus verschärfter Umweltgesetzgebung, öffentlichen Subventionen, sinkenden Preisen, insbesondere für Batterien bei gleichzeitig höherer Effizienz; d. h., mehr Leistung und größere Reichweite sowie eine verbesserte Versorgungsinfrastruktur. Nicht zuletzt wächst mit dem Umweltbewusstsein tendenziell auch die Zahlungsbereitschaft der Kunden.

Entsprechend stieg die Zahl elektrifizierter Fahrzeuge seit 2011 weltweit beträchtlich an. Anfang 2014 fuhren geschätzt rund 750.000 Elektro- und Hybridautos, wovon alleine im Jahr 2014 etwa 320.000, also fast die Hälfte neu zugelassen wurden. Bis Anfang 2015, kamen weitere 550.000 hinzu, was den Gesamtbestand auf etwa 2,5 Mio. hochschnellen ließ und die frische aktuelle Dynamik verdeutlicht. Den höchsten absoluten Zuwachs verzeichnete erstmals China mit 207.000 Wagen. Der Gesamtbestand verdreifachte sich damit auf über 300.000 (2014: 54.000 Neuzulassungen bei einem Bestand von knapp 100.000). China belegte damit im internationalen Bestandsvergleich Rang zwei, hinter den USA, die mit über 400.000 E-Fahrzeugen noch die Spitze behaupteten. An dritter Stelle rangierte Japan, vor den Niederlanden, Norwegen und Frankreich. Deutschland folgte mit nur gut 55.000 Elektroautos, wovon wiederum knapp die Hälfte 2015 auf die Straße kamen, weit abgeschlagen. (Fan et al. 2014; www.ecomento.tv; Kraftfahrt-Bundesamt 2016) Die Angaben umfassen Pkw mit batterieelektrischem Antrieb, Range Extender und Plug-In Hybride.

Bezogen auf den Anteil am Fahrzeugbestand verteidigte Norwegen seine angestammte Spitzenposition der Vorjahre. Mehr als 3 % aller Autos fuhren dort bereits 2015 komplett oder zum Teil elektrisch, wobei 30 % der Neuzulassungen dieses Jahres auf Elektro- und Hybridautos entfielen. Der Erfolg resultiert aus einem umfassenden öffentlichen Anreizsystem als Kombination von Steuer-, Maut- und Energiekostensubventionen. Die bescheidene deutsche Bestandsquote von ca. 0,3 % Ende 2016 wiederum dokumentiert den Handlungsbedarf überdeutlich; dies umso mehr, als der Straßenverkehr nach wie vor zu über 90 % auf Basis fossiler Kraftstoffe funktioniert, während in Norwegen aufgrund günstiger Standortbedingungen (Wind und Wasser) regenerative Energien 99 % beisteuern. (McKinsey 2016; www.ecomento.tv)

Was die Treiber angeht, beleben neben dem Privatkundensegment zunehmend CarSharinganbieter und Logistikdienstleister mittels elektrifizierter Fahrzeugflotten die Branche. (Deffner 2012) Zugleich leisten sie damit einen wichtigen Beitrag, um die Technologie einem breiteren Publikum nahezubringen. Als Vorreiter profiliert sich einmal mehr die Deutsche Post DHL Group. Sie knüpft entschlossen an alte Zeiten an und setzt auf dem

Weg zurück in die Zukunft systematisch auf CO₂-freie Zustellungsvehikel. Ihre Street-scooter E-Flotte soll weiter rasant wachsen. Geplant ist ein Ausbau der Produktionskapazität auf 20.000 Einheiten. Sie sollen auch an externe Abnehmer weltweit verkauft werden. Derweil ist das E-Bike bereits seit einiger Zeit mit aktuell rund 10.500 zwei- und dreirädrigen Exemplaren Standardzustellfahrzeug der Postboten. (www.dpdhl.com/de/presse.html)

Davon abgesehen feiert das E-Bike in allen denkbaren Varianten gerade auch generell fulminante globale Erfolge. Alleine in Deutschland entschieden sich 2016 über 600.000 Käufer für ein elektrifiziertes Rad. Der Gesamtbestand liegt zwischenzeitlich bei knapp 3 Mio. Dieser Erfolg ist auch im generellen Kontext von zentraler Relevanz. Denn er belegt einmal mehr, dass eine Technologie sich rasch am Markt durchzusetzen vermag, falls für die Verbraucher der Nutzen auf der Hand liegt und damit auch das Aufwand-Ertragsverhältnis stimmt. Beim E-Auto ist dieser Zusammenhang offensichtlich noch nicht evident.

Und so hat trotz aller ermutigenden Fortschritte das Verbrenner-Paradigma auch im dritten Jahrtausend Bestand, obwohl Oil Peak und Erderwärmung drängender denn je ein sofortiges Umsteuern anmahnen und der Ideenvorrat an Lösungsmöglichkeiten für das menschliche Mobilitätsbedürfnis längst nicht ausgeschöpft ist. Nicht zuletzt die rasante Digitalisierung von Technik, Wirtschaft und Gesellschaft öffnet völlig neue, disruptive Potenziale im weitesten Sinne digitaler Mobilität. Komplementäre, verkehrsreduzierende Formen sind leichter realisierbar denn je.

Ob bzw. wann sich das E-Auto in diesem Szenario endlich vom Stigma der scheinbar ewigen Zukunfts- und Nischentechnologie befreit, bleibt abzuwarten. (ams 2011, 2017; Canzler und Knie 1994; Deutsches Museum München 2010; Mom 2004) Die Chancen stehen momentan jedenfalls so gut wie nie.

2.1.1.5 Vom Zukunftskonzept zum Paradigma

Die historische Analyse offenbart, dass die technischen Grundlagen aller Varianten von Elektromobilität, abgesehen von der Flugmobilität, bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts bekannt und erprobt waren. Das Scheitern als Massentechnologie beruht letztlich auf einer Kombination aus technischen, soziökonomischen und psychologischen Faktoren. Sie führten seit den 1920er-Jahren zu einem sich rasch verfestigenden globalen Verbrenner-Paradigma. Elektromobilität verkam in der Folge zum Nischen- bzw. Zukunftskonzept, wenn man einmal von der Schiene absieht, wo sie rasch zur Leittechnologie avancierte. Die systematische Forschung im Bereich des Straßenverkehrseinsatzes kam damit quasi ebenfalls zum Erliegen.

Seit Ende der 1960er-Jahre begannen sich die Rahmenbedingungen zwar wieder zugunsten der Elektromobilität zu verschieben, da die Ökologie als dynamisch an Gewicht gewinnendes Agens hinzukam. Bislang aber verhinderte der oben skizzierte System-Lock-in-Effekt den Durchbruch der Technologie. Allenfalls in akuten Krisensituationen gab es Veränderungsansätze, durchaus mit Placebo-Funktion, und deshalb ohne Ambitionen, das geltende Mobilitätsparadigma grundlegend zu hinterfragen.

So lautet der aus historischer Perspektive zu ziehende Schluss: Die angestrebte Entkopplung von fossiler Energie und Verkehrsleistung bedarf einer strukturellen, auf der Basis langfristigen Nutzens optimierten ganzheitlichen Neudeinition von Mobilität. Eine solche kann der freie Markt per se nicht leisten. Es braucht von der Politik gesetzte, verbindliche institutionelle Leitplanken, welche durch Normierung und Steuerung Forschungs- und Produktionsanreize schaffen, ohne die erfolgsnotwendigen Spielräume zu verengen. Daraus resultierende Skalenerträge wiederum sollten die E-Mobilität endlich zur individuellen und kollektiven Norm transformieren helfen. Ein scheinbar eherner Gegensatz hätte sich damit aufgelöst, wobei die Potenziale eines synergetischen Zusammenspiels analoger und digitaler Mobilität noch gar nicht in die Überlegungen integriert sind.

Davon abgesehen braucht die Welt ein Gesamtkonzept nachhaltiger Mobilität. Gefragt sind sämtliche Verkehrsformen komplementär integrierende Lösungen, verbunden mit einer kollektiv-individuellen Bedarfsoptimierung. (Thomes und Jost 2009) Ein solcher Ansatz könnte die Basis eines auf globale Konvergenz ziellenden elektrobasierten Zukunfts-Automobilitäts-Paradigmas schaffen (Thomes 2012).

2.1.2 Aktuelle Herausforderungen der Elektromobilität

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_2) und lokalen Emissionen wie Kohlenmonoxid und Stickoxiden, 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 Ausstoß von CO_2 und gesundheitsschädlichen Gasen ermöglicht.

Es ist gesellschaftlicher Konsens, dass eine der wichtigsten Anforderungen heute 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)

Bei Betrachtung aktueller Herausforderungen spielen sowohl technisch geprägte Aspekte als auch ökonomisch-wirtschaftliche Überlegungen 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 Kosten-drucks 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 Kostendruck

Die Entwicklung von neuen Elektrofahrzeugen für den kleinen und volatilen Markt erfordert ein hohes Volumen an Erstinvestitionen durch den Einsatz von innovativen Produktionsanlagen und der Forschung insbesondere im Bereich der Batterietechnologie. Der aktuelle Preis für Elektrofahrzeuge liegt derzeit aufgrund der Mehrkosten der Batterie und trotz der Entwicklungen der letzten Jahre über dem Preis vergleichbarer Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Somit kann die Kostenreduktion in der Fahrzeug- und Batterieproduktion als ein maßgeblicher Faktor für den Durchbruch dieser Technologie identifiziert werden. Es ist mitunter die Preisfähigkeit der Elektrofahrzeuge, die darüber entscheiden wird, ob die Technologie flächendeckend erfolgreich ist. Die Entwicklung der letzten Jahre zeigt, dass die Preise der elektrifizierten Fahrzeuge sinken. Der Nissan Leaf ist beispielweise seit Markteinführung knapp 7000 Euro billiger geworden und liegt damit derzeit bei etwa 23.790 Euro, der C-Zero kostet nur noch 17.850 Euro – knapp die Hälfte seines Einführungspreises. (Weißenborn 2015) Auch in Zukunft wird der Preis weiter fallen. Bei Elektroautos werden die Mehrkosten im Vergleich zu konventionellen Modellen noch stärker fallen als bei Plug-in-Hybriden, da technologische Fortschritte im Bereich der Batterie stärker ins Gewicht fallen. (Wolfram und Lutsey 2016)

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

Die Initiative der Bundesregierung zur Förderung der Elektromobilität wird mit den vorgesehenen Steuervergünstigungen und Investitionsförderungen einen wichtigen Beitrag leisten, den finanziellen Aufwand zu verringern.

Der entscheidende Kostentreiber beim Elektroauto ist die Batterie. Bei Produktionskosten einer Lithium-Ionen-Zelle von ca. 200 Euro pro Kilowattstunde (kWh) und einer Kapazität für einen Kleinwagen von ca. 25 kWh liegt der Preis alleine für eine Batterie bereits bei ca 5000 Euro. Momentane Entwicklungen lassen vermuten, dass dieser bis 2030 auf ca. 100 Euro pro kWh sinken könnte. (VDI 2016) 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. Abschn. 2.2) Die Beispielkalkulation der Total-Cost-of-Ownership (TCO) für ein Elektroauto und ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor identifiziert folgende Kostenstruktur (Abb. 2.1):

Die Annahmen, auf welchen die Berechnungen basieren, können Tab. 2.1 entnommen werden. Die Kosten berücksichtigen einen höheren Anschaffungspreis sowie wegfallende bzw. reduzierte Kfz-Steuern, um rund 35 % geringere Wartungs- und Reparaturkosten

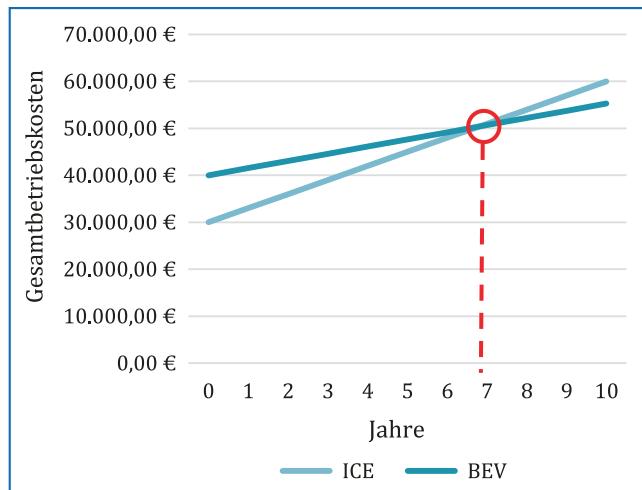


Abb. 2.1 TCO eines konventionellen Fahrzeugs (ICE) und eines reinelektrischen Fahrzeugs (BEV) im Vergleich

Tab. 2.1 Annahmen zur TCO-Berechnung aus Abb. 2.1

Annahmen	ICE	BEV
Kaufpreis	30.000 €	40.000 €
Durchschnittlicher Verbrauch auf 100 km	6,5 l	12 kWh
Energiekosten	1,28 €/l (ADAC 2016)	0,29 €/kWh
Kfz-Steuern, Wartungs- und Versicherungskosten	1500 €	900 €
Jahreslaufleistung	18.000 km	18.000 km

und etwa gleich hohe Versicherungskosten für Elektroautos im Vergleich zu herkömmlichen Autos. Zudem wurde angenommen, dass Elektrofahrzeuge mit einem reinelektrischen Antrieb ca. 12 kWh auf 100 km benötigen, zu einem Preis von etwa 0,29 Euro pro kWh und einer Jahreslaufleistung von 18.000 km. Folglich sind diese Fahrzeuge bei den angesetzten Verbrauchszahlen günstiger als ein herkömmliches Auto. Bei einem Spritpreis von 1,28 Euro pro Liter und einem durchschnittlichen Verbrauch von ca. 6,5 l/100 km ergeben sich nach einer Nutzung von ca. 6,8 Jahren deutlich niedrigere TCO. Ziel muss es sein, das bereits erwähnte Kostenminimierungspotenzial von Elektroautos zu nutzen und den Kaufpreis in Zukunft deutlich zu reduzieren, sodass sich die Kostenkurve eines BEV insgesamt weiter nach unten verschiebt und sich Elektroautos im Vergleich zu Autos mit Verbrennungsmotoren bereits nach einer kürzeren Nutzungsdauer amortisieren. Vor dem Hintergrund des Ölpreisfalls Ende 2014 zeigt sich, dass dieser Preisunterschied nicht mit Gewissheit vorausgesetzt werden kann. In Deutschland wurden im Jahr 2015 zwar etwa 45 % mehr Elektrofahrzeuge und 145 % mehr Plug-in-Fahrzeuge zugelassen als im Jahr 2014 (KBA 2015), jedoch räumt die Bundesregierung 2016 ein, dass