

Heymann, Eric; Koppel, Oliver; Puls, Thomas

Research Report

Evolution statt Revolution - die Zukunft der Elektromobilität

IW-Analysen, No. 84

Provided in Cooperation with:

German Economic Institute (IW), Cologne

Suggested Citation: Heymann, Eric; Koppel, Oliver; Puls, Thomas (2013) : Evolution statt Revolution - die Zukunft der Elektromobilität, IW-Analysen, No. 84, ISBN 978-3-602-45524-9, Institut der deutschen Wirtschaft (IW), Köln

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/181845>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

Eric Heymann / Oliver Koppel / Thomas Puls

Evolution statt Revolution – die Zukunft der Elektromobilität

Analysen

Forschungsberichte
aus dem Institut der deutschen Wirtschaft Köln

Eric Heymann / Oliver Koppel / Thomas Puls

Evolution statt Revolution – die Zukunft der Elektromobilität

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek.

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie. Detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://www.dnb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-602-14906-3 (Druckausgabe)

ISBN 978-3-602-45524-9 (E-Book|PDF)

In Kooperation mit
Deutsche Bank



Herausgegeben vom Institut der deutschen Wirtschaft Köln

Grafik: Dorothe Harren

© 2013 Institut der deutschen Wirtschaft Köln Medien GmbH

Postfach 10 18 63, 50458 Köln

Konrad-Adenauer-Ufer 21, 50668 Köln

Telefon: 0221 4981-452

Fax: 0221 4981-445

iwmedien@iwkoeln.de

www.iwmedien.de

Druck: Hundt Druck GmbH, Köln

Inhalt

1	Einleitung	5
2	Globale Rahmenbedingungen im Weltautomobilmarkt	10
3	E-Mobilität: Was ist gemeint?	14
3.1	Batterien – einige Vorbemerkungen	14
3.2	Brennstoffzelle	17
3.3	Verschiedene Konzepte im Pkw	23
3.4	Exkurs: Elektroantrieb für Zweiräder	25
3.5	Exkurs: Elektroantrieb für Nutzfahrzeuge	26
4	Herausforderungen an die E-Mobilität	29
4.1	Rohstoffbedarf – Importabhängigkeit bleibt bestehen	29
4.2	Batterietechnik – noch großer Entwicklungsbedarf	37
4.3	Wertschöpfungsketten – Marktanteile verschieben sich	44
4.4	Strombedarf und Stromquelle – vorerst kein großes Problem	50
4.5	Klimafreundlichkeit – von Rahmenbedingungen abhängig	52
5	Arbeitskräftebedarf der E-Mobilität	58
5.1	Methodik	59
5.1.1	Abgrenzung der Kernqualifikationen und -branchen	59
5.1.2	Demografiebedingter Ersatzbedarf	60
5.1.3	Genereller und spezifischer Expansionsbedarf	64
5.2	Qualifikationen und Qualifikationsbedarf	67
5.2.1	Akademiker	67
5.2.2	Berufliche Qualifikationen	68
5.3	Arbeitskräftepotenziale	69
5.3.1	Weibliche Arbeitskräfte	69
5.3.2	Teilzeiterwerbstätige	70
5.3.3	Arbeitslose	71
5.3.4	Bildungsausländer	72
6	Die Kundensicht: Wann sich ein Elektroauto lohnt	73
6.1	Sinkende Kosten sind die conditio sine qua non	74
6.2	Geringe Reichweite ist aktuell kein grundsätzliches Problem	79
6.3	Alternative Mobilitätskonzepte gewinnen an Bedeutung	81

6.4	Batterie-Leasing oder Wechselstationen: Wer zahlt?	82
6.5	Ladeinfrastruktur: Ausbau vorerst nur punktuell nötig	84
6.6	Politische Optionen zur Förderung der E-Mobilität	87
6.7	Marktpotenzial in Deutschland: vier Szenarien	96
7	Fazit	100
	Literatur	102
	Kurzdarstellung / Abstract	109
	Die Autoren	110

1

Einleitung

Über viele Jahrhunderte hinweg war das Schiff die schnellste und sicherste Methode, um Personen und Güter zu befördern. Deshalb entstanden alle großen Zivilisationen an Schifffahrtswegen. Die hieraus hervorgegangene Siedlungsstruktur prägt den Globus bis in unsere Tage. Vor gut 150 Jahren begann das Zeitalter der Eisenbahn. Auch dieses Transportmittel hinterließ deutliche Spuren auf den Landkarten der Neuzeit. Der schnelle und zuverlässige Transport über die Schiene ermöglichte es den Städten, weiter zu wachsen und abseits der Wasserstraßen ganz neue Agglomerationen zu bilden. Doch den größten Einfluss auf die heutigen Wirtschafts- und Siedlungsstrukturen hatte das Kraftfahrzeug mit Verbrennungsmotor, das in den vergangenen 100 Jahren die Mobilität von Menschen und Gütern revolutioniert hat.

In den letzten Jahren wurde aber zunehmend die Frage gestellt, wie lange das Zeitalter des Verbrennungsmotors noch dauern kann. Steigende Rohölpreise, die Endlichkeit fossiler Energieträger, die Schadstoffbelastung in den Städten und die Klimadebatte haben die Frage nach möglichen Alternativen zum Verbrennungsmotor als Grundlage der Mobilität neu angefacht. Dabei hat zuletzt vor allem eine Alternative die Öffentlichkeit geradezu elektrisiert: das Elektroauto.

In den Medien wurde teilweise bereits die elektrische Revolution im Individualverkehr ausgerufen. Doch so richtig revolutionär sind die Idee vom elektrischen Fahren und die eingesetzte Technik eigentlich nicht. Im Fall des Elektroautos ist viel eher von einem Comeback zu reden als von einer technischen Revolution. Zu Beginn des Automobilzeitalters gegen Ende des 19. Jahrhunderts war es nämlich keineswegs ausgemacht, dass es der Verbrennungsmotor sein würde, der die Mobilität des 20. Jahrhunderts dominieren würde. Vielmehr drängten zeitgleich drei neue Antriebskonzepte auf den Markt für Individualmobilität, der bis dahin vom Pferd und vom Pferdefuhrwerk beherrscht wurde. Es handelte sich um Elektroautos, Autos mit Benzinmotor und dampfgetriebene Autos. Diese Fahrzeugtypen befanden sich am Markt zunächst auf Augenhöhe. Gerade der Verbrennungsmotor wurde skeptisch gesehen, denn diese Technik war völlig neu. Die Vorstellung, ein Fahrzeug mit Explosionen anzutreiben, weckte damals erhebliche Bedenken, wie ein vor etwa 130 Jahren in den USA geschriebener Text illustriert (zitiert nach Pehnt, 2002, 60):

„Eine neue Energiequelle mit dem Namen Benzin ist von einem Bostoner Ingenieur erzeugt worden. Dieser Brennstoff wird nicht unter einem Kessel verbrannt, sondern explodiert im Zylinder eines Motors ... Die Gefahren sind doch offensichtlich. Benzin in den Händen von Leuten, die vor allem an Profit interessiert sind, stellt eine Feuer- und Explosionsgefahr erster Klasse dar. Pferdlose, von Benzin angetriebene Kutschen können Geschwindigkeiten von 14 oder sogar 20 Meilen pro Stunde erreichen. Die Bedrohung, die von solchen Fahrzeugen ausgeht, die durch unsere Straßen rasen und unsere Atmosphäre vergiften, verlangt nach einer gesetzlichen Antwort, auch wenn die militärischen und ökonomischen Implikationen überwältigend sind ... Im Übrigen sind die Herstellungskosten des Benzins jenseits der Finanzkraft unserer privaten Industrie ... Außerdem werden durch diese Entwicklung unsere Pferde überflüssig. Dadurch wird unsere Landwirtschaft ruiniert!“

Tatsächlich wies das Elektroauto für den Verkehr in den Städten des späten 19. Jahrhunderts zeitsignifikante Vorteile gegenüber dem Verbrennungsmotor auf. So produzierte es keine Abgase und machte buchstäblich nicht so leicht die Pferde scheu. Auch die geringen Reichweiten von Elektroautos fielen kaum ins Gewicht, da die Städte kleiner waren als heute und über relativ wenige gute Straßen verfügten. In der Folge waren Elektroautos zu jener Zeit am Markt recht erfolgreich – auch wenn der Markt sehr klein war. So fuhren beispielsweise im Jahr 1897 eigentlich alle Taxis in New York mit Elektroantrieb. Auch die deutschen Autopioniere standen dem Elektroauto offen gegenüber. So baute Ferdinand Porsche im Jahr 1898 den Lohner-Porsche, ein nach heutigen Maßstäben etwas mehr als 100.000 Euro (damals 35.000 Österreichische Kronen) teures Elektroauto, das mit einer 410 Kilogramm schweren Batterie immerhin 50 Kilometer Reichweite erzielte. Bezeichnend für den Konstrukteur ist, dass Porsche auch eine Rennversion seines Elektroautos baute. Diese erreichte in der Spitze 60 km/h – bei einem Batteriegewicht von 1,8 Tonnen.

Ab dem Jahr 1900 änderten sich aber die Rahmenbedingungen zugunsten des Verbrennungsmotors. Die Straßen wurden auch im städtischen Umland weiter ausgebaut, wodurch die Reichweite der Fahrzeuge an Bedeutung gewann. Die Erfindung der Zündkerze bei Bosch ermöglichte den Bau von schneller laufenden Verbrennungsmotoren und dank des relativ günstigen Öls entstand sehr rasch ein Netz von Tankstellen. So waren bereits im Jahr 1909 in Deutschland rund 2.500 Tankstellen registriert, die nicht ganz 50.000

Kraftfahrzeuge – darunter in etwa 22.500 Zweiräder und 24.000 Pkws – versorgten (StJBdDR, 1910, 121). Es handelte sich zunächst um Drogerien, Kolonialwarenhändler, Fahrradhandlungen, Hotels und Gaststätten, für die der Benzinverkauf ein Zusatzgeschäft war. Dank dieser Synergien wuchs das „Tankstellen“-Netz sehr schnell, was die Verbreitung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor stark begünstigte. In der Summe trugen diese neuen Rahmenbedingungen erheblich dazu bei, dass sich der Verbrennungsmotor auf ganzer Linie durchsetzte und eine ganze Ära prägte. Das Elektroauto hingegen verschwand in der Versenkung – bis heute.

Doch nun setzt das Elektroauto zu einem Comeback an. Warum aber rückt die Elektromobilität (E-Mobilität) gerade jetzt so stark in die öffentliche Diskussion? Warum unterstützen viele Regierungen gerade jetzt diese Technologie? Und warum intensivieren die Automobilhersteller gerade jetzt ihre Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich der E-Mobilität?

Die Antworten hierauf basieren im Kern auf der Hoffnung, dass die E-Mobilität dazu beitragen kann, viele aktuelle oder sich abzeichnende wirtschaftliche, ökologische und soziale Probleme des heutigen Straßenverkehrs abzumildern oder zu lösen. In der Tat gibt es einen breiten Kanon von Erwartungen und Hoffnungen an die E-Mobilität. Hierzu zählen:

- Ein Treiber für die E-Mobilität ist die Erkenntnis, dass die Ölreserven der Erde endlich sind und dass der Ölpreis in Zukunft steigen wird. Strom als alternativer Kraftstoff im Straßenverkehr soll einen Ausweg aus dieser Kostenfalle aufzeigen. Aus deutscher und europäischer Perspektive erhofft man sich zudem, die Abhängigkeit von Ölimporten zu verringern.
- Als Argument für die E-Mobilität wird zudem der Klimaschutz vorgebracht. Wenn man unterstellt, dass der Strombedarf für Elektrofahrzeuge durch erneuerbare Energien gedeckt wird, sinken die Kohlendioxidemissionen (CO₂) des Straßenverkehrs durch den Einsatz von Elektroautos.
- Der höhere Wirkungsgrad von Elektrofahrzeugen und die niedrigen lokalen Schadstoff- und Lärmemissionen sollen die Städte wohnlicher machen.
- In der E-Mobilität wird auch ein Baustein zur Stabilität der Stromnetze und zur Versorgungssicherheit gesehen. Denn erneuerbare Energien werden wichtiger. In Deutschland soll ihr Anteil am Stromverbrauch bis zum Jahr 2020 von zuletzt mehr als 20 Prozent auf 35 Prozent steigen (BMU, 2011, 5). Da die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen stark schwankt, sollen Batterien der Elektrofahrzeuge als Pufferspeicher dienen.
- Einige Verkehrsexperten sehen die E-Mobilität als einen Teil innovativer Verkehrssysteme (Schraven et al., 2010, 22). Diese sollen sich durch eine

bessere, auf Informationstechnologie (IT) gestützte intermodale Vernetzung der Verkehrsträger, eine flexiblere Nutzung von Fahrzeugen und veränderte Eigentümerstrukturen auszeichnen. So könnten sich zum Beispiel Automobilhersteller durch eine Kooperation mit Unternehmen des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) zu Anbietern von integrierten Mobilitätskonzepten wandeln.

- Die Bundesregierung verfolgt das Ziel, bis zum Jahr 2020 etwa eine Million Elektrofahrzeuge¹ auf Deutschlands Straßen zu bringen (Bundesregierung, 2011, 11). Dies geht einher mit der Idee, Leitmarkt und Leitanbieter im Bereich E-Mobilität zu werden.
- Schließlich erwarten die Kunden, dass auch Elektrofahrzeuge ihre Bedürfnisse in puncto Preiswürdigkeit, Komfort, Sicherheit, Leistung, Verbrauch, Zuverlässigkeit und Design erfüllen. Die Autokäufer werden diese und andere Kriterien auch künftig gemäß ihren individuellen Präferenzen sehr unterschiedlich gewichten.

Sind die Erwartungen an die E-Mobilität realistisch? Steht die elektrische Revolution vor der Tür oder befinden wir uns erst am Beginn eines gleitenden Übergangs vom Verbrennungsmotor zum rein elektrischen Fahren? Oder liegt die Zukunft der Mobilität ganz woanders? Das sind Fragen, mit denen sich gerade ein Autoland wie Deutschland auseinandersetzen muss. Ein Umstieg auf das Elektroauto würde nämlich erhebliche Auswirkungen auf die stark von der Automobilindustrie geprägte deutsche Wirtschaft haben, wie ein Blick auf den Weltautomobilmarkt veranschaulicht.

Allein im Jahr 2010 wurden weltweit 78 Millionen Fahrzeuge produziert, davon knapp 58 Millionen Pkws (OICA, 2012). Mit etwas mehr als 11,6 Millionen produzierten Pkws hatten deutsche Hersteller einen Weltmarktanteil von etwa 20 Prozent. Die Hälfte davon wurde in deutschen Werken gebaut (VDA, 2012). Diese Zahlen verdeutlichen die hohe Bedeutung, die sowohl eine elektrische Revolution als auch eine evolutionäre Entwicklung hin zum elektrischen Fahren für Deutschland haben würden.

In Bezug auf die Erwartungen an die Elektromobilität ist in jedem Fall eine beträchtliche Diskrepanz zwischen den Erwartungen in der Öffentlichkeit und denen von Experten festzustellen. So zeigen die in Tabelle 1 dargestellten Ergebnisse aus einer Expertenbefragung, dass im Kreis der Befragten einerseits eine relativ geringe Erwartungshaltung gegenüber den ökologischen

¹ Die Bundesregierung versteht in diesem Zusammenhang auch Plug-in-Hybriden als Elektroautos. Laut der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) schlüsselt sich das Ziel von einer Million wie folgt auf: 500.000 Plug-in-Hybriden, 450.000 batterieelektrische Fahrzeuge und 50.000 Plug-in-Hybrid-Nutzfahrzeuge.

Expertenprognosen zum Einfluss von E-Mobilität

Tabelle 1

Ergebnisse einer Befragung in Deutschland

Kriterium	Bewertung
Bedarf an neuen Facharbeitern im Kfz-Gewerbe steigt (Elektrik statt Mechanik)	1,76
Importe von Seltenen Erden und Metallen steigen	1,77
Akademikerbedarf steigt (Elektrotechnik, Chemie)	1,82
Rohölimporte sinken	3,29
CO ₂ -Emissionen sinken	3,54

Bewertungsskala: 1 = sehr stark; 2 = eher stark; 3 = eher schwach; 4 = gar nicht; Befragung von 181 Umweltexperten der Wirtschaft im Juni 2011.

Quelle: IW-Umweltexpertenpanel 3/2011

Effekten besteht. Andererseits rechnen die Experten mit spürbaren Nachfrageveränderungen auf dem Arbeitsmarkt, denen die Autoren in der vorliegenden Analyse daher auch besondere Aufmerksamkeit schenken wollen.

Die vorliegende Analyse stellt eine erweiterte Langfassung der Studie „Elektromobilität. Sinkende Kosten sind *conditio sine qua non*“ dar, welche die Autoren im September 2011 im Rahmen einer Kooperation des Instituts der deutschen Wirtschaft Köln (IW) und der Deutsche Bank Research vorgestellt haben (Heymann et al., 2011). Im Folgenden wird analysiert, wie realistisch die Erwartungen an die E-Mobilität sind und welche Herausforderungen zumindest kurz- und mittelfristig nicht oder nur teilweise bewältigt werden können. Ferner geht die Untersuchung der Frage nach, mit welchen marktwirtschaftlichen und ordnungspolitischen Instrumenten Regierungen die E-Mobilität unterstützen wollen und können. Zudem schätzen die Autoren das Marktpotenzial für Elektrofahrzeuge in Deutschland im Jahr 2020, basierend auf verschiedenen Szenarien und unabhängig vom vorgegebenen politischen Ziel.

Die Analyse geht an vielen Stellen auf die Arbeiten der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) und deren Arbeitsgruppen ein und bezieht sich auf diese, etwa auf den „Zweiten Bericht der NPE“ vom Mai 2011 (NPE, 2011a; 2011b). Gleichwohl wird an vielen Stellen unabhängig von den Resultaten der NPE argumentiert werden. An geeigneten Stellen ergänzen die Autoren Aussagen durch die Ergebnisse der Befragungen des Umweltexpertenpanels des IW Köln.

2

Globale Rahmenbedingungen im Weltautomobilmarkt

Dass heute ein Comeback des Elektroautos als möglich angesehen wird, hat vor allem damit zu tun, dass sich die globalen Rahmenbedingungen erneut verändert haben, doch diesmal zugunsten des elektrischen Fahrens. Die Welt von heute durchläuft gerade einen tiefgehenden Veränderungsprozess. Sowohl ökonomische als auch ökologische und soziale Rahmenbedingungen verändern sich auf dem Globus und erfordern Anpassungsprozesse vonseiten der Wirtschaft. Dabei dürften zwei Megatrends besonders prägend für die Zukunft des Automobils sein – und beide begünstigen die Rückkehr des Elektroautos.

Bevölkerungsentwicklung

Die Weltbevölkerung wächst schnell. Die Vereinten Nationen rechnen heute damit, dass es im Jahr 2050 über neun Milliarden Menschen auf der Erde geben wird (UN, 2010, 1). Von größerer Bedeutung sind aber die zu erwartenden Veränderungen in der Zusammensetzung der Weltbevölkerung. Hier sind verschiedene Entwicklungen zu beachten, welche auch die Nachfrage nach Mobilität und Automobilen nachhaltig prägen werden (vgl. auch Übersicht 1). Ein wesentlicher Trend ist die zunehmende Urbanisierung. Im Jahr 2009 lebten weltweit erstmals mehr Menschen in Städten als auf dem Land. Es ist wahrscheinlich, dass sich dieser Trend langfristig weiter fortsetzen wird. Nach heutigen Prognosen ist zu erwarten, dass sich das künftige Bevölkerungswachstum fast vollständig auf die urbanen Zentren konzentrieren wird, während sich die Bevölkerung im ländlichen Raum tendenziell eher verringern wird.

Wie Tabelle 2 zeigt, ist für den Zeitraum von 2010 bis 2025 mit einem Anstieg der urbanen Bevölkerung um fast ein Drittel zu rechnen. Den prozentual größten Zuwachs wird es mit über 46 Prozent in Megastädten mit mehr als zehn Millionen Einwohnern geben, deren Zahl auf knapp 30 steigen wird. Zudem werden im Jahr 2025 mehr als 2,2 Milliarden Menschen in Städten ab 500.000 Einwohnern leben. Das sind ungefähr 50 Prozent aller Stadtbewohner.

Dabei kommt es aber zu erheblichen regionalen Unterschieden. In Europa und Nordamerika nimmt der Anteil der Stadtbewohner an der Gesamtbevölkerung – auf hohem Niveau – nur noch sehr langsam zu, während er in Asien und Afrika bis 2025 rasant zulegen wird, sodass im Jahr 2025 auch gut

Alterung der Bevölkerung

Übersicht 1

Ein beachtenswerter Trend ist die zunehmende Zahl älterer Menschen. Schon heute gibt es weltweit über 780 Millionen Menschen im Alter von über 60 Jahren. Ihre Zahl wird in den kommenden Jahrzehnten enorm zunehmen. Für das Jahr 2050 rechnen die Vereinten Nationen bereits mit mehr als zwei Milliarden über 60-jährigen weltweit. Die Alterung der Weltbevölkerung ist dabei keineswegs auf die Industrieländer beschränkt. Gerade in den asiatischen Schwellenländern vollzieht sich der Alterungsprozess der Bevölkerung mit einer viel höheren Geschwindigkeit als in den Industrieländern. In Bezug auf den Anteil älterer Menschen an der Gesamtbevölkerung holen die Länder Asiens und Lateinamerikas sehr schnell gegenüber Europa auf, vor allem weil die Lebenserwartung schnell steigt (Stiftung Weltbevölkerung, 2011). Auch diese Entwicklung wird spürbaren Einfluss auf Mobilitätsbedürfnisse und Fahrzeuge der Zukunft haben.

Eigene Zusammenstellung

50 Prozent der Asiaten und Afrikaner in Städten leben werden. Zentren dieser Entwicklung werden China und Indien sein, also die Länder, denen eine sehr große Bedeutung als zukünftige Absatzmärkte für Automobile zugeschrieben wird. Allein in diesen beiden Ländern wird die urbane Bevölkerung bis zum Jahr 2025 um etwa 400 Millionen Menschen wachsen. Durch die fortschreitende Urbanisierung in wichtigen Märkten verliert die maximale Reichweite eines Fahrzeugs an Bedeutung für die Kunden. Zugleich wächst der Druck auf die Hersteller, Fahrzeuge mit möglichst geringen Emissionen von Schadstoffen und Lärm auf den Markt zu bringen. In vielen Ländern mit großen Metropolen werden die Emissionsanforderungen an Fahrzeuge verschärft. Am weitesten ist bislang die Europäische Union (EU) gegangen, die nicht nur die Emissionen von Schadstoffen und Lärm reguliert hat. Vielmehr sind in Europa mit der Luftreinhalterichtlinie und der Umgebungslärmrichtlinie auch Immissionsstandards geschaffen worden (Puls, 2008, 21 f.). In diesem Umfeld strenger Emissions- und Immissionsregeln kommen die Vorteile des Elektro-

Urbane Bevölkerung nach Stadtgrößen

Tabelle 2

Stadtgröße	Einwohner, in Millionen		
	1995	2010	2025
Unter 100.000	914	1.146	1.593
100.000 bis unter 500.000	534	629	684
500.000 bis unter 1.000.000	237	352	465
1.000.000 bis unter 5.000.000	526	749	1.004
5.000.000 bis unter 10.000.000	143	225	321
Über 10.000.000	186	320	469
Insgesamt	2.540	3.421	4.536

Quelle: UN, 2010, 5

autos wieder sehr viel besser zum Tragen. Es ist zu erwarten, dass die großen Schwellenländer diesen regulatorischen Trend zeitversetzt nachvollziehen werden. Schon heute ist in ihren Metropolen der Problemdruck durch Luftschadstoffe und Lärm sehr groß. So gelten in der Stadt Peking bereits die gleichen Emissionsvorschriften für Pkws wie in Europa.

Rohölpreis

Seit den Ölkrisen der Jahre 1973 und 1979 hat der Rohölpreis einen Sonderstatus in der öffentlichen Wahrnehmung. Es dürfte der mit Abstand bekannteste und meistdiskutierte Rohstoffpreis der Welt sein. Doch seit einigen Jahren wird nicht mehr nur der Rohölpreis diskutiert – der seit Jahren tendenziell steigt –, sondern auch die Frage der Verfügbarkeit rückte ins Blickfeld. Unter dem Begriff Peak Oil wird zunehmend die Frage thematisiert, wie lange der endliche Rohstoff Rohöl (gemeint ist in diesem Zusammenhang in der Regel das konventionelle Rohöl) noch in den Mengen gefördert werden kann, wie sie am Markt nachgefragt werden. Grundlage dieser Debatte ist die sogenannte Hubbert-Kurve (Hubbert, 1956). Diese beschreibt im Wesentlichen das Problem des abnehmenden Grenzertrags bei der Ausbeutung von Ölfeldern. Wenn ein bestimmter Entleerungsgrad eines Ölfelds erreicht ist, geht die mit konstantem Aufwand erzielbare tägliche Fördermenge zurück. Wenn nicht ausreichend neue Felder erschlossen werden, ist gemäß der Hubbert-Kurve zunächst mit einer Stagnation der weltweiten Fördermenge und dann mit einem sich beschleunigenden Rückgang der verfügbaren Rohölmengen zu rechnen. Dies bedeutet nicht, dass plötzlich kein Rohöl mehr verfügbar ist. Unabhängig vom Zeitpunkt, an dem der als Peak Oil bezeichnete geophysikalische Wendepunkt erreicht wird, steigt künftig der Rohölpreis. Die Nachfrage wird nämlich tendenziell schneller wachsen als das Angebot und die Förderkosten pro Barrel werden spürbar zulegen.

Auch wenn es heute noch keine geologisch begründeten Verfügbarkeitsprobleme bei Rohöl gibt, sind doch schon seit einer Dekade deutlich steigende Ölpreise zu verzeichnen. Ende 2001 lag der Preis für ein Barrel Öl (159 Liter) bei einem Preis von unter 20 US-Dollar. Nachdem Anfang des Jahres 2008 erstmals die 100-Dollar-Marke übersprungen wurde, überstieg der Preis im Lauf desselben Jahres sogar kurz die 140-Dollar-Grenze. Im Zuge der dann folgenden globalen Wirtschaftskrise brach auch der Rohölpreis drastisch ein, pendelte sich aber im Lauf des Jahres 2011 wieder bei über 100 US-Dollar pro Barrel ein (Abbildung 1). Die nominale Versiebenfachung des Ölpreises in sieben Jahren war aber auf eine ganze Reihe von Ursachen zurückzuführen.

Preisentwicklung am Rohölmarkt

Abbildung 1

Preis in US-Dollar pro Barrel Brent¹



¹ Monatsdurchschnitt der Sorten Dubai, Brent und WTI.
Quelle: HWWI

Hierzu zählen ein kräftiger globaler Nachfrageanstieg seit dem Jahr 2001, kurzfristige Angebotsbeschränkungen und geopolitische Risiken in den Förderregionen, von denen viele in den letzten zehn Jahren eine Phase großer politischer Instabilität durchliefen.

Unabhängig von den Ursachen ist aber festzuhalten, dass die Zeit des billigen Rohöls, das einstmals den Siegeszug der Verbrennungsmotoren ermöglicht hat, wohl vorbei ist. Erdölbasierte Mobilität wird tendenziell teurer werden und der technische Fortschritt wird vermutlich nur einen Teil der Rohstoffpreissteigerungen kompensieren können. Diese Umkehrung der Rahmenbedingungen begünstigt *ceteris paribus* nun das Comeback des Elektroautos.

Es ist allerdings anzumerken, dass der Preisanstieg bei anderen – weniger im Fokus der Öffentlichkeit stehenden – Rohstoffen ebenso stark ausgefallen ist. In vielen Fällen wurde der Preiseinbruch der Jahre 2008 und 2009 in den Folgejahren mehr als ausgeglichen (Bardt, 2011). Hintergrund dieser Preisanstiege ist vor allem ein Anstieg der globalen Nachfrage, der vom Wachstum in den Schwellenländern getrieben wird.

3

E-Mobilität: Was ist gemeint?

Vorab ist natürlich die Frage zu klären, was unter E-Mobilität zu verstehen ist. Es gibt nämlich viele Möglichkeiten, Elektrizität im Straßenverkehr einzusetzen, wie im Folgenden aufgezeigt wird. Diese Ausführungen sind aber im Wesentlichen als Exkurs zu betrachten. Wenn nämlich in den weiteren Kapiteln von E-Mobilität gesprochen wird, sind reine Elektroautos beziehungsweise batterieelektrische Fahrzeuge (BEV – Battery Electric Vehicle) gemeint, die als Pkws genutzt werden. Am Anfang stehen einige grundsätzliche Anmerkungen zu den technischen Alternativen, die sich unter dem Begriff Elektromobilität subsumieren.

3.1 Batterien – einige Vorbemerkungen

Wenn man über die Einsatzmöglichkeiten von Elektroautos diskutiert, dann dreht sich der größte Teil der Diskussion um das technische Herz eines BEV – die Batterie. Aufgrund der großen Bedeutung dieser Komponente soll an dieser Stelle genauer auf ihre Technik und ihre Entwicklungspotenziale eingegangen werden.²

Die Geschichte der Batterie begann bereits 1789 mit der Entdeckung der Elektrizität durch Luigi Galvani. Im Jahr 1800 baute Alessandro Volta die erste Batterie, indem er Kupfer- und Zinkscheiben übereinanderstapelte, jeweils ein mit Salzlösung getränktes Stück Pappe zwischen die einzelnen Scheiben legte und diese mit einem Draht verband. Er kombinierte also ein Metall, welches dazu neigt, Elektronen abzugeben (Anode), mit einem, das dazu neigt, Elektronen aufzunehmen (Kathode), und trennte sie mit einem Material, welches Ionen leiten kann (Elektrolyt). Verbindet man Anode und Kathode über einen Draht, so fließen Elektronen durch den Draht von der Anode in die Kathode, was auch als Strom bezeichnet wird. Zeitgleich wandern positiv geladene Ionen von der Kathode zur Anode und bilden dort eine feste Verbindung. Dieser Vorgang setzt sich so lange fort, bis es an der Anode keinen „Überschuss“ von Elektronen mehr gibt. In diesem Fall ist die Batterie „leer“. Die Kombination von Anode, Kathode und Elektrolyt bezeichnet man auch als galvanische Zelle oder Batteriezelle. Typischerweise

² Im Folgenden wird zugunsten einer besseren Lesbarkeit auf eine begriffliche Trennung zwischen Batterie und Akkumulator verzichtet. Im Regelfall ist aber mit Batterie eine Sekundärbatterie gemeint, also ein wiederaufladbarer Energiespeicher.

bestehen heutige Batterien aus einer Vielzahl von zusammenschalteten galvanischen Zellen (Übersicht 2). Die in den einzelnen Zellen eingesetzten Materialien bestimmen darüber, welche Spannung den Strom begleitet und wie groß die Speicherkapazität der Batterie ist.

Begriffe aus dem Batteriebau

Übersicht 2

Aktives Material

Als aktives Material bezeichnet man in einer Batterie die Stoffe, welche Elektronen austauschen. Aktives Material ist typischerweise in den Elektroden eingelagert. Die Menge aktiven Materials bestimmt im Endeffekt die Speicherkapazität, wobei die Speicherkapazität pro Kilogramm von den elektrochemischen Eigenschaften des aktiven Materials abhängt.

Batteriezelle

Eine Zelle ist der Grundbaustein heutiger Batterien. Jede Zelle ist ein kleiner chemischer Energiespeicher und -wandler, wobei ihre Speicherkapazität von der Menge an elektrochemisch aktivem Material in der Zelle bestimmt wird. Eine heutige Lithium-Ionen-Zelle liefert je nach Kathodenmaterial eine Nennspannung von 2,9 bis 3,7 Volt und erreicht eine Energiedichte von 140 bis 170 Wh/kg (Wattstunden pro Kilogramm).

Stack

Ein Stack (Stapel) besteht aus mehreren zusammenschalteten Batteriezellen.

Batteriesystem

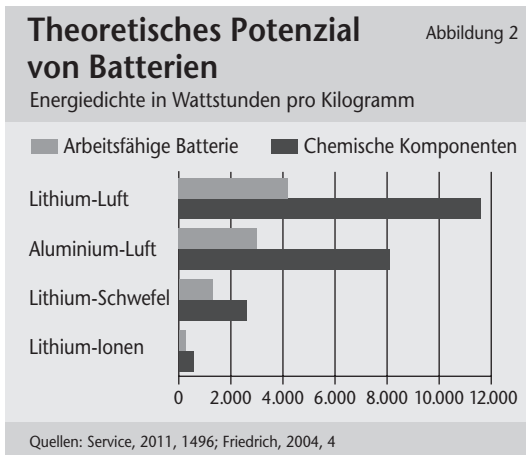
Ein Batteriesystem enthält mehrere zusammenschaltete Stacks. Zum Batteriesystem gehören ferner Steuerungselektronik und die Batteriekühlung. Die Energiedichte eines Batteriesystems liegt im Regelfall etwa 40 Prozent unter der Energiedichte der verwendeten Zellen. Heute beträgt die Energiedichte von verwendbaren Batteriesystemen 80 bis 120 Wh/kg.

Eigene Zusammenstellung

An diesem Grundbauplan hat sich in den letzten 200 Jahren eigentlich nichts geändert. Allerdings haben Forscher praktisch alle denkbaren Materialkombinationen in den galvanischen Zellen ausprobiert, um Batterien für die unterschiedlichsten Anwendungen und Anforderungen zu bauen (für einen Überblick über verschiedene Batterietypen, ihre Eigenschaften und Einsatzgebiete vgl. GRS, 2007)

Im Zuge der Batterieentwicklungen hat sich gezeigt, dass von allen Elementen Lithium aufgrund seiner elektrochemischen Eigenschaften wohl am besten geeignet ist, um Batterien mit einer hohen Speicherkapazität herzustellen. Ein weiterer Vorteil dieser Technik besteht in der recht hohen Spannung pro Batteriezelle. Batterien auf Basis der Lithium-Ionen-Technik sind daher recht weit verbreitet. Das weltweite Marktvolumen von Lithium-Ionen-Batterien wird heute schon auf 10 Milliarden US-Dollar beziffert (Service, 2012, 163). Es handelt sich bei diesem Batterietyp also um eine Technologie, die bereits fest am Markt etabliert ist.

Da sie eine relativ hohe Energiedichte aufweisen, gelten diese Batterien derzeit auch als erste Wahl für BEV. Bei einer Lithium-Ionen-Batterie werden in der Anode und in der Kathode Lithium-Ionen als aktives Material eingelagert. Als Reaktionspartner in der Kathode werden derzeit oft Kobalt oder Eisenphosphat verwendet. Die Lithium-Ionen-Batterie wird mit großem Aufwand weiterentwickelt, was sich an der hohen Zahl von Patentanmeldungen mit Bezug auf diese Technologie zeigt. Bei einer Lithium-Kobalt-Batterie hat das aktive Material eine theoretische Energiespeicherkapazität von rund 570 Wh/kg. Das ist die physikalische Obergrenze für dieses aktive Material. Ein Batteriesystem kann diesen Wert nicht erreichen, da das aktive Material nur einen kleineren Teil von dessen Gesamtmasse ausmacht.



Wenn man jedoch den Energiebedarf eines BEV berücksichtigt, dann wird schnell deutlich, dass diese Energiedichte nicht ausreichen kann, um ein BEV mit großer Reichweite oder gar einen Fernverkehrslastwagen elektrisch anzutreiben. Hier stößt die Lithium-Ionen-Technik an physikalische Grenzen. Daher wird diese Technologie zwar einen Einstieg in die Elektro-

mobilität ermöglichen. Damit das BEV aber wirklich in alle Bereiche des Straßenverkehrs vordringen kann, bedarf es neuer Batteriekonzepte, an denen derzeit kräftig geforscht wird. Wie Abbildung 2 zeigt, gibt es durchaus Konzepte, die weitaus höhere Energiedichten versprechen als die Lithium-Ionen-Technik.

Allerdings befinden sich alle diese Konzepte noch in der Grundlagenforschung. Es ist also offen, ob sie mittel- bis langfristig wirklich eine Alternative zur Lithium-Ionen-Technik darstellen können. Die erfolgversprechendsten alternativen Batteriekonzepte sind derzeit:

- **Lithium-Schwefel.** Dieses Konzept ist in der Entwicklung wohl am weitesten fortgeschritten. Es vereint eine hohe theoretische Energiedichte des aktiven Materials von rund 2.600 Wh/kg mit relativ geringen Kosten. Als größtes Problem sind die heute unzureichende Zyklenfestigkeit und die schlechte Ausnutzung des aktiven Materials zu nennen (Service, 2011, 1496).

- **Lithium-Luft.** Mit Lithium-Luft-Batterien lässt sich theoretisch die Energiedichte von Diesel erreichen. Die Hauptprobleme sind die Zyklenfestigkeit und der Schutz des Lithiums vor der Feuchtigkeit in der Umgebungsluft (Wilcke, 2011, 52).
- **Aluminium-Luft.** Aluminium weist ähnlich wie Lithium günstige elektrochemische Eigenschaften auf. Zudem ist es auf der Erde sehr häufig und brennt nicht, weshalb es als mögliche Alternative zum Lithium gilt. Das Hauptproblem bei der Entwicklung von Aluminium-Luft-Batterien liegt darin, dass chemische Prozesse im Inneren die Leitfähigkeit schnell reduzieren (Service, 2012, 163).

Ein völlig anderes Batteriekonzept stellt die „Semi Solid Fuel Cell“ dar (Chiang et al., 2011), denn sie weicht vom traditionellen Bauplan ab. Hierbei handelt es sich um eine neuartige Redox-Flow-Batterie, bei der die Energie in einem Gel gespeichert wird. Dieses wird in einen Energiewandler gepumpt und dort entladen. Im Anschluss kann das Gel aufgeladen oder einfach ausgetauscht werden. Durch die Trennung von Speicher und Energiewandler sind höhere Energiedichten auf der Ebene der Batteriesysteme möglich. Selbst gute Lithium-Ionen-Batterien erreichen weniger als 50 Volumenprozent aktives Material in einer Batterie. Dieser Wert lässt sich mit einer Redox-Flow-Batterie weit übertreffen. Ein weiterer Vorteil liegt in den geringeren Produktionskosten. Gerade die Interkalationsmaterialien der Elektroden (vgl. Abschnitt 5.2.1) sind in der Herstellung teuer und werden in diesem Batteriedesign viel weniger benutzt. Die Kosten für das energiespeichernde Gel liegen hingegen deutlich unter 100 US-Dollar pro kWh Speicherkapazität (Chiang et al., 2011, 515). Größtes Problem sind aktuell die Leistungsabgabe und -aufnahme, die noch signifikant gesteigert werden müssen, damit das Konzept marktfähig werden kann.

3.2 Brennstoffzelle

Als eine mögliche Alternative zum batterieelektrischen Fahrzeug (BEV) gilt das Brennstoffzellenauto. Streng genommen handelt es sich bei der Brennstoffzelle um einen elektrochemischen Energiewandler, der aus fossilen oder regenerativen Kraftstoffen Strom herstellt. Die eigentliche Traktion erfolgt in einem Brennstoffzellenauto durch einen Elektromotor. Auch wenn dieser Wandler technisch gesehen anders funktioniert als der Wandler in einer Batteriezelle, besteht der Unterschied zwischen Brennstoffzellenfahrzeug und BEV vor allem in der Form der Energiespeicherung. Im Endeffekt gleichen sich die Vor- und Nachteile beider Konzepte recht stark, aber es gibt auch signifikante Unterschiede.

Die Brennstoffzelle ist keine neue Erfindung. Sie wurde bereits im Jahr 1839 entwickelt. Lange fand sich jedoch kein passendes Einsatzgebiet für diese Technologie. Das änderte sich erst mit dem Apollo-Projekt der USA. Die Stromversorgung der Mondfähren erfolgte mithilfe von alkalischen Brennstoffzellen. Seitdem war das Militär ein wichtiger Treiber für die Weiterentwicklung der Brennstoffzelle. Eine der bekanntesten Anwendungen sind die deutschen U-Boote der Klassen 212a und 214, die als die leistungsfähigsten konventionellen U-Boote der Welt gelten. Ob und wann die Brennstoffzelle als Energiewandler im Automobilssektor wirklich in den Massenmarkt eintritt, ist aber kaum einzuschätzen. Bisher waren alle Prognosen zu diesem Thema viel zu optimistisch. Der Straßenverkehr gilt jedoch als eine der erfolgversprechendsten Anwendungen. Es existieren bei verschiedenen Herstellern Demonstrationsprojekte, welche die Einsatztauglichkeit von Brennstoffzellenfahrzeugen nachgewiesen haben.

Eigentlich ist es falsch, von „der“ Brennstoffzelle zu reden. Es gibt mehrere recht unterschiedliche Varianten dieses Energiewandlers, die sich in Hinsicht auf den elektrischen Wirkungsgrad, den genutzten Energieträger, die Betriebstemperatur und die Herstellungskosten stark unterscheiden (vgl. weitergehend Puls, 2006, 82 ff.). Im Autobau dürfte am ehesten eine Variante zum Einsatz kommen, die reinen Wasserstoff (H_2) als Brenngas nutzt. Da der Wasserstoff mit dem Luftsauerstoff reagiert, entsteht lediglich Wasserdampf als Abfallprodukt. Ein solches Fahrzeug würde also keine lokalen Schadstoffemissionen verursachen. Zum Bau dieser Brennstoffzellenform wird aber auch eine größere Menge Platin benötigt, was ein limitierender Faktor für den Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen werden könnte. Es ist jedoch in den letzten Jahren gelungen, den Platinbedarf deutlich zu senken, wodurch sich diese Situation entschärft hat.

Auf der Habenseite steht, dass Brennstoffzellen recht effiziente Energiewandler sind. Das für den Straßenverkehr favorisierte Konzept erreicht auf Zellebene elektrische Wirkungsgrade von 60 bis 70 Prozent. Das ist zwar weniger als bei einer Batterie, die elektrische Wirkungsgrade von 90 Prozent erreicht. Dafür liegt der Wirkungsgrad weit über dem von Verbrennungsmotoren, bei denen in etwa zwei Drittel der eingesetzten Primärenergie in Form von Abwärme verloren gehen.

Der wesentliche Unterschied zwischen BEV und Brennstoffzellenfahrzeug liegt aber im Energiespeicher, wobei Wasserstoff nach heutigem Kenntnisstand in direkter Konkurrenz zur Lithium-Ionen-Technik steht. Daher ist es an dieser Stelle angebracht, sich genauer mit dem Wasserstoff zu befassen.

Auch die Verwendung von Wasserstoff als Energiespeicher ist eine recht alte Idee. Schon Jules Verne sah im Wasserstoff die „Kohle der Zukunft“, wie man es in seinem 1874 erschienenen Buch „Die geheimnisvolle Insel“ nachlesen kann. Außer den Visionären trauen aber auch viele Wissenschaftler dem im Jahr 1766 entdeckten Wasserstoff das Potenzial zu, in der Nachfolge von Holz, Kohle und Öl das vierte Energiezeitalter der Menschheit einzuläuten. Der molekulare, gasförmige Wasserstoff (H_2) kann sowohl in einem konventionellen Motor verbrannt als auch in einer Brennstoffzelle in elektrischen Strom umgewandelt werden und wäre somit relativ flexibel einsetzbar. Neben seinen variablen Nutzungsmöglichkeiten besitzt der molekulare Wasserstoff einen weiteren bedeutenden Vorteil: Er kann nie knapp werden oder gar ausgehen, denn atomarer Wasserstoff (H) ist das mit Abstand am häufigsten vorkommende Element. Doch gibt es in dieser Mengenbetrachtung einen Wermutstropfen. Der atomare Wasserstoff ist hoch reaktiv und liegt daher fast immer in gebundener Form vor, beispielsweise in Form von Kohlenwasserstoffen wie Holz, Kohle, Erdgas oder Öl. Auch der Mensch besteht zu großen Teilen aus gebundenem Wasserstoff. Reiner Wasserstoff kommt aufgrund seiner hohen Reaktionsfreude in der Natur praktisch nicht vor.

Daher müsste molekularer Wasserstoff industriell hergestellt werden, bevor er in Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen genutzt werden kann (Übersicht 3). Dabei ist es in jedem Fall nötig, Energie in den Herstellungsprozess hineinzustecken. Molekularer Wasserstoff wäre also ebenso wie eine Batterie ein Sekundärenergieträger – ein künstlicher Energiespeicher. Die eigentliche Energiegewinnung findet mithilfe von Primärenergieträgern wie etwa dem Sonnenlicht oder fossilen Brennstoffen statt.

Die wichtigsten Verfahren zur Wasserstoffproduktion Übersicht 3

Eines der bekanntesten Verfahren zur Produktion von H_2 ist die Elektrolyse. Bei diesem Verfahren werden jeweils zwei Wassermoleküle durch die Zufuhr von elektrischem Strom in ein Sauerstoffmolekül (O_2) und zwei Wasserstoffmoleküle (H_2) zerlegt. Ein Teil der bei diesem Vorgang eingesetzten Energie kann durch Verbrennung des gewonnenen Wasserstoffs oder durch seine Umwandlung in einer Brennstoffzelle zurückgewonnen werden. Allerdings sind bei beiden Umwandlungsprozessen Energieverluste unvermeidlich. Da die Elektrolyse sehr stromintensiv ist, wird sie derzeit kaum im großen Maßstab genutzt. Kennzeichnend für dieses Verfahren ist, dass seine Klimafreundlichkeit vom verwendeten Strommix bestimmt wird. Die Herstellung von Wasserstoff unter Zuhilfenahme von Strom aus fossilen Energiequellen hätte in jedem Fall eine eher schlechte Klimabilanz aufzuweisen.

Das heute gängigste Verfahren zur Wasserstoffproduktion ist die Erdgasdampfpreformation (EDR). Bei diesem Verfahren wird allerdings fossiles Erdgas verbraucht und es kommt praktisch zu den gleichen CO_2 -Emissionen wie bei der Erdgasverbrennung, da die Kohlenstoffatome des Erdgases zusammen mit den Sauerstoffmolekülen der Umgebungsluft CO_2 bilden.

Eigene Zusammenstellung

Vor allem die Herstellung von Wasserstoff mithilfe der Elektrolyse aus Wasser ist äußerst stromintensiv, denn sie erreicht bestenfalls einen Wirkungsgrad von 65 bis 70 Prozent. Ein Drittel der eingesetzten elektrischen Energie geht bei diesem Produktionsverfahren also verloren. Damit liegen die dem Wasserstoff anzurechnenden CO₂-Emissionen je Einheit gespeicherte Energie zwangsläufig gut 50 Prozent über denen des verwendeten Stroms. Hinzu kommen auch noch die energetischen Aufwendungen für die Verteilung des Wasserstoffs und seine Rückumwandlung in Energie, welche die energetische Gesamteffizienz der Wasserstoffbereitstellung auf dem Weg von der Wasserstoffproduktion in den Fahrzeugtank (Well-to-Tank) weiter senken (Puls, 2006, 74 f.).

Ein weiteres Problem bei der Verwendung von Wasserstoff als Treibstoff liegt in seiner Speicherung, die aufgrund der chemischen Eigenschaften des Wasserstoffs sehr aufwendig ist. Wasserstoff enthält je Masseinheit eine konkurrenzlos große Energiemenge, wie in Tabelle 3 abzulesen ist.

Energieinhalt von Kraftstoffen						Tabelle 3
in Kilowattstunden pro Tonne und pro Kubikmeter						
Massenspezifisch, in kWh/t						
Wasserstoff		Erdgas		Superbenzin	Diesel	Batterien
33.500		13.800		11.100	12.000	120
Volumenspezifisch, in kWh/m ³						
Wasserstoff		Erdgas		Superbenzin	Diesel	Batterien
Bei Normaldruck (200 bar)	Flüssig	Bei Normaldruck (200 bar)	Flüssig			
600	2.380	2.000	5.800	8.760	9.800	–
Eigene Zusammenstellung auf Basis von Pehnt, 2002, 64						

Ein Kilogramm Wasserstoff speichert annähernd 300-mal so viel Energie wie eine Batterie des gleichen Gewichts. Tabelle 3 zeigt aber auch, dass gasförmiger Wasserstoff aufgrund seiner geringen Dichte unter Normaldruck eine äußerst geringe volumenspezifische Energiedichte aufweist. Dies stellt vor allem bei dem begrenzten Raumangebot eines Fahrzeugs ein erhebliches Problem dar und führt dazu, dass Wasserstoff komprimiert werden muss, wenn er in einem Fahrzeug eingesetzt werden soll. Die am weitesten verbreitete Methode ist daher die Hochdruckspeicherung. Etwa 700 bar dürften dabei die Untergrenze sein, um eine konkurrenzfähige Reichweite von Wasserstofffahrzeugen zu gewährleisten. Die Verdichtung auf 700 bar kostet aber nicht nur viel Energie, sondern erfordert auch einen schweren Sicherheitstank.

Andere Speichermethoden wie Verflüssigung oder die Anlagerung in Metallhydriden weisen ebenfalls große Schwierigkeiten auf (Puls, 2006, 73).

Zu beachten ist außerdem, dass die bestehende Infrastruktur kaum für die Bereitstellung von Wasserstoff genutzt werden kann.³ Das Problem beginnt mit fehlenden Produktionskapazitäten, setzt sich bei fehlenden Pipelinenetzen fort und endet bei dem Mangel an Speichermöglichkeiten in den Tankstellen. Daher benötigt Wasserstoff sehr hohe Investitionen in eine Versorgungsinfrastruktur. Alles in allem ist damit zu rechnen, dass Wasserstoff als Kraftstoff zunächst deutlich teurer wäre als Diesel oder Benzin.

Doch obwohl aus heutiger Sicht so vieles gegen den Wasserstoff spricht, hat er dennoch die Chance, im Kraftstoffmix der Zukunft eine gewichtige Rolle zu spielen. Denn er weist auch verschiedene Vorteile auf, die denen von Batterien stark gleichen. Zu nennen sind hier:

- Wasserstoff kann praktisch ohne jede Belastung der Umwelt bereitgestellt und verwendet werden, wenn die nötige Primärenergie aus regenerativen Quellen stammt.
- Wasserstoff kann in praktisch unbegrenzter Menge zur Verfügung gestellt werden. Neueren Schätzungen zufolge bestehen 75 Prozent der Masse des Universums aus Wasserstoff, das entspricht etwa 90 Prozent aller Atome (Rifkin, 2002). Die Wasserstoffvorkommen der Erde werden niemals knapp werden, solange die Menschheit existiert.
- Wasserstoff hat eine extrem hohe massenspezifische Energiespeicherkapazität.

Der zentrale Vorteil bei der Nutzung von Wasserstoff als Speichermedium in einem elektrisch betriebenen Fahrzeug besteht also einerseits darin, dass der Wasserstoff eine sehr viel höhere Energiedichte als Batterien aufweist – und wohl immer aufweisen wird. Andererseits ist die Bereitstellung von Wasserstoff sehr viel aufwendiger als im Fall der elektrischen Energie. Da Wasserstoff über eine chemische Umwandlung gewonnen werden muss, geht zudem ein viel größerer Teil der eingesetzten elektrischen Energie verloren als bei der Speicherung in Batterien. Somit ist festzuhalten, dass sowohl die Bereitstellung von Wasserstoff (Well-to-Tank) als auch die Bereitstellung von Strom über Brennstoffzellen (Tank-to-Wheel) im Vergleich zum gleichen Prozess beim BEV geringere elektrische Wirkungsgrade aufweisen. In der Gesamtbetrachtung (Well-to-Wheel) ist das BEV somit deutlich effizienter als ein Brennstoffzellenfahrzeug. Diesen Nachteil wird das Brennstoffzellen-

³ Eine Ausnahme stellen die Immobilien der Tankstellen dar.

auto wegen der zusätzlichen Energiewandlungen auch nie ausgleichen können. Er müsste durch die Vorteile des Brennstoffzellenfahrzeugs aufgewogen werden, wenn es am Markt gegen das BEV bestehen soll.

Die Antwort auf die Frage, welcher Speicher am Ende die Energie für elektrische Fahrzeuge liefern wird, hängt ganz wesentlich von den erzielbaren technischen Fortschritten ab. Auf der einen Seite wird an neuen Methoden der Wasserstoffspeicherung geforscht. Ziel sind kostengünstigere und effektivere Speicher. Ein neuer erfolgversprechender Ansatz ist die Speicherung in Nanokristallen (Harder et al., 2011). Auf der anderen Seite arbeiten die Elektrochemiker an neuen Batteriekonzepten, die deutlich höhere Energiedichten erzielen können als derzeitige Batterien.

Aus heutiger Sicht ist es noch offen, welcher Speicher sich durchsetzen kann, wie man an den in Abbildung 3 wiedergegebenen Ergebnissen einer Befragung unter Automobilexperten ablesen kann. Allerdings scheint zumindest im Pkw-Markt die Batterie derzeit die besseren Karten zu haben. Im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge sind hingegen Batterien vermutlich auf absehbare Zeit als Option ausgeschlossen. Hier könnte eine Anwendung für die Brennstoffzelle liegen. Wenn die Anwender nämlich Betreiber eigener Fahrzeugflotten sind, lässt sich auch eine Versorgungsinfrastruktur leichter aufbauen. Da sich aber die Merkmale von Batterien und Brennstoffzellen in vielen Punkten ähneln, können die weiteren Ausführungen in der vorliegenden Analyse weitgehend auch auf Brennstoffzellenfahrzeuge übertragen werden.

Markterwartungen bei elektrischen Fahrzeugen nach Region

Abbildung 3

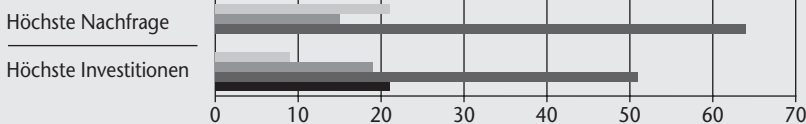
Befragung von 200 Entscheidern in der Automobilindustrie, Angaben in Prozent

Brennstoffzelle
 BEV
 Hybriden
 Andere Alternativen (Erdgas, Autogas etc.)

Triade: EU-27, USA, Japan



BRIC: Brasilien, Russland, Indien, China



Quelle: KPMG, 2012, 14

3.3 Verschiedene Konzepte im Pkw

Ein wesentliches Kennzeichen von elektrischen Antriebssträngen in Fahrzeugen besteht darin, dass sie in ihrer Gestaltung sehr flexibel sind. Diese Flexibilität zeigt sich sowohl in der Leistungstärke der elektrischen Systeme als auch in der Möglichkeit, die einzelnen Elemente eines elektrischen Antriebsstrangs im Fahrzeug zu verteilen.

Ein konventioneller Antriebsstrang ist auf einen zentralen Motor und mechanische Kraftübertragung auf die Räder ausgelegt. Ein elektrischer Antriebsstrang kann auf die gleiche Weise aufgebaut werden. Es ist aber auch denkbar, ihn dezentral zu konstruieren. Das offensichtlichste Beispiel hierfür wäre der Einsatz von Radnabenmotoren. Bei diesem Antriebskonzept, welches bereits im Lohner-Porsche von 1898 Verwendung fand, sind an den Rädern Elektromotoren angebracht. Auf diese Weise werden einerseits mechanische Kraftübertragungsverluste vermieden. Andererseits sind Einbußen bei Stabilität und Fahrkomfort zu befürchten, wenn Radnabenmotoren die ungefederte Masse des Fahrzeugs erhöhen. Eine mögliche Zwischenlösung besteht in einem achsnahen Antrieb, bei dem der Elektromotor direkt an der Achse angebracht wird. Diese verschiedenen Möglichkeiten bei der Antriebskonfiguration zeigen bereits recht deutlich, dass es angebracht sein wird, ein Elektroauto komplett neu zu konstruieren. Mit einem bloßen Umbau einer bestehenden Plattform werden eventuell Vorteile verschenkt.

Neben der Antriebskonfiguration und damit dem Fahrzeugdesign können auch die Größe und Leistung des elektrischen Antriebsstrangs stark variiert werden. Aufgrund des technischen Entwicklungsstands bei den verschiedenen Speichern für elektrische Energie setzen derzeit die meisten Autohersteller auf einen gleitenden Übergang in die Zeit elektrischen Fahrens, indem sie Hybridfahrzeuge bauen, in denen der elektrische Antriebsstrang eher eine unterstützende Rolle übernimmt. Es gibt dabei eine große Bandbreite von Hybridkonzepten, die sich vor allem durch die Dimension des elektrischen Antriebsstrangs unterscheiden. Es sind bereits viele Hybridvarianten am Markt erhältlich. Die wichtigsten Beispiele für unterschiedlich dimensionierte elektrische Antriebsstränge sind:

- **Micro- und Mild-Hybrid.** Als Micro-Hybrid werden Fahrzeuge bezeichnet, die über Spritsparsysteme wie eine Start-Stopp-Automatik oder Bremskraft-rückgewinnung verfügen. Ein Mild-Hybridfahrzeug ist bereits mit einem Elektromotor ausgerüstet, dieser unterstützt den Verbrennungsmotor aber nur, vor allem beim Anfahren. Rein elektrisches Fahren ist mit einem Mild-Hybrid nicht möglich.

- **Voll-Hybrid.** Diese Fahrzeuge sind mit einem Elektromotor und einer Verbrennungsmaschine bestückt, wobei der elektrische Antriebsstrang auf kurzen Strecken rein elektrisches Fahren ermöglicht. Die Batterie kann über Bremskraftrückgewinnung geladen werden, die eigentliche Energiequelle im Fahrzeug ist aber der Verbrennungsmotor.
- **Plug-in-Hybrid (PHEV).** Ein solches Fahrzeug verfügt ebenfalls über einen elektrischen und einen konventionellen Antriebsstrang. Der elektrische Antriebsstrang ist aber so dimensioniert, dass ein großer Teil der Fahrleistung elektrisch erfolgen kann. Ein weiteres Kennzeichen ist die Option, die Batterie am Stromnetz aufzuladen. Ein PHEV verfügt also über zwei Energiequellen.
- **Range Extender (REEV – Range Extended Electric Vehicle).** Hier ist allein der Elektromotor für den Vortrieb zuständig. Der eingebaute Verbrennungsmotor dient als Generator, mit dem im Bedarfsfall die Batterie geladen werden kann, was aber auch über das Stromnetz möglich ist.
- **Reines Elektrofahrzeug.** Das batterieelektrische Fahrzeug (BEV) besitzt ausschließlich einen elektrischen Antriebsstrang, dessen Batterie über das Stromnetz gespeist wird.
- **Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV – Fuel Cell Electric Vehicle).** Hierbei handelt es sich genau genommen lediglich um eine Variante des reinen Elektroautos, welches auf einen anderen Energiespeicher und Energiewandler setzt als das BEV.

Mit Ausnahme des FCEV – das derzeit nur in Demonstrationsprojekten genutzt wird – sind all diese Varianten bereits am Automobilmarkt verfügbar, wobei die kleineren Hybridvarianten eher als Sprintspartechnik denn als alternativer Antrieb zu verstehen sind. Als Daumenregel kann man festhalten, dass eine Hybridvariante umso weiter im Fahrzeugbestand verbreitet ist, je kleiner – und damit beim Kauf kostengünstiger – sie ausfällt. Der Kostenvorteil resultiert dabei nicht nur aus dem kleiner dimensionierten Energiespeicher, sondern auch aus der Option, Batterietypen einzusetzen, die eine geringere Energiedichte als Lithium-Ionen-Batterien aufweisen, dafür aber günstiger sind. Das beste Beispiel ist der wohl bekannteste Voll-Hybrid – der Toyota Prius –, der mit einer Nickel-Metallhydrid-Batterie ausgestattet ist. Erst die seit September 2012 erhältliche PHEV-Version des Prius verfügt über eine Lithium-Ionen-Batterie. Im Prinzip lässt sich derzeit am Automobilmarkt der Beginn eines evolutionären Prozesses hin zum elektrischen Fahren beobachten, während der revolutionäre Umstieg auf reine Elektrofahrzeuge bislang auf homöopathische Absatzmengen beschränkt ist.

3.4 Exkurs: Elektroantrieb für Zweiräder

Während der Markt für Elektroautos noch in den Kinderschuhen steckt, sind elektrisch angetriebene Zweiräder bereits ein Massenprodukt. Vor allem in China finden E-Fahrräder und E-Roller zahlreiche Käufer. Hieraus lassen sich aber nur wenige Schlüsse für die Zukunft des Elektroautos ableiten, denn sowohl die eingesetzte Technik als auch die Anschaffungskosten von Elektrozweirädern sorgen für ein gänzlich anderes Marktumfeld.

Die größte Verbreitung haben Elektrozweiräder in China gefunden. In nur wenigen Jahren wurde dort aus einem Nischen- ein Massenprodukt. Wurden im Jahr 1998 noch 56.000 Elektrofahrräder verkauft, so stieg diese Zahl im Jahr 2010 auf fast 24 Millionen (Tabelle 4). Schon vor dem Jahr 1990 wurde von verschiedenen Herstellern versucht, den kraftstoffverbrennenden Zweirädern Marktanteile abzugewinnen – dies allerdings zunächst mit mäßigem Erfolg. Den Durchbruch ermöglichten staatliche Regulierungen. So wurden in vielen chinesischen Städten Kleinkrafträder mit Verbrennungsmotor schlicht verboten, wobei Schanghai 1996 den Anfang machte. Mittlerweile gilt in etwa 90 chinesischen Städten ein Verbot oder eine Deckelung der ausgestellten Betriebs-erlaubnisse. Als Gründe hierfür wurden die Verkehrssicherheit, die Verkehrslage in den Städten sowie die Luftverschmutzung angeführt. Durch diese Verbote entstand eine Marktlücke, die von den Herstellern von Elektrozweirädern gefüllt wurde. Gerade Elektrofahrräder profitierten auch davon, dass für sie weder eine Betriebserlaubnis noch ein Führerschein erforderlich ist.

Der starke Anstieg der Zahl an Elektrofahrrädern – mittlerweile gehen Schätzungen von einem Bestand in der Größe von gut 120 Millionen derartigen Fahrzeugen auf Chinas Straßen aus – ging allerdings auch nicht problemlos vonstatten. So wuchs die Zahl der schweren Verkehrsunfälle mit Elektrofahrrädern rapide an. Bei der Zunahme der Unfallzahlen spielten sowohl die erreichbaren Geschwindigkeiten als auch die geringen Lärmemissionen eine Rolle, welche die Wahrnehmbarkeit von Elektrofahrrädern für Fußgänger einschränken. Um dem Problem der Verkehrssicherheit zu begegnen, beschloss die chinesische Regierung ein Tempolimit für E-Bikes.

Doch nicht nur der chinesische Markt wächst weiter dynamisch. Auch in Europa findet man immer mehr Elektrozweiräder. In Deutschland gibt es

Verkaufszahlen von Elektrozweirädern in China

Tabelle 4

Marktvolumen, in Millionen

Jahr	E-Fahrräder	E-Roller
2009	21,0	29,0
2010	23,7	30,0
2011	27,0	33,0
2015	39,5	48,0

2011 und 2015: Schätzungen.
Quelle: Nowak, 2011, 5

derzeit etwa eine Million Elektrofahrräder, Tendenz stark steigend, denn allein 2011 wurden hierzulande rund 310.000 Stück abgesetzt (ZIV, 2012). Man könnte den Elektrofahrrädern daher eine gewisse Pionierrolle dabei zubilligen, die elektrische Mobilität hierzulande „hoffähig“ zu machen. Man sollte jedoch auch die großen Unterschiede zum BEV richtig einschätzen.

In der Summe stellen Elektrozweiräder eine relativ kostengünstige Form der Mobilität dar, die zudem keine zusätzliche Infrastruktur erfordert. Die Batterien in diesen Elektrozweirädern sind nämlich relativ klein, da sie keine größeren Reichweiten sicherstellen müssen. Für Elektrofahrräder liegen normale Akkugrößen ungefähr zwischen 200 und 450 Wh. Diese Akkus lassen sich mit relativ kurzen Standzeiten über normale Steckdosen aufladen. Die Batterie kann bei vielen Modellen mit in die Wohnung genommen und dort angeschlossen werden. Auch die geforderte Leistungsabgabe ist eher klein. Auf besondere Maßnahmen zur Leistungssteuerung und ein ausgefeiltes Thermomanagement kann verzichtet werden. Es ist günstiger, den Akku im Schadenfall einfach zu ersetzen. Rein technisch gesehen, haben diese Akkus also relativ wenig mit denen in einem BEV gemeinsam.

3.5 Exkurs: Elektroantrieb für Nutzfahrzeuge

Das Einsatzgebiet von Nutzfahrzeugen ist sehr viel stärker differenziert als jenes von Pkws. Die Ansprüche, die ein schwerer Lkw mit bis zu 40 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht an seinen Antrieb stellt, sind völlig anders gelagert als bei einem Lkw, der primär im Verteilerverkehr fährt und normalerweise ein zulässiges Gesamtgewicht von maximal 7,5 Tonnen aufweist. Noch größer ist die Diskrepanz der Anforderungen gegenüber den leichten Nutzfahrzeugen, die bis zu 3,5 Tonnen wiegen. Prinzipiell kann man sagen, dass der Einsatz von elektrischen Antrieben umso wahrscheinlicher wird, je kleiner das Fahrzeug ist. Aufgrund der erheblichen Unterschiede in Größe, Gewicht und Nutzung ist es bei Nutzfahrzeugen angebracht, eine differenzierte Betrachtung über die Verwendungsmöglichkeiten von elektrischen Antriebssträngen anzustellen. Im Folgenden werden die Aussichten in zwei wichtigen Einsatzgebieten skizziert.

Fernverkehr

Im Schwerlastfernverkehr ist der Einsatz von batterieelektrischen Nutzfahrzeugen weitgehend ausgeschlossen, denn die notwendigen Batterien würden in Bezug auf Gewicht und Kosten die Dimensionen sprengen. Ein schwerer Lkw im Fernverkehr hat einen ungleich höheren Energiebedarf als

ein Pkw. Als heutige Benchmark kann ein Kraftstoffverbrauch von etwas mehr als 30 Litern auf 100 Kilometer gelten, jedenfalls bei günstigen Streckenprofilen. Zudem benötigt ein solcher Lkw, der ein Leergewicht von mehr als 15 Tonnen besitzt, einen Motor mit der mehrfachen Leistung eines Pkw-Motors. Diese Zahlen deuten bereits an, wie groß die Batterie sein müsste, damit sich ein solches Fahrzeug in Bewegung setzt. Auch wenn ein elektrischer Antriebsstrang effizienter ist als sein konventionelles Gegenstück, lässt sich doch feststellen, dass die Batterie so schwer werden würde, dass sie die Nutzbarkeit des Fahrzeugs einschränkt. Das soll die folgende Überschlagsrechnung demonstrieren:

- Kraftstoffverbrauch eines 40-Tonnen-Lkws (beladen): 33 Liter je 100 Kilometer;
- Eigengewicht des Fahrzeugs ohne Kraftstoff: 16 Tonnen;
- geforderte Reichweite: 1.200 Kilometer (Strecke Stuttgart – Rotterdam, Hin- und Rückfahrt);
- Energiedichte der möglichen Batterie: 120 Wh/kg;
- Effizienz: Es wird unterstellt, dass die Tank-to-Wheel-Effizienz des elektrischen Antriebsstrangs doppelt so hoch ist wie die des konventionellen.⁴

Gemessen in elektrischer Energie, entspricht der Kraftstoffverbrauch ziemlich genau 326 kWh/100 km. Unter Berücksichtigung der höheren Energieeffizienz des elektrischen Antriebsstrangs bleibt ein Energiebedarf von 163 kWh/100 km stehen, allerdings ist davon auszugehen, dass der Energiebedarf im bergigen Gelände auf etwa 230 kWh/100 km steigen kann. Geht man vom Mindestbedarf aus, würde dieser Lastzug eine Batterie mit einem Gewicht von knapp 1.360 Kilogramm benötigen, um 100 Kilometer zurücklegen zu können. Um die geforderte Strecke von den süddeutschen Industriezentren zu Europas größtem Seehafen und zurück zu bewältigen, wäre eine Batterie von gut 16 Tonnen Gewicht erforderlich. Batterie und Fahrzeug würden also bereits 32 Tonnen wiegen, was die Zuladung auf 8 Tonnen begrenzen würde. (An dieser Stelle wird aus Vereinfachungsgründen unterstellt, dass das Gewicht des Elektromotors dem eines Verbrennungsmotors entspricht.) Die Anschaffungskosten für eine solche Batterie dürften aktuell spürbar weit über 2 Millionen Euro liegen. Zudem ist ein Lkw ein Arbeitsgerät, bei dem Ladestandzeiten von mehreren Stunden aus wirtschaftlichen Erwägungen kaum akzeptabel sind. Beim Laden an einer Steckdose müssten sogar mehrere Tage Ladezeit in Kauf genommen werden.

⁴ Der konventionelle Antriebsstrang im Nutzfahrzeug ist effizienter als der im Pkw.

Diese Relationen zeigen, dass der Lkw-Fernverkehr auf absehbare Zeit kein Einsatzgebiet für batterieelektrische Antriebe sein kann. Hinzu kommen dann noch weitere Faktoren, wie etwa die Anschaffungskosten und die extreme Dauerbelastung der Batterie, denn Lkws stehen sehr viel weniger als Pkws. Damit elektrisches Fahren im Schwerlastverkehr zur Option wird, muss ein deutlich verbesserter Energiespeicher entwickelt werden. Dies kann auf ein neues Batteriekonzept oder auch auf Wasserstoff hinauslaufen. In absehbarer Zeit ist aber keine ökonomisch sinnvolle Alternative zur weiteren Optimierung der konventionellen Motoren und gegebenenfalls zum Einsatz von Biokraftstoffen zu erkennen, wenn die Abhängigkeit des Lastverkehrs vom Rohöl reduziert werden soll.

Verteilerverkehr

Völlig anders ist die Lage bei Nutzfahrzeugen für die innerstädtische Distribution. Diese Fahrzeuge haben einen bei genauerer Betrachtung optimalen Fahrzyklus für elektrische Antriebssysteme, wie verschiedene Praxistests mit Hybridlastwagen in Innenstadtbereichen demonstriert haben:

- tägliche Fahrstrecke: bis zu 100 Kilometer;
- Durchschnittsgeschwindigkeit: unter 20 km/h;
- viele Stopps: Im Praxistest eines Herstellers wurden über 30 Stopps pro Stunde ermittelt (Studener, 2010, 6);
- hohe Energierückgewinnungsrate: Diese ist wegen des hohen Anteils von Stop-and-go-Verkehren möglich. Im Test einer großen Handelskette mit einem Hybridfahrzeug wurden 79 Prozent des verbrauchten Stroms durch Bremskraftrückgewinnung regeneriert;
- Kraftstoffersparnis: Ein bei der Supermarktbelieferung eingesetzter Hybrid konnte etwa 25 Prozent des Kraftstoffverbrauchs einsparen (Bayer, 2010, 15).

Diese Nutzfahrzeuge sind aufgrund ihres Einsatzgebiets eigentlich sehr gut für elektrische Antriebssysteme geeignet. Zudem können sie dank größerem Bauraum im Fahrzeug und höherer Tragkraft des Rahmens auf günstigere Batteriesysteme zurückgreifen, als es bei Pkws der Fall wäre. Beispiele hierfür sind Nickel-Metallhydrid-Batterien (GRS, 2007, 15) oder auf Salzbasis funktionierende Zebra-Batterien. Derzeit gelten vor allem Titan-Nickel-Metallhydrid-Batterien als brauchbare Alternative, da sie nur ein Drittel vergleichbarer Lithium-Ionen-Batterien kosten und in der neuesten Generation in Bezug auf die Energiedichte stark aufgeholt haben. Es sind bereits einzelne elektrische Modelle mit noch günstigeren Batterietypen am Markt. Es ist aber festzustellen, dass die Aufpreise von Hybriden und rein

elektrischen Lastwagen derzeit noch zu hoch sind, um die stets scharf rechnenden Nutzfahrzeugkäufer überzeugen zu können. Das gilt vor allem für reine Elektrolastwagen. Bei einem aktuellen Fahrzeug mit 100 Kilometern elektrischer Reichweite liegen die Mehrkosten bei weit über 60.000 Euro gegenüber der Dieselsvariante des Modells.

4

Herausforderungen an die E-Mobilität

In diesem Kapitel werden verschiedene Aspekte der E-Mobilität beleuchtet. Zur besseren Verständlichkeit liefert die Position der einzelnen Themen innerhalb der automobilen Wertschöpfungskette die Sortierung der folgenden Abschnitte.

4.1 Rohstoffbedarf – Importabhängigkeit bleibt bestehen

Eine zentrale Erwartung an die Elektromobilität besteht darin, dass Elektroautos die Abhängigkeit der Industriestaaten von Rohstoffimporten – und damit von den oftmals instabilen Förderländern – verringern. Es stellt sich aber durchaus die Frage, ob Elektroautos in absehbarer Zeit wirklich einen Beitrag dazu leisten können, die Industriestaaten von Rohstoffimporten unabhängiger zu machen. Denn obwohl Elektroautos ohne konventionelle Kraftstoffe fahren können, so ist doch festzuhalten, dass ihre Produktion den Bedarf an anderen Rohstoffen deutlich erhöht. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang beispielsweise Lithium, Kupfer oder Seltene Erden, die in verschiedenen Teilen eines elektrischen Antriebsstrangs Verwendung finden. Eine Verengung der Betrachtung auf die Rohölsubstitution greift daher zu kurz. Gleichwohl beginnt die Analyse bei diesem wichtigen Rohstoff.

Rohöl bleibt der dominierende Energieträger im Straßenverkehr

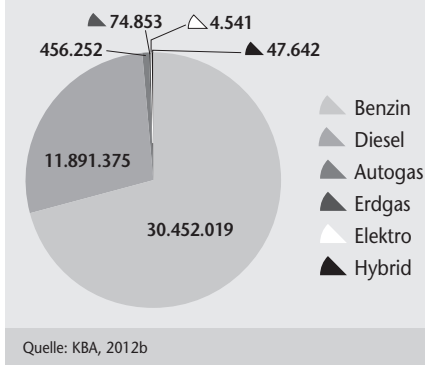
Der heutige Straßenverkehr basiert auf dem Primärenergieträger Erdöl. Von 42,9 Millionen Pkws in Deutschland fahren 99,7 Prozent mit einem Kraftstoff, der aus Rohöl gewonnen wird.⁵ Der wichtigste alternative Primärenergieträger ist das Erdgas. Das batterieelektrische Auto (BEV) ist heute

⁵ Autogas, das auch als LPG (Liquefied Petroleum Gas) bekannt ist, entsteht im Wesentlichen als Kuppelprodukt bei der Raffinierung von Erdöl. Biokraftstoffbeimischungen sind an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

Pkw-Bestand in Deutschland

Abbildung 4

nach Kraftstoffart, Stand: 1. Januar 2012



hingegen ein absolutes Nischenprodukt. So waren Anfang 2012 gerade einmal 4.541 BEV in Deutschland beim Kraftfahrt-Bundesamt gemeldet (Abbildung 4).

Auch bei den Pkw-Neuzulassungen in Deutschland kann man keinen nennenswerten Trend zu alternativen Antrieben erkennen. So wurden im Jahr 2011 knapp 3,17 Millionen Pkws in Deutschland neu zugelassen. Darunter waren rund 12.600 Hybriden, 6.200 Erdgasfahrzeuge, 4.800 Flüssiggas- und 2.150 Elektroautos. Damit hat

sich die Zahl der Elektroautos zwar in nur einem Jahr annähernd verdoppelt, aber nur etwa 100 dieser Elektroautos wurden auf private Halter zugelassen. Der Zugewinn alternativer Primärenergieträger in den Zulassungszahlen erfolgt jedenfalls auf extrem niedrigem Niveau. Man kann also mit Fug und Recht behaupten, dass die Mobilität in Deutschland von der Erdölversorgung abhängig ist. Doch in den letzten Jahren haben sich die Rohölmärkte zu einem Problem entwickelt (vgl. Kapitel 2).

Angesichts steigender Nachfrage und endlicher Rohölreserven wollen viele Länder ihre Abhängigkeit von Ölimporten verringern. Um dieses Ziel zu erreichen, wird seit einigen Jahren versucht, die im Straßenverkehr eingesetzten Energieträger zu diversifizieren. In den letzten Jahren betraf das vor allem die Förderung von Erdgasautos – deren Kraftstoff in Deutschland bis zum Jahr 2018 weitgehend von der Energiesteuer befreit ist – und die Nutzung von Biokraftstoffen. Auch von den BEV wird erwartet, dass sie in der Zukunft einen Beitrag zur Diversifikation der Energieträger im Straßenverkehr leisten. Zumindest in Europa ist es aber sehr unwahrscheinlich, dass die BEV im laufenden Jahrzehnt einen nennenswerten Einfluss auf die Menge der Rohölimporte haben werden – selbst wenn sie sich schneller verbreiten sollten, als derzeit zu erwarten ist. Hierbei kommt ein oftmals wenig beachteter Sonderfaktor zum Tragen, nämlich der hohe Dieselanteil in der europäischen Fahrzeugflotte und die daraus resultierenden Warenströme auf dem Weltkraftstoffmarkt.

Aufgrund ihrer technischen Spezifikationen dürften BEV in absehbarer Zeit vor allem als kleine Stadtautos genutzt werden. Damit stehen sie vor

allem in Konkurrenz zu kleineren Fahrzeugen mit Benzinmotor, die weit mehr als 80 Prozent der Fahrzeuge im Sub-Kompaktsegment stellen (Erdmann, 2009, 69). Dieselfahrzeuge findet man vor allem im Güterverkehr und in den großen Fahrzeugklassen, die oftmals hohe Jahresfahrleistungen aufweisen. Im Kleinwagensegment sind Diesel aufgrund der höheren Produktionskosten hingegen relativ selten. Es ist also damit zu rechnen, dass der Einsatz von BEV primär zu einer Reduktion des Benzinverbrauchs führen wird, während der Dieselaabsatz kaum betroffen sein dürfte.

In Europa wird die Menge der Rohölimporte aber primär vom Dieserverbrauch bestimmt, denn die Raffinerien können aus einer Tonne Rohöl nicht einfach jedes gewünschte Mengenverhältnis von Diesel und Benzin gewinnen (Übersicht 4). Dieser in der Öffentlichkeit wenig beachtete Effekt verdient an dieser Stelle etwas genauere Ausführungen, um die These zu untermauern, dass BEV auch bei unerwartet großem Markterfolg praktisch keinen Einfluss auf den europäischen Rohölimport haben werden.

Produktionssteuerung in Raffinerien

Übersicht 4

Der erste Ansatzpunkt für eine Produktionssteuerung ist der verwendete Rohstoff. Unraffiniertes Erdöl (Rohöl) ist ein Naturprodukt mit mehr als 17.000 Bestandteilen. Der Anteil der energetisch nutzbaren Kohlenwasserstoffe kann zwischen 50 Prozent (bei Schwerölen und Bitumen) und 97 Prozent (bei Leichtölen) liegen. Auch die Arten der im Rohöl anzutreffenden Kohlenwasserstoffe sind sehr verschieden. Kohlenwasserstoffe unterscheiden sich nach der Anzahl der in den einzelnen Molekülen eingebundenen Kohlenstoffatome, die vereinfacht dargestellt eine Kette bilden. Je länger die Kette, desto fester ist der Stoff in Reinform und desto höher ist seine Siedetemperatur. Der leichteste Kohlenwasserstoff ist Methan (Erdgas), gefolgt von LPG (Autogas), Kerosin, Benzin, Diesel/Heizöl (Mitteldestillate) und Schweröl. Die längsten Ketten haben Stoffe wie Bitumen oder Paraffin. Dabei ist diese Einordnung nicht trennscharf. Es gibt immer wieder Kohlenwasserstoffe, die in mehreren Produkten auftreten können. So können beispielsweise die längsten im Benzin vorkommenden Kohlenstoffketten auch im Dieselmotortreibstoff genutzt werden, wodurch man den Produktmix in Maßen steuern kann. Diesel und leichtes Heizöl bestehen sogar aus den gleichen Kohlenwasserstoffen, sind also Substitute und stehen in direkter Konkurrenz.

Um diese Stoffe aus dem Erdöl zu extrahieren, wird in Raffinerien ein mehrstufiger Prozess genutzt. Der wichtigste Produktionsschritt ist die Destillation. Es handelt sich also vereinfacht gesagt um einen Sortiervorgang, bei dem die unterschiedlichen Siedepunkte der Kohlenwasserstoffe genutzt werden, um reinere Kraftstoffe zu gewinnen. Nach der Destillation bleiben die schweren (langkettigen) Moleküle, der sogenannte Sumpf, zurück. Der „Sumpf“ kann noch weiter verarbeitet werden. Ein zentrales Verfahren hierzu wird „Cracken“ genannt. Im Prinzip geht es darum, die verbliebenen langen Kohlenwasserstoffketten gezielt aufzuspalten, damit die als Kraftstoff genutzten Moleküle entstehen (vgl. umfassender BAYERNOIL, 2009).

Eigene Zusammenstellung

Die Kraftstoffproduktion in Europa ist sehr stark auf die Produktion von Diesel ausgerichtet, wie ein Vergleich der Produktionsstatistiken von Deutsch-

land und den USA verdeutlicht (Tabelle 5). In Deutschland wird ungefähr doppelt so viel Diesel wie Benzin produziert. Mit einem Anteil von über 43 Prozent an der Gesamtproduktion ist Diesel das Hauptprodukt deutscher Raffinerien, während Benzin nicht ganz 21 Prozent ausmacht. Das deutsche Output-Verhältnis entspricht in etwa den Angaben für die europäischen Mitgliedstaaten der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD), wobei sich der Dieselanteil in den letzten Jahren immer weiter erhöht hat, parallel zum Dieselanteil in der Fahrzeugflotte. Ein völlig anderes Bild zeigt sich in den USA. Der US-Markt für Pkws wird von Benzinern dominiert. Der Anteil von Dieselfahrzeugen an den Pkw-Neuzulassungen betrug im Jahr 2011 lediglich 1,2 Prozent (Heymann, 2011, 7), während er in Deutschland bei über 45 Prozent gelegen hat (KBA, 2012a). Aus diesem Grund ist die US-Kraftstoffproduktion auf Benzin ausgelegt.

Raffinerieausstoß in Deutschland und den USA				Tabelle 5	
im Jahr 2010					
	In 1.000 Tonnen		Anteil an der Gesamtproduktion, in Prozent		
	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	
Deutschland	21.949	45.422	20,99	43,44	
USA	352.710	210.989	42,64	25,51	

Quelle: IEA, 2011a

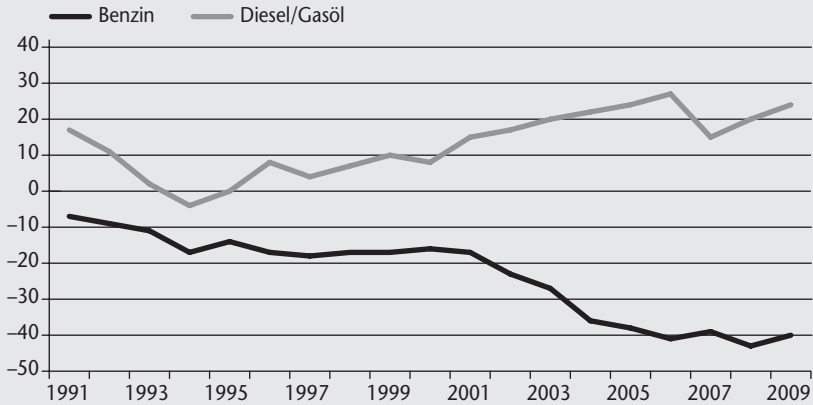
Letztlich liefern die hier wiedergegebenen Produktionszahlen nicht das ganze Bild, denn Kraftstoffe werden in erheblichen Mengen international gehandelt. Betrachtet man die Außenhandelszahlen, so zeigt sich, dass Europa trotz der auf Diesel ausgerichteten Raffinerien Benzin im Überfluss hat, aber knapp an Dieselmotorkraftstoff ist (Abbildung 5). Tatsächlich hat die EU-27 im Jahr 2009 netto mehr als 40 Millionen Tonnen Benzin exportiert, was mehr als dem doppelten Benzinverbrauch Deutschlands entspricht. Hauptabnehmer waren die USA. Zeitgleich wurden netto 24 Millionen Tonnen Diesel in die EU-27 importiert.

In Anbetracht der schon heute auf Diesel ausgerichteten Produktion, der Stellung Europas als großer Benzinexporteur und der Erwartung, dass BEV vor allem Fahrzeuge mit Benzinmotor ersetzen würden, ist damit zu rechnen, dass die Verbreitung von BEV bestenfalls den Benzinexport erhöhen wird. Die vom Dieselbedarf geprägten Rohölimporte können sich hingegen erst dann verändern, wenn BEV in die Domänen des Dieselmotors vordringen – also in die großen Fahrzeugklassen, die im Langstreckenverkehr dominieren,

Außenhandel der EU mit Kraftstoffen

Abbildung 5

Saldo aus Importen und Exporten der EU-27, in Millionen Tonnen



Positiver Wert: Importüberschuss, negativer Wert: Exportüberschuss.
Quelle: IEA, 2011b

sowie in den Schwerlastverkehr. Eine solche Entwicklung ist aber heute nicht absehbar. Das führt zu dem Schluss, dass eine weitere Verbesserung der Verbrennungsmotoren auf absehbare Zeit der weitaus effektivere Weg ist, um den europäischen Rohölimportbedarf zu reduzieren.

Kein Versorgungsrisiko bei Lithium

Durch den Bau von Elektroautos entstehen zusätzliche Importabhängigkeiten. Von den Materialien, die zum Bau moderner Batterien benutzt werden, gibt es in Europa keine abbauwürdigen Vorkommen. Eine herausgehobene Stellung nimmt dabei das Lithium ein, welches zum Bau der meisten zukunftssträchtigen Batteriekonzepte benötigt wird. Da Lithium ein sehr hohes elektrochemisches Potenzial aufweist, ist es – zumindest aus heutiger Sicht – auch aus künftigen Batterien kaum wegzudenken (vgl. Abschnitt 3.1). Mit zunehmender Elektrifizierung des Antriebsstrangs wird die Lithiumnachfrage daher spürbar steigen.

Prinzipiell ist Lithium weltweit in ausreichender Menge vorhanden. Im Jahr 2011 wurden global 34.000 Tonnen Lithium gefördert. Die Weltreserven (Übersicht 5) werden vom United States Geological Service (USGS) auf 13 Millionen Tonnen geschätzt, was eine statische Reichweite der Lithiumreserven von über 500 Jahren ergibt. Hinzu kommen Ressourcen von 33 Millionen Tonnen. Problematischer ist die räumliche Verteilung der Vorkommen. Die weltweiten

Reserven

Nachgewiesene, zu heutigen Preisen und mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnbare Rohstoffe.

Ressourcen

Nachgewiesene, aber derzeit technisch und/oder wirtschaftlich nicht gewinnbare sowie nicht nachgewiesene, aber geologisch mögliche, künftig gewinnbare Rohstoffe.

Statische Reichweite

Der Zeitraum, über den die Rohstoffreserven bei konstanter Fördermenge ausreichen.

Eigene Zusammenstellung

Lithiumreserven konzentrieren sich auf Chile mit 7,5 Millionen Tonnen und China mit 3,5 Millionen Tonnen. Die größten Lithiumressourcen finden sich in Bolivien mit neun Millionen Tonnen (USGS, 2012a).

Auch aufseiten der lithiumproduzierenden Unternehmen ist eine sehr hohe Konzentration vorhanden. Die fünf größten Unternehmen teilen sich 80 Prozent des Marktes (IW Consult/vbw, 2011, 48). Der größte Teil des Lithiumhandels wird in Form von Lithiumcarbonat abgewickelt, welches ein Grundstoff für die Produktion von anderen Lithiumverbindungen ist. Die Weltnachfrage nach Lithiumcarbonat ist in den letzten Jahren stark angestiegen. Nach Angaben des führenden Produzenten von Lithiumcarbonat lassen sich aus der globalen Lithiumproduktion aktuell etwa 135.000 Tonnen Lithiumcarbonat herstellen. Hauptabnehmer sind Aluminiumerzeuger, aber auch Batteriehersteller weiten die Nachfrage stark aus. Als Daumenregel kann gelten, dass etwa 0,6 Kilogramm Lithiumcarbonat notwendig sind, um eine Lithium-Ionen-Batterie mit einer Speicherkapazität von einer Kilowattstunde zu bauen. Das Unternehmen Chemetall schätzt, dass für die Produktion von einer Million BEV knapp 15.000 Tonnen Lithiumcarbonat notwendig wären (Chemetall, 2011a). Die Zahlen verdeutlichen, dass die geologische Verfügbarkeit von Lithium kein Hindernis für den Ausbau der E-Mobilität darstellen dürfte. Ein Versorgungsrisiko könnte lediglich aufgrund der hohen Marktkonzentration entstehen. So bleibt abzuwarten, ob Länder wie China und Bolivien dauerhaft verlässliche Lieferanten sein werden. Bei Bolivien kommt erschwerend hinzu, dass es aufgrund der ungünstigen Lage seiner Lithiumressourcen im Altiplano erst dann als Anbieter auftreten kann, wenn die Lithiumpreise spürbar steigen. Auf absehbare Zeit werden die chilenischen Anbieter Lithium zu deutlich geringeren Preisen produzieren können als mögliche bolivianische Konkurrenten.⁶

⁶ In Chile wird das Lithium in der Küstenwüste produziert, wobei die notwendige Energie im Wesentlichen von der Sonne stammt.

Aufgrund der wachsenden Nachfrage ist mit einem weiteren Anstieg der Preise für Lithiumcarbonat zu rechnen. Im wichtigsten Erzeugerland Chile liegen die Erzeugerpreise heute rund 50 Prozent über dem Niveau des Jahres 2005. Auch der Verkaufspreis pro Kilogramm Lithiumcarbonat stieg zuletzt stark an. Da der Kilopreis aber immer noch unter 10 Euro beträgt, ist der Anteil des Lithiums an den Gesamtkosten eines Batteriesystems noch zu gering, um von einem Preisrisiko zu sprechen (Chemetall, 2011b).

Das in einer Batterie verwendete Lithium kann wiederaufbereitet werden. Daher wird künftig auch das Batterierecycling eine große Rolle spielen. Mit heutigen Verfahren lassen sich etwa 50 Prozent des Lithiums durch Batterie-recycling zurückgewinnen. Dies spricht dafür, die Einführung von Lithium-Ionen-Batterien im Automobilbereich mittelfristig mit dem Aufbau eines umfassenden Batterierecyclings zu flankieren. Dadurch können mögliche politische Versorgungsrisiken minimiert werden und die ökologischen Effekte sind positiv.

Kupferbedarf steigt

Ein weiterer wichtiger Rohstoff für Elektroautos ist Kupfer, das vor allem für den Elektromotor und das auf höhere Stromflüsse ausgelegte Bordnetz⁷ verwendet wird. Die weltweite Minenproduktion betrug im Jahr 2010 etwas mehr als 16 Millionen Tonnen. Bei geschätzten Reserven von 600 Millionen Tonnen ergibt das eine statische Reichweite der Reserven von 37 Jahren. Das ist ein etwas kürzerer Zeitraum, als er für die Erdölreserven ausgewiesen wird. Der größte Produzent ist Chile mit einem Weltmarktanteil von 34 Prozent. Weder bei der Länder- noch bei der Unternehmenskonzentration sind größere Risiken durch Marktmacht zu erkennen. Zudem ist Kupfer gut zu recyceln. Bereits heute liegt die Recyclingquote für Kupfer in Deutschland bei über 50 Prozent und es wird erwartet, dass sie bis zum Jahr 2020 auf 70 Prozent steigt. Aufgrund des hohen Kupferpreises und regulatorischer Vorgaben zur Altautoverwertung ist damit zu rechnen, dass beim Recycling von Fahrzeugen das hier verbaute Kupfer zu einem sehr hohen Anteil zurückgewonnen wird.

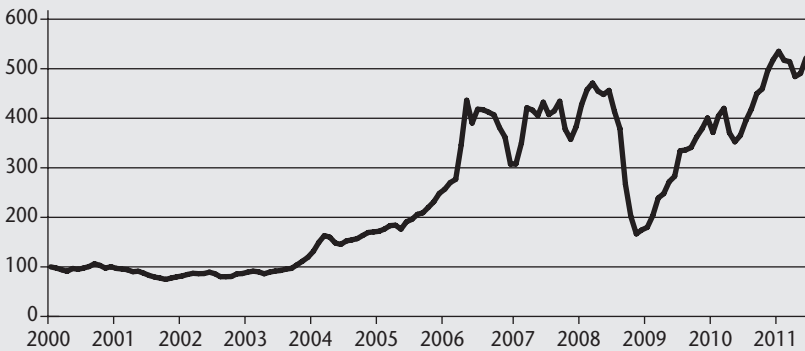
In einem heutigen Fahrzeug der Kompaktklasse werden etwa 25 Kilogramm Kupfer verbaut. Bei einem Elektroauto wird laut Wirtschaftsvereinigung Metalle mit einem Bedarf von rund 65 Kilogramm gerechnet (wvm, 2011, 75). Die Produktion von einer Million Elektroautos würde also zu einem Nachfrageanstieg von 40.000 Tonnen führen, was 0,25 Prozent der

⁷ Für die Hauptleitungen im Bordnetz könnten auch Aluminiumkabel zum Einsatz kommen, was das Gewicht reduzieren, aber den Platzbedarf erhöhen würde.

Kupferpreis

Abbildung 6

in US-Dollar, Index: Januar 2000 = 100



Quelle: London Metal Exchange, 2012

heutigen Weltminenproduktion entspräche. Da Kupfer aber auch in vielen anderen Wachstumsbranchen verwendet wird, steigt die Nachfrage bereits heute stark. So hat sich der Kupferpreis in zehn Jahren annähernd verfünffacht (Abbildung 6) und liegt aktuell knapp unter 8.000 US-Dollar pro Tonne. In Anbetracht der zu erwartenden Nachfrageentwicklung ist an dieser Stelle von einem zunehmenden Preisrisiko auszugehen, auch wenn eine generelle Kupferknappheit kurz- und mittelfristig unwahrscheinlich ist.

Seltene Erden für E-Mobilität wichtig

Neben diesen gängigen Metallen finden in einem Elektroauto auch „exotischere“ Materialien Verwendung, die zwar zu sehr geringen Mengen verbaut werden, aber für das Funktionieren des Produkts oftmals unverzichtbar sind. Am bekanntesten sind an dieser Stelle jene 17 Metalle, die unter dem Begriff „Seltene Erden“ subsumiert werden. Dieser Begriff ist eigentlich irreführend, da die Seltenen Erden gar nicht so selten sind. Selbst die seltenste der Seltenen Erden ist in der Erdkruste etwa 200-mal so häufig wie Gold zu finden. Für die Gruppe der Seltenen Erden werden die Weltreserven auf 110 Millionen Tonnen geschätzt. Allerdings sind sie sehr fein verteilt. Abbauwürdige Vorkommen sind in der Tat seltener und regional sehr konzentriert. Es kommt erschwerend hinzu, dass Seltene Erden nicht in Reinform vorkommen, sondern als oxidierte Mineralien, aus denen sie herausgelöst werden müssen. Dieser Prozess ist in der Regel energieintensiv und sehr belastend für die Umwelt.

In der Vergangenheit hat China durch eine aggressive Preispolitik praktisch ein Monopol bei der Förderung Seltener Erden errungen. Gut 97 Prozent der Weltproduktion von 130.000 Tonnen kommen heute aus China (USGS, 2012b). Inzwischen nutzt China diese Position als politisches Instrument und hat beispielsweise Exportbeschränkungen erlassen. In der Folge wurden in anderen Ländern neue Minenprojekte angestoßen, die aber noch nicht die Märkte beliefern.

Man muss sich auch fragen, wofür man Seltene Erden in der Elektromobilität braucht: Neodym kommt in den Magneten von Elektromotoren zum Einsatz. Die besten Motoren sind tatsächlich diejenigen mit der Seltenen Erde Neodym in den Permanentmagneten – aber mit geringen Abstrichen in der Energieeffizienz geht es auch ohne Neodym. Ansonsten werden Seltene Erden vor allem in Nickel-Metallhydrid-Batterien verwendet. Solche Batterien lassen sich einem umfassenden Recycling zuführen, bei dem auch die darin verbauten Seltenen Erden wiedergewonnen werden können. Honda zum Beispiel hat angekündigt, mit dem weltweit ersten Serienverfahren dieser Art 80 Prozent der in den Batterien seiner Hybridfahrzeuge genutzten Seltenen Erden zu recyceln.

Ähnlich wie beim Lithium bestehen in diesem Bereich also eher politische denn geologische oder technische Risiken für die Rohstoffversorgung der E-Mobilität. Allerdings wächst die Nachfrage nach Seltenen Erden rasant. Es wird mit einem Nachfrageplus von 50 Prozent bis zum Jahr 2015 gegenüber heute gerechnet, sodass aus heutiger Sicht Versorgungsengpässe und/oder extreme Preiserhöhungen möglich sind. Der Aufschluss von neuen Vorkommen ist nämlich oftmals ein langwieriges Verfahren. Das Preisrisiko für die E-Mobilität ist aber recht gering, da die eingesetzte Menge pro Fahrzeug klein ist.

4.2 Batterietechnik – noch großer Entwicklungsbedarf

Die Batterie stellt die höchste technische Hürde für das Elektroauto dar. Im Prinzip sind zwar alle Bestandteile eines elektrischen Antriebsstrangs sehr reife Industrieprodukte. Elektromotoren, Inverter, Batterien und Ladegeräte gibt es schon seit gut 150 Jahren. Die heute verfügbaren Komponenten weisen in Anbetracht des langen Entwicklungszeitraums sehr hohe Effizienzgrade auf. Auch wenn die Entwicklung des BEV in den letzten 100 Jahren weitgehend ruhte, wurden diese Komponenten doch in anderen Bereichen der Elektroindustrie kontinuierlich eingesetzt und weiterentwickelt. Die Energiewandlungsverluste in Form von Wärme liegen bei allen Komponenten unterhalb von 10 Prozent. Doch obwohl alle Komponenten einen Effizienzgrad von

Effizienz nach Fahrzeugkonzept

Tabelle 6

Wirkungsgrad, in Prozent

Fahrzeugkonzept	Well-to-Wheel					
	Well-to-Tank	Tank-to-Wheel				
BEV (Mitsubishi i-MiEV)	42,9 ¹	66,5				28,5
		Ladegerät	Batterie	Inverter	Motor	
		90	92	96	91	92
Voll-Hybrid (Benzin)	82,2	30,2				24,8
Diesel	88,6	17,8				15,8
Benzin	82,2	15,1				12,4

¹ Angabe bezieht sich auf das japanische Stromnetz.
Quelle: Likar, 2009

90 Prozent oder mehr aufweisen, darf man nicht dem Trugschluss unterliegen, dass dies auch für einen elektrischen Antriebsstrang gelten würde. Da an dieser Stelle die Effizienzgrade aller eingesetzten Komponenten zu berücksichtigen sind, liegt der Gesamteffizienzgrad in der Tank-to-Wheel-Betrachtung deutlich unter dem eines Elektromotors. Wie in Tabelle 6 für den heute erhältlichen Mitsubishi i-MiEV dargestellt, rangiert der Tank-to-Wheel-Wirkungsgrad des betrachteten BEV mit 66,5 Prozent weit über dem von Voll-Hybriden und konventionellen Fahrzeugen. In der Well-to-Wheel-Betrachtung, die auch den thermischen Umwandlungsprozess in Kraftwerken und Verluste im Stromnetz berücksichtigt, schrumpft der Vorteil des BEV aber dramatisch zusammen. Der Voll-Hybrid kommt dicht an das Ergebnis des BEV heran.

Der Effizienzvorsprung des BEV hängt also vor allem an der Entwicklung der Stromerzeugung. Das weitere Innovationspotenzial der reinen Energiewandler im Fahrzeug (Elektromotor, Inverter) ist nämlich bei bereits erreichten Effizienzgraden von über 90 Prozent gering. Die größten Entwicklungsmöglichkeiten bietet aufgrund ihrer Ausmaße und ihres hohen Gewichts noch die Batterie.

Hierfür spricht auch, dass sich die Batterie eines Elektroautos technisch gesehen stark von jenen Batterien unterscheiden muss, die heute in der Konsumelektronik eingesetzt werden. So muss die Batterie eines BEV Anforderungen erfüllen, die in den bisherigen Anwendungsfeldern keine große Rolle spielten.

Sicherheit. Der Sicherheitsaspekt ist für die gebräuchlichen Lithium-Ionen-Batterien ein Problem. Lithium ist ein hoch reaktives Metall. Auch wenn Lithium in Batterien als chemische Verbindung vorliegt, sind die Komponenten eines Lithium-Ionen-Akkus leicht brennbar. Aufgebrochene Lithium-

Zellen reagieren wie auch metallisches Lithium heftig mit Wasser, weshalb ein Batteriebrand nicht mit Wasser oder Schaum gelöscht werden kann. Bei einem Verkehrsunfall ist das Risiko gegeben, dass eine dieser Implikationen eintritt. Die zeigte sich beispielsweise bei einem Crashtest mit einem Range Extender (REEV) in den USA. Gleichwohl ist hier zu beachten, dass es versäumt wurde, die Batterie nach dem Test zu entladen, was den Batteriebrand verhindert hätte. Crashtests mit Benzinern oder Diesel-Pkws werden in der Regel mit weitgehend entleertem Tank durchgeführt. Im Mai 2012 gab es zudem einen folgenschweren Unfall mit einem Elektroauto in China, bei dem die Batterie abbrannte. Nach Absturz einer Frachtmaschine in Australien aufgrund in Brand geratener Lithium-Ionen-Batterien hat die australische Luftfahrtbehörde Civil Safety Aviation Authority neue Richtlinien für den Transport von Lithium-Ionen-Batterien erlassen. Auch im Bereich der Konsumelektronik gab es Probleme mit Batteriebränden, die Rückrufaktionen verschiedener Hersteller auslösten. Das Brandrisiko muss daher noch deutlich verringert werden. Allerdings sollte an dieser Stelle auch betont werden, dass Benzinfahrzeuge natürlich auch abbrennen können. Sowohl Lithium-Ionen-Batterien als auch Benzin werden mit gutem Grund beim Transport als Gefahrgut deklariert. Das Brandrisiko von BEV sollte aber die Benchmark der konventionellen Fahrzeuge nicht überschreiten, wenn sie in großen Stückzahlen auf die Straße kommen. Neben der chemischen Sicherheit ist die Hochvolteigensicherheit eines Fahrzeugs herzustellen (Übersicht 6). Dazu muss etwa bei einem Unfall gewährleistet werden, dass das gesamte Bordnetz schlagartig entladen wird. Ohne diese Maßnahme bestünde erhebliche Gefahr für die Rettungskräfte, besonders wenn Insassen aus einem Wrack herausgeschnitten werden müssen. Die Hochvoltsicherheit ist dabei im Fahrzeug sicherzustellen, da es schwierig wäre, die Rettungsdienste entsprechend zu schulen. Immerhin sind allein in Deutschland rund 25.000 Feuerwehren im Einsatz, davon rund 20.000 freiwillige Wehren.

Hochvolteigensicherheit

Übersicht 6

Bei aktuellen BEV liegen die Spannungen des Bordnetzes über 300 Volt (bei konventionellen Fahrzeugen 12 Volt). Die auftretenden Spannungen stellen für Menschen somit eine Lebensgefahr dar. Ein Kraftfahrzeug gilt als hochvolteigensicher, wenn durch technische Maßnahmen am Fahrzeug für Personen (Insassen, Kfz-Werkstattpersonal oder Rettungskräfte) ein vollständiger Berührungs- und Lichtbogenschutz zu jedem Zeitpunkt gewährleistet ist. Im Fall eines Unfalls sollte das Bordnetz beispielsweise selbstständig und unmittelbar Spannungsfreiheit herstellen. Dieser Vorgang ist oft mit einem Totalschaden der Batterie verbunden.

Eigene Zusammenstellung

Lebensdauer. Die Batterie ist mit Abstand der teuerste Teil eines BEV. Ihre Lebensdauer bestimmt auch die mögliche Einsatzdauer des Fahrzeugs. Ein BEV mit defekter Batterie ist quasi ein wirtschaftlicher Totalschaden. Ein Problem liegt darin, dass etwa Lithium-Ionen-Batterien mit der Zeit und mit der Zahl der Ladezyklen altern, da die Elektroden oxidieren. Auch die Degradation des organischen Elektrolyten und der Leitsalze und die zeitliche Änderung der Elektrodenstruktur verkürzen die Lebenszeit der Batterien (Garthwaite, 2011). Wenn sich die Speicherkapazität der Batterie durch diese Prozesse um mehr als 20 Prozent ihrer ursprünglichen Kapazität reduziert hat, gilt die Batterie als ausgefallen. Eine marktfähige BEV-Batterie sollte 15 Kalenderjahre oder 300.000 gefahrene Kilometer überstehen, bevor diese Marke unterschritten wird. Die genannte Fahrstrecke entspräche näherungsweise 2.000 bis 3.000 Ladevorgängen.

Temperaturresistenz. Eine Lithium-Ionen-Batterie funktioniert optimal bei rund 35 Grad Celsius. Bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts kommt es zu drastischen Leistungseinbußen, da sich der Innenwiderstand der Batteriezellen erhöht. Bei Temperaturen oberhalb von 45 Grad Celsius altert die Batterie rapide, wodurch ein deutlicher, irreversibler Kapazitätsverlust eintritt. Ein umfassendes Thermomanagement ist nötig, um das Batteriesystem im optimalen Temperaturband zu halten und ihre Leistungsfähigkeit zu sichern.

Ein Batteriesystem für ein BEV muss zudem eine sehr viel größere Leistung, Spannung und Energie bereitstellen, als es in der Konsumelektronik der Fall ist. In der Konsequenz müssen die zu integrierende Steuerungselektronik und das notwendige Thermomanagement völlig anders konstruiert werden. Als Zielgrößen sollte eine marktfähige Batterie im BEV eine Spannung von rund 400 Volt, eine Leistungsdichte von 1.800 W/kg (Watt pro Kilogramm) und eine Energiedichte von 200 Wh/kg (Wattstunden pro Kilogramm) aufweisen. Abbildung 7 stellt das breite Spektrum der Anforderungen an ein markttaugliches Batteriesystem dar. Die eigentlichen Zielerreichungsgrade verändern sich derzeit sehr schnell, sodass die hier angegebenen Werte bereits überholt sein können; die Relation der Zielerreichungsgrade ist aber nach wie vor gültig.

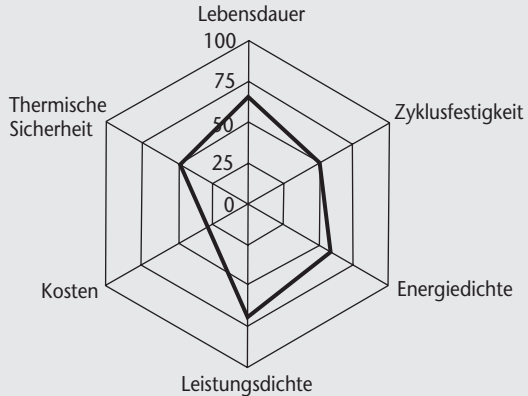
Setzt man die genannten Anforderungen mit den Werten für ein existierendes Batteriesystem ins Verhältnis, so zeigt sich, dass noch großer Entwicklungsbedarf besteht. In Abbildung 7 sind die entsprechenden Zielerreichungsgrade eines Batteriesystems aus dem Jahr 2010 dargestellt. Es gibt demnach noch mehrere große Baustellen. Zu den größten Herausforderungen zählen dabei: Kosten und Energiedichte.

Ein weiteres großes technisches Problem stellt die Zyklusfestigkeit von Lithium-Ionen-Batterien dar, also die Zahl der Ladevorgänge, welche eine Batterie übersteht, ohne deutliche Speicherverluste zu erleiden. Viele Angaben zu diesem Komplex basieren auf Teststandversuchen, die aber Rahmenbedingungen wie schwankende Temperaturen und schwankende Entladungstiefen nicht berücksichtigen und daher mit einem Fragezeichen zu versehen sind.

Technischer Stand von Batterien

Abbildung 7

Zielerreichungsgrade von Lithium-Ionen-Batterien des Jahres 2010, in Prozent der Marktanforderungen für BEV



Quelle: Berns et al., 2009, 233

Ambitionierte Ziele zur Kostendegression

Das größte Problem besteht bei den Kosten. Das gilt gerade für die Lithium-Ionen-Batterien, welche derzeit die höchsten Energiedichten aufweisen. Verschiedene Untersuchungen nennen für Batteriesysteme im Automobilbereich ein Kostenziel von etwa 200 Euro pro Kilowattstunde, ab dem die Batterie mit Benzin wirtschaftlich konkurrieren könnte. Zu den aktuellen Batteriekosten gibt es viele unterschiedliche Angaben. Bei ihrer Interpretation ist zu beachten, dass oftmals Begriffe vermengt werden. So ist häufig unklar, ob von Batteriezellen, Batteriestacks oder Batteriesystemen die Rede ist. So kann man aus dem aktuellen Preis einer einfachen Lithium-Ionen-Batterie aus dem Bereich der Konsumelektronik keine Rückschlüsse auf eine Batterie für ein BEV ziehen, da die einfachen Batterien aus China weder über eine Leistungselektronik noch über ein Thermomanagement verfügen, was aufgrund der Größe und des Preises einer BEV-Batterie aber unverzichtbar ist. Immerhin besteht eine BEV-Batterie aus etwa 100 Zellen und eine Batterie ist immer nur so gut wie die schwächste Zelle. Daher gleicht die Leistungselektronik beispielsweise die Ladezustände der einzelnen Zellen einander an, was schwache Zellen schonen und so die Lebensdauer der Batterie steigert.

Zudem ist zu bedenken, dass die Unterbewertung der chinesischen Währung zu den aktuellen Preisen beiträgt. Auch eine klare Trennung zwischen Produktionskosten und Endkundenpreisen wird selten vorgenommen. Es kommt erschwerend hinzu, dass die Preise aktuell spürbar in Bewegung sind, sodass es eine große Spanne von Angaben gibt.

Diese stimmen aber darin überein, dass das genannte Kostenziel noch sehr weit entfernt ist. Für Batteriesysteme von Elektroautos wurden auf der Internationalen Automobil-Ausstellung (IAA) im Jahr 2011 Endkundenpreise von ungefähr 1.000 Euro pro Kilowattstunde aufgerufen. Damit kostete die 16-kWh-Batterie eines Mitsubishi i-MiEV annähernd doppelt so viel wie ein kompletter, ähnlich großer Kleinwagen. Inzwischen sind die Preise gefallen. Endkundenpreise in der Gegend von 800 Euro erscheinen Mitte 2012 realistisch. Zu beachten ist an dieser Stelle auch, dass von jeder installierten Kilowattstunde Speicher normalerweise nur zwischen 0,6 und 0,8 Kilowattstunden vom Verbraucher genutzt werden können, da die Batterien gegen eine vollständige Entladung geschützt werden. Der Grund hierfür ist, dass regelmäßige Vollentladungen die Lebensdauer der Batterie um rund 30 Prozent verkürzen (Grebe, 2012, 272). Diese Beschränkung müsste eigentlich beim Endkundenpreis noch berücksichtigt werden.

Aktuell wird mit erheblichen Kostensenkungen durch die Großserienfertigung von Batteriezellen für den Automobilbereich gerechnet. Die Herstellungskosten sollen bis zum Jahr 2020 um zwei Drittel gesenkt werden. Dies ist ein ambitioniertes Ziel, denn relevante Kostenbestandteile der Lithium-Ionen-Batterie lassen sich durch Größenvorteile und Lernkurveneffekte in der Fertigung nur schwer reduzieren. Vor allem die Rohstoffkosten werden tendenziell eher steigen; ihr Anteil an den Batteriekosten wird auf bis zu 50 Prozent geschätzt. Zudem dürften sich Interkalationsmaterialien (Elektroden) und die reaktiven Stoffe in der Kathode als Preistreiber erweisen.

Energiedichte deutlich kleiner als bei flüssigen Kraftstoffen

Die zweite große Baustelle liegt in der erreichbaren Energiedichte der Batteriesysteme. Hiervon hängt vor allem die Reichweite eines BEV ab. Angepeilt wird eine Verdoppelung der heute erreichbaren Energiedichte auf gut 200 Wh/kg; in den letzten 15 Jahren war hier eine durchschnittliche Verbesserung von knapp 5 Prozent pro Jahr zu verzeichnen (Service, 2011, 1495). Aber selbst wenn dieses Ziel erreicht wird, ist das BEV weit von den Reichweiten konventioneller Fahrzeuge entfernt. Ein Liter Diesel speichert in etwa

zehn Kilowattstunden, was einer Energiedichte von 12.000 Wh/kg entspricht. Aktuell liegt die Energiedichte von fossilen Kraftstoffen also ungefähr um den Faktor 100 über dem Wert von Lithium-Ionen-Batterien. Bezieht man die höhere Energieeffizienz eines elektrischen Antriebsstrangs mit ein, so bleibt ein Verhältnis von knapp 1 zu 20 übrig. Dieser Faktor beschränkt das mögliche Einsatzgebiet von BEV weitgehend auf die Kurz-, maximal auf die Mittelstrecke. Ein Batteriesystem, welches ausreichend Energie für größere Entfernungen aufnehmen kann, würde nämlich zu groß und zu schwer für einen Pkw werden.

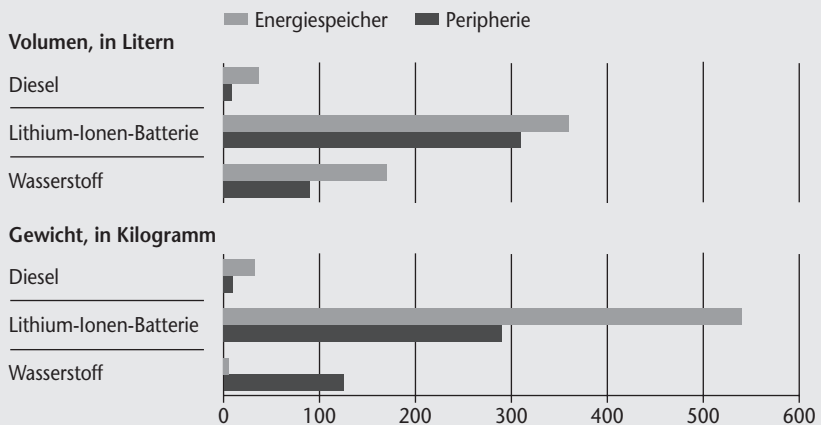
Das gilt besonders, wenn man berücksichtigt, dass auch alle zusätzlichen Stromverbraucher wie Heizung, Klimaanlage oder Radio beim BEV aus der Batterie gespeist werden müssen. Der größte potenzielle Zusatzverbraucher ist die Heizung, die je nach Fahrzeug einen Mehrbedarf von bis zu fünf Kilowattstunden verursachen kann. Diesen weitgehend inakzeptablen Mehrverbrauch könnte man allerdings durch den Einbau von nicht elektrischen Heizungen in den Griff bekommen. So sind beispielsweise schon heute Heizungen am Markt, die Ethanol als Energiequelle nutzen. Doch auch die zahlreichen elektronischen Hilfs- und Komfortmittel können einen erheblichen Zusatzbedarf erzeugen, der mit der Fahrzeuggröße zunimmt. So haben Untersuchungen eines Autobauers gezeigt, dass im praktischen Betrieb eines aktuellen Oberklassefahrzeugs (BMW 750iA) ein Leistungsbedarf von einem Kilowatt realistisch ist. Auch in der oberen Mittelklasse (BMW 530dA) ist noch damit zu rechnen, dass die Elektronik eine Leistung von etwa 750 Watt abrufen, und selbst in der Kompaktklasse (BMW 115i) wurde ein Bedarf von 330 Watt durch die Elektroniknutzung der Kunden kalkuliert (Liebl, 2009, 199). Die Tendenz beim Stromverbrauch ist zudem weiter steigend. Insgesamt nahm der Stromverbrauch im Auto in den letzten 30 Jahren um gut 50 Prozent zu – und dieser Trend setzt sich weiter fort. Bezieht man dies in einen Vergleich mit ein, so ergibt sich das in Abbildung 8 dargestellte Bild. Sowohl was den notwendigen Platz als auch das Gewicht des Speichers angeht, ist die Batterie deutlich schlechter als das konventionelle System.

Um im Mittel- und Langstreckenbereich Fuß zu fassen, wird das BEV daher auf die Entwicklung von Post-Lithium-Ionen-Technologien angewiesen sein. Diese befinden sich heute aber noch im Stadium der Grundlagenforschung und werden frühestens in zehn bis 15 Jahren am Markt sein. Bis dahin werden es also vor allem PHEV oder REEV sein (vgl. Abschnitt 3.3), welche dem konventionellen Fahrzeug auf der Mittel- und Langstrecke schrittweise Konkurrenz machen.

Platzbedarf und Gewicht von Energieträgern nach Fahrzeugkonzept

Abbildung 8

Notwendige Energieträger für 500 Kilometer Reichweite



Quelle: Johnen et al., 2009, 252

4.3 Wertschöpfungsketten – Marktanteile verschieben sich

Für die deutsche Automobilindustrie besteht die Herausforderung der E-Mobilität vor allem darin, sich auf das langfristige Vordringen des Elektroautos in den Pkw-Markt vorzubereiten und gleichzeitig den eigenen technischen Vorsprung bei konventionellen Antrieben zu sichern. Hiermit gehen Chancen und Risiken einher, die auch von der Position innerhalb der automobilen Wertschöpfungskette abhängen. Deutsche Unternehmen decken mit ihren Produkten bereits heute einen großen Teil der künftigen Wertschöpfungskette ab. Gerade im Bereich der Batteriezellenproduktion gibt es aber erhebliche Rückstände gegenüber asiatischen Konkurrenten. Da zur automobilen Wertschöpfungskette auch vor- und nachgelagerte Bereiche vom Maschinenbau bis zur Hauptuntersuchung (TÜV) zählen, muss sich ein großer Teil der deutschen Wirtschaft intensiv mit der Evolution der E-Mobilität auseinandersetzen.

Autobauer: Hohe Forschungsausgaben für kleinen Markt

Egal ob eine Batterie oder eine Brennstoffzelle den Strom bereitstellt – Fahrzeuge, welche von Elektromotoren angetrieben werden, können auf zahlreiche Bauteile verzichten, die heute in jedem Kfz Verwendung finden.

Dies betrifft zunächst einmal die mechanischen Komponenten im Antriebsstrang (Demuß, 2000). Die meisten Komponenten des Antriebsstrangs müssen entweder komplett neu konstruiert oder massiv abgewandelt werden, wenn sie in einem BEV zum Einsatz kommen sollen. Das Abgassystem ist sogar ein sicherer Streichkandidat. Völlig anders ist das Getriebe zu konstruieren, welches nur noch einstufig aufzubauen wäre, um die hohe Drehzahl eines Elektromotors auf die Antriebsräder umzusetzen. Eine Schaltung wird weitgehend unnötig, denn ein Elektromotor liefert auch bei minimalen Umdrehungszahlen sein volles Drehmoment. Aus Effizienz- und Komfortgründen bietet es sich aber an, zumindest ein einfaches Getriebe zu installieren, denn bei höheren Drehzahlen – bei denen ein Verbrennungsmotor optimal läuft – verliert der Elektromotor an Drehmoment. Ein Zweigangetriebe wäre aber wohl ausreichend, während bei konventionellen Fahrzeugen der Oberklasse inzwischen Acht-Gang-Automatikgetriebe eingesetzt werden. Insgesamt lassen sich in etwa 120 verschiedene Baugruppen identifizieren, die aus dem Fahrzeug verschwinden würden und auszugsweise in Übersicht 7 dargestellt werden.

Diese massiven technischen Veränderungen eröffnen auch branchenfremden Unternehmen die Chance, in den Automarkt einzudringen, wobei dies gerade in China massiv staatlich unterstützt wird. Bislang bleiben die Erfolge dieser Förderpolitik weit hinter den ursprünglichen Erwartungen der chinesischen Regierung zurück. Die heutigen Autobauer besitzen aber auch Startvorteile, da die Einhaltung von Sicherheits- und Qualitätsanforderungen großes Systemwissen verlangt, das sich Neueinsteiger erst erarbeiten müssen. Zudem sind viele technisch anspruchsvolle Ausstattungsmerkmale eines

Autoteile, die bei Elektroautos entfallen

Übersicht 7

Beispiele aus einer Liste von über 120 Teilen

Abgasanlage	Motorblock
Anlasser	Nockenwelle
Antriebswelle (bei Radnabenmotoren)	Ölfilter
Getriebe (bei Radnabenmotoren)	Ölwanne
Kraftstoffpumpe	Pleuellager
Kühler für Kühlwasser	Schwungrad
Kurbelwelle	Tank
Lichtmaschine	Vergaser
Luftfiltergehäuse	Zylinderkopf

Quelle: Geschka, 2003, Tabelle 22

Fahrzeugs vom Antriebsstrang unabhängig. Gerade die Hersteller mit etablierten Marken müssen auch darauf achten, dass sie sich erst dann im heutigen Nischenmarkt der BEV positionieren, wenn die neue Technologie ihren hohen Qualitätsstandards voll entspricht. Übereilte Markteinführungen könnten sonst die Marke im Markt der konventionellen Fahrzeuge schwächen. Da ein Auto ein äußerst komplexes (und emotionales) Produkt ist, dauert so eine Entwicklung mehrere Jahre und kann für ein einzelnes Modell durchaus mehr als 1 Milliarde Euro kosten. Problematisch ist auch, dass das BEV zunächst im Klein- und Kompaktwagensegment eingeführt werden wird, wo die Kunden eher kostensensibel sind. Normalerweise werden neue Technologien zunächst in der Oberklasse etabliert, wo die Zahlungsbereitschaft für Innovationen recht hoch ist.

Langfristig kann der Wechsel vom konventionellen zum elektrischen Antriebsstrang auch ein Risiko für die Autohersteller darstellen, denn ihre Kernkompetenz liegt im Motorenbau. Die Automarken definieren sich stark über die Motoren. Gut 55 Prozent der Arbeitsplätze bei Autoherstellern hängen an der Motorenfertigung. Da sich der Technologievorsprung im Motorenbau durch ein Aufkommen des elektrischen Antriebsstrangs tendenziell entwerten würde, sind die Hersteller trotz hoher Kosten gezwungen, eigene Kompetenzen in diesem Bereich aufzubauen, um ihre Position in der Wertschöpfungskette zu sichern. Vorerst ist das Elektroauto für die etablierten Autohersteller aber vor allem eine finanzielle Belastung, da den hohen Entwicklungskosten kein adäquater Absatzmarkt gegenübersteht.

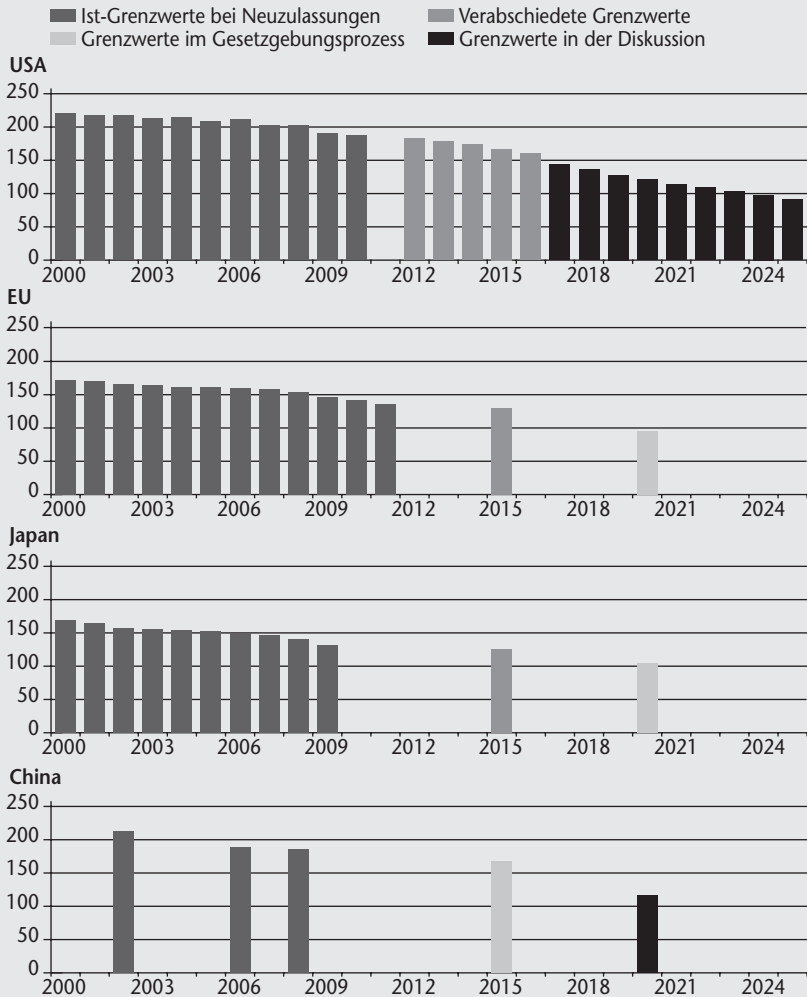
Zeitgleich müssen die Hersteller auch massiv in die Weiterentwicklung des konventionellen Antriebsstrangs investieren, denn dieser wird noch lange das Hauptgeschäftsfeld der Autobauer bleiben. Aufgrund immer schärferer gesetzlicher Vorgaben hinsichtlich Schadstoffausstoß und Kraftstoffverbrauch besteht auch hier Investitionsbedarf in Forschung und Entwicklung. In den letzten Jahren kam zudem in den wichtigen Automärkten eine CO₂-Regulierung hinzu (Abbildung 9).

Doch nicht nur staatliche Regulierung sorgt heute dafür, dass die Hersteller in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch ihrer Modelle unter Druck stehen. Dieses Kriterium hat schon seit geraumer Zeit auch beim Endkunden als Verkaufsargument an Bedeutung gewonnen. Der weitere Anstieg des Benzinpreises tut sein Übriges, um hier noch mehr Druck auf die Hersteller aufzubauen. Die etablierten Hersteller müssen somit mehrere Technologien parallel weiterentwickeln, um für die Zukunft gerüstet zu sein. Derzeit steckt die deutsche Automobilindustrie rund 10 Milliarden Euro pro Jahr an Auf-

Grenzwerte für CO₂-Emissionen

Abbildung 9

von neu zugelassenen Pkws, in Gramm pro gefahrenen Kilometer



CO₂-Emissionen: umgerechnet gemäß den europäischen Testnormen; Pkws: ohne Geländewagen;
 China: nur Pkws mit Benzinmotor.
 Quelle: ICCT, 2012

wendungen für Forschung und Entwicklung (FuE) in die Entwicklung effizienterer beziehungsweise neuartiger Antriebe. Das sind rund 50 Prozent des gesamten FuE-Budgets der Branche.

Zulieferer: Stellung der Systemzulieferer wird gestärkt

Auch für die Automobilzulieferer, die für mehr als 70 Prozent der automobilen Wertschöpfung stehen, bedeutet die Einführung von BEV Chance und Risiko. Vor allem für die großen Systemzulieferer, die komplette Baugruppen liefern, eröffnen sich Chancen. Ihr Produktportfolio umfasst viele Komponenten (Elektronik, Elektromotoren), die im elektrischen Antriebsstrang zum Einsatz kommen. Da sie zudem über große Erfahrung als Systemintegratoren verfügen, können sie als Schnittstelle zwischen etablierten Zulieferern und Marktneulingen fungieren, beispielsweise bei der Integration von Thermomanagement und Zellfertigung. Beachtenswert ist auch, dass es für Systemzulieferer tendenziell am einfachsten sein wird, Größenvorteile (Economies of Scale) zu erzielen, indem sie mehrere Hersteller mit den Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs beliefern. Das ist bei den zu erwartenden kleinen Märkten ein großer Vorteil, denn gerade bei Baugruppen wie Elektromotoren sind hohe Stückzahlen erforderlich, wenn Economies of Scale erzielt werden sollen. Die Fertigung kompletter elektrischer Antriebsstränge stellt für die großen Systemzulieferer ebenfalls eine interessante Zukunftsoption dar, in die sie bereits heute verstärkt investieren.

Auf der Gewinnerseite stehen auch Anbieter in den Bereichen Chemie und Elektronik. Heute entfallen etwa 30 Prozent der Wertschöpfung auf diese Sparten, bei einem BEV können es 80 Prozent werden. Es werden auch neue Firmen in den Zuliefermarkt eintreten, vor allem Batteriehersteller und Produzenten von Leichtbaumaterialien.

Es wird aber auch Zulieferer geben, die mit Nachfragerückgängen durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs konfrontiert werden. Ein konventioneller Antriebsstrang umfasst etwa 1.400 Bauteile. Viele davon werden von hoch spezialisierten mittelständischen Zulieferern hergestellt. Da ein BEV auf zahlreiche Bauteile verzichtet, die heute in jedem Kfz Verwendung finden, ist das bisherige Geschäftsmodell dieser Spezialisten langfristig gefährdet. Längerfristig dürfte dies den bereits heute laufenden Konzentrationsprozess in der traditionell mittelständisch organisierten Zulieferbranche weiter verstärken. Gleichwohl erwarten fast alle Prognosen zur Entwicklung des Automobilmarktes, dass auch im Jahr 2020 noch die meisten Pkws (inklusive Hybridfahrzeugen) über einen Verbrennungsmotor verfügen werden (vgl. Abschnitt 6.7), wengleich dieser im Durchschnitt kleiner dimensioniert sein wird als heute. Da bis 2020 der globale Pkw-Absatz um durchschnittlich etwa 4 Prozent pro Jahr steigen dürfte, wächst auch der potenzielle Absatzmarkt für klassische Zulieferer.

Maschinenbau: Veränderte Nachfrage zu erwarten

Veränderungen in einer so wichtigen Branche wie der Automobilindustrie ziehen aber noch weitere Kreise. So werden zur Produktion eines BEV Maschinen zum Drehen oder Fräsen kaum benötigt. Dafür liegt der Bedarf an Misch- und Beschichtungsanlagen deutlich höher. Davon wäre wiederum der Maschinenbau massiv betroffen, für den die Automobilindustrie ein wichtiger Kunde ist. Dies gilt auch für andere Branchen, die zum Teil noch deutlich stärker vom Autobau als Kunden abhängen, beispielsweise Gießereien.⁸

Deutsche Firmen im Bereich E-Mobilität

Die Produktion und die Entwicklung von Batteriezellen sind weitgehend in Ostasien konzentriert. Auch bei Batteriesystemen verfügt Deutschland aktuell nur über einen Weltmarktanteil von 2 Prozent. Heutige Marktdaten sind aber nur begrenzt aussagefähig, da sich die künftigen Batteriesysteme für BEV bezüglich Zellchemie, Leistungselektronik und Kühlsystem stark von denen unterscheiden müssen, die aktuell am Markt sind. Der heutige Rückstand lässt sich aufholen, wenn die in Deutschland vorhandenen Kompetenzen entsprechend gebündelt werden.

Die industrielle Basis in Deutschland umfasst neben den bekannten Autobauern viele Branchen und Firmen, deren Produkte und Kompetenzen bei der Produktion von Elektroautos gefordert sein werden. Deutschland ist dabei mehr als nur Autoland. Auch die leistungsfähige Chemie- und Elektroindustrie sowie der starke Maschinenbausektor tragen dazu bei, dass Deutschland im Rennen um die künftigen Produktionsstandorte von Elektrofahrzeugen recht gut aufgestellt ist.

- **Grundstoffe.** In Deutschland sind mehrere Firmen angesiedelt, die bei der Produktion von Vorprodukten für die Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien eine starke Marktposition haben. So ist die Firma Chemetall der Weltmarktführer bei der Produktion von Lithiumcarbonat und verfügt auch über eine starke Marktstellung bei der Herstellung weiterer Lithiumverbindungen.
- **Funktionsmaterialien.** In Deutschland ist zum Beispiel Evonik in der Entwicklung und Herstellung von Interkalationsmaterialien für Elektroden und sichere Separatoren engagiert; dies ist eine zentrale Aufgabe innerhalb der Wertschöpfungskette des BEV.
- **Elektronik.** In Deutschland gibt es eine leistungsfähige Elektronikindustrie, die bei der Entwicklung der Leistungselektronik für Batterien eine Schlüssel-

⁸ Für eine umfassende Analyse der Auswirkungen auf den deutschen Maschinenbau vgl. Schlick et al. (2011).

rolle einnehmen kann. Zu nennen wären beispielsweise Infineon als größter Produzent von Chips für den Autobau oder Siemens, die zusammen einen großen Teil des Bordnetzes abdecken.

- **Thermomanagement.** Für Elektroautos ist die Kühlung der Batterie elementar wichtig. In Zukunft werden ganz neue Kühlsysteme für die Hochleistungsbatterien im Auto entwickelt werden, wobei der Trend in Richtung Flüssigkühlung geht. Hier ist der Zulieferer Behr gut positioniert.
- **Systemzulieferer.** In Deutschland sind gleich mehrere Systemzulieferer zu Hause, die bei der Fortentwicklung des elektrischen Antriebsstrangs eine Schlüsselposition einnehmen. So beliefert Continental einen großen französischen Autobauer mit elektrischen Antriebssträngen. Der weltgrößte Zulieferer Bosch deckt ebenfalls den gesamten Antriebsstrang ab und ist auch in die Fertigung von Batteriesystemen eingestiegen. Zudem plant Bosch Investitionen in die Zellfertigung.⁹

4.4 Strombedarf und Stromquelle – vorerst kein großes Problem

Der zusätzliche Strombedarf durch E-Mobilität ist vorerst vernachlässigbar. Unter den Annahmen, dass auf Deutschlands Straßen eine Million reine Elektrofahrzeuge fahren, die im Jahresdurchschnitt 20 kWh je 100 km Fahrleistung verbrauchen (Kompakt- bis Mittelklasse) und eine durchschnittliche Fahrleistung von 10.000 Kilometern pro Jahr aufweisen, beträgt der Stromverbrauch zwei Millionen Megawattstunden. Gemessen am deutschen Bruttostromverbrauch des Jahres 2010 entspricht dies lediglich einem Anteil von 0,3 Prozent (AGEB, 2011). Ein Ausbau des Kraftwerksparks allein aufgrund der zunehmenden Bedeutung der E-Mobilität muss also vorerst nicht erfolgen, zumal viele Elektrofahrzeuge nachts – also in Zeiten ansonsten schwacher Nachfrage – aufgeladen werden dürften.

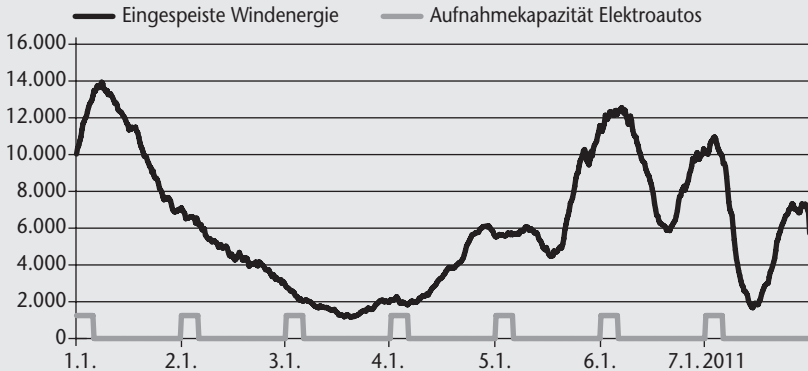
Die Möglichkeit, Elektroautos in der Nacht aufzuladen, hat das Interesse der Stromnetzbetreiber geweckt. Denn im Zuge des Ausbaus der erneuerbaren Energien haben sie zunehmend mit der schwankenden Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen zu kämpfen. Betrachtet man ein wöchentliches Einspeiseprofil für Windenergie, so zeigen sich große Schwankungen. In Abbildung 10 wird dies anhand der Windenergieeinspeisung in der ersten Januarwoche des Jahres 2011 gezeigt, wobei zu berücksichtigen ist, dass seitdem weitere Kapazitäten zugebaut wurden.

⁹ Bis Herbst 2012 waren diese Aktivitäten in einem Joint Venture mit Samsung zusammengefasst.

Windenergie und angenommene Aufnahmekapazität von Elektroautos

Abbildung 10

Windenergieeinspeisung in Deutschland in der ersten Januarwoche 2011 und Stromaufnahmekapazität von einer Million Elektroautos (BEV)¹, in Megawatt



¹ Angenommener Bestand.

Quellen: Amprion, 2011; ENBW, 2011; TenneT TSO, 2011; 50Hertz, 2011; eigene Berechnungen

Ebenfalls eingezeichnet ist eine sehr optimistische Schätzung der Speicherkapazität, die von einer Million BEV bereitgestellt würde. Wenn jedes dieser Fahrzeuge einen nutzbaren Speicher von 15 Kilowattstunden besitzt, jeden zweiten Tag geladen wird und zu zwei Dritteln entladen ist, ergibt sich eine Energiespeicherkapazität von 5.000 Megawattstunden. Würden diese Fahrzeuge etwa vier Stunden zum Laden brauchen, zum Beispiel ab Mitternacht, resultierte eine mögliche Leistungsabnahme von 1.250 Megawatt.

Zu beachten ist auch, dass die eingespeiste Windenergieleistung in Deutschland verschiedene Zyklen aufweist. Im Winter liegt die erzeugte Leistung, aber auch die Leistungsschwankung tendenziell höher als im Sommer. Im Fallbeispiel vom 1. Januar bis 7. Januar 2011 in Abbildung 10 schwankt die eingespeiste Leistung der Windturbinen zwischen 13.935 und 1.176 Megawatt. Im Tageszyklus der Windenergieeinspeisung trat die Leistungsspitze häufig in den Stunden nach Mitternacht auf, während die Mittagsstunden relativ leistungsschwach waren. In der Beispielwoche lag die durchschnittlich eingespeiste Windenergieleistung zwischen Mitternacht und drei Uhr bei knapp 7.200 Megawatt, während sie zwischen zwölf und 15 Uhr nur etwa 4.950 Megawatt betrug. Die Stromverbrauchsspitze ist hingegen typischerweise in den Mittagsstunden zu verorten. In den Nachtstunden liegt der Stromverbrauch hingegen deutlich unter dem Tagesdurchschnitt.

Diese Zyklen und die hohen Schwankungen bei der Stromeinspeisung belasten die Stabilität des Stromnetzes sehr stark und müssen durch konventionelle Kraftwerke oder Pumpspeicher ausgeglichen werden. Die in das Stromnetz eingespeiste Leistung muss aber umgehend abgerufen werden. Das hat in der Vergangenheit bereits zu negativen Strompreisen an der Leipziger Strombörse geführt.

Wie Abbildung 10 zeigt, kann die nächtliche Stromnachfrage durch Elektroautos dabei helfen, diese Situationen etwas zu entschärfen. Allerdings sollte man die Möglichkeiten des Elektroautos an dieser Stelle richtig einschätzen. Bei einer Million Elektroautos wäre das ein gewisser Puffer. Selbst unter den optimistischen Annahmen des Beispiels bewegte sich dieser Puffer jedoch von der Leistung her lediglich in der Größenordnung eines großen Pumpspeicherwerks.

Damit das Stromnetz stabil bleibt, müssen die Schwankungen auch künftig vor allem über den konventionellen Kraftwerkspark ausgeglichen werden. Das BEV kann nur einen kleinen Beitrag leisten, vor allem wenn man bedenkt, dass sich die installierte Kapazität von Wind- und Sonnenenergie bis zum Jahr 2020 ungefähr verdoppeln soll. Theoretisch wäre es auch möglich, die gespeicherte Energie in den Spitzenlastzeiten wieder in das Netz abzugeben und damit Verbrauchsspitzen abzufedern (bi-direktionales Laden). Dies würde aber eine ausgefeilte Infrastruktur voraussetzen, die sowohl entsprechende Netzan-schlüsse als auch Abrechnungstechnik beinhaltet. Zudem würde es eine deutliche Erhöhung der jährlichen Ladezyklen nach sich ziehen, was die Lebensdauer der Fahrzeugbatterien reduzieren könnte. Wirtschaftlich ist dies aus heutiger Sicht nicht vertretbar. Auch die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) sieht technologische und wirtschaftliche Hürden für das bi-direktionale Laden und hält es nur für „eine Zukunftsoption“ (NPE, 2010, 17).

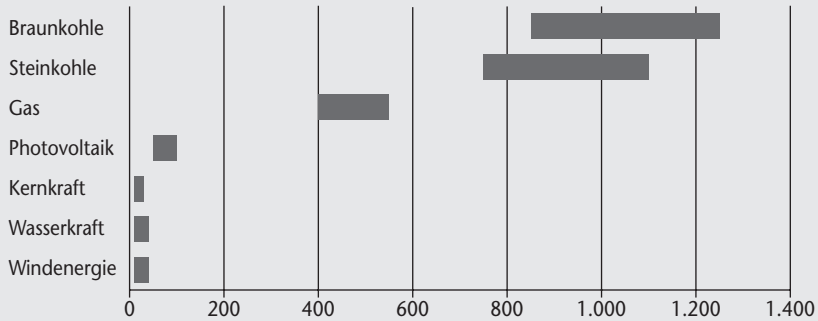
4.5 Klimafreundlichkeit – von Rahmenbedingungen abhängig

Ein Aspekt der E-Mobilität, der vor allem aus ökologischer Sicht interessant zu sein scheint, ist die Frage, wie der Strom für Elektrofahrzeuge erzeugt wird. In der Tat macht es einen erheblichen Unterschied für die CO₂-Bilanz eines Elektroautos, ob der von ihm genutzte Strom auf Basis erneuerbarer Energien oder Kernkraft (also weitgehend CO₂-frei) erzeugt wird oder aber aus Kohlekraftwerken stammt. Die CO₂-Emissionen je erzeugte Kilowattstunde unterscheiden sich ganz erheblich (Abbildung 11).

Beim aktuellen deutschen Strommix betragen nach Daten des Umweltbundesamts die CO₂-Emissionen für ein Fahrzeug mit einem Verbrauch von 20 kWh/100 km¹⁰ gut 110 g/km. Dies entspricht bei einem Auto mit Benzin-

CO₂-Emissionen verschiedener Primärenergieträger Abbildung 11

in Gramm pro Kilowattstunde



Quelle: Wagner/Koch, 2007, 50

motor einem Verbrauch von etwa 4,6 Litern pro 100 gefahrenen Kilometern. Das ist ein Wert, der von vielen Kleinwagen und Voll-Hybridautos zwar bereits heute erreicht beziehungsweise unterschritten wird. Er ist jedoch deutlich besser als der durchschnittliche CO₂-Ausstoß von neu zugelassenen Pkws in Deutschland. Dieser lag im Jahr 2011 mit 146,1 g/km (KBA, 2012a, 8) oberhalb des Zielwertes von 130 g/km.

In Deutschland und der EU macht es aber hinsichtlich der rechnerischen CO₂-Emissionen eines Elektroautos faktisch keinen Unterschied, ob der Strom durch erneuerbare Energien oder in einem Braunkohlenkraftwerk erzeugt wird. Denn die Energiewirtschaft unterliegt dem EU-Emissionshandel, der eine Obergrenze für die CO₂-Emissionen dieses Sektors vorgibt, die per definitionem nicht überschritten werden kann (NPE, 2011a, 34). Wenn also durch mehr Elektroautos die Nachfrage nach Strom aus fossilen Quellen und damit nach Emissionszertifikaten steigen sollte, führt der Emissionshandel dazu, dass die Emissionen an anderer Stelle eingespart werden. Die CO₂-Bilanz ändert sich nicht und fällt innerhalb des Energiesektors genauso hoch aus, als würden die Elektroautos mit CO₂-freiem Strom betrieben.

BEV werden in der EU von der Politik derzeit wie Fahrzeuge ohne CO₂-Emissionen behandelt. In Deutschland waren sie bis Anfang 2012 für die ersten fünf Jahre nach Erstzulassung von der Kfz-Steuer befreit und wurden danach nach Gewicht besteuert (BMF, 2009, 2). Inzwischen besteht eine

¹⁰ Bei 20 kWh/100 km handelt es sich um eine relativ optimistische Schätzung. So ermittelte der Allgemeine Deutsche Automobil-Club (ADAC) für ein aktuelles Kompaktmodell mit Elektroantrieb einen Verbrauch von 25,7 kWh/100 km (ADAC, 2012, 9).

Steuerbefreiung für zehn Jahre, was aber nur eine sehr geringe finanzielle Besserstellung gegenüber der Vorgängerregelung bedeutet. Darüber hinaus gibt es sogar die Möglichkeit, die (unterstellten) Null-Emissionen von Elektroautos mehrfach auf das Flottenziel der Autohersteller anzurechnen. Bis zum Jahr 2015 werden Pkws mit einem CO₂-Ausstoß von weniger als 50 g/km mit einem höheren Faktor bei der Berechnung des Flottenverbrauchs (Übersicht 8) der Hersteller angesetzt. Demnach werden neue Pkws mit Emissionen von weniger als 50 g/km in den Jahren 2012 und 2013 mit dem Faktor 3,5 auf das Flottenziel angerechnet, mit dem Faktor 2,5 im Jahr 2014 und mit dem Faktor 1,5 im Jahr 2015 (Transport & Environment, 2010, 12). Beispiel: Verkauft ein Hersteller im Jahr 2012 ein Elektrofahrzeug, so werden dessen CO₂-Emissionen (0 g/km) bei der Berechnung des Flottenziels des Herstellers so gewertet, als hätte er 3,5 Autos mit diesem Emissionsniveau abgesetzt. Insgesamt wirken BEV dadurch positiv auf die Erfüllung der CO₂-Flottenziele. Die Bundesregierung setzt sich dafür ein, diese Mehrfachanrechnung zu verlängern (Bundesregierung, 2011, 52).

Europäische CO₂-Grenzwerte für Pkws

Übersicht 8

Die CO₂-Emissionen von Pkws in der EU müssen bis spätestens im Jahr 2015 auf ein Niveau von 130 g/km im Durchschnitt aller neu zugelassenen Autos gesunken sein. Weitere 10 g/km sollen durch ergänzende Maßnahmen (zum Beispiel Biokraftstoffe, Leichtlaufreifen) erzielt werden. Im Jahr 2011 wurde ein Wert von 136,6 g/km erreicht. Der Durchschnittswert von 130 g/km bedeutet, dass für einzelne Hersteller unterschiedliche Zielvorgaben bestehen. Vereinfacht lässt sich sagen, dass für Fahrzeuge mit einem höheren Gewicht auch höhere Emissionsgrenzwerte vorgesehen sind. Wenn sich an den Fahrzeuggewichten nichts ändert, liegt der Grenzwert für Daimler im Jahr 2015 bei knapp 138 g/km, für Fiat dagegen bei knapp 120 g/km. Durch diese Staffelung soll berücksichtigt werden, dass schwerere Autos allein schon aus physikalischer Sicht einen höheren Kraftstoffverbrauch aufweisen. Gleichwohl müssen die Hersteller, die mehr schwere Fahrzeuge produzieren, die durchschnittlichen CO₂-Grenzwerte im Flottendurchschnitt in absoluter und relativer Betrachtung stärker reduzieren als Unternehmen, die überwiegend kleinere Autos produzieren. Als langfristiger Grenzwert (2020) sind 95 g/km geplant.

Es existiert eine Übergangsfrist für die Automobilindustrie (Phasing-in): Demzufolge müssen bis zum Jahr 2012 erst 65 Prozent aller neuen Pkws die jeweiligen Grenzwerte erreichen, 2013 dann 75 Prozent und 2014 80 Prozent. Ab 2015 gelten die Grenzwerte für die gesamte Flotte. Durch diese Maßnahmen soll den Entwicklungszyklen der Branche Rechnung getragen werden.

Werden die Grenzwerte überschritten, sind Strafzahlungen für die Autobauer vorgesehen. Von 2015 bis 2018 würden für das erste Gramm über dem Grenzwert 5 Euro pro Fahrzeug fällig, 15 Euro für das zweite, 25 Euro für das dritte und 95 Euro ab dem vierten Gramm über dem Grenzwert. Ab dem Jahr 2019 würden dann schon ab dem ersten Gramm 95 Euro pro Gramm und Auto als Strafzahlung anfallen (EU, 2012). Damit wäre eine zusätzliche Tonne CO₂ aus dem Straßenverkehr vermutlich mit einer Strafzahlung verbunden, die in etwa beim Zehnfachen des erwarteten Preises für ein entsprechendes Emissionszertifikat liegt.

Eigene Zusammenstellung

Da der für die Fahrzeuge produzierte Strom dem Emissionshandel unterliegt, kann man der Argumentation folgen, BEV seien Null-Emissions-Fahrzeuge, solange nicht die Zahl der Emissionszertifikate wegen des steigenden Anteils an Elektroautos erhöht wird. Aufgrund der faktischen Teilnahme der BEV am Emissionshandel werden ihre tatsächlichen Emissionen durch den Strommix bestimmt; die Emissionszertifikate unterscheiden nicht nach Stromherkunft. In der politischen Argumentation wird parallel zur steigenden Bedeutung der E-Mobilität ein Ausbau der erneuerbaren Energien gefordert. Für die Akzeptanz der E-Mobilität bei den Kunden mag dies förderlich sein. Aus ökologischer Sicht ist dies nicht notwendig, wenn die Zahl der Emissionszertifikate trotz des Mehrverbrauchs durch Elektroautos konstant bleibt und auch die geplante jährliche Absenkung der Emissionsobergrenze nicht angepasst wird.

Der positive Klimaauswirkung der E-Mobilität liegt vor allem darin, dass Treibhausgasemissionen in einem Sektor, der bislang nicht dem EU-Emissionshandel unterliegt, vermindert werden. Stattdessen trifft die steigende Nachfrage nach Strom und wohl auch nach Emissionszertifikaten auf ein jeweils begrenztes Angebot. Wie erwähnt wird die E-Mobilität Teil des Emissionshandels. Würden die eine Million Elektrofahrzeuge in Deutschland entsprechend viele Autos mit gleicher jährlicher Fahrleistung (10.000 Kilometer) und einem durchschnittlichen Benzinverbrauch von 6 Litern pro 100 Kilometer ersetzen, säne der CO₂-Ausstoß um etwa 1,4 Millionen Tonnen. In Anbetracht dessen, dass die jährlichen CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland seit dem Jahr 1999 um 30 Millionen Tonnen (rund 18 Prozent) abgenommen haben, ist das ein eher bescheidener Beitrag, den das Elektroauto leisten kann.

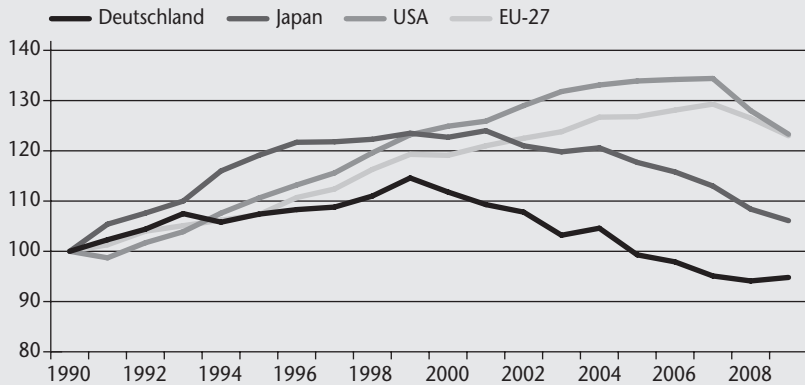
Auch in anderen großen Industrieländern haben energieeffizientere Verbrennungsmotoren bereits dazu geführt, dass das Wachstum der CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs abgebremst oder sogar das Emissionsniveau gesenkt wurden. Deutschland ist dabei der Vorreiter. Hierzulande liegen diese Emissionen bereits unter denen des Kyoto-Basisjahres 1990 (Abbildung 12). In Japan gehen die CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs seit dem Jahr 2002 zurück. Selbst in den USA hat sich der Anstieg deutlich verlangsamt. Die größten Zuwächse verzeichnet China, wo sich die Emissionen des Straßenverkehrs seit 1990 fast versechsfachten. Absolut liegen sie heute mehr als doppelt so hoch wie in Deutschland.

Der geschätzte Beitrag der Elektroautos im Jahr 2020 entspricht rund 1 Prozent der heutigen CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland.

CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs

Abbildung 12

Internationaler Vergleich, Index: 1990 = 100



Quelle: IEA, 2011c

Diese Relation zeigt bereits, dass die geforderten und auch zu erwartenden Emissionsreduktionen im kommenden Jahrzehnt primär durch effizientere Verbrennungsmotoren erbracht werden müssen, da das Elektroauto nicht die nötigen Reduktionspotenziale generiert. Auch die fortschreitende Hybridisierung wird hier eine wachsende Rolle spielen. Allerdings teilen Hybriden und Elektroautos ein Problem. Die durch sie erzielten Emissionsreduktionen weisen sehr hohe Vermeidungskosten auf. Beim BEV liegen heute die Vermeidungskosten pro Tonne CO₂ nach Berechnungen der Autoren im vierstelligen Euro-Bereich, während die im Emissionshandel abgebildeten gesamtwirtschaftlichen Vermeidungskosten im Jahr 2020 vermutlich deutlich unter 30 Euro pro Tonne betragen werden.

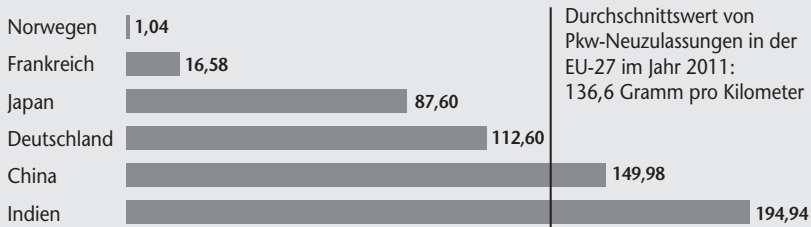
Anders ist dagegen die Situation in Ländern ohne Emissionshandel. In diesen Ländern entscheidet allein die CO₂-Intensität des nationalen Strommix über die Klimaverträglichkeit von Elektroautos (Abbildung 13). Beispielsweise fiel die CO₂-Bilanz eines Elektroautos deutlich schlechter aus, wenn der Strom auf Basis des chinesischen Kraftwerksparks mit seinem hohen Anteil an Kohlekraftwerken mit niedrigem Wirkungsgrad produziert würde. Übertragen auf das oben genannte Beispiel lägen die CO₂-Emissionen – aufgrund des chinesischen Energiemix – in einer Größenordnung von 150 g/km.¹¹ Da

¹¹ Die Zahl basiert auf den Angaben von Emissionfactors.com (2011). In Literatur und Presse finden sich teilweise sehr viel höhere Werte, was auch an den möglichen Emissionsbandbreiten von Kraftwerken liegt (vgl. Abbildung 11).

CO₂-Emissionen eines Elektroautos¹

Abbildung 13

nach Strommix verschiedener Länder im Jahr 2011, in Gramm pro Kilometer



¹ Basierend auf einem BEV mit einem Energieverbrauch von 20 kWh auf 100 km.
Quellen: Emissionfactors.com, 2011; Umweltbundesamt, 2011; ACEA, 2012

in China weder der Energiesektor noch die Wirtschaft allgemein einem Emissionshandelssystem unterliegen, würde ein Ausbau der E-Mobilität dort unter den aktuellen Gegebenheiten gesamtwirtschaftlich nicht zu einer Senkung der CO₂-Emissionen gegenüber einem Szenario ohne E-Mobilität führen.

Doch trotz der relativ schlechten CO₂-Werte von BEV in China tritt das Land als Vorreiter bei der Elektromobilität auf. China dürfte das Thema E-Mobilität aber nicht in erster Linie aus Klimaschutzgründen oder zur Reduktion von Treibhausgasemissionen forcieren. Im Vordergrund stehen stattdessen die Ziele, die Abhängigkeit des Landes von Ölimporten und die Luftverschmutzung in den schnell wachsenden Städten des Landes zu verringern. Zudem will sich China in der E-Mobilität einen technologischen Vorsprung erarbeiten, weil der Rückstand gegenüber Unternehmen aus Europa, Japan, Südkorea und Nordamerika bei den traditionellen Antriebstechnologien groß ist. Bei der jungen Technologie will das Land von Beginn an in der Spitzengruppe mit dabei sein, was die hohen Fördermittel für die E-Mobilität und heimische Unternehmen erklärt. Allerdings ist die Euphorie hinsichtlich der E-Mobilität inzwischen auch in China abgeklungen. Angesichts des nur langsamen Fortschritts in der Technologie äußerte sich Ministerpräsident Wen Jiabao schon im Jahr 2011 in Form eines Namensartikels in der Parteizeitung Quishi skeptisch zu der Frage, ob sich Elektrofahrzeuge letztlich durchsetzen würden.

In Norwegen, das am EU-Emissionshandel teilnimmt, würde die E-Mobilität rechnerisch dazu beitragen, die CO₂-Emissionen zu verringern. Aufgrund des sehr hohen Anteils der weitgehend CO₂-freien Wasserkraft lägen die CO₂-Emissionen des erwähnten Elektroautos dort umgerechnet bei nur 1 g/km.

5

Arbeitskräftebedarf der E-Mobilität

Nahezu der gesamte Fahrzeugbau sowie große Teile der Elektroindustrie sind bereits zum aktuellen Zeitpunkt von gravierenden Arbeitskräfteengpässen besonders im akademischen Segment gekennzeichnet. So kamen im März 2012 bei Fahrzeug- und Maschinenbauingenieuren in Deutschland auf eine arbeitslose Person rund elf offene Stellen, bei Elektroingenieuren lag das entsprechende Verhältnis bei eins zu über zehn (VDI, 2012). Aber auch bei vielen nichtakademischen Qualifikationen wie etwa Technikern des Fahrzeug- und Maschinenbaus respektive der Elektrotechnik waren bei Relationen von eins zu fünf beziehungsweise eins zu vier deutliche Engpässe zu erkennen.

Erschwerend aus Sicht der E-Mobilität kommt vor diesem Hintergrund hinzu, dass diese mit zahlreichen weiteren Wachstumsbranchen und -technologien (zum Beispiel Embedded Systems, Umwelttechnologie, Radio Frequency Identification, Software Engineering, Medizintechnik, energieeffiziente Produktionstechnologie) um dieselben knappen Arbeitskräfte konkurriert, zum Beispiel um Elektro- und Maschinenbauingenieure sowie Informatiker. Neun von zehn Unternehmen in der Elektro- und IT-Industrie erwarten, dass der Trend zu Elektromobilität den Bedarf speziell an Elektroingenieuren weiter erhöhen wird. Ein nahezu ebenso hoher Anteil geht davon aus, dass dieser gestiegene Bedarf nicht gedeckt werden kann (VDE, 2010).

Stellvertretend für die in vielen Industriebranchen von Arbeitskräfteengpässen im Bereich technischer Arbeitskräfte gekennzeichnete Situation des deutschen Arbeits- und Ausbildungsmarktes zeigt eine aktuelle Befragung von Zulieferunternehmen der Automobilindustrie (Bähr/Puls, 2012), dass das Thema der Arbeitskräfteverfügbarkeit aus Sicht dieser Unternehmen auch mit großem Vorsprung vor allen anderen Rahmenbedingungen die höchste Priorität zur Sicherung der eigenen Zukunfts- und Wettbewerbsfähigkeit genießt (Tabelle 7).

Um Deutschland in diesem arbeitskräftebezogenen Engpassumfeld als Leitmarkt für Elektrofahrzeuge zu positionieren, bedarf es einer Vielzahl neu ausgebildeter Arbeitskräfte und des frühen Aufbaus der erforderlichen Kompetenzen. Die betroffenen Qualifikationsgruppen reichen von Ausbildungsberufen der dualen Berufsausbildung über Aufstiegsfortbildungen wie Techniker oder Industriemeister bis hin zu technisch-naturwissenschaftlichen Akademikern.

Rahmenbedingungen aus Sicht deutscher Automobilzulieferer

Tabelle 7

Prioritäten auf einer Bewertungsskala von 0 (unwichtig) bis 100 (sehr wichtig)

Arbeitskräfteverfügbarkeit	100
FuE-Kompetenz	67,5
Infrastruktur	59,8
Planungssicherheit	47,2
Rechtssicherheit (zum Beispiel Patentschutz, Planungssicherheit)	45,7
Logistik	44,6
Steuer-/Abgabenbelastung	44,6
Lieferantennetzwerke	43,9
Währungssicherheit	41,3
Finanzierungsbedingungen	39,8
Demografische Entwicklung	39,5
Forschungsnetzwerke	39,1

Quelle: Bähr/Puls, 2012

5.1 Methodik

5.1.1 Abgrenzung der Kernqualifikationen und -branchen

Eine streng nach einzelnen Fachrichtungen differenzierende Abschätzung des künftigen Arbeitskräftebedarfs ist nicht möglich oder gar zielführend. An dieser Stelle wird daher eine quantitative Bedarfsanalyse der für die E-Mobilität relevanten Qualifikationen auf Ebene der drei Kompetenzniveaus Akademiker, Techniker und Industriemeister sowie beruflich Qualifizierte durchgeführt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass – wie bereits beschrieben – die E-Mobilität ein wichtiger, aber nicht der einzige Treiber des Bedarfs an diesen Arbeitskräften ist. Ein Näherungswert für den spezifischen Arbeitskräftebedarf ist daher der Bedarf an Arbeitskräften in den für E-Mobilität relevanten Fachrichtungen, der in den Kernbranchen der E-Mobilität wirksam wird. Beispiele dafür sind der Fahrzeugbau, die Elektroindustrie sowie weitere elektroaffine Branchen des Verarbeitenden Gewerbes wie Kfz-Handel, -instandhaltung und -reparatur.

Mit „Arbeitskräften“ sind im Folgenden grundsätzlich jene Arbeitskräfte gemeint, die eine für die E-Mobilität besonders relevante Qualifikation aufweisen. Hierzu werden in der vorliegenden Analyse Arbeitskräfte mit Abschluss mindestens einer Berufsausbildung der folgenden Fachrichtungen (Statistisches Bundesamt, 2010) gezählt: Fahrzeugbau und Verkehrstechnik,

Physikalische Technik, Physik, Informatik, Fertigungs- beziehungsweise Produktionstechnik, Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Elektrizität, Energie, Elektrotechnik, Elektronik und Automation, Telekommunikation, Gesundheitstechnik und Feinwerktechnik sowie Wirtschaftsingenieurwesen.

Neben der qualifikatorischen Dimension erfolgt eine Abgrenzung der E-Mobilität auf Branchenebene. Dabei werden folgende Bereiche als Kernbranchen der E-Mobilität betrachtet: Herstellung von Akkumulatoren und Batterien, Elektromotoren, Generatoren und Transformatoren, Elektrizitätsverteilungs- und Elektrizitätsschaltanlagen, isolierte Elektrokabel, -leitungen und -drähte, elektrische Ausrüstungen (anderweitig nicht genannt), elektronische Bauelemente, Mess-, Kontroll-, Navigations- und ähnliche Instrumente und Vorrichtungen, industrielle Prozesssteuerungseinrichtungen, Kraftwagen und Kraftwagenmotoren, Karosserien, Aufbauten und Anhänger, land- und forstwirtschaftliche Maschinen, Teile und Zubehör für Kraftwagen und Kraftwagenmotoren, Krafträder, Fahrräder und Behindertenfahrzeuge. Dazu gehören auch Fahrzeugbau (anderweitig nicht genannt), Elektrizitätsversorgung, Kraftfahrzeughandel, -instandhaltung und -reparatur, außerdem die Forschung und Entwicklung in den Bereichen Natur-, Ingenieur-, Agrarwissenschaften und Medizin, technische, physikalische und chemische Untersuchung sowie Hochschulen und andere Bildungseinrichtungen des Tertiärbereichs.

Die bis zum Jahr 2020 im Bereich der E-Mobilität wirksam werdenden Beschäftigungsbedarfe können in drei Komponenten unterteilt werden. Erstens müssen die Arbeitgeber diejenigen Arbeitskräfte ersetzen, die altersbedingt aus dem Erwerbsleben ausscheiden. Zweitens wird ein genereller Expansionsbedarf wirksam, der sich aus Strukturrends wie der bevorzugten Beschäftigung hochqualifizierter Arbeitskräfte und dem langfristigen volkswirtschaftlichen Wachstum speist. Drittens führt die Einführung der E-Mobilität zu spezifischen volkswirtschaftlichen Effekten wie Änderungen in der automobilen Wertschöpfungskette oder Investitionen in notwendige Infrastruktur. Diese lösen einen für die E-Mobilität spezifischen Expansionsbedarf aus.

5.1.2 Demografiebedingter Ersatzbedarf

Der demografiebedingte Ersatzbedarf gibt an, wie viele heute noch erwerbstätige Arbeitskräfte mit für die Elektromobilität relevanten Qualifikationen in den kommenden Jahren in den Kernbranchen der E-Mobilität aus dem Erwerbsleben ausscheiden werden. Gelänge es, diese – in der Regel

altersbedingt – ausscheidenden Arbeitskräfte durch neue zu ersetzen, so bliebe der Personalbestand konstant. Andernfalls würde er sinken oder steigen. Für die einzelnen Qualifikationsgruppen kann dieser Ersatzbedarf in Abhängigkeit von der spezifischen Alters- und Erwerbstätigenstruktur sehr unterschiedlich ausfallen. In Tabelle 8 sind zunächst die zur Berechnung des demografiebedingten Ersatzbedarfs notwendigen Daten in Form der kohortenspezifischen Erwerbstätigenquoten der aktuellen Arbeitskräftepotenzialgruppen dargestellt.

Strukturell zeigen die Erwerbstätigenquoten der drei Arbeitskräftegruppen einen ähnlichen Verlauf. Sie sind umgekehrt U-förmig, wobei sie bei jungen Erwerbstätigen auf einem hohen Niveau beginnen, zunächst steigen, typischerweise in der Mitte des Erwerbslebens ihr Maximum erreichen und gegen Ende des Erwerbslebens deutlich sinken.¹²

Die Erwerbstätigenquote in der Kohorte der 60- bis 64-Jährigen, das heißt vor Erreichen der zum Erhebungszeitpunkt geltenden Regelaltersgrenze der gesetzlichen Rentenversicherung, steigt mit dem Kompetenzniveau deutlich an und reicht von 40 Prozent bei beruflich Qualifizierten bis 57,4 Prozent bei

Erwerbstätigenquote in Kernqualifikationen der E-Mobilität

Tabelle 8

Erwerbstätige¹ nach Altersgruppe und Kompetenzniveau je 100 Personen, im Jahr 2009

Kohorte	Alter, in Jahren	Akademiker	Techniker und Industriemeister	Beruflich Qualifizierte
1	bis 29	86,9	87,5	83,5
2	30 bis 34	92,4	95,2	88,5
3	35 bis 39	95,3	95,0	90,0
4	40 bis 44	94,9	95,4	89,3
5	45 bis 49	94,1	95,0	88,0
6	50 bis 54	92,1	92,2	83,2
7	55 bis 59	82,9	81,7	75,3
8	60 bis 64	57,4	50,5	40,0
9	65 bis 69	14,0	12,9	6,1

¹ Nur Erwerbstätige in den in Abschnitt 5.1.1 definierten Kernqualifikationen (Fachrichtungen).

Eigene Berechnungen auf Basis von Forschungsdatenzentrum der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder, Mikrozensus 2009

¹² Bei vielen anderen Arbeitskräftegruppen verläuft die Entwicklung M-förmig und die Erwerbstätigenquote fällt vor Erreichen des globalen Maximums zunächst ab. Dieser Effekt ist auf die in den jüngeren Kohorten auftretenden kinder- oder anderweitig familiär bedingten Erwerbsunterbrechungen zurückzuführen. Dass dieser Effekt bei den E-Mobilität-relevanten Arbeitskräftegruppen typischerweise ausbleibt, kann als Folge deren sehr geringen Frauenanteils (vgl. Abschnitt 5.3.1) interpretiert werden.

Akademikern. Aber auch nach Erreichen der gesetzlichen Regelaltersgrenze sinkt die Erwerbstätigenquote nicht sofort auf null, da einige Personen auch in den folgenden Alterskohorten einer Erwerbstätigkeit nachgehen – etwa als Geschäftsführer eines Handwerksbetriebs oder Ingenieurbüros oder in einer freiberuflich beratenden Tätigkeit in Industrieunternehmen.

Abstrahiert man von arbeitsmarktwirksamer Zu- und Abwanderung, was die Realität in Deutschland der letzten Jahre widerspiegelt, werden die innerhalb einer bestimmten Kohorte heute erwerbstätigen Personen zum großen Teil bis zum Erreichen der gesetzlichen Rentenaltersgrenze aus dem Erwerbsleben ausscheiden. Wie an der Veränderung der Erwerbstätigenquoten in Tabelle 8 zu erkennen ist, treten diese Personen jedoch nicht alle im selben Alter aus dem Erwerbsleben aus. Der innerhalb eines bestimmten Zeitraums wirksame demografiebedingte Ersatzbedarf muss folglich anhand der Veränderung der Erwerbstätigenquoten berechnet werden. Hierbei kann vereinfachend angenommen werden, dass a) die kohortenspezifischen Erwerbstätigenquoten über den Prognosezeitraum bis zum Jahr 2020 konstant bleiben, b) erwerbstätige Personen aus dem Alterssegment 65 plus spätestens mit Vollendung des 70. Lebensjahres aus dem Erwerbsleben ausscheiden und c) die einzelnen Jahrgänge innerhalb einer Fünfjahreskohorte gleich verteilt sind.

Tabelle 9 erläutert die einzelnen Effekte und die Ermittlung des demografiebedingten Ersatzbedarfs beispielhaft anhand des Jahresübergangs eines aktuellen Jahrgangs erwerbstätiger Akademiker mit Kernqualifikationen der E-Mobilität. Ein erstes, noch sporadisches Ausscheiden aus dem Erwerbsleben setzt bei diesen Akademikern mit dem Übergang von Kohorte 3 zu Kohorte 4 ein. Bei einem Jahresübergang kommt es hier zu folgenden Effekten: Ein Fünftel der Kohorte 3 wechselt infolge des gestiegenen Alters in Kohorte 4. Mit diesem Schritt reduziert sich die durchschnittliche Erwerbstätigenquote der 172.700 Betroffenen von 95,3 auf 94,9 Prozent. Folglich scheidet an dieser Schwelle rund 100 vormals erwerbstätige Personen aus dem Erwerbsleben aus. Beim Übergang von Personen aus Kohorte 4 in Kohorte 5 reduziert sich deren Erwerbstätigenquote um weitere 0,8 Prozentpunkte. Dies betrifft ein Fünftel der 248.700 Personen, sodass zusätzliche knapp 400 vormals erwerbstätige Personen aus dem Erwerbsleben ausscheiden. Die mit 43,4 Prozentpunkten bezogen auf die Erwerbstätigenquote stärkste Reduktion der Erwerbstätigenzahl findet beim Übergang der Kohorte 8 auf die Kohorte 9 statt. An dieser Schwelle verlassen knapp 9.200 Personen den Arbeitsmarkt. Summiert über alle Kohorten scheidet bis zum Jahr 2014 jährlich etwa 24.800 Akademiker mit Kernqualifikationen für die E-Mobili-

Demografiebedingter Ersatzbedarf an Akademikern in Kernqualifikationen der E-Mobilität Tabelle 9

Jährlicher Bedarf an Akademikern¹ bis 2014

Kohorte	Alter, in Jahren	Akademiker	Erwerbstätigenquote, in Prozent	Jährlich aus dem Erwerbsleben ausscheidende Akademiker
1	bis 29	178.400	86,9	–
2	30 bis 34	161.800	92,4	–
3	35 bis 39	172.700	95,3	100
4	40 bis 44	248.700	94,9	400
5	45 bis 49	196.800	94,1	800
6	50 bis 54	166.300	92,1	3.100
7	55 bis 59	151.700	82,9	7.700
8	60 bis 64	106.200	57,4	9.200
9	65 bis 69	124.900	14,0	3.500
Demografischer Ersatzbedarf insgesamt				24.800
Davon in den Kernbranchen der E-Mobilität				7.000

¹ Nur Akademiker mit den in Abschnitt 5.1.1 definierten Kernqualifikationen (Fachrichtungen).
Eigene Berechnungen auf Basis von Forschungsdatenzentrum der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder, Mikrozensus 2009

tät aus dem Erwerbsleben aus. Mit Ablauf einer Zeitspanne von fünf Jahren sind sämtliche Altersjahrgänge um eine Kohortenummer aufgestiegen. Exemplarisch wird die neue Kohorte 6 dann von denjenigen 196.800 Personen gebildet, die bis dahin noch die Kohorte 5 repräsentierten.

Da rund 28 Prozent aller Akademiker mit Kernqualifikationen für die E-Mobilität in den Kernbranchen der E-Mobilität beschäftigt sind, beläuft sich der in diesen Kernbranchen relevante demografiebedingte Ersatzbedarf auf jährlich 7.000 Personen. Bei Technikern und Industriemeistern beziehungsweise beruflich Qualifizierten beträgt der entsprechende Anteil 29 Prozent beziehungsweise 20 Prozent. Ermittelt man analog zur obigen Methodik die Daten für Techniker und Industriemeister sowie für beruflich Qualifizierte und schreibt diese Daten bis zum Jahr 2020 fort, so ergeben sich die in Tabelle 10 dargestellten demografischen Ersatzbedarfe nach Qualifikationsgruppen.

Auf sämtlichen Kompetenzniveaus wird der demografiebedingte Ersatzbedarf in den Kernqualifikationen und -branchen der E-Mobilität bis zum Jahr 2020 deutlich steigen, bei Akademikern um knapp 39 Prozent, bei beruflich Qualifizierten um gut 25 Prozent und bei Technikern und Industrie-

Demografiebedingter Ersatzbedarf in Kernqualifikationen und -branchen der E-Mobilität

Tabelle 10

Jährlicher Bedarf an Arbeitskräften¹ nach Kompetenzniveau

	Bis 2014	2015 bis 2019	2020
Akademiker	7.000	8.400	9.700
Techniker und Industriemeister	7.600	8.300	9.100
Beruflich Qualifizierte	24.100	27.900	30.200

¹ Nur Arbeitskräfte in den in Abschnitt 5.1.1 definierten Kernqualifikationen (Fachrichtungen) und -branchen. Eigene Berechnungen auf Basis von Forschungsdatenzentrum der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder, Mikrozensus 2009

meistern um etwa 20 Prozent. Rein rechnerisch wird somit *ceteris paribus* ein immer größerer Anteil der neu in das Erwerbsleben eintretenden Personen allein dafür benötigt, ausscheidende Arbeitskräfte zu ersetzen.¹³

5.1.3 Genereller und spezifischer Expansionsbedarf

Zusätzlich zu dem demografiebedingten Ersatzbedarf wird ein genereller Expansionsbedarf wirksam, der durch langfristiges Wachstum der Volkswirtschaft und einen anhaltenden Strukturwandel hin zu einer forschungs- und wissensintensiven Gesellschaft ausgelöst wird. Speziell die Kernqualifikationen der E-Mobilität erfahren infolge der globalen Durchdringung von Arbeits- und Produktionsprozessen mit Informations- und Kommunikationstechnologien einen kontinuierlichen Nachfrageschub. So ist die Akademikerbeschäftigung innerhalb der Kernqualifikationen und -branchen der E-Mobilität im Durchschnitt der Jahre 2000 bis 2009 um jährlich 4,3 Prozent oder durchschnittlich 12.400 Personen gestiegen. Es kann erwartet werden, dass dieser Bedarf auch vor dem Hintergrund der in der Einleitung dieses Kapitels beschriebenen, zusätzlich zur E-Mobilität wirksamen technologischen Wachstumstrends im laufenden Jahrzehnt mindestens ein ähnlich hohes Niveau erreichen wird.

Der generelle Expansionsbedarf der beiden nichtakademischen Kompetenzniveaus lässt sich nicht analog ermitteln, da im Mikrozensus des Jahres 2000 zwar das Niveau des beruflichen Abschlusses (zum Beispiel Lehrausbildung, Fachhochschulabschluss) erfasst, die konkrete Hauptfachrichtung jedoch erst für die akademischen Abschlüsse registriert wurde. Zur Abschätzung des

¹³ Der Prognosezeitraum wurde bewusst so gewählt, dass die Entwicklung der Absolventenzahlen keine Effekte auf den demografiebedingten Ersatzbedarf ausübt. So scheidet die ersten der innerhalb des Zeitraums bis 2020 hervorgebrachten Absolventen erst nach 2020 aus dem Erwerbsleben aus, das heißt, die ermittelten demografiebedingten Ersatzbedarfe sind ausschließlich auf die bereits heute existierende Arbeitskräftepopulation zurückzuführen.

Expansionsbedarfs bei Technikern und Industriemeistern sowie beruflich Qualifizierten muss daher eine Durchschnittsbetrachtung erfolgen. Die Erwerbstätigkeit dieser beiden Qualifikationsgruppen ist zwischen den Jahren 2000 und 2009 im Aggregat um durchschnittlich 1 Prozent pro Jahr gestiegen. Im Jahr 2009 waren laut Auswertung des Mikrozensus 23 Prozent aller beruflich Qualifizierten sowie 33 Prozent aller Techniker und Industriemeister in den Kernqualifikationen der E-Mobilität ausgebildet. 29 Prozent aller beruflich Qualifizierten respektive 20 Prozent aller Techniker und Industriemeister E-Mobilität-relevanter Fachrichtungen waren in den Kernbranchen der E-Mobilität beschäftigt. Daraus ergeben sich die Werte in Tabelle 11. Der generelle Zusatzbedarf im Bereich akademischer Qualifikationen fällt folglich deutlich höher aus als in den nichtakademischen Kompetenzniveaus.

Schließlich führt die Einführung der E-Mobilität auch noch zu spezifischen volkswirtschaftlichen Effekten. Dazu zählen unter anderem Änderungen in der automobilen Wertschöpfungskette oder Investitionen in notwendige Infrastruktur. Diese lösen einen für die E-Mobilität spezifischen Expansionsbedarf aus. Die NPE erwartet bis zum Jahr 2020 einen spezifischen Expansionsbedarf in Höhe von netto rund 30.000 zusätzlichen Arbeitsplätzen, basierend auf dem Ziel von einer Million Elektroautos im Bestand (NPE, 2011a). Davon dürften die meisten im Automobilbau entstehen, viele aber auch in komplementären Branchen wie der Energieversorgung. Der Großteil des Nettozuwachses dürfte auf akademische Qualifikationen entfallen. Für die Berechnung des spezifischen Expansionsbedarfs an Akademikern, Technikern und Industriemeistern sowie beruflich Qualifizierten wird an dieser Stelle mit Anteilen von 80 Prozent, 5 Prozent und 15 Prozent gerechnet. Der spezifische Zusatzbedarf wird wegen der nur allmählich wachsenden Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen zunächst moderat ausfallen, zum Ende des Betrachtungszeitraums jedoch eine volkswirtschaftlich relevante Größenordnung annehmen (Tabelle 12).

Aggregiert man die drei einzelnen Komponenten der Arbeitskräftenachfrage im Bereich E-Mobilität – demografiebedingter Ersatzbedarf, genereller

Genereller Expansionsbedarf in Kernqualifikationen und -branchen der E-Mobilität
 Tabelle 11
 Jährlicher Bedarf an Arbeitskräften¹ bis 2020 nach Kompetenzniveau

Akademiker	12.400
Techniker und Industriemeister	3.500
Beruflich Qualifizierte	9.000

¹ Nur Arbeitskräfte in den in Abschnitt 5.1.1 definierten Kernqualifikationen (Fachrichtungen) und -branchen. Eigene Berechnungen auf Basis von Forschungsdatenzentrum der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder, Mikrozensus 2009

Spezifischer Expansionsbedarf in Kernqualifikationen und -branchen der E-Mobilität

Tabelle 12

Jährlicher Bedarf an Arbeitskräften¹ nach Kompetenzniveau

	Bis 2014	2015 bis 2019	2020
Akademiker	700	3.500	4.400
Techniker und Industriemeister	0	200	300
Beruflich Qualifizierte	100	700	800

¹ Nur Arbeitskräfte in den in Abschnitt 5.1.1 definierten Kernqualifikationen (Fachrichtungen) und -branchen.
Eigene Berechnungen auf Basis von Forschungsdatenzentrum der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder,
Mikrozensus 2009

sowie spezifischer Expansionsbedarf – zu einem Gesamtarbeitskräftebedarf, so ergeben sich die in Abbildung 14 zusammengefassten Resultate. Der in den Kernqualifikationen und -branchen der E-Mobilität wirksame Arbeitskräftebedarf liegt aktuell bei jährlich gut 64.000 Personen und dürfte auf gut 79.000 Personen im Jahr 2020 steigen. Die größten Bedarfssteigerungen treten im akademischen Segment auf. Hier werden aktuell jährlich rund

Gesamtbedarf in Kernqualifikationen und -branchen der E-Mobilität

Abbildung 14

Jährlicher Bedarf an Arbeitskräften¹ bis 2020 nach Kompetenzniveau

■ Demografieersatzbedarf ■ Genereller Expansionsbedarf ■ Spezifischer Expansionsbedarf

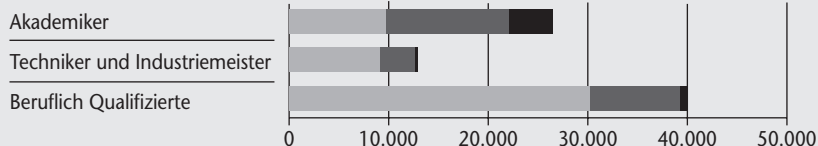
bis 2014



2015–2019



2020



¹ Nur Arbeitskräfte in den in Abschnitt 5.1.1 definierten Kernqualifikationen (Fachrichtungen) und -branchen.
Eigene Berechnungen auf Basis von Forschungsdatenzentrum der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder,
Mikrozensus 2009; NPE, 2011a

20.000 Akademiker benötigt, um altersbedingt aus dem Erwerbsleben ausscheidende Personen zu ersetzen und den Zusatzbedarf decken zu können. Bis zum Jahr 2020 steigt dieser Gesamtbedarf an Akademikern kontinuierlich auf jährlich 26.500 Personen an und liegt damit knapp ein Drittel oberhalb des heutigen Bedarfs. Der jährliche Gesamtbedarf an Technikern und Industriemeistern steigt von rund 11.000 auf knapp 13.000 (plus 16 Prozent), der jährliche Gesamtbedarf an beruflich Qualifizierten von über 33.000 auf 40.000 Personen (plus 20 Prozent).

5.2 Qualifikationen und Qualifikationsbedarf

5.2.1 Akademiker

Die für die E-Mobilität wichtigen Studiengänge gehören im Wesentlichen zu technisch-naturwissenschaftlichen Fachrichtungen wie Ingenieurwissenschaften, Physik und Informatik. Das Einbinden und Vernetzen dieser Disziplinen in den Hochschulen stellt eine Herausforderung dar. Denn zahlreiche unterschiedliche Fachrichtungen müssen die Basis für eine gemeinsame wissenschaftliche Zusammenarbeit im Bereich der Forschung, Entwicklung und Produktion bilden. Der zusätzliche Aufbau akademischer Kompetenzen ist gerade in den Bereichen spezifische Batterieforschung (Elektrochemie, elektrische Energiespeicherung), Materialforschung mit Fokus auf Funktionsmaterialien, Leichtbau, Produktion und Automatisierung, Infrastruktur der Ladestationen sowie Architektur und Bau der Infrastrukturen nötig. Weiterhin sollte höchste Priorität bei der Kompetenzentwicklung im akademischen Bereich laut NPE (Göschel, 2011) auf der Fahrzeugtechnik liegen, beispielhaft in den Bereichen Inverter, Leistungselektronik, Antriebsregelung, Range Extender und Hochvolt-/Bordnetz.

Von exponierter Bedeutung für die Batterieentwicklung sind Qualifikationen in der Elektrochemie, die als Teilbereich der physikalischen Chemie und mithin der Physik subsumiert wird. Als weiteres Beispiel werden Materialwissenschaftler zur Entwicklung von Funktionsmaterialien benötigt. Auch im Kontext der Batterieentwicklung sind materialwissenschaftliche Kompetenzen unerlässlich. So basiert die Funktionsweise eines Lithium-Ionen-Akkumulators, der aufgrund seiner hohen Energiedichte gemäß heutigem Stand der Technik sehr gut für energieintensive Antriebsformen geeignet ist, elementar auf der temporären Einlagerung (Interkalation) von Lithium-Atomen in geeigneten Stoffen. Die Erforschung entsprechender neuartiger Materialien mit dem Ziel einer Effizienzverbesserung der verwendeten Funk-

tionsmaterialien und Elektrolyte stellt dabei eine der Hauptaufgaben dar, die ohne materialwissenschaftliches Know-how nicht zu bewältigen ist. Auch und speziell für die Erforschung radikal neuer Batterietechnologien wie etwa der gelbasierten Redox-Flow-Batterie (vgl. Abschnitt 3.1) werden Materialwissenschaftler dringend gebraucht. Eine große Herausforderung besteht hier in der Verbesserung der Membraneigenschaften.

Die Aufgabe aus Sicht der akademischen Bildungspolitik liegt im Großen und Ganzen jedoch nicht darin, völlig neue Studiengänge zu erschaffen. Vielmehr ist das dezentral in den bereits bestehenden Disziplinen vorhandene Wissen zu vernetzen und neu zusammenzuführen. Die im Rahmen der Bologna-Reform eingeführten modularisierten Studiengänge erweisen sich hier als sehr großer Vorteil. So umfasst ein exemplarisches Qualifikationsprofil eines Akademikers im Bereich E-Mobilität Kompetenzen in der Elektrotechnik, der Elektrochemie und der Werkstoffkunde. Ein derartiges Profil lässt sich deutlich zielführender und effizienter durch die Kombination eines Bachelorstudiengangs Elektrotechnik in Kombination mit einem anschließenden Masterstudiengang in einer Spezialisierungsrichtung erreichen als im Rahmen eines klassischen Diplomstudiengangs der reinen Elektrotechnik. Außerdem ermöglicht die Modularisierung eine zeitnahe und flexible Anpassung an die künftigen Bedürfnisse des Arbeitsmarktes, die sich mit fortschreitender Marktdurchdringung der E-Mobilität und Änderung der zugehörigen technischen Rahmenbedingungen (neue Batterietechniken, Antriebs-techniken, Materialien etc.) kontinuierlich wandeln werden.

5.2.2 Berufliche Qualifikationen

Die berufliche Bildung steht ebenfalls vor substanziellen Herausforderungen. Während die Arbeitskräfteversorgung der E-Mobilität mit Akademikern aktuell in erster Linie ein quantitatives Problem ist, liegt die Herausforderung in der beruflichen Aus-, Fort- und Weiterbildung primär auf qualitativer Ebene, konkret bei der Qualifizierung des Personals. Auf einer Berufsausbildung oder Aufstiegsfortbildung basierende Kompetenzen müssen gerade in sämtlichen Bereichen der Fahrzeugtechnik sowie innerhalb der Elektroindustrie zusätzlich in den Bereichen Infrastruktur und Stationen sowie Systemdienstleistungen vermehrt aufgebaut werden (Göschel, 2011). Die Qualifizierungsprofile der bereits heute bewährten Ausbildungsgänge (zum Beispiel Kfz-Mechatroniker, Elektroniker für Automatisierungstechnik, Systeminformatiker) können jedoch gut im Rahmen entsprechender Fort- und Weiterbildungen (zum Beispiel Arbeiten an hochvolteigensicheren Fahrzeugen, Wartung von Hochleistungsbatte-

rien) angepasst und erweitert werden. Neben der reinen Fahrzeugtechnik liegen Qualifizierungsbedarfe im Bereich der Systemdienstleistungen (zum Beispiel Netzanbindung, -integration und -rückspeisung), der Ladeinfrastruktur (zum Beispiel Steuerungstechnik) und im Fahrzeugservice (zum Beispiel Rettungseinsätze bei offenen Hochvoltsystemen). In den Bereichen Fahrzeugservice und -handel besteht bereits zum jetzigen Zeitpunkt infolge einer rechtzeitigen Einführung neuer und an die Bedürfnisse der E-Mobilität angepasster Aus- und Fortbildungsgänge (BMBF, 2011) nur noch ein moderater Ausbaubedarf.

In Bezug auf die Nachwuchssicherung stehen vor allem die für die E-Mobilität relevanten beruflichen Bildungsgänge vor der Schwierigkeit, dass sie eine nochmals deutlich geringere Frauenpartizipation als ihre akademischen Pendanten kompensieren müssen. So sind in den Kernbranchen der E-Mobilität weniger als 3 Prozent aller relevanten Techniker und Industriemeister sowie gut 5 Prozent aller relevanten Absolventen einer Berufsausbildung weiblich, aber fast 10 Prozent aller relevanten Akademiker (vgl. Abschnitt 5.3.1).

Da im Bereich der beruflichen Bildung im Gegensatz zu den Akademikern realistischerweise jedoch ein volkswirtschaftlich geringerer Expansionsbedarf entstehen wird, wirkt sich dieser Umstand (noch) nicht als limitierender Faktor für die Arbeitskräfteversorgung aus. Ein derartiger Engpass würde jedoch auch die E-Mobilität schwächen – und das stark. Diese Annahme wird durch die Überzeugung deutscher Innovatoren belegt, dass Arbeitskräfte mit einer technischen Berufsausbildung aufgrund ihrer exzellenten Qualifikation den wichtigsten Faktor für die Innovationsfähigkeit bilden. Infolge ihrer Beschäftigung in der Breite der Unternehmen stehen sie dabei noch vor technisch-naturwissenschaftlichen Akademikern (Erdmann et al., 2012).

5.3 Arbeitskräftepotenziale

Angesichts der bereits vorhandenen Arbeitskräfteengpässe im Bereich technisch-naturwissenschaftlicher Qualifikationen und der Konkurrenzsituation zu anderen technologischen Wachstumstrends und -branchen steht die E-Mobilität vor einer besonderen Herausforderung in Bezug auf die Arbeitskräftegewinnung. Im Folgenden wird untersucht, welche Arbeitskräftepotenziale zur Deckung des künftigen Arbeitskräftebedarfs der E-Mobilität aktiviert werden könnten.

5.3.1 Weibliche Arbeitskräfte

Im Jahr 2009 waren weniger als 10 Prozent aller Akademiker, die in den Kernqualifikationen und -branchen der E-Mobilität beschäftigt waren, weib-

lich. Bei sonstigen Akademikern (zum Beispiel Wirtschaftswissenschaftlern, Juristen) in den Kernbranchen der E-Mobilität waren es dagegen 38 Prozent. In diesen Kernbranchen ist folglich keineswegs eine generell geringe Präsenz von Akademikerinnen gegeben. Vielmehr beschränkt sich diese auf die Kernqualifikationen der E-Mobilität. Bei den nichtakademischen Qualifikationsgruppen in den Kernqualifikationen und -branchen der E-Mobilität liegt der Frauenanteil unter den Erwerbstätigen sogar nochmals deutlich niedriger – unter Personen mit Berufsbildungsabschluss bei über 5 Prozent, unter Technikern und Industriemeistern sogar bei unter 3 Prozent.

Aktuell weiterhin niedrige Frauenanteile bei den Erstabsolventen relevanter Fachrichtungen (zum Beispiel Elektrotechnik: 7,7 Prozent im Jahr 2009) lassen keine Trendumkehr in der Frauenpartizipation erwarten. Unter den akademischen Erstabsolventinnen insgesamt nimmt der Anteil E-Mobilität-relevanter Studiengänge sogar ab. Die für die E-Mobilität relevanten Fachrichtungen konnten von der im Aggregat starken Expansion weiblicher Akademiker nur unterproportional profitieren. Auch bei nichtakademischen Kernqualifikationen der E-Mobilität ist keine spürbare Erhöhung der Frauenpartizipation zu erkennen. Trotz aller Bemühungen der Förderung des weiblichen Nachwuchses (Girls' Days, Mentoringprogramme, Karrierenetze) konnte der Frauenanteil im Durchschnitt aller technischen Ausbildungs- oder Studiengänge nicht oder zumindest nicht substantiell gesteigert werden. Zusammenfassend muss daher bezweifelt werden, dass weibliche Arbeitskräfte während des Zeitraums bis 2020 einen deutlich höheren Beitrag als bislang zur Deckung des akademischen Arbeitskräftebedarfs der E-Mobilität leisten können.

5.3.2 Teilzeiterwerbstätige

Im Jahr 2009 waren weniger als 6 Prozent aller Akademiker, die in den Kernqualifikationen und -branchen der E-Mobilität beschäftigt waren, teilzeiterwerbstätig¹⁴ (Tabelle 13). Bei nichtakademischen Kernqualifikationen lag die Teilzeitquote nochmals unterhalb dieses Referenzwerts.

Von diesen geringen Anteilen an Teilzeitkräften wiederum war je nach Qualifikationsgruppe weniger als jeder Fünfte (beruflich Qualifizierte) bis nahezu jeder Elfte (Techniker und Industriemeister) unfreiwillig teilzeiterwerbstätig. Das heißt, er oder sie würde gerne Vollzeit arbeiten, gab jedoch

¹⁴ Als Teilzeit werden hier alle Beschäftigungsverhältnisse im Umfang von weniger als 32 Wochenstunden gezählt, wobei der arbeitsvertraglich festgelegte, nicht der tatsächlich geleistete Arbeitsumfang zugrunde gelegt wird.

Teilzeiterwerbstätige in Kernqualifikationen und -branchen der E-Mobilität

Tabelle 13

Erwerbstätige¹ im Jahr 2009 nach Kompetenzniveau

	Akademiker	Techniker und Industriemeister	Beruflich Qualifizierte
Teilzeiterwerbstätige je 100 Erwerbstätige	5,8	3,9	4,1
Unfreiwillig Teilzeiterwerbstätige je 100 Teilzeiterwerbstätige	12,8	8,6	18,7
Maximales Potenzial zusätzlicher Vollzeiterwerbstätiger je 100 Erwerbstätige	0,7	0,3	0,8

¹ Nur Erwerbstätige in den in Abschnitt 5.1.1 definierten Kernqualifikationen (Fachrichtungen) und -branchen. Eigene Berechnungen auf Basis von Forschungsdatenzentrum der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder, Mikrozensus 2009

an, keine entsprechende Arbeitsstelle finden zu können. Die Gründe für die reduzierte Stundenzahl sind bei dem Großteil der Teilzeiterwerbstätigen somit freiwilliger Natur und liegen im persönlichen Umfeld – etwa in einer parallel zum Beschäftigungsverhältnis erfolgenden Betreuung von Kindern oder Pflege von Angehörigen oder schlicht dem fehlenden Wunsch nach einer Vollzeitbeschäftigung.

Selbst wenn es folglich gelänge, sämtliche der insgesamt rund 10.000 in den Kernqualifikationen und -branchen der E-Mobilität unfreiwillig Teilzeiterwerbstätigen als Vollzeitkräfte zu aktivieren, entspräche dies je nach Qualifikationsgruppe einmalig zwischen 0,3 und 0,8 Prozent aller Erwerbstätigen. Dieses quantitativ nahezu unbedeutende Aktivierungspotenzial teilzeiterwerbstätiger Arbeitskräfte in den Kernbranchen der E-Mobilität ist ebenfalls nicht genereller Natur, sondern beschränkt sich wiederum auf die Kernqualifikationen: Bei sonstigen Akademikern liegt der Vergleichswert beispielsweise bei 4 Prozent.

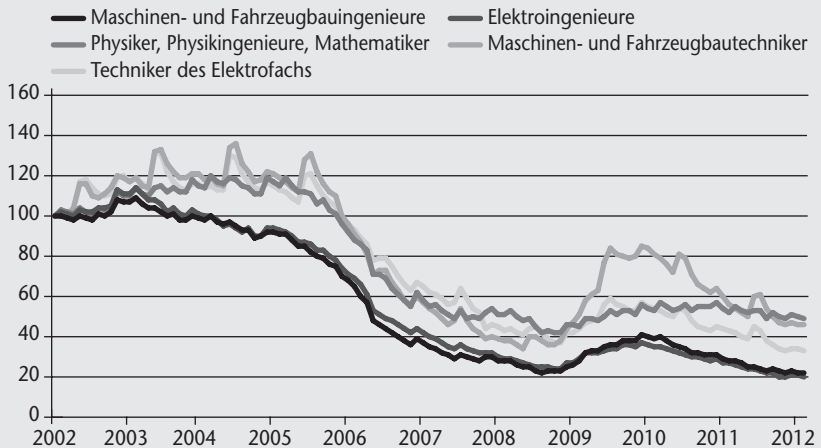
5.3.3 Arbeitslose

Im März 2012 waren 2.407 Elektroingenieure in Deutschland arbeitslos gemeldet. Zugleich waren allein bei der Bundesagentur für Arbeit (BA) 3.656 offene Stellen für Elektroingenieure registriert (BA, 2012). Gesamtwirtschaftlich waren sogar etwa 25.000 offene Stellen für Elektroingenieure sofort zu besetzen. Auch bei Maschinenbauingenieuren (3.655 Arbeitslose, 5.841 BA-gemeldete offene Stellen, rund 40.000 offene Stellen insgesamt) befindet sich die Arbeitskräftenachfrage seit langem deutlich über dem Arbeitskräfte-

Arbeitslose in typischen Berufen der E-Mobilität

Abbildung 15

Index: März 2002 = 100



Eigene Berechnungen auf Basis von BA, 2012

angebot. In zahlreichen Berufen rund um die E-Mobilität herrscht aktuell praktisch Vollbeschäftigung.

Die indexierte Arbeitslosigkeit ist in sämtlichen typischen Berufen der E-Mobilität in den letzten Jahren deutlich gesunken und lag beispielsweise für Maschinen- und Fahrzeugbau- sowie für Elektroingenieure zuletzt bei nur noch rund einem Fünftel des Niveaus von 2002 (Abbildung 15).

Zudem sind laut Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB) weniger als 25 Prozent aller arbeitslosen Akademiker in diesen Berufen ein Jahr oder länger ohne Beschäftigung (IAB, 2012). Beim Großteil dieser Arbeitslosen handelt es sich somit um Sucharbeitslosigkeit, die notwendigerweise kurzfristig und typischerweise entweder am Übergang zwischen Hochschule und Arbeitsmarkt oder zwischen Beschäftigungsverhältnissen entsteht. Insgesamt fallen die aktivierbaren Arbeitsmarktpotenziale somit gering aus.

5.3.4 Bildungsausländer

Aus Sicht der akademischen Kernqualifikationen stellen Bildungsausländer ein lohnenswertes Potenzial dar; Bildungsausländer sind Personen, die ihre Hochschulzugangsberechtigung nicht in Deutschland erworben haben. Sie weisen mehrheitlich eine ausländische Staatsangehörigkeit auf. Unter den Absolventen E-Mobilität-relevanter Studiengänge sind in Deutschland über-

proportional viele Bildungsausländer vertreten – in der Elektrotechnik etwa 20 Prozent aller Studierenden. Im Jahr 2009 lag der Anteil der Bildungsausländer unter den Erstabsolventen relevanter Studiengänge bei rund 10 Prozent. Sie stammten zu großen Teilen aus China, Indien oder der Türkei. Nicht zuletzt die in der Vergangenheit vorhandenen Restriktionen, denen sich Absolventen aus Nicht-EU-Staaten beim Arbeitsmarktzutritt gegenübersehen, führen jedoch dazu, dass zwei Drittel der hier ausgebildeten Bildungsausländer Deutschland nach dem Studium wieder verlassen und damit dem deutschen Arbeitsmarkt nicht zur Verfügung stehen. Dabei verspricht dieser Personenkreis eine besonders einfache Integration, da Inhalte und Qualität der Studienabschlüsse den hiesigen Arbeitgebern bekannt sind und die Absolventen in der Regel bereits über umfassende Deutschkenntnisse verfügen. Rechnet man konservativ damit, dass 50 Prozent der Bildungsausländer eines relevanten Absolventenjahrgangs (etwa 5 Prozent aller Absolventen) Deutschland nach dem Examen wieder verlassen, beträgt der Verlust – und damit auch das aktivierbare Arbeitskräftepotenzial – aktuell mehr als 2.800 Absolventen jedes Jahr. Mit Blick auf das Jahr 2020 stellen diese Bildungsausländer das bedeutendste und am einfachsten aktivierbare Potenzial zur Sicherung der Arbeitskräfteverfügbarkeit im Bereich der E-Mobilität dar. Es sollte über eine aktive öffentliche Retentions- und Integrationspolitik systematisch erschlossen werden. Erste Schritte hierzu sind mit der Einführung der Blue Card, die den Zuzug von technisch-naturwissenschaftlich qualifizierten Personen aus Drittstaaten erleichtern soll, getan worden.

6

Die Kundensicht: Wann sich ein Elektroauto lohnt

In vielen Diskussionen um die E-Mobilität stehen technologische Aspekte im Fokus. Dabei wird die Rolle des Kunden häufig vernachlässigt, obwohl ein Umstieg auf Elektrofahrzeuge vom Autofahrer erhebliche Verhaltensänderungen verlangt. Am augenfälligsten ist dabei, dass er im Gegensatz zu heute kürzere Reichweiten in Kauf nehmen und sein Auto entsprechend häufiger „betanken“ muss. Und der Kunde muss zudem bereit sein, einen deutlichen Preisaufschlag gegenüber Benzinern oder Diesel-Pkws zu zahlen, der sich nur bei sehr hohen Fahrleistungen amortisiert. Es stellt sich die Frage, ob die Kunden bereit sind, diese Aspekte des Elektroautos zu akzep-

Voraussetzungen für den Kauf eines Elektroautos

Tabelle 14

Angaben in Prozent

	Deutschland	USA	China
Günstiger als ein konventionelles Auto	43	41	49
Genügend Ladestationen	17	2	1
Größere Reichweite	16	6	9
Umweltschonende Technologie	15	7	13
Mindestens so komfortabel wie ein konventionelles Auto	10	8	4
Mindestens so sicher wie ein konventionelles Auto	9	7	27
Würde auf keinen Fall ein Elektroauto kaufen	9	11	4

Befragt wurden im Jahr 2011 die Hauptnutzer eines Autos, die einen Hybrid- oder Elektroantrieb kennen; Mehrfachnennungen möglich.
Quelle: Sommer, 2011, 22

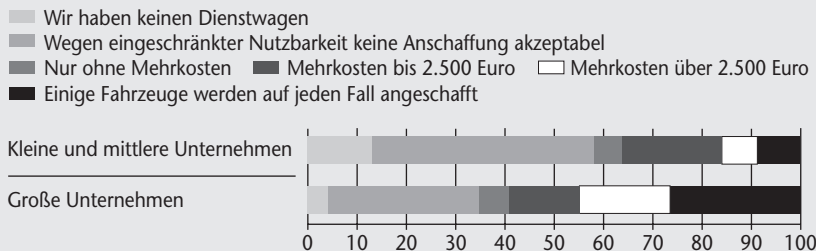
tieren. In verschiedenen Befragungen wurde inzwischen eine recht hohe grundsätzliche Bereitschaft zum Umstieg auf Elektroautos nachgewiesen. Allerdings zeigen tiefergehende Befragungen recht schnell, dass die potenziellen Autokäufer nur dann wirklich ein Elektroauto kaufen würden, wenn dieses bestimmte Anforderungen erfüllt. Wie Tabelle 14 zeigt, können diese Anforderungen je nach Land recht unterschiedlich ausfallen, aber die Frage nach den Kosten steht global an erster Stelle.

6.1 Sinkende Kosten sind die *conditio sine qua non*

Häufig wird die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen und Autos mit Verbrennungsmotor auf Basis der „Total Costs of Ownership“ (TCO) verglichen. Dies ist ein gerechtfertigtes Vorgehen, weil dabei alle Kostenkomponenten des Erwerbs und der Nutzung eines Fahrzeugs berücksichtigt werden. Auch die NPE hat in ihrem Bericht vom Mai 2011 solche Wirtschaftlichkeitsvergleiche anhand des TCO-Ansatzes vorgenommen. Demnach liegt der Kostennachteil des Elektroautos zu Beginn des laufenden Jahrzehnts – je nach Fahrzeugsegment und Halter des Fahrzeugs (privat oder gewerblich) – zwischen 5.000 und 11.000 Euro. Dieser soll bis 2020 auf 2.000 bis 4.000 Euro fallen. Nach Kalkulationen der NPE sinkt der gesamte Kostennachteil von Elektrofahrzeugen künftig also deutlich, bleibt aber auch im Jahr 2020 noch signifikant (NPE, 2011a, 43). Dies ist durchaus als kritischer Wert zu sehen. Wie Abbildung 16 untermauert, sinkt die Bereitschaft, ein Elektroauto anzuschaffen, ganz erheblich, wenn Mehrkosten zu erwarten sind. Das gilt auch für die Betreiber von Fahrzeugflotten, die oft als mögliche Erstkäufer von Elektroautos genannt werden. Tatsächlich traten im Jahr 2011 fast nur Firmen

Mehrkosten von Elektroautos und Kaufbereitschaft Abbildung 16

Antworten von Experten auf die Frage, welche Mehrkosten eines BEV akzeptabel wären, in Prozent



Befragung von 118 Umweltexperten der Wirtschaft im September/Oktober 2010.
Quelle: IW-Umweltexpertenpanel 4/2010

als Käufer von Elektrofahrzeugen in Deutschland auf. Die Zahl der Privatneuzulassungen lag lediglich bei etwa 100.

Eine kritische Analyse der Annahmen ist gerechtfertigt. So basiert der Kostenvergleich der NPE auf der Annahme, dass die zu vergleichenden Autos in der Kompaktklasse auf eine jährliche Fahrleistung von 15.000 Kilometern und in der Mittelklasse sogar von 30.000 Kilometern kommen (NPE, 2011b, 27). Dieser Wert ist aus unserer Sicht sehr hoch gewählt, denn die mittlere Fahrleistung von Benzinern in Deutschland liegt derzeit unter 12.000 Kilometern; bei Diesel-Pkws beträgt sie rund 21.000 Kilometer (DIW, 2011, 303). Wir halten es für unwahrscheinlich, dass Elektrofahrzeuge (BEV und PHEV) im Durchschnitt eine derart hohe jährliche Fahrleistung erreichen. Beim TCO-Vergleich begünstigen solche Annahmen die E-Mobilität aufgrund ihrer im Vergleich zum Verbrennungsmotor niedrigen variablen Kosten erheblich.

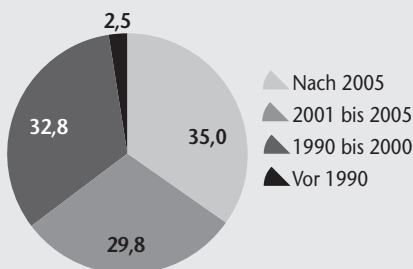
Zudem wird ein enormer technischer Fortschritt angenommen. So sollen sich die Batteriekosten von heute etwa 800 Euro pro Kilowattstunde (laut NPE) innerhalb von nur drei Jahren halbieren (NPE, 2011b, 27). Dieses hohe Tempo des Fortschritts ist zumindest als ambitioniert zu bezeichnen. Diese Annahme führt ebenfalls dazu, dass das Ergebnis des Kostenvergleichs zugunsten des Elektrofahrzeugs ausfällt. Ferner wird beim TCO-Vergleich eine Nutzungsdauer der Fahrzeuge von zehn Jahren unterstellt. Tatsächlich werden viele Pkws heute spürbar länger genutzt, wie die in Abbildung 17 dargestellte Altersstruktur der aktuellen deutschen Fahrzeugflotte belegt.¹⁵

¹⁵ Das Kraftfahrt-Bundesamt weist keine Zahlen mehr zum Lebensalter von Fahrzeugen bei Abmeldung aus. Das Durchschnittsalter der aktuell in Deutschland zugelassenen Pkws beträgt 8,5 Jahre.

Alter der Pkws in Deutschland

Abbildung 17

Pkw-Bestand nach Zulassungsjahr, in Prozent



Stand: 1. Januar 2012.

Quelle: KBA, 2012c

Der Effekt dieser Annahme auf den Kostenvergleich ist nicht eindeutig. Denn eine längere Nutzungsdauer (und damit Fahrleistung) wirkt positiv auf die TCO-Bilanz des Elektroautos. Eine Lebensdauer von mehr als zehn Jahren kann die (teure) Batterie durchaus erreichen; Leistungsverluste wird sie in dieser Zeitspanne aber in jedem Fall erleiden.

Schließlich könnten die Annahmen der NPE (2011b, 27) hinsichtlich des Ölpreises (99 US-Dollar pro Barrel im Jahr 2020) zu vorsichtig sein. Bis dahin rechnen die Autoren der vorliegenden Analyse mit einem deutlich höheren Ölpreis – und damit auch mit einem höheren Benzin- und Dieselpreis. Dies wiederum würde die Wettbewerbsfähigkeit von Autos mit Verbrennungsmotor gegenüber Elektrofahrzeugen verglichen mit den Annahmen der NPE verschlechtern – konstante Strompreise vorausgesetzt.

Unter dem Strich ist festzuhalten, dass Elektrofahrzeuge in der TCO-Analyse der NPE durch die getroffenen Annahmen gegenüber Autos mit Verbrennungsmotor begünstigt werden. Vor allem die unterstellte hohe jährliche Fahrleistung sowie der schnelle technische Fortschritt sind kritisch zu sehen. Gleichwohl ist der Auffassung zuzustimmen, dass sich der Kostenabstand verringern wird.

Für den Vergleich der Kraftstoffkosten ist die künftige Entwicklung der Benzin- und Dieselpreise auf der einen sowie der Strompreise auf der anderen Seite von Bedeutung. Diese Preise sind sowohl von der Preisentwicklung für Energierohstoffe (zum Beispiel Öl, Kohle, Gas) als auch von fiskalischen Maßnahmen abhängig. Tendenziell dürften alle genannten Energiepreise künftig steigen. Wichtig für den Wirtschaftlichkeitsvergleich ist freilich die Verschiebung der relativen Preise. Man kann sich zwar glaubwürdige Szenarien vorstellen, in denen die Benzin- und Dieselpreise schneller steigen als die Strompreise, aber auch Szenarien mit umgekehrter Entwicklung.

Als Alternative zum TCO-Ansatz werden für einen Wirtschaftlichkeitsvergleich im Folgenden drei verschiedene Amortisationsrechnungen erstellt. Die wichtigsten Einflussfaktoren sind der Kaufpreis des Fahrzeugs und die durch

die Nutzung anfallenden variablen Energiekosten. Dabei wird unterstellt, dass es zwischen Elektrofahrzeugen und Benzinern beziehungsweise Diesel-Pkws bezüglich der Unterhaltskosten (zum Beispiel Wartung, Steuern, Versicherung) keine entscheidenden Unterschiede gibt. Zwar dürften die Wartungskosten eines Elektrofahrzeugs niedriger sein als bei einem Auto mit Verbrennungsmotor, zum Beispiel weil es weniger Verschleißteile hat. Dafür dürften etwaige Reparaturkosten bei Elektroautos im Schadenfall höher liegen, unter anderem weil anfangs wohl nur wenige Werkstätten entsprechende Arbeiten durchführen können. Zudem fällt bei reinen Elektrofahrzeugen nach geltendem Recht für zehn Jahre keine Kfz-Steuer an. Dagegen kostet die Versicherung bei Elektroautos aufgrund des höheren Kaufpreises mehr. Kalkulatorische Zinsen auf das eingesetzte Kapital werden nicht berücksichtigt.

In der Vergleichsrechnung wird angenommen, dass für den Kauf und die Nutzung von Elektrofahrzeugen keinerlei Subventionen gewährt werden. Die Beispielrechnungen unterscheiden sich hinsichtlich des Kaufpreises der zu vergleichenden Fahrzeuge, des Kraftstoff- beziehungsweise Energieverbrauchs sowie des durchschnittlichen Benzin- und Strompreises.

Amortisationsrechnung I

Reales Beispiel: Verglichen werden zwei real verfügbare Autos mit ähnlicher Größe und Ausstattung, basierend auf heutigen Benzin- und Strompreisen. Beim Toyota Aygo mit Benzinmotor (ein Liter Hubraum) beträgt der Listenpreis (in gehobener Ausstattung) knapp 12.000 Euro und der kombinierte Durchschnittsverbrauch 4,5 Liter Benzin auf 100 Kilometer. Annahmegemäß wird das Fahrzeug überwiegend im Stadtverkehr eingesetzt. Relevant ist daher der innerörtliche Verbrauch von 5,3 Litern pro 100 Kilometer, und zwar zu einem unterstellten Benzinpreis von 1,60 Euro pro Liter. Diesem Auto wird der Mitsubishi i-MiEV gegenübergestellt – ein reines Elektrofahrzeug, das von einer Lithium-Ionen-Batterie mit einer Kapazität von 16 Kilowattstunden angetrieben wird. Der Listenpreis liegt bei rund 29.300 Euro, wobei die Ausstattung etwas umfangreicher ist als beim Toyota Aygo. Der Normverbrauch beträgt etwa 13,5 kWh/100 km. Kalkuliert wird mit einem Strompreis von 0,22 Euro pro Kilowattstunde. Bei diesen Annahmen amortisiert sich der höhere Kaufpreis für das Elektroauto erst ab einer Fahrleistung von über 320.000 Kilometern. Beide Fahrzeuge werden in ihrem Lebenszyklus kaum diese Fahrleistung erreichen. Das aktuelle Elektroauto ist unabhängig von der geringeren Reichweite dem Konkurrenzmodell mit Verbrennungsmotor aus wirtschaftlicher Sicht weit unterlegen.

Amortisationsrechnung II

Fiktives Beispiel: Im zweiten Wirtschaftlichkeitsvergleich wird ein rasanter technischer Fortschritt in der Batterietechnologie angenommen, der zu einer starken Kostenreduktion führt. Das Beispiel bezieht sich auf ein Fahrzeug aus der Kompaktklasse. Der Preisunterschied auf der Einkaufsseite schrumpft auf 10.000 Euro. Als Verbrauch des Benziners werden sieben Liter auf 100 Kilometer angesetzt. Für das Elektrofahrzeug sollen 15 kWh/100 km gelten, ein relativ niedriger Wert für ein Auto der Kompaktklasse. Unterstellt wird ferner, dass der Benzinpreis schneller steigt als der Strompreis: Der Benzinpreis soll 1,85 Euro pro Liter und der Strompreis 0,24 Euro pro Kilowattstunde betragen. Selbst unter diesen für das Elektroauto positiven Annahmen wird der Amortisationszeitpunkt erst nach gut 100.000 Kilometern Fahrleistung erreicht. Ein Voll-Hybrid würde sich bei überwiegender Nutzung im Stadtverkehr sehr viel früher amortisieren, vor allem weil dessen Anschaffungskosten näher am Konkurrenzmodell liegen.

Amortisationsrechnung III

Fiktives Beispiel: Im dritten Beispiel wird ein reines Elektroauto der Kompaktklasse mit einem Voll-Hybridauto verglichen. Der Voll-Hybrid soll in der Anschaffung 8.000 Euro weniger kosten als das BEV. Der Verbrauch des Voll-Hybridautos beträgt annahmegemäß vier Liter pro 100 Kilometer bei einem Benzinpreis von 1,70 Euro pro Liter. Das Elektrofahrzeug verbräuche – wie im ersten fiktiven Beispiel – 15 kWh/100 km und der Strompreis liege bei 0,24 Euro je Kilowattstunde. In diesem Beispiel amortisieren sich die höheren Ausgaben erneut erst ab einer sehr hohen Fahrleistung, und zwar ab rund 250.000 Kilometern.

Solche Amortisationsrechnungen sind auch deshalb gerechtfertigt, weil sie eher dem Kalkül eines privaten Autokäufers entsprechen als eine TCO-Analyse. Denn die beiden hierfür herangezogenen Kriterien, Preis und Verbrauch, zählen für die Kunden zu den wichtigsten Kaufkriterien. Laut DAT-Report 2011 (DAT, 2011) ist der Anschaffungspreis beim Kauf von Neuwagen das dritt wichtigste Kaufkriterium; der Kraftstoffverbrauch folgt auf dem fünften Platz (Tabelle 15). Beide Kriterien sind damit wichtiger als die Reparatur- und Wartungskosten (Rang 6) und deutlich bedeutender als der Wertverlust (Rang 13). Beim Gebrauchtwagenkauf, der gerade für private Halter gemessen an den abgesetzten Stückzahlen wichtiger ist als der Neuwagenmarkt, liegen Anschaffungspreis und Kraftstoffverbrauch sogar auf den ersten beiden Plätzen der Liste der wichtigsten Kaufkriterien.

Entscheidungskriterien von Autokäufern in Deutschland

Tabelle 15

im Jahr 2010, Bewertungsskala von 1 (sehr wichtig) bis 4 (unwichtig),

Neuwagen		Gebrauchtwagen	
Kriterium	Wichtig-keit	Kriterium	Wichtig-keit
Zuverlässigkeit	1,3	Anschaffungspreis	1,4
Aussehen	1,6	Kraftstoffverbrauch	1,7
Anschaffungspreis	1,6	Aussehen	1,8
Serienausstattung	1,6	Ausstattung	1,9
Kraftstoffverbrauch	1,6	Wartungsfreundlichkeit	1,9
Reparatur- und Wartungskosten	1,9	Ersatzteilversorgung	2,0
Ersatzteilversorgung	1,9	Niedriger Kilometerstand	2,0
Nähe des Händlers	1,9	Umweltverträglichkeit	2,3
Lieferzeit	1,9	Kundendienstnetz	2,3
Umweltverträglichkeit	1,9	Garantieumfang	2,5
Kundendienstnetz	2,0	Wiederverkaufswert	2,5
Paketlösungen	2,1	Prestigewert	2,7
Wiederverkaufswert	2,1	Paketlösungen	2,9
Finanzierungsangebot	2,2	Finanzierungsangebote	2,9
Prestigewert	2,4	Günstige Hereinnahme des Vorwagens	3,0
Günstige Inzahlungnahme	2,7		

Quelle: DAT, 2011, 19 ff.

6.2 Geringe Reichweite ist aktuell kein grundsätzliches Problem

Die Beispiele zeigen, wie anspruchsvoll es ist, die Wettbewerbsfähigkeit des Elektroautos zu erreichen, zumal der technische Fortschritt auch bei Benzinern und Diesel-Pkws weitergeht: Bis zum Jahr 2020 dürften die durchschnittlichen Verbräuche um mindestens 25 Prozent sinken – zum Beispiel durch kleinere Motoren (Downsizing), Benzindirekteinspritzung oder Leichtbau. Bei Voll-Hybridautos ist das Ende der technologischen Fahnenstange natürlich ohnehin noch lange nicht erreicht. Die hohen Kosten von Elektroautos sind also die alles entscheidende Hürde für deren Markterfolg. Aus diesem Grund wird in vielen Ländern der Kauf von Elektrofahrzeugen durch staatliche Zuschüsse unterstützt. Die kurze Reichweite von Elektroautos ist dagegen kein K.-o.-Kriterium für Kunden. Denn in Europa beträgt die durchschnittliche zurückgelegte Distanz einer Autofahrt etwa 30 bis 40 Kilo-

meter pro Tag. Und an 80 Prozent aller Tage wird ein Auto weniger als 40 Kilometer gefahren. Dies sind Werte, die unter normalen Bedingungen sogar von PHEV oder REEV im Elektromodus bewältigt werden können.

Wenn man von wirtschaftlichen Aspekten absieht, bieten sich Elektroautos – BEV, PHEV oder REEV – daher als Zweitwagen für Familien, Kurzstreckenpendler und Menschen in Stadtrandlagen oder als Stadtauto an; ein Stellplatz in einer Garage mit Stromanschluss ist hilfreich für die Akzeptanz. Als gewerbliche Kunden sind Unternehmen prädestiniert, die zum Beispiel im städtischen Lieferverkehr oder im mobilen Pflegedienst tätig sind. Sie kommen auf geringe tägliche Kilometerleistungen, die rein elektrisch erbracht werden können. Bei ihnen kommt als großer Vorteil hinzu, dass sie in ihren Betrieben leicht eine Ladeinfrastruktur errichten können. Da viele Fahrzeuge nachts geladen werden dürften, reicht in der Regel die zeitintensive Aufladung an einer einfachen Steckdose. Natürlich werden sich viele Unternehmen zum Beispiel aus Imagegründen Elektroautos anschaffen. Auch wohlhabende, technikaffine Privatleute, für die die höheren Kosten keine große finanzielle Belastung darstellen, zählen zu den Erstkunden – und das schon heute. Mit einem Massenmarkt hat dies freilich alles nichts zu tun.

Ein Zielkonflikt besteht bei reinen Elektroautos darin, dass sie möglichst viel gefahren werden müssten, damit der Nutzer von den niedrigen variablen Kosten profitiert. Diesem Ziel stehen aber derzeit noch die kurzen Reichweiten der Autos, die langen Ladezeiten der Batterien und die begrenzte Zahl von Ladezyklen im Weg.

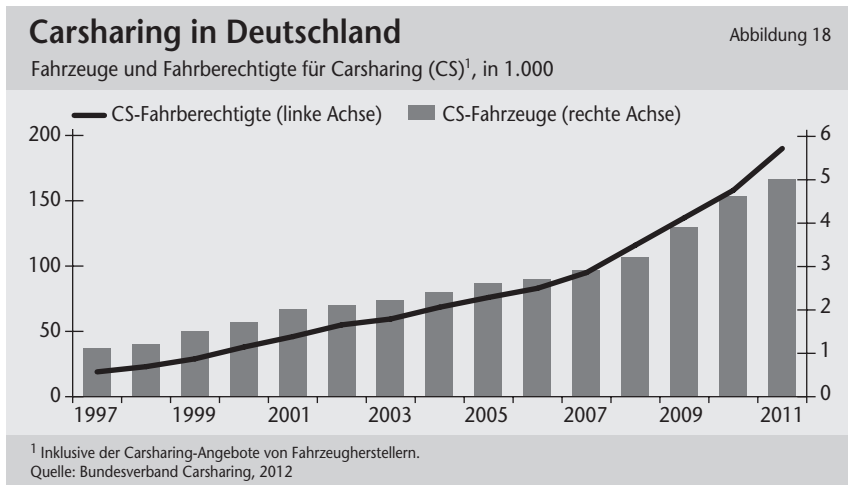
Grundsätzlich werden sich BEV heute und auch in der näheren Zukunft aus rein wirtschaftlicher Sicht nicht rechnen. Die Batteriekosten sind dabei der entscheidende Kostentreiber. Diese müssten in den kommenden Jahren durch technischen Fortschritt und Größenvorteile in der Produktion um etwa 70 bis 80 Prozent sinken, damit reine Elektroautos im Massenmarkt (ohne Subventionen) für den Kunden eine wirtschaftlich sinnvolle Alternative darstellen. Wie bereits ausgeführt wurde, dürfte dies bis 2020 kaum zu erreichen sein. Da die Batterie bei PHEV und REEV kleiner dimensioniert ist als bei reinen Elektroautos, kann dort die Wirtschaftlichkeit früher erreicht werden, zumal auch diese Formen des elektrischen Vortriebs vom technischen Fortschritt profitieren werden. Sie sind zudem für ein größeres Kundenpotenzial interessant, was das frühzeitige Erschließen von Größenvorteilen in der Produktion erleichtern dürfte.

6.3 Alternative Mobilitätskonzepte gewinnen an Bedeutung

In der jüngeren Vergangenheit sind alternative Mobilitätskonzepte in Deutschland populärer geworden. Im Mittelpunkt steht dabei häufig die Idee, dass die Kunden in erster Linie mobil sein möchten und nicht unbedingt ein eigenes Fahrzeug besitzen wollen. Je nach Mobilitätsbedürfnis greifen sie auf die passende Kombination von Verkehrsmitteln zurück (zum Beispiel Pkw, ÖPNV, Fahrrad). Carsharing, das in den letzten Jahren ein stetiges Wachstum in Deutschland verzeichnet hat (Abbildung 18), oder verschiedene Mietwagensysteme sind Beispiele, in denen Pkws eine wichtige Rolle spielen.

Dabei kann die Flexibilität des automobilen Individualverkehrs – wenn auch mit etwas Planungsvorlauf – in Anspruch genommen werden, ohne die hohen Fixkosten eines eigenen Autos tragen zu müssen. Die Nutzung solcher Angebote soll durch den Einsatz von modernen Informations- und Kommunikationstechnologien erleichtert werden. Diese sollen zum Beispiel dem Kunden helfen, das nächste Auto zu lokalisieren. Gerade für junge, städtische Bevölkerungsgruppen sind solche Konzepte interessant, da sie im Alltag nur selten ein eigenes Fahrzeug benötigen. Für die Automobilindustrie und den Autohandel resultieren hieraus Herausforderungen an das klassische Geschäftsmodell. Es entstehen in diesem Markt aber zudem interessante Geschäftsoptionen als Mobilitätsdienstleister.

Die beschriebenen Konzepte werden weiter an Bedeutung gewinnen. Häufig wird zudem argumentiert, dass solche Mobilitätskonzepte prädestiniert seien, um die Marktdurchdringung der E-Mobilität zu steigern. Auf den ersten Blick kann man hierfür auch gute Gründe finden, denn viele Konzepte



sind vor allem auf den Stadtverkehr ausgelegt. Zudem müssen die Kunden nicht die hohen Anschaffungskosten eines eigenen Elektroautos tragen. Auf den zweiten Blick sind jedoch Zweifel angebracht. So besitzen Elektroautos kein Alleinstellungsmerkmal, das sie gegenüber anderen Fahrzeugen (zum Beispiel Kleinwagen mit Benzinmotor) auszeichnet. Im Klartext: Carsharing und Mietwagenmodelle funktionieren auch sehr gut mit preiswerteren Autos mit klassischem Verbrennungsmotor – zumindest solange der Staat deren Nutzung in Innenstadtlagen nicht massiv verteuert oder verbietet, was politisch kurz- und mittelfristig nur schwer durchzusetzen sein wird.

Abgesehen vom günstigeren Preis weisen Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor sogar den Vorteil auf, dass sie aufgrund der höheren Reichweite und kürzeren Tankzeiten länger für die Nutzung durch die Kundschaft zur Verfügung stehen.

6.4 Batterie-Leasing oder Wechselstationen: Wer zahlt?

Es existieren weitere Ideen beziehungsweise reale Angebote, mit denen E-Mobilität einem größeren Kundenkreis zugänglich gemacht werden soll. Eine Option besteht darin, dass der Kunde Elektroautos (oder die eingebauten Batterien) nicht kaufen, sondern nur leasen kann und sie nach einiger Zeit (zum Beispiel nach drei Jahren) wieder an den Hersteller oder Händler zurückgibt. Der französische Autohersteller Renault, der in puncto elektrische Antriebe aktuell ausschließlich auf BEV setzt, bietet solche Modelle an. So kostet der Renault Fluence Z.E., eine viertürige Stufenhecklimousine, die der Kompaktklasse zugeordnet werden kann, knapp 26.000 Euro ohne die Batterie. Für die Batteriemiete fallen laut Homepage monatlich 82 Euro an (für 36 Monate und 10.000 Kilometer Fahrleistung pro Jahr). Die Batteriemiete soll dabei die Abnutzung der Batterie abdecken; ihre Höhe ist an die tatsächliche Fahrleistung gekoppelt, übersteigt den genannten Wert also, wenn mehr als 10.000 Kilometer im Jahr gefahren werden. Nimmt man eine Fahrleistung von 10.000 Kilometern an, dann entspricht die jährliche Batteriemiete – bei einem Benzinpreis von 1,60 Euro pro Liter – dem Gegenwert von 615 Litern Benzin. Die Stromkosten – der Stromverbrauch des Fluence lag im Test des Allgemeinen Deutschen Automobil-Clubs (ADAC) bei 25,7 kWh/100 km (ADAC, 2012, 9) – hat der Kunde selbst zu zahlen. Durch die Batteriemiete wird der Betriebskostenvorteil des Fluence gegenüber konventionellen Fahrzeugen praktisch nivelliert und an den Hersteller transferiert.

Das Hauptargument für das Leasingmodell liegt erneut darin, dass der Kunde den ansonsten sehr viel höheren Kaufpreis eines Elektroautos schmä-

lern kann. Für die Batterie wird statt des hohen Kaufpreises nur eine monatliche Miete oder Leasingrate fällig, mit der – je nach Angebot – die Wartung oder gar die Stromkosten abgegolten sein können. Auch dieses Konstrukt hört sich zunächst erfolgversprechend an, denn so fällt für den Kunden unter anderem das Risiko eines raschen Wert- und/oder Leistungsverlusts der Batterie weg. Das entscheidende Problem bleibt aber auch hier ungelöst: Die höheren Kosten müssen von irgendeiner Stelle getragen werden – entweder vom Autohersteller oder vom Händler über Quersubventionen, vom Kunden über eine hohe Leasingrate oder vom Staat über Zuschüsse.

Eine weitere Idee, die ebenfalls darauf basiert, dass der Kunde nicht Eigentümer der Batterie ist, verfolgt zusätzlich das Ziel, das Reichweitenproblem von Elektroautos zu lösen. Im Zentrum stehen Wechselstationen für Batterien, an denen die leere Batterie vollautomatisch gegen eine aufgeladene Batterie getauscht werden soll. Das Unternehmen Better Place setzt unter anderem auf den Einsatz solcher Wechselstationen (Better Place, 2011). Hier wird also das bekannte Konzept der Tankstelle auf die E-Mobilität übertragen. Die großflächige Umsetzung dieser im Grunde sehr guten Idee steht jedoch vor gewaltigen Hürden. So wird pro Elektroauto zwangsläufig mehr als eine Batterie benötigt; dies erhöht die Kosten des Systems. Ferner sind enorme Investitionen in die entsprechende Infrastruktur notwendig, wobei unklar ist, wer diese zu tragen hat. Würden sehr viele Fahrzeuge die Wechselstationen nutzen, wären die logistischen Herausforderungen enorm. Zu nennen sind hier zum einen die nötigen Lagerflächen für Batterien, aber gravierender dürfte das Transportproblem sein. Es wären sehr viele Lkw-Transporte mit schweren Batteriepacks nötig, um eine ausreichende Verteilung der Batterien im Land zu gewährleisten. Zudem gelten Lithium-Ionen-Akkus als Gefahrgut, weshalb die Transporte besonderen Auflagen unterliegen würden. Das Konzept verlangt ferner ein hohes Maß an Normung im Fahrzeug- und Batteriebau. Batterien und Unterboden müssen genormt sein, denn an den Wechselstationen sollen die Batterien sowohl von Kleinwagen als auch von Luxuslimousinen getauscht werden. Dies wirft technologische Probleme auf. Auch der exakte Anschluss an das Bordnetz und die Belüftung des Batteriesystems müssen einheitlich und sicher sein. Diese Standardisierung würde die Möglichkeiten des Fahrzeugdesigns stark beschränken. Zudem würde weitgehend die Möglichkeit entfallen, eine Marke über die Motorisierung zu definieren, denn eine Normbatterie müsste natürlich auch bezüglich der Leistungsabgabe genormt sein. Es ist fraglich, ob die Autohersteller hieran ein Interesse haben.

Es ist aus heutiger Sicht realistischer, dass das Problem der geringen Reichweite eher durch PHEV oder REEV adressiert wird. Die Möglichkeiten der Elektrifizierung des Antriebsstrangs sind hier flexibler und ökonomisch sinnvoller. Mittel- bis längerfristig dürfte das Reichweitenproblem wohl eher durch eine höhere Leistungsdichte der Batterie als durch Wechselstationen abgemildert werden. Letztlich zeigen die skizzierten Konzepte zur besseren Marktdurchdringung der E-Mobilität erneut, dass sinkende Kosten die *conditio sine qua non* für den Markterfolg der E-Mobilität sind.

6.5 Ladeinfrastruktur: Ausbau vorerst nur punktuell nötig

Der Einstieg in die E-Mobilität erfordert den Aufbau einer Ladeinfrastruktur. Dabei sind folgende Aspekte wichtig. Angesichts der erwarteten langsamen Marktdurchdringung von Elektroautos kann auch der Aufbau der Ladeinfrastruktur schrittweise erfolgen. Laut NPE wären für eine Million Elektroautos etwa 900.000 Ladepunkte ausreichend; bis 2014 läge der Bedarf bei knapp 120.000 Ladepunkten (NPE, 2011a, 37). Die meisten Ladestationen werden auf den Grundstücken der privaten und gewerblichen Kunden zu finden sein.

Automobilindustrie und Energieversorger sind gut beraten, ihre Investitionen in die öffentliche und halböffentliche Ladeinfrastruktur zusammen mit geeigneten Partnern (zum Beispiel Einzelhandel, Kommunen) schon jetzt – aber nur schrittweise – zu erhöhen. Erstens wird der Marktanteil von Elektroautos (BEV, PHEV, REEV) in den kommenden Jahren nur allmählich steigen. Es ist daher sinnvoll, diesen Strukturwandel durch einen Ausbau der Infrastruktur von Beginn an, aber in gemäßigtem Tempo zu begleiten. Zweitens können durch den Aufbau der Infrastruktur heute wertvolle Erfahrungen gesammelt werden, die dazu beitragen, die Wirtschaftlichkeit in Zukunft zu erhöhen und den technischen Fortschritt voranzutreiben. Die Unternehmen können auch Erfahrungen mit den bürokratischen Prozessen machen (Genehmigungen für Ladepunkte). Drittens wird eine zunehmende Sichtbarkeit von E-Mobilität und der zugehörigen Ladeinfrastruktur die Akzeptanz potenzieller Kunden steigern. Dass die Bereitstellung von öffentlicher Ladeinfrastruktur (ohne Subventionen) für die Anbieter vorerst ein Verlustgeschäft sein wird, müssen die Anbieter wohl oder übel akzeptieren, wenn sie der E-Mobilität langfristig zum Durchbruch verhelfen wollen. Die gegebenen Unsicherheiten dürften die Finanzierung dieser Investitionen erschweren beziehungsweise verteuern.

Es versteht sich fast von selbst, dass die öffentliche Ladeinfrastruktur künftig unabhängig vom Eigentümer allen Nutzern diskriminierungsfrei zur Verfügung stehen sollte und dass die Bezahlung und Abrechnung unkompliziert

ziert sein muss. Auch Aspekte des Datenschutzes müssen beachtet werden. Eine weitere wichtige Frage ist die nach der Art der Ladestation. Um die Batterie eines Elektroautos an einer Steckdose aufzuladen, benötigt man – abhängig von der Spannung des Stromnetzes und der möglichen Leistungsabgabe – mehrere Stunden. So sind in Deutschland mit seiner Netzspannung von 220 Volt zum kompletten Aufladen eines Mitsubishi i-MiEV an einer normalen Steckdose rund sieben Stunden einzuplanen. In den USA – wo in der Regel eine Spannung von 120 Volt vorhanden ist – wären eher 13 Stunden anzusetzen. Diese Ladezeiten sind für die Nutzer eigentlich nur dann praktikabel, wenn sie ihr Fahrzeug über Nacht aufladen können. Alternativ können Schnellladestationen installiert werden, mit denen die Ladezeit auf unter eine Stunde gedrückt werden kann. Dies sind die einzigen Systeme, die außerhalb der eigenen Garage denkbar sind. Daher spielen sie bei den Überlegungen über den Aufbau einer Ladeinfrastruktur eine große Rolle. Schnellladung sorgt dafür, dass es den Menschen leichter fällt, ein Elektroauto in ihren Tagesablauf zu integrieren – was ansonsten nur einer Minderheit gelingen wird –, hat aber auch Nachteile, wie etwa eine verkürzte Lebenserwartung der Batterie.

Natürlich erfordert der Aufbau der Ladeinfrastruktur hohe Investitionen. Gerade Ladestationen im öffentlichen Raum kosten nach Einschätzung der NPE zwischen 4.700 und 9.000 Euro pro Ladepunkt (NPE, 2011a, 38). Schnellladesysteme sind heute noch deutlich teurer. Die Kosten pro Ladepunkt differieren dabei in Abhängigkeit von der Leistung und vom Standort der Ladestation. Die Leistung bestimmt später darüber, wie lange die Ladezeit ist. Je leichter ein Standort zugänglich ist, desto mehr muss vom Betreiber der Ladestation in Abrechnungs- und Sicherheitssysteme investiert werden. Dabei erhöhen sich die Kosten noch einmal enorm, wenn die Ladestation als Teil eines sogenannten Smart Grids fungieren soll, also das angeschlossene Elektroauto als Pufferspeicher für das Stromnetz dienen soll.

Am günstigsten sind Anschlüsse in privaten Haushalten. Die Steckdosen in der Garage oder am Carport sind nur den Bewohnern zugänglich, weshalb keine besonderen Abrechnungs- und Sicherheitsvorrichtungen nötig sind. Die Varianten für private Ladestationen reichen von einfachen 3,7-kW-Anschlüssen bis zu 11- oder 22-kW-Schnellladestationen. In diesem Bereich halten sich die Investitionskosten mit 200 Euro bis maximal 1.250 Euro pro Station in engen Grenzen (Doll et al., 2011, 8 f.). Darum überrascht es auch nicht, dass bei vielen Flottenversuchen mit Elektroautos die Teilnahme an den Besitz einer Garage oder eines Carports geknüpft wurde.

Halböffentliche Stationen sind in geschützten öffentlichen oder privaten Einrichtungen untergebracht. Lademöglichkeiten auf einem bewachten Betriebsparkplatz fallen in diese Kategorie. Die Nutzerschicht ist genau umrissen, Abrechnungseinrichtungen können, müssen aber nicht installiert werden und Sicherheitseinrichtungen sind nur beschränkt notwendig. Denkbare Optionen für solche Ladepunkte sind 11- oder 22-kW-Anschlüsse. Unter diesen Voraussetzungen ist mit Investitionskosten im Bereich von 1.250 bis 3.250 Euro pro Einheit zu rechnen.

Am teuersten wären öffentlich zugängliche Ladestationen. Diese benötigen hohe Abrechnungs- und Sicherheitsstandards. Bei Ladeleistungen von 11, 22 oder 43 kW bewegen sich die Investitionskosten zwischen 4.000 und 17.000 Euro pro Einheit (Doll et al., 2011, 9). Es ist offensichtlich, dass sich Investitionen in öffentliche Ladepunkte allein über die verkaufte Strommenge nicht rechnen werden. Das Potenzial, zusätzliche Einnahmen über Werbung oder Mehrwertdienste (zum Beispiel Informationsangebote) zu generieren, ist als begrenzt einzuschätzen. Öffentliche Ladestationen werden also auf Zuschüsse des Staates oder Quersubventionen der Industrie beziehungsweise Energiewirtschaft angewiesen sein. Ladestationen auf privaten oder gewerblichen Grundstücken (oftmals eine einfache Steckdose) sind dagegen deutlich billiger oder bereits vorhanden. Parkhausbetreiber können durch Ladestationen einen Mehrwert für ihre Kunden anbieten und so einen Anreiz haben, zu investieren. Im Mittelpunkt würde bei solchen Angeboten aber die Kundenbindung stehen. Diskutiert werden zudem induktive, also kabellose Ladekonzepte. Das Auto wird zum Beispiel über einer induktiven Ladestation geparkt; der Nutzer muss keine Kabelverbindung herstellen. Diese Lösungen sind zwar vor allem bei stationärer Ladung technologisch machbar, aber laut Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) wirtschaftlich nicht rentabel (Schraven et al., 2010, 20). So stellt sich erneut die Frage nach dem Investor.

Die meisten privaten und gewerblichen Erstkunden von Elektroautos dürften über eine eigene Ladestation verfügen oder diese zu relativ niedrigen Kosten installieren können. Es ist zudem zu erwarten, dass diese Erstkunden die Fahrzeugnutzung im Wissen um eine zunächst nur begrenzt verfügbare öffentliche Ladeinfrastruktur planen werden. Das heißt, sie werden für längere Strecken auf eine Alternative zurückgreifen können.

Unter dem Strich gibt es ausreichend viele potenzielle Nutzer von Elektroautos, die im privaten und/oder beruflichen Umfeld ohne großen Kostenaufwand verlässlich auf eine Ladestation (Steckdose) für ein Elektroauto zu-

greifen könnten. Als empirische Evidenz sei die Zahl von gut elf Millionen Einfamilienhäusern in Deutschland genannt (Statistisches Bundesamt, 2011, 292), von denen die meisten über eine Garage oder einen Pkw-Stellplatz verfügen dürften. Erste Praxistests mit kleineren Elektrofahrzeugflotten zeigen, dass sich die Nutzer schnell an die eingeschränkte Reichweite anpassen. Daher muss das weitgehende Fehlen einer zusätzlichen öffentlichen oder halböffentlichen Ladeinfrastruktur (zum Beispiel auf Parkplätzen von Supermärkten) kein fundamentaler Hemmschuh für einen beginnenden Massenmarkt sein. Lediglich das große Potenzial von städtischen Kunden, die nicht über eine Garage oder einen festen Stellplatz verfügen, wird man ohne den Aufbau einer öffentlichen Ladeinfrastruktur nur schwer heben können. Hier müssen die Anbieter zusammen mit den jeweiligen Kommunen kostengünstige und praktikable Lösungen finden (zum Beispiel Stromanschluss an der Straßenlaterne), um diese potenziellen Kunden vom Kauf eines Elektroautos zu überzeugen. Die logistischen Probleme (Zahl der Stellplätze, Abrechnungssysteme) sind freilich nicht trivial.

In der längeren Frist ist es aus ökonomischen und ökologischen Gründen erstrebenswert, dass die Fahrzeugbatterien automatisch in Schwachlastzeiten aufgeladen werden. Dies erfordert kostenintensive Investitionen in intelligente Stromnetze und -zähler (Smart Grids). Ein Anreiz für die Kunden, diese Investitionen zu tätigen, läge darin, den Strompreis in Zeiten geringer Nachfrage zu senken. Allerdings sind die Investitionen, die Privatleute für Smart Grids aufwenden müssten, beträchtlich (Auer/Heng, 2011).

6.6 Politische Optionen zur Förderung der E-Mobilität

Die E-Mobilität bietet also grundsätzlich großes Potenzial, ist aber aufgrund der hohen Kosten und anderer Unsicherheiten noch weit von einem wirtschaftlich tragfähigen Massenmarkt entfernt. Dennoch ist zu beobachten, dass die Regierungen in vielen Ländern die E-Mobilität durch verschiedene Maßnahmen unterstützen oder solche in Aussicht stellen.

Es ist erstaunlich, dass ein Nischenprodukt wie das BEV eine derart hohe politische Aufmerksamkeit und Unterstützung genießt – und das nicht nur in Ländern mit eigener Automobilindustrie. Eine solche frühzeitige Festlegung zur Förderung einer speziellen Technologie birgt vor allem dann für den Staat hohe (finanzielle) Risiken, wenn kein Ausstieg aus der Förderung festgesetzt wird. Es ist zudem das exakte Gegenteil von technologieoffener staatlicher Förderpolitik, denn es versperrt potenziell den Weg für eventuell bessere Technologien.

Die Motivation für diese politische Strategie dürfte in den einzelnen Staaten sehr unterschiedlich sein. In Ländern, in denen die Automobilindustrie ein wichtiger Arbeitgeber ist, spielt die Unterstützung der heimischen Industrie sicherlich eine Rolle, wenngleich die Unternehmen bei der Entwicklung der E-Mobilität von Land zu Land unterschiedlich weit sind. Wenn nämlich alle anderen Nationen die Technologie fördern, ist es mit Blick auf ein faires Wettbewerbsumfeld für die Politik schwer zu argumentieren, als einziges Land in diesem Subventionswettbewerb nicht mitzumachen.

Das industriepolitische Motiv dürfte gerade in China groß sein, denn in einer jungen Branche kann man durch staatliche Zuschüsse leichter „internationale Champions“ aufbauen. Aber auch in Frankreich und den USA dürfte die Förderung der jeweils heimischen Unternehmen sehr relevant sein, zumal diese erklärtermaßen große Hoffnungen auf die E-Mobilität setzen (zum Teil sogar mit ausschließlichem Fokus auf BEV wie im Fall von Renault). In Frankreich kommt hinzu, dass der Anteil der weitgehend CO₂-freien Kernenergie am Strommix hoch ist, was die rechnerischen CO₂-Emissionen des Verkehrssektors stark reduzieren würde. In Deutschland werden bislang keine direkten Zuschüsse zum Kauf von Elektroautos in Aussicht gestellt. Dennoch soll die Technologie und damit auch die hiesige Industrie gefördert werden. Ob sich mit diesem Förderrahmen das Ziel der Bundesregierung – im Jahr 2020 eine Million zugelassene BEV und PHEV – erreichen lässt, darf bezweifelt werden. Die NPE geht jedenfalls in ihrem dritten Fortschrittsbericht davon aus, dass es eher 600.000 Stück sein werden (NPE, 2012, 47).

Weitere Argumente für die Förderung der E-Mobilität liegen in der erhofften Möglichkeit, die Abhängigkeit von Rohölimporten und auch lokale Schadstoff- und Lärmemissionen zu verringern. Die Vermeidung von CO₂-Emissionen kommt als Begründung hinzu. Dies ist besonders in jenen Ländern glaubwürdig, die nicht über eine eigene Automobilindustrie verfügen und die Technologie dennoch fördern (zum Beispiel die Niederlande und Dänemark). Die Tatsache, dass die CO₂-Vermeidungskosten der E-Mobilität sehr hoch sind, spielt für die politische Willensbildung hier offenbar keine große Rolle.

Elektrofahrzeuge sind auf absehbare Zeit wirtschaftlich noch nicht rentabel. Wenn die Politik – aus welchen Gründen auch immer – die Technologie direkt oder indirekt unterstützen möchte, gibt es hierfür viele Möglichkeiten. Man kann zwischen monetären und nichtmonetären Maßnahmen unterscheiden sowie zwischen Maßnahmen, die beim Endkunden oder bei der Industrie ansetzen. Im Folgenden werden verschiedene Förderoptionen beleuchtet.

Zu den klassischen nichtmonetären Anreizen zur Förderung der E-Mobilität, die sich an den Endkunden richten, zählen Privilegien für Elektrofahrzeuge im Straßenverkehr (zum Beispiel die Nutzung von Busspuren oder besonders ausgewiesenen Parkplätzen). Solche Maßnahmen sind aus ordnungspolitischer Sicht relativ unproblematisch. Die Begünstigung gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor kann man unter anderem mit den niedrigeren lokalen Schadstoff- und Lärmemissionen begründen. Es müssen zwar juristische und technische Voraussetzungen geschaffen werden, dies sollte aber selbst kurzfristig umzusetzen sein. Naturgemäß stößt eine solche Privilegierung mit steigender Zahl von Elektrofahrzeugen an logistische Grenzen – ihre Wirkung dürfte langfristig nachlassen. Das IW-Umweltexpertenpanel signalisiert zudem, dass nichtmonetäre staatliche Fördermaßnahmen und damit solche Privilegien bei der Kaufentscheidung eher eine untergeordnete Rolle spielen (Tabelle 16). Die Privilegien für Elektrofahrzeuge könnten natürlich durch Straßenbenutzungsgebühren oder gar Fahrverbote für traditionelle Pkws beispielsweise in bestimmten Stadtteilen ergänzt werden (zum Beispiel Citymaut). Umfassende Regelungen dieser Art halten die Autoren kurz- und mittelfristig aber weder für angemessen noch für politisch durchsetzbar.

Die monetären Maßnahmen zur Förderung der E-Mobilität können grundsätzlich in direkte Zuschüsse zum Autokauf und indirekte finanzielle Anreize untergliedert werden. Zudem könnten durch steuerliche Änderungen die relativen Preise zugunsten der E-Mobilität verändert werden. Eine Erhöhung der Steuer auf Benzin und Diesel bei gleichzeitiger Absenkung der Stromsteuer oder der Umlage für erneuerbare Energien für die Nutzer von Elektroautos würde deren Vorteil bei den variablen Kosten weiter vergrößern. Dies wäre aber unverhältnismäßig. Man kann sich zudem vorstellen, dass

Wirksamkeit von Förderinstrumenten der E-Mobilität Tabelle 16

Instrument	Bewertung
Technische Verbesserungen am Fahrzeug	1,79
Mehr Ladestationen, qualifizierte Werkstätten etc.	1,81
Positives Unternehmensimage	1,99
Finanzielle staatliche Förderung	2,33
Verbesserung der eigenen Emissions-/Umweltbilanz	2,61
Nichtmonetäre staatliche Förderung	2,99

Bewertungsskala: 1 = sehr stark, 2 = eher stark, 3 = eher schwach, 4 = gar nicht; Befragung von 181 Umweltexperten der Wirtschaft im Juni 2011.

Quelle: IW-Umweltexpertenpanel 3/2011

aufgrund des steigenden Anteils erneuerbarer Energien, der mit einer höheren Umlage über das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) einhergeht, die Strompreise (für Privatkunden, nicht unbedingt an der Strombörse) sogar schneller steigen als die Benzin- und Dieselpreise. In der sehr langen Frist (bei einem sinkenden Bestand an Pkws mit Verbrennungsmotor) ist es zudem denkbar, dass der Staat Einnahmeverluste aus der Energiesteuer (früher Mineralölsteuer) durch eine höhere Besteuerung des Stroms zu kompensieren versucht. Dies ist jedoch allenfalls Zukunftsmusik.

Viele Staaten setzen auf eine Mischung aus direkten und indirekten Subventionen (NPE, 2012, 59). Dabei liegen die Gesamtbeträge teilweise im fünfstelligen Bereich pro Fahrzeug, also in einer Größenordnung, für die man einen gut ausgestatteten Kleinwagen kaufen könnte (Fraunhofer IAO/Price-waterhouseCoopers, 2010, 23). Die indirekten Zuschüsse umfassen vor allem verschiedene steuerliche Erleichterungen, verbesserte Abschreibungsregeln oder verbilligte Kredite für die Finanzierung der Fahrzeuge. Die NPE behandelt in ihrem jüngsten Bericht (NPE, 2012) mögliche monetäre Anreize, auf die hier nicht weiter eingegangen wird.

Direkte Kaufprämien besitzen gegenüber indirekten Subventionen den Vorteil, dass sie transparenter sind und mit weniger Transaktionskosten verbunden sein dürften. Zudem ist der Kreis der potenziell Begünstigten bei pauschalen Zuschüssen höher als bei indirekten steuerlichen Regelungen. Wenn das politische Ziel lautet, möglichst viele Elektroautos in den Markt zu bringen, verfügen staatliche Kaufprämien über eine hohe Effektivität. Man kann monetäre Anreize aber aus vielen Gründen sehr kritisch sehen. Es handelt sich um einen Markteingriff, der eine bestimmte Technologie stark begünstigt, von der die Politik heute nicht wissen kann, wann sie sich ohne Subventionen im Markt behauptet. Durch hohe Zuschüsse kann man zwar einer Technologie in einem abgegrenzten Markt zum Durchbruch verhelfen. Gleichzeitig besteht aber die Gefahr, dass andere Optionen, die langfristig ökonomisch und/oder ökologisch vielleicht sogar besser wären, nicht auf den Weg gebracht werden. Zudem führen Subventionen zu Besitzständen, weshalb sie stets schwer wieder abzubauen sind, wie die wiederkehrenden Diskussionen um eine Kürzung der Einspeisevergütung für Solarstrom zeigen. Wenn eine solche Förderung beispielsweise zu Arbeitsplätzen in den relevanten Branchen führt, wird eine Rückführung der Subventionen so lange schwierig sein, wie die Technologie noch nicht eigenwirtschaftlich angeboten werden kann.

Grundsätzlich kann man kritisch hinterfragen, ob sich die Regierungen in Zeiten chronisch knapper öffentlicher Kassen solche Zuschüsse leisten sollten.

Mit Blick auf die Ergebnisse von Abschnitt 6.1 wird diese Frage von den Autoren verneint. Aufgrund des aktuell und auch mittelfristig hohen Kostennachteils von Elektrofahrzeugen werden nämlich staatliche Fördermaßnahmen schnell sehr teuer, wenn die E-Mobilität die Nische verlassen soll. Würden in Deutschland die bis zum Jahr 2020 angestrebten eine Million Fahrzeuge (inklusive PHEV) zum Beispiel mit 5.000 Euro pro Auto gefördert, läge der staatliche Subventionsbedarf bei 5 Milliarden Euro – freilich verteilt über mehrere Jahre. Die Kostenlücke der Fahrzeuge wäre damit nicht geschlossen.

Wenn finanzielle Förderung, dann mit klar definiertem Ende

Wenn sich die Politik dazu entscheidet, monetäre Anreize zum Kauf von Elektroautos zu gewähren, dann sollten diese angesichts der genannten Risiken degressiv ausgestaltet, in der Höhe jährlich limitiert und zeitlich befristet sein. Diese Förderbedingungen sollten von Beginn an klar kommuniziert werden. So könnte man ab einem bestimmten Jahr den Kauf einer festgelegten Zahl von Elektrofahrzeugen mit einem definierten Zuschuss subventionieren. Im Zeitablauf sollten der Zuschuss pro Fahrzeug und die maximale Zahl der geförderten Autos sinken, bis am Ende des zuvor definierten Zeitraums die Förderung auslief. Die Zuschüsse könnten pro Jahr nach dem Windhundverfahren gewährt werden, das heißt, die schnellsten Kunden würden profitieren. Über die Zahl der Fahrzeuge, die Höhe des Zuschusses und den maximalen Förderzeitraum wäre natürlich zu diskutieren. Zudem könnte man überlegen, ob nicht ausgeschöpfte Förderkontingente (weniger gewährte Kaufprämien als maximal möglich) eines Jahres in Folgeperioden übertragen werden können, freilich zum niedrigeren Fördersatz.

Eine solche Regelung hätte für den Staat den Vorteil, dass er von Beginn an die maximal fällige Förderhöhe kalkulieren könnte, wie ein fiktives Rechenbeispiel in Übersicht 9 verdeutlicht. Ein solches (oder ähnliches) Modell hätte für den Staat den weiteren Vorteil, dass man durch die degressive Ausgestaltung Anreize zum technischen Fortschritt setzen würde. Für die Industrie läge der Reiz einer solchen Regelung darin, dass sie Planungssicherheit hinsichtlich der geförderten Stückzahlen hätte und auch wüsste, wann die Förderung ausläuft. Die Unternehmen könnten ihre Investitionen in die E-Mobilität dann an ihren eigenen Erwartungen ausrichten, zum Beispiel denen über den technischen Fortschritt.

Ein Nachteil einer solchen Förderpolitik läge unter anderem darin, dass es bei einem schnellen technischen Fortschritt zu Mitnahmeeffekten käme.

Rechenbeispiel für staatliche Förderung der E-Mobilität

Übersicht 9

Es wird angenommen, dass in Deutschland ab dem Jahr 2015 der Absatz von maximal 250.000 Elektroautos (BEV, PHEV, REEV) pro Jahr mit 10.000 Euro pro Auto gefördert wird. Es wird ferner angenommen, dass die maximale Zahl der geförderten Fahrzeuge linear um 25.000 pro Jahr und die Förderung ebenfalls linear um 1.000 Euro pro Jahr sinken. Ab dem Jahr 2025 gäbe es in diesem Beispiel dann keine Förderung mehr. Wenn die Förderkontingente komplett im jeweiligen Jahr ausgeschöpft würden, käme auf den Staat eine maximale nominale Fördersumme von gut 9,6 Milliarden Euro zu – verteilt auf zehn Jahre. In den Genuss der Förderung kämen in diesem Beispiel 1,375 Millionen Autos.

Eigene Zusammenstellung

Zudem ist die Gewährung des Zuschusses nach dem Windhundverfahren nicht unproblematisch. Ein weiteres Problem in der Praxis dürfte darin liegen, dass eine solche Förderpolitik in gewissem Rahmen international abgestimmt werden müsste.

Um es noch einmal zu betonen: Eine umfangreiche monetäre Förderung für den Kauf von Elektroautos ist mit Skepsis zu betrachten. Aber wenn sich die Politik für ein solches Instrument entscheiden sollte, wären ein zeitlich klar definiertes Ende und eine Festlegung der maximalen Fördersumme notwendig. In Deutschland sollen die monetären Anreize für den Kauf von Elektroautos nach derzeitigem Stand gering ausfallen. Das Ziel, Leitmarkt für die E-Mobilität zu werden, wird man so zwar nicht erreichen. Das ist aber angesichts der geringen Größe des eigenen Marktes ohnehin ein ambitioniertes Ziel. Für die hiesige Industrie muss dies aber nicht zwangsläufig eine schlechte Nachricht sein. Denn wenn sie wettbewerbsfähige Produkte entwickelt und auf den Markt bringt, kann sie von den höheren Fördersätzen in anderen Ländern profitieren. Ein Beispiel hierfür ist der Erfolg der chinesischen Solarindustrie, die mit ihrer Panelproduktion massiv von den hohen Förderungen in Deutschland profitiert und inzwischen deutsche Anbieter weitgehend verdrängt hat. Ob man dann allein oder in Kooperation mit ausländischen Partnern zum Leitanbieter werden kann, wird erst die Zukunft zeigen.

Die bisher genannten Fördermaßnahmen setzen beim Endkunden an. Die Politik kann die E-Mobilität auch unterstützen, indem die relevanten Unternehmen beziehungsweise die Forschung gefördert werden. Dies geschieht in vielen Ländern. Die umfangreichsten Zuschüsse planen dabei die USA, die laut Verband der Automobilindustrie (VDA) die E-Mobilität in den Jahren von 2010 bis 2017 mit etwa 22 Milliarden Euro fördern wollen,

zum Beispiel für die lokale Batterieproduktion (VDA, 2011). Mit Blick auf das Ziel, Leitanbieter in diesem Bereich zu werden, wäre eine solche Förderung auch für Deutschland ein probates Mittel. Dabei sind Zuschüsse für die Grundlagenforschung ein geeignetes Instrument und ordnungspolitisch unbedenklich, wenn sie diskriminierungsfrei gewährt werden. Zudem sollte sich der Staat zusammen mit der Industrie in Teilbereichen der E-Mobilität für ein sinnvolles Maß an Normierung und Standardisierung einsetzen (zum Beispiel bei der Ladeinfrastruktur), ohne Wettbewerb a priori auszuschließen.

Darüber hinaus könnte der Staat natürlich bestimmte Teile der Wertschöpfungskette direkt subventionieren (etwa durch direkte Investitionszuschüsse, steuerliche Vergünstigungen oder günstige Abschreibungsregeln). In der Praxis spielt diese Form der Industriepolitik durchaus eine wichtige Rolle. So wird in den USA der Aufbau von Fabriken zur Batterieproduktion – wie bereits oben erwähnt – durch den Staat subventioniert. An diesem Beispiel sind allerdings direkt auch die negativen Effekte einer solchen Förderpolitik zu erkennen. Sie ist nämlich ein Eingriff in den internationalen Wettbewerb. Das birgt die Gefahr eines Subventionswettkampfs zwischen den Nationen in sich, der zudem eventuell auf eine langfristig suboptimale Technologie abzielt. Von Land zu Land unterschiedlich hohe Kaufprämien sind aus wettbewerbspolitischer Sicht dagegen unproblematisch, wenn sie grundsätzlich vom Autokäufer für alle Marken in Anspruch genommen werden können.

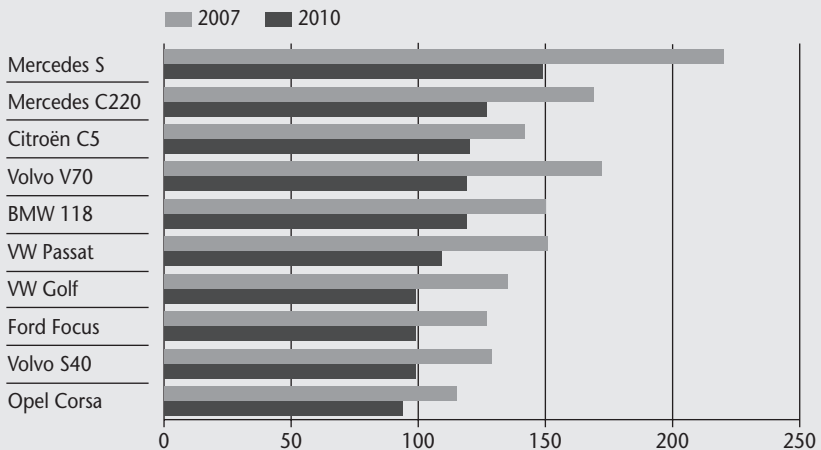
Ordnungsrecht: Auflagen zu CO₂-Emissionen sind ein wichtiger Hebel

Eines der effektivsten Instrumente in der Umweltpolitik ist das Ordnungsrecht, zu dem schon die oben erwähnten Privilegien im Straßenverkehr zählen. Das Ordnungsrecht spielt für die E-Mobilität über eine andere Wirkungsweise bereits heute eine wichtige Rolle, denn die Auflagen zur Reduktion der CO₂-Emissionen von Autos sind einer der bedeutendsten Treiber zur Förderung der neuen Technologie. Vor allem das EU-Ziel, die durchschnittlichen CO₂-Emissionen neuer Pkws bis zum Jahr 2020 auf 95 g/km zu senken, wird die Elektrifizierung des Antriebsstrangs vorantreiben – schließlich drohen bei Zielverfehlung empfindliche Strafzahlungen (vgl. Übersicht 8, Abschnitt 4.5). Auch in anderen Staaten gibt es CO₂-Grenzwerte, die aber bislang weniger streng ausfallen. Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs ist für das Erreichen dieser Reduktionsziele und das Vermeiden der Strafen ein wichtiger Faktor. Die Hauptlast liegt allerdings weiterhin auf der Verbesserung der konventionellen Antriebe. Hier sind bereits einige Fortschritte zu erkennen, wie Abbildung 19 belegt.

Senkung von CO₂-Emissionen bei Verbrennungsmotoren

Abbildung 19

CO₂-Emissionen der emissionsärmsten Dieselvariante eines Modells, in Gramm pro Kilometer



Quelle: Transport & Environment, 2010

Die Politik könnte die E-Mobilität basierend auf diesen regulatorischen Vorgaben fördern. So könnte sie es erlauben, die niedrigen Emissionen von neu zugelassenen Elektrofahrzeugen (BEV, PHEV, REEV) jeweils für eine gewisse Zeit (und degressiv ausgestaltet) mehrfach auf den Flottenverbrauch der einzelnen Hersteller anzurechnen. Eine solche Mehrfachanrechnung wird derzeit – wie in Abschnitt 4.5 dargestellt – auf EU-Ebene angewendet, ist aber umstritten. Durch sie hat die Industrie den Anreiz, mehr Elektrofahrzeuge zu verkaufen (und den Kaufpreis entsprechend zu subventionieren).

Für die Mehrfachanrechnung spricht, dass sie den Staat wenig kostet. Lediglich entgangene Strafzahlungen im Fall einer Zielverfehlung der Hersteller wären zu nennen. Diese sind freilich nicht haushaltswirksam und stünden ohnehin der EU zu. Ein Nachteil der Regelung ist natürlich, dass die tatsächlichen Emissionen der Fahrzeugflotte höher ausfallen, als im System mit Mehrfachanrechnung kalkuliert. Kritiker der Mehrfachanrechnung sehen darüber hinaus die Gefahr, die Autoindustrie könne ihre Anstrengungen zur Reduktion der CO₂-Emissionen zurückfahren (Transport & Environment, 2010, 7). Diese Gefahr kann man aber weitgehend bannen, indem man die Mehrfachanrechnung auf einen relativ kurzen Zeitraum begrenzt. Zudem ist zu erwarten, dass andere Treiber (vor allem steigende

Ölpreise) die Branche dauerhaft veranlassen werden, die spezifischen Emissionen ihrer Autos weiter zu senken. Eine Verlängerung der Regelung zur Mehrfachanrechnung scheint angesichts der ohnehin hohen CO₂-Vermeidungskosten der E-Mobilität jedenfalls gerechtfertigt.

Ein grundsätzlicher Kritikpunkt zur Regulierung der CO₂-Emissionen von Fahrzeugen liegt in diesen hohen CO₂-Vermeidungskosten alternativer Antriebstechnologien. Zudem führen die staatlichen Vorgaben dazu, dass es für das homogene und in der EU auch handelbare Gut CO₂ zu unterschiedlichen Preisen kommt. Dies ist ein Zeichen für ökologische und ökonomische Ineffizienz – entspricht aber der politischen Realität (Sinn, 2008, 159 ff.).

In der Theorie wäre es besser, die Emissionen des Verkehrssektors ebenfalls in den Emissionshandel einzubeziehen. Dies sollte so organisiert sein, dass jene Unternehmen, die Kraftstoffe in den Markt bringen, auch Emissionszertifikate nachweisen müssen (Upstream-Ansatz). Das würde Transaktionskosten gegenüber einer Lösung sparen, bei der alle Verkehrsteilnehmer am Emissionshandel teilnehmen müssten. Aufgrund der hohen Zahlungsbereitschaft im Verkehrssektor würden die Reduktionslasten wohl vor allem zu den energieintensiven Industrien verschoben, was wirtschaftspolitische Implikationen hätte. Von einer solchen Regelung sind wir in der Praxis natürlich weit entfernt.

Zwischenfazit: Förderpolitik ist eine Gratwanderung

Der Abschnitt über die Optionen zur Förderung der E-Mobilität zeigt, dass Förderpolitik für die Staaten eine Gratwanderung ist. Hohe direkte Zuschüsse dürften relativ schnell Wirkung zeigen, sind aber teuer, selbst wenn man sie zeitlich befristet. Direkte Subventionen für die Industrie sind aus Wettbewerbsgründen problematisch. Die Forschungsförderung ist dagegen zu befürworten und kann für ein Herstellerland im internationalen Wettbewerb auch industriepolitisch vorteilhaft sein (Stichwort Leitanbieter). Privilegien im Straßenverkehr und die Unterstützung der Grundlagenforschung sind ordnungspolitisch unbedenklich und relativ kostengünstig. Sie reichen aber vorerst nicht aus, um die Marktdurchdringung von Elektroautos zu beschleunigen. Letztlich ist in vielen Ländern die Entscheidung zur Förderung der E-Mobilität bereits gefallen: Monetäre Anreize für Industrie und Kunden spielen dort die Hauptrolle. Technologieoffenheit sieht anders aus. In Deutschland ist die Diskussion noch voll im Gang. Es zeichnen sich länger währende Vergünstigungen bei der Kfz-Steuer sowie Privilegien im Straßenverkehr ab. Zudem stellt die Bundesregierung Mittel für Forschung und Entwicklung bereit.

Das Instrument, das den Staat wenig kostet, aber spürbare Anreize zum Verkauf von Elektrofahrzeugen setzt, ist deren befristete Mehrfachenrechnung auf das Flottenziel der Autohersteller. Dies ist somit als ein wichtiger Hebel für eine schnellere Marktdurchdringung von Elektroautos einzustufen, der die Kosten weitgehend der Automobilindustrie anlastet. In Europa wird dieses Instrument aber sehr viel zögerlicher eingesetzt werden als in den USA oder China. Die USA verwenden hier den Faktor 2,5, in China zählt jedes Elektrofahrzeug fünffach. Der Vorschlag der EU-Kommission zur Setzung firmenspezifischer Emissionsgrenzwerte für Neuwagenflotten ab 2020 sieht nur vor, dass bei der Berechnung der durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen jeder neue Personenkraftwagen mit spezifischen CO₂-Emissionen von weniger als 35 Gramm CO₂/km zwischen 2020 und 2023 als 1,3 Pkws und ab dem Jahr 2024 als ein Pkw gezählt wird. Die Zahl der anrechenbaren Fahrzeuge wäre zudem bei 20.000 Stück pro Hersteller und Jahr gedeckelt (EU, 2012, 10). Für gewerbliche Kunden und private Nutzer von Dienstwagen könnten auch Sonderabschreibungen beziehungsweise Vergünstigungen bei der Dienstwagenregelung (zum Beispiel Ansetzung eines niedrigeren Brutto-listenpreises) spürbare Anreize sein.

6.7 Marktpotenzial in Deutschland: vier Szenarien

Über den künftigen Markterfolg der E-Mobilität gibt es viele unterschiedliche Einschätzungen. Die optimistischste Prognose, die sich in der Literatur finden lässt (Dudenhöffer, 2010, 21), stammt vom französischen Autohersteller Renault und beziffert den Marktanteil von reinen Elektroautos (BEV) im Jahr 2020 auf bis zu 10 Prozent. A.T. Kearney (2011, 1) nennt ebenfalls einen möglichen Marktanteil von 10 Prozent, schließt neben BEV aber auch PHEV mit ein. Das Institut für Automobilwirtschaft (IFA) schätzt den Weltmarktanteil von BEV im Jahr 2020 auf unter 5 Prozent (IFA, 2011, 1). Eine Umfrage des IW Köln (Bähr/Puls, 2012) bei Unternehmen der deutschen Automobilindustrie ergab die in Abbildung 20 dargestellten Erwartungen an die Marktanteile verschiedener Antriebe im Jahr 2020.

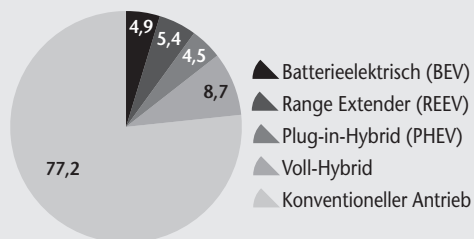
Die Bandbreite der Prognosen verdeutlicht, dass das Marktpotenzial der E-Mobilität nur mit enormen Unsicherheiten abgeschätzt werden kann. Daher ist es sinnvoll, mögliche Zukünfte mittels einer Szenarioanalyse zu skizzieren. Im Folgenden wird auf Basis von vier Szenarien das Absatzpotenzial für BEV in Deutschland im Jahr 2020 geschätzt – unabhängig von politischen Zielvorgaben. Dafür wurden zwei Treiber als wesentliche Einflussfaktoren für das Marktpotenzial festgelegt: erstens die Höhe staatlicher

monetärer Anreize für den Kauf von Elektroautos und zweitens der Grad des technischen Fortschritts in der E-Mobilität, der entscheidenden Einfluss auf die Kostenentwicklung hat. Die staatlichen Anreize können hoch oder gering ausfallen, der technische Fortschritt kann schnell oder langsam erfolgen. Je nach Ausprägung der beiden Faktoren ergeben sich also vier Szenarien.

Prognostizierte Marktanteile von Antriebsarten bei Pkws

Abbildung 20

Erwartungen deutscher Automobilunternehmen für das Jahr 2020, in Prozent der globalen Neuzulassungen



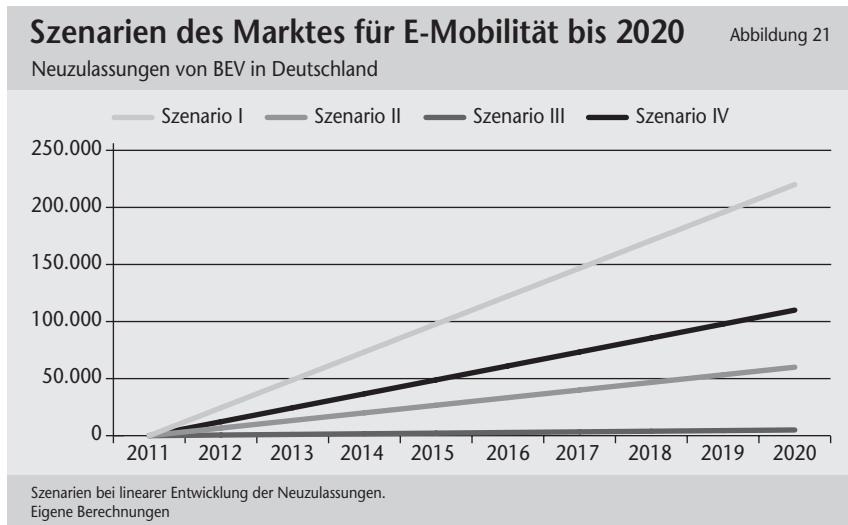
Quelle: Bähr/Puls, 2012, 31

Von einer hohen staatlichen (direkten/indirekten) Förderung ist bei Beträgen von (deutlich) mehr als 5.000 Euro pro Auto zu sprechen. Je nach Fahrzeugsegment würde eine solche Subvention dazu beitragen, einen nennenswerten Teil des Kostennachteils von Elektroautos auszugleichen. Eine geringe staatliche Förderung wird mit Beträgen zwischen 0 und 2.500 Euro angesetzt; 2.500 Euro betrug der im Rahmen der Abwrackprämie gezahlte Zuschuss. Ein schneller technischer Fortschritt wird bei einer Reduktion der Batterie-kosten um zwei Drittel oder mehr bis zum Jahr 2020 unterstellt (das entspricht in etwa den Annahmen der NPE). Zudem schließt schneller technischer Fortschritt auch signifikante Verbesserungen bei der Energiedichte der Batterien und damit bei der Reichweite der Fahrzeuge ein (Reichweite im Durchschnitt mehr als 200 Kilometer). Von langsamem technischen Fortschritt wird bei einer Kostensenkung gegenüber heute von weniger als 50 Prozent ausgegangen.

Alle Szenarien basieren auf weiteren Annahmen zum automobilen Umfeld. Das reale BIP in Deutschland ist demnach bis dahin durchschnittlich um etwas weniger als 1,5 Prozent pro Jahr gewachsen; die strukturelle Arbeitslosigkeit ist unter anderem aufgrund der demografischen Entwicklung auf etwa 2,5 Millionen gesunken. Die Zahl potenzieller Autobesitzer hat sich kaum verändert, wenngleich die Zahl der Menschen über 65 Jahre gegenüber heute um mindestens zwei Millionen Menschen gestiegen sein wird (zulasten der Alterskohorte der 20- bis 64-Jährigen). Der Pkw-Bestand wird bis zum Jahr 2020 von 42,9 Millionen auf rund 44 Millionen Einheiten gestiegen sein. Im Durchschnitt dürften dann pro Jahr in Deutschland rund 3,1 Millionen

Pkws verkauft werden. Sowohl Benzin- und Dieselpreise als auch der Strompreis haben sich erhöht. Die relativen Preise sind weitgehend konstant geblieben. Der Durchschnittsverbrauch von reinen Benzinern und Diesel-Pkws ist um 30 Prozent gesunken. Unterstellt werden keine ordnungspolitischen Einschränkungen für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (zum Beispiel Fahrverbote, Citymaut). Dagegen gibt es in einigen Städten mit hohem Verkehrsaufkommen Sonderrechte für Elektroautos.

Basierend auf diesen Rahmendaten werden mögliche Marktpotenziale für BEV abgeleitet. Die Szenarien sind keine Prognosen, sondern stellen mögliche Zukünfte dar. Die Szenarien im Überblick (Abbildung 21):



- Im Szenario I (hohe Förderung, schneller technischer Fortschritt) könnte der Anteil der BEV an den Pkw-Neuzulassungen im Jahr 2020 in einer Größenordnung von 6 bis 8 Prozent liegen (7 Prozent entsprächen knapp 220.000 Einheiten). Die Autos sind aufgrund der hohen Förderung und des schnellen technischen Fortschritts für eine nennenswerte Kundengruppe eine interessante Alternative geworden. Auch PHEV und REEV dürften – Förderung vorausgesetzt – in diesem Szenario zusammen einen Marktanteil in ähnlicher Größenordnung verbuchen.
- Im Szenario II (geringe Förderung, schneller technischer Fortschritt) dürfte der Marktanteil dagegen nur etwa 1 bis 3 Prozent betragen (bei 2 Prozent wären es gut 60.000 Stück). Trotz des schnellen technischen Fortschritts werden sich die meisten Kunden von den – ohne größeren Zu-

schuss – hohen Gesamtkosten abschrecken lassen. PHEV und REEV könnten etwas besser abschneiden, weil bei ihnen der Kostennachteil gegenüber Autos mit Verbrennungsmotoren oder Voll-Hybridautos aufgrund des schnellen technischen Fortschritts kleiner geworden ist als bei BEV.

- Im Szenario III (geringe Förderung, langsamer technischer Fortschritt) werden BEV auch im Jahr 2020 noch nicht ihre Nischenrolle verlassen haben; ihr Marktanteil an den Pkw-Neuzulassungen liegt dann unter 0,5 Prozent. Auch die Marktanteile von PHEV und REEV bleiben zusammen unter der 1-Prozent-Marke. Die Fahrzeuge sind aus Kundensicht wirtschaftlich nicht interessant.
- Schließlich könnte der Marktanteil von BEV im Jahr 2020 im Szenario IV (hohe Förderung, langsamer technischer Fortschritt) etwa 3 bis 4 Prozent an den Pkw-Neuzulassungen erreichen (knapp 110.000 Einheiten bei 3,5 Prozent). Im Vergleich zum Szenario II ist zu erkennen, dass eine höhere staatliche Förderung die potenziellen Kunden eher zum Kauf anregen würde als ein schneller technischer Fortschritt, zumal der technische Fortschritt im Szenario IV immer noch beträchtlich ist. Der gemeinsame Marktanteil von PHEV und REEV kann bei ähnlicher Förderung auch ähnliche Marktanteile erreichen wie der von BEV.

Die einzelnen Szenarien zeigen, dass das Absatzpotenzial für Elektroautos im Jahr 2020 in Abhängigkeit von den beiden Haupteinflussfaktoren stark schwankt (vgl. Abbildung 21). Dies deckt sich mit den zuvor genannten externen Schätzungen zum Marktpotenzial. Es ist zu erkennen, dass das Ziel von einer Million Elektroautos nach Definition der Bundesregierung (BEV, PHEV, REEV) in den Szenarien II und III mit großer Sicherheit verfehlt wird. Das gilt mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auch für Szenario IV. Aus ökonomischer Sicht ist jedoch das Szenario II wünschenswert. Denn hier würde sich die Technologie primär aufgrund des technischen Fortschritts und weniger wegen staatlicher Subventionen (allmählich) durchsetzen. Mit Blick auf die aktuelle Diskussion in Deutschland, in der die politischen Entscheidungsträger zumindest einer starken direkten Förderung von Elektrofahrzeugen skeptisch gegenüberstehen, könnte Szenario II auch das wahrscheinlichste sein.

Die oben genannten Szenarien sind von großer Unsicherheit über den technischen Fortschritt und die Förderpolitik, aber auch über die sonstigen Rahmenbedingungen geprägt. Die Unsicherheit überträgt sich natürlich auf die jeweilige Abschätzung der Marktgröße. Will man nun das globale Potenzial für Elektroautos im Jahr 2020 abschätzen, nehmen die Unsicherheiten

noch deutlich zu. Es dürfte jedoch klar sein, dass der Marktanteil von Elektroautos in Ländern mit dauerhaft hoher Förderung auch am höchsten sein wird (zum Beispiel China, Frankreich, USA). Dagegen dürfte E-Mobilität in jenen Schwellenländern kaum eine Rolle spielen, in denen die Technologie nicht gefördert wird, weil sie schlicht zu teuer ist oder weil alternative Kraftstoffe vor Ort reichlich vorhanden sind (zum Beispiel Ethanol in Brasilien). Ohne Förderung wird der Marktanteil von Elektroautos etwa in Indien, den ASEAN-Staaten (Vereinigung südostasiatischer Staaten) oder Lateinamerika auch in zehn Jahren nur im homöopathischen Bereich liegen.

Eine Prognose über das Jahr 2020 hinaus fällt aufgrund der dann rapide steigenden Unsicherheiten zum technischen Fortschritt extrem schwer. Die Weichen werden derzeit jedoch so gestellt, dass zumindest im Pkw-Bereich die Elektrifizierung des Antriebsstrangs – in welcher Form auch immer – auch über das Jahr 2020 hinaus weiter zunehmen wird. Die Bundesregierung strebt bis zum Jahr 2030 die Zielgröße von sechs Millionen Elektroautos im Pkw-Bestand an, was einem Anteil von rund 14 Prozent entsprechen würde (Bundesregierung, 2011, 11).

7 Fazit

Denkt man an dieser Stelle an das Zitat aus dem 19. Jahrhundert über die bedrohlichen Aussichten und Folgen des Fahrens mit benzingetriebenen Fahrzeugen zurück (vgl. Kapitel 1), dann fallen einem einige Parallelen zum vorliegenden Beitrag auf. Auch wenn die Analyse gezeigt hat, dass viele Erwartungen an das batterieelektrische Fahrzeug (BEV) überzogen und noch erhebliche Hürden auf dem Weg zum elektrischen Fahren zu meistern sind, ist dennoch davon auszugehen, dass die Zukunft der Individualmobilität im elektrischen Antrieb liegt. Wir befinden uns heute aber erst am Beginn eines langfristigen, evolutionären Prozesses, an dessen Ende einmal das rein elektrische Fahrzeug stehen wird – welchen Energiespeicher es auch immer nutzen wird.

Die Automobilindustrie hat die Weichen für eine zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstrangs gestellt. Wie die Analyse gezeigt hat, bietet die E-Mobilität viele Vorteile und ein beachtliches Marktpotenzial. Sinkende Kosten der Technologie sind die mit Abstand wichtigste Bedingung, um

dieses Potenzial heben zu können. Alle anderen Herausforderungen (zum Beispiel geringe Reichweite, fehlende Ladeinfrastruktur, Art der Stromquelle) sind gemessen an der Kostenfrage zweitrangig.

BEV sind nur eine Option im Spektrum der E-Mobilität. Plug-in-Hybriden (PHEV) und Range Extender (REEV) stehen in direkter Konkurrenz, die je nach Fahrzeugsegment unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Die Nachteile der genannten Fahrzeuge in puncto Kosten und/oder Reichweite bleiben vorerst signifikant. Als wirtschaftlich interessante Alternativen werden zunächst am ehesten Voll-Hybridautos und extrem sparsame Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor infrage kommen. Ohnehin gleicht der Weg in die elektromobile Zukunft einer Evolution und nicht einer Revolution. Auch in zehn bis 20 Jahren dürften die meisten Pkws noch mit einem Verbrennungsmotor ausgestattet sein – und sei es nur als Teil eines Hybridsystems. BEV, PHEV und REEV können dort ihre Nischenposition am schnellsten verlassen, wo sie am stärksten gefördert werden. Eine solche Förderpolitik kann aber für die Regierungen schnell sehr teuer werden. Ohnehin ist die Förderpolitik ein schmaler Grat.

Die nur allmähliche und zumeist staatlich geförderte Marktdurchdringung der E-Mobilität ist eine große Herausforderung für die Automobilindustrie. Sie muss ihre FuE-Aktivitäten in diesem Bereich hochfahren, ohne dass diesen Investitionen kurzfristig ein entsprechender Markt gegenüberstünde. Viele Investitionen können sogar Sunk-Cost-Charakter haben und wären demnach verloren, wenn der Durchbruch zum Massenmarkt ausbliebe. Gleichzeitig müssen Autobauer die Energieeffizienz der konventionellen Antriebe stetig verbessern.

Der in den Kernqualifikationen und -branchen der E-Mobilität wirksame Arbeitskräftebedarf liegt aktuell bei jährlich gut 64.000 Personen und dürfte auf gut 79.000 Personen im Jahr 2020 steigen. Die größten Bedarfssteigerungen werden im akademischen Segment wirksam. Die Unternehmen sollten sich möglichst früh um die relevanten Arbeitskräfte bemühen, denn hier zeichnen sich deutliche Engpässe ab. Auch konkurriert die E-Mobilität mit zahlreichen weiteren Wachstumsbranchen und -technologien um dieselben knappen technisch-naturwissenschaftlichen Arbeitskräfte. Im akademischen Segment wären Stipendien oder Kooperationen mit Universitäten eine Option.

Aufgrund des evolutionären Charakters der E-Mobilität sind die bisherigen First-Mover-Vorteile von Unternehmen in diesem Bereich als gering einzuschätzen. Nicht unbedingt die schnellsten, sondern die besten Angebote werden den Unternehmen langfristig die günstigsten wirtschaftlichen Perspektiven bieten.

Literatur

50Hertz, 2011, Windenergieeinspeisung, URL: http://www.50hertz.com/cps/rde/xchg/trm_de/hs.xsl/1983.htm?rdeLocaleAttr=de&rdeCOQ=SID-E29353A1-81077F83 [Stand: 2012-01-16]

ACEA – Association des Constructeurs Européens d'Automobiles, 2012, Tough CO₂ targets for auto industry in difficult economic times, URL: http://www.acea.be/index.php/news/news_detail/tough_co2_targets_for_auto_industry_in_difficult_economic_times [Stand: 2012-08-01]

ADAC – Allgemeiner Deutscher Automobil-Club, 2012, ADAC Autotest – Renault Fluence Z.E. Expression, URL: http://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT4724_Renault_Fluence_Z_E_Expression/Renault_Fluence_Z_E_Expression.pdf [Stand: 2012-08-01]

AGEB – Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, 2011, Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2010 nach Energieträgern, URL: http://www.ag-energiebilanzen.de/componenten/download.php?filedata=1312192927.pdf&filename=BRD_Stromerzeugung1990-2010_Prozent2001Aug2011.pdf&mimetype=application/pdf [Stand: 2012-01-16]

Amprion, 2011, Windenergieeinspeisung, URL: <http://www.amprion.net/windenergieeinspeisung> [Stand: 2012-01-16]

A.T. Kearney, 2011, E-Mobility: Lange Fahrt zum Milliardengeschäft, URL: http://www.atkearney.de/content/misc/wrapper.php/id/51468/name/pdf_2011_09_eb_e-mobility_web_13159115647105.pdf [Stand: 2012-01-16]

Auer, Josef / Heng, Steffen, 2011, Smart Grids. Energiewende erfordert intelligente Elektrizitätsnetze, Deutsche Bank Research, Economics, No. 84, URL: http://www.dbresearch.de/PROD/DBR_INTERNET_DE-PROD/PROD0000000000273605/Smart+Grids%3A+Energiewende+erfordert+intelligente+Elektrizit%C3%A4tsnetze.pdf [Stand: 2012-01-16]

BA – Bundesagentur für Arbeit, 2012, Arbeitsmarkt in Zahlen, Arbeitsmarktstatistik, Arbeitsmarkt nach Berufen – Deutschland (Klassifikation der Berufe 1988), fortlaufende Monatsberichte, Nürnberg

Bähr, Cornelius / Puls, Thomas, 2012, Zukunft der Automobilzulieferer, in: Materialien zur Automobilindustrie, Nr. 44, Berlin

Bardt, Hubertus, 2011, Rohstoffpreise. Entwicklung und Bedeutung für die deutsche Wirtschaft, in: IW-Trends, 38. Jg., Nr. 2, URL: http://www.iwkoeln.de/Portals/0/pdf/trends02_11_2.pdf [Stand: 2011-11-11]

Bayer, Andreas, 2010, Hybridfahrzeuge im städtischen Verteilverkehr, URL: http://portal.wko.at/wk/format_detail.wk?StID=570742&AngID=1&dstid=268 [Stand: 2011-11-11]

BAYERNOIL, 2009, Informationsbroschüre BAYERNOIL, URL: http://www.bayernoil.de/fileadmin/downloadpool/Info-Material/bayernoil_broschuere_D_final.pdf [Stand: 2012-01-16]

Berns, Steffen / Kraft, Dieter / Fetzner, Joachim, 2009, Der Weg zur Elektrifizierung des Antriebsstranges, in: 11th VDA Technical Congress 2011 – Proceedings, S. 221–235

Better Place, 2011, Battery switch stations, URL: <http://www.betterplace.com/the-solution-switch-stations> [Stand: 2012-08-01]

BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2011, Ausbildungsberufe für die Elektromobilität, Berlin

BMF – Bundesministerium der Finanzen, 2009, Die Kraftfahrzeugsteuer im Überblick, URL: http://www.bundesfinanzministerium.de/nn_55228/DE/BMF__Startseite/Service/Broschueren__Bestellservice/Steuern/20230__Kfz__Flyer,templateId=raw,property=publicationFile.pdf [Stand: 2012-01-16]

BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2011, Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung, Berlin

Bundesregierung, 2011, Regierungsprogramm Elektromobilität, URL: http://www.bmbf.de/pubRD/programm_elektromobilitaet.pdf [Stand: 2012-01-16]

Bundesverband Carsharing, 2012, CarSharing macht einen großen Sprung nach vorn, URL: http://www.carsharing.de/index.php?option=com_content&task=view&id=329&Itemid=44 [Stand: 2012-07-02]

Chemetall, 2011a, Lithium Resources, URL: <http://www.chemetalllithium.com/en/lithium-resources/lithium-resources.html> [Stand: 2012-01-16]

Chemetall, 2011b, Chemetall Lithium Division announces global Price increases, URL: [http://www.chemetalllithium.com/en/news/newsoverview/newssingleview/archive/2011/06/meldung/chemetall-lithium-division-announces-global-price.html?xttnews\[day\]=16&cHash=259e462f0ecd6b908a4be0862c987f1c](http://www.chemetalllithium.com/en/news/newsoverview/newssingleview/archive/2011/06/meldung/chemetall-lithium-division-announces-global-price.html?xttnews[day]=16&cHash=259e462f0ecd6b908a4be0862c987f1c) [Stand: 2012-01-16]

Chiang, Yet-Ming et al., 2011, Semi-Solid Lithium Rechargeable Flow Battery, in: Advanced Energy Materials, Vol. 1, No. 3, S. 511–516

DAT – Deutsche Automobil Treuhand GmbH, 2011, DAT-Report 2011, URL: <http://www.dat.de/servlet/com.bil.ep.mediaman.servlet.Download?fileid=3112> [Stand: 2012-01-16]

Demuß, Lutz, 2000, Technologische Veränderungen beim Übergang vom konventionellen Antriebsstrang zur Brennstoffzelle, in: Wengel, Jürgen / Schirrmeister, Elena (Hrsg.), Innovationsprozess vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle, Karlsruhe, S. 111–176

DIW – Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, 2011, Verkehr in Zahlen, Berlin

Doll, Claus / Gutmann, Martin / Wietschel, Martin, 2011, Integration von Elektrofahrzeugen in Carsharing-Flotten. Simulation anhand realer Fahrprofile, URL: http://www.elektromobilitaet.fraunhofer.de/Images/FSEM_Elektromobilitaet_und_Carsharing_fin-2011-05-06_tcm243-90486.pdf [Stand: 2012-01-16]

Dudenhöffer, Ferdinand, 2010, Batteriespitzen-technologie für automobile Anwendungen und ihr Wertschöpfungspotential für Europa, in: ifo Schnelldienst, 63. Jg., Nr. 11, S. 19–27

Emissionfactors.com, 2011, The Definitive Greenhouse Gas Emission Factor Database, URL: <http://emissionfactors.com/> [Stand: 2012-01-16]

ENBW – Energie Baden-Württemberg, 2011, Windeinspeisung, URL: <http://www.enbw-transportnetze.de/kennzahlen/erneuerbare-energien/windeinspeisung/?activeTab=csv&app=wind> [Stand: 2012-01-16]

Erdmann, Georg, 2009, CO₂-Emissionen von Elektrofahrzeugen, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 59. Jg., Nr. 10, S. 66–71

Erdmann, Vera / **Koppel**, Oliver / **Plünnecke**, Axel, 2012, Innovationsmonitor. Die Innovationskraft Deutschlands im internationalen Vergleich, IW-Analysen, Nr. 79, Köln

EU – Europäische Union, 2012, Vorschlag für eine Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 443/2009 hinsichtlich der Festlegung der Modalitäten für das Erreichen des Ziels für 2020 zur Verringerung der CO₂-Emissionen neuer Personenkraftwagen, URL: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/de/com/2012/com2012_0393de01.pdf [Stand: 2012-08-01]

Fraunhofer IAO – Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) / **PricewaterhouseCoopers**, 2010, Elektromobilität. Herausforderungen für Industrie und öffentliche Hand, URL: <http://www.iao.fraunhofer.de/images/downloads/elektromobilitaet.pdf> [Stand: 2012-08-01]

Friedrich, Kaspar A., 2004, Das Potenzial neuer Li-Batteriesysteme (Li-S, Li-Luft): Eine kritische Bewertung, URL: http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Workshopbaende/ws2010-1/ws2010-1_06_friedrichOK.pdf [Stand: 2012-08-01]

Garthwaite, Josie, 2011, Why lithium-ion batteries die so young, URL: <http://gigaom.com/cleantech/why-lithium-ion-batteries-die-so-young/> [Stand: 2012-05-08]

Geschka, 2003, Die Brennstoffzelle als Fahrzeugantrieb, Darmstadt

Göschel, Burkhard, 2011, Nationale Plattform Elektromobilität. Ergebnisse der AG 6 Ausbildung und Qualifizierung, URL: http://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni-ulm/iui.proelek/Dokumente/vortraege/f00-goeschel.pdf [Stand: 2012-05-04]

Grebe, Uwe, 2012, Batterieentwicklung des Opel Ampera. Anforderungen, Auslegung, Validierung, in: 14th VDA Technical Congress 2012 – Proceedings, S. 265–278

GRS – Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien, 2007, Die Welt der Batterien, URL: http://www.grs-batterien.de/fileadmin/user_upload/Download/Wissenswertes/Infomaterial_2010/GRS_welt_der_batterien.pdf [Stand: 2012-02-11]

Harder, Sjoerd / **Spielmann**, Jan / **Intemann**, Julia / **Bandmann**, Heinz, 2011, Hydrogen Storage in Magnesium Hydride: The Molecular Approach, in: Angewandte Chemie, Vol. 123, No. 18, S. 4242–4246

Heymann, Eric, 2011, US-Automarkt auf dem Weg zurück zu alter Größe, Deutsche Bank Research, Aktuelle Themen, Nr. 533, URL: http://www.dbresearch.de/PROD/DBR_INTERNET_DE-PROD/PROD000000000282350.pdf [Stand: 2012-01-16]

Heymann, Eric / Koppel, Oliver / Puls, Thomas, 2011, Elektromobilität. Sinkende Kosten sind conditio sine qua non, Deutsche Bank Research, Aktuelle Themen, Nr. 526, URL: http://www.dbresearch.de/MAIL/DBR_INTERNET_DE-PROD/PROD000000000277861.pdf [Stand: 2012-01-16]

Hubbert, Marion K., 1956, Nuclear Energy and the Fossil Fuels, URL: <http://www.hubbertpeak.com/hubbert/1956/1956.pdf> [Stand: 2012-01-16]

IAB – Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung der Bundesagentur für Arbeit, 2012, Berufe im Spiegel der Statistik, URL: <http://bisds.infosys.iab.de/bisds/faces/Start.jsp> [Stand: 2012-05-04]

ICCT – International Council on Clean Transportation, 2012, Global Comparison of Fuel Economy / Green House Gas Emission Standards, Data Sheet, August 2011, URL: http://www.theicct.org/sites/default/files/GlobalPVStd_Aug2011_datasheet_web.xls [Stand: 2012-07-02]

IEA – Internationale Energieagentur, 2011a, Oil Information 2011, Paris

IEA, 2011b, World Energy Statistics 2011, Paris

IEA, 2011c, CO₂-Emissions from Fuel-Combustion, Paris

IFA – Institut für Automobilwirtschaft, 2011, Elektromobilität nach Fukushima: Steigende Strompreise gefährden den Erfolg von Elektroautos, URL: <http://www.ifa-info.de/downloads/2583/ElektromobilitProzentC3ProzentA4tProzent2030.03.pdf> [Stand: 2012-01-16]

IW Consult – Institut der deutschen Wirtschaft Köln Consult GmbH / **vbw** – Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft, 2011, Rohstoffsituation Bayern – keine Zukunft ohne Rohstoffe, URL: http://www.vbw-bayern.de/agv/downloads/57465@agv/110714_vbw+Studie_Rohstoffe+Bayern_web.pdf [Stand: 2012-05-21]

Johnen, Thomas / Helmholt, Rittmar von / Eberle, Ulrich, 2009, Brennstoffzellenfahrzeuge und elektrische Antriebssysteme bei General Motors und Opel, in: 11th VDA Technical Congress 2011 – Proceedings, S. 247–259

KBA – Kraftfahrt-Bundesamt, 2012a, Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern – Januar 2012, FZ 8, Flensburg

KBA, 2012b, Emissionen und Kraftstoffe. Deutschland und seine Länder am 1. Januar 2012, URL: http://www.kba.de/cln_030/nn_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/EmissionenKraftstoffe/2012_b_emi_eckdaten_absolut.html [Stand: 2012-05-08]

KBA, 2012c, Bestand 1. Januar 2012 nach Fahrzeugalter, FZ 15, URL: http://www.kba.de/cln_030/nn_191188/DE/Statistik/Fahrzeuge/Publicationen/2012/fz15_2012_pdf;templateId=raw,property=publicationFile.pdf/fz15_2012_pdf.pdf [Stand: 2012-08-01]

KPMG, 2012, Global Auto Executive Survey, URL: <http://www.kpmg.com/Global/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/global-automotive-survey-2012/Documents/global-automotive-survey-2012.pdf> [Stand: 2012-01-16]

Liebl, Johannes, 2009, BMW Efficient Dynamics. Die Innovationen gehen weiter, in: 11th VDA Technical Congress 2009 – Proceedings, S. 187–201

Likar, Uwe, 2009, New Generation Electric Vehicle “i-miev”, Vortrag auf dem International Advanced Mobility Forum des Genfer Automobilsalons

London Metal Exchange, 2012, LME Copper price graph, URL: http://www.lme.com/copper_graphs.asp [Stand: 2012-07-02]

Nowak, Gerhard, 2011, China Pushes Us Forward!, URL: http://archiv.iaa.de/2011/fileadmin/user_upload/2011/deutsch/downloads/fv/14/4-IAA-China-Day2011_DrGerhardNowak.pdf [Stand: 2012-08-01]

NPE – Nationale Plattform Elektromobilität, 2010, Zwischenbericht der Arbeitsgruppe 3: Lade-Infrastruktur und Netzintegration, URL: http://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Kompetenzzentrum_Elektromobilitaet/ProzentC3ProzentA4t/Endgueltig-Zwischenbericht-AG3.pdf [Stand: 2012-01-16]

NPE, 2011a, Zweiter Bericht der NPE, URL: http://www.bmbf.de/pubRD/zweiter_bericht_nationale_plattform_elektromobilitaet.pdf [Stand: 2012-01-16]

NPE, 2011b, Zweiter Bericht der NPE – Anhang, URL: http://www.standards-portal.de/content/assets/2011-07-NPE_Anhang [Stand: 2012-01-16]

NPE, 2012, Dritter Bericht der NPE, URL: <http://www.ika.rwth-aachen.de/aktuell/elektromobilitaet-fortschrittsbericht-nationale-plattform.pdf> [Stand: 2012-08-01]

OICA – Organisation Internationale des Constructeurs d’Automobiles, 2012, Production Statistics 2010, URL: <http://oica.net/category/production-statistics/> [Stand: 2012-01-16]

Pehnt, Martin, 2002, Energierevolution Brennstoffzelle. Perspektiven, Fakten, Anwendungen, Heidelberg

Puls, Thomas, 2006, Alternative Antriebe und Kraftstoffe. Was bewegt das Auto von morgen?, IW-Analysen, Nr. 15, Köln

Puls, Thomas, 2008, Stadtverkehr im Fokus, IW-Analysen, Nr. 37, Köln

Rifkin, Jeremy, 2002, Die H₂-Revolution, Frankfurt am Main

Schlick, Thomas / **Hertel**, Guido / **Hagemann**, Bernhard / **Maiser**, Eric / **Kramer**, Michael, 2011, Zukunftsfeld Elektromobilität, URL: http://www.vdma.org/wps/wcm/connect/d0d2900046cafcd865e8f08124134e0/VDMA_E-Mobility-Studie_20110511.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=d0d2900046cafcd865e8f08124134e0 [Stand: 2012-01-16]

Schraven, Sebastian / **Kley**, Fabian / **Wietschel**, Martin, 2010, Induktives Laden von Elektromobilen: eine techno-ökonomische Bewertung, Fraunhofer ISI Working Paper Sustainability and Innovation, No. S8, URL: <http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn:nbn:de:0011-n-1515796.pdf> [Stand: 2012-01-16]

Service, Robert, 2011, Getting There, in: Science, Vol. 332, No. 6037, S. 1494–1496

Service, Robert, 2012, Al bids to V with Li in Battery Wars, in: Science, Vol. 335, No. 6065, S. 163

Sinn, Hans-Werner, 2008, Das grüne Paradoxon. Plädoyer für eine illusionsfreie Klimapolitik, Berlin

Sommer, Klaus, 2011, Continental Mobilitätsstudie 2011, URL: http://www.conti-online.com/generator/www/com/de/continental/presseportal/allgemein/elektromobilitaet/workshop_2011_12_15/download/studie_de.pdf [Stand: 2012-01-16]

Statistisches Bundesamt, 2010, Tabelle VII C – 1.4.2: Bildungsabschlüsse nach Hauptfachrichtung, ISCED-Nummer, Mikrozensus-Hauptfachnummer und Bildungsprogramm, Excel-Datei, Wiesbaden

Statistisches Bundesamt, 2011, Statistisches Jahrbuch 2011, Wiesbaden

Stiftung Weltbevölkerung, 2011, Anteil der über 60-Jährigen an der Bevölkerung, URL: http://www.weltbevoelkerung.de/uploads/tx_tspagefileshortcut/Anteil_ueber_60Jaehriger_05.11.pdf [Stand: 2011-11-11]

StJbDDR – Statistisches Jahrbuch des Deutschen Reiches, 1910, 31. Jg., Berlin

Studener, Karl M., 2010, Elektroantriebe bei Transportern, Hybrid- und Erdgasantriebe bei Nutzfahrzeugen, URL: http://portal.wko.at/wk/format_detail.wk?StID=570742&AngID=1&dstdid=268 [Stand: 2011-11-11]

TenneT TSO, 2011, Windenergieeinspeisung, URL: <http://www.tennetso.de/site/Transparenz/veroeffentlichungen/netzkennzahlen/tatsaechliche-und-prognostizierte-windenergieeinspeisung> [Stand: 2011-11-11]

Transport & Environment, 2010, Green Power for electric cars. Development of policy recommendations to harvest the potential of electric vehicles, URL: <http://www.transportenvironment.org/sites/default/files/media/green-power-for-electric-cars-report-08-02-10.pdf> [Stand: 2012-01-16]

Umweltbundesamt, 2011, CO₂-Emissionen des deutschen Strommix 2009 und Schätzung für 2010, URL: <http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf> [Stand: 2012-01-16]

UN – United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2010, World Urbanization Prospects: The 2009 Revision, URL: http://esa.un.org/unpd/wup/Documents/WUP2009_Highlights_Final.pdf [Stand: 2011-11-11]

USGS – United States Geological Service, 2012a, Lithium, URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/mcs-2012-lithi.pdf> [Stand: 2012-05-08]

USGS, 2012b, Rare Earths, URL: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2012-raree.pdf [Stand: 2012-01-16]

VDA – Verband der Automobilindustrie, 2011, Förderung der Elektromobilität international 2006 bis 2020, URL: <http://www.vda.de/de/downloads/962/?PHPSESSID=pj8fiadvb2jeptau9ald9lc116> [Stand: 2012-01-16]

VDA, 2012, Zahlen und Fakten – Automobilproduktion, URL: <http://www.vda.de/de/zahlen/jahreszahlen/automobilproduktion/> [Stand: 2012-01-16]

VDE – Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik, 2010, Elektrofahrzeuge. Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf, Frankfurt am Main

VDI – Verein Deutscher Ingenieure, 2012, Ingenieurmonitor März 2012, URL: http://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/dps_dateien/SK/Ingenieurmonitor/2011/Ingenieurmonitor_2012-04.pdf [Stand: 2012-05-03]

Wagner, Hermann-Josef / Koch, Marco, 2007, CO₂-Emissionen der Stromerzeugung, in: **BWK – Das Energiefachmagazin**, Bd. 59, Nr. 10, S. 44–52

Wilcke, Winfried, 2011, Luftige Träume, in: **Automobil Industrie**, 25. Jg. Nr. 6, S. 52–54

wvm – Wirtschaftsvereinigung Metalle, 2011, Perspektiven. Elemente für die Zukunft, Geschäftsbericht, URL: http://www.wvmetalle.de/wvmprofi/medien/doc_7261_2011610104824.pdf [Stand: 2012-01-16]

ZIV – Zweirad-Industrie-Verband, 2012, FAQ, URL: <http://www.ziv-zweirad.de/faq.html> [Stand: 2012-08-01]

Kurzdarstellung

Der Weg in die elektromobile Zukunft wird einer Evolution und nicht einer Revolution gleichen. Das reine Elektroauto wird auch im Jahr 2020 ein Nischenprodukt sein, denn bis dahin werden verbrauchoptimierte Autos mit Verbrennungsmotor und verschiedene Varianten von Hybridfahrzeugen die wirtschaftlich bessere Option sein. Die langsame Marktdurchdringung ist eine Herausforderung für die Automobilindustrie. Sie muss ihre Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in diesem Bereich hochfahren, ohne dass diesen Investitionen kurzfristig ein entsprechender Markt gegenübersteht. Gleichzeitig verlangen Kunden und Regulierer, dass die Energieeffizienz der konventionellen Antriebe stetig verbessert wird. In dieser Situation wird viel über staatliche Förderung diskutiert, wobei der Staat entweder die Nachfrage stimulieren oder die Angebotsseite stärken kann. Jede Form der staatlichen Unterstützung stellt dabei eine Gratwanderung dar, weil sie schnell sehr teuer wird und dazu neigt, nicht marktkonforme Lösungen zu fördern. Ein wichtiger Baustein für Deutschland auf dem Weg zum Leitanbieter von Elektroautos ist die Ausbildung der nötigen Fachkräfte. Staat und Unternehmen sollten sich schon heute um den akademischen Nachwuchs bemühen, da sich Engpässe abzeichnen.

Abstract

Even in 2020 the fully electric car will still be a niche product, since until then cars driven by combustion engines with optimised fuel consumption and different kinds of hybrid vehicles will continue to be the more economical option. This slow rate of market penetration presents the automobile industry with a challenge. Manufacturers must rev up their R & D activities in this field without, in the short term, having a corresponding market to recoup their investments. At the same time, both customers and regulators are demanding continual improvements to the energy efficiency of conventional engines. In this situation there is much discussion of state subsidies, which can be used either to stimulate demand or to reinforce the supply side. However, with their rapidly soaring costs and their tendency to promote market-distorting solutions, government subsidies in any form are a tight-rope act. Training the necessary skilled workers is an important step for Germany, which is intent on becoming a leading supplier of electric vehicles. Given that there are already signs of training bottlenecks, both government and industry should already be striving to ensure the supply of young graduates.

Die Autoren

Dipl.-Ökonom **Eric Heymann**, geboren 1973 in Limburg an der Lahn; Studium der Wirtschaftswissenschaften in Gießen; seit 1998 bei Deutsche Bank Research in Frankfurt am Main, Senior Economist und stellvertretender Leiter des Teams „Branchen, Technologie, Ressourcen“, inhaltliche Zuständigkeit für die Themen Verkehr, Umwelt und Automobilindustrie.

Dr. rer. pol. **Oliver Koppel**, geboren 1975 in Arnsberg; Studium der Volkswirtschaftslehre in Bonn und Promotion in Köln; seit 2005 im Institut der deutschen Wirtschaft Köln, Senior Economist im Kompetenzfeld „Human-kapital und Innovation“.

Dipl.-Volkswirt **Thomas Puls**, geboren 1974 in Preetz in Holstein; Studium der Volkswirtschaftslehre in Kiel und Stockholm; seit 2002 im Institut der deutschen Wirtschaft Köln, Senior Economist im Kompetenzfeld „Umwelt, Energie, Ressourcen“.