

Zukunftsperspektiven der Elektromobilität - treibende Faktoren und Hemmnisse in ökonomischer Sicht

Döring, Thomas; Aigner-Walder, Birgit

Veröffentlichungsversion / Published Version

Arbeitspapier / working paper

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit / provided in cooperation with:

SSG Sozialwissenschaften, USB Köln

Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

Döring, T., & Aigner-Walder, B. (2011). *Zukunftsperspektiven der Elektromobilität - treibende Faktoren und Hemmnisse in ökonomischer Sicht*. (sofia-Diskussionsbeiträge zur Institutionenanalyse, 11-7). Darmstadt: Hochschule Darmstadt, FB Gesellschaftswissenschaften und Soziale Arbeit, Sonderforschungsgruppe Institutionenanalyse (sofia). <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-376261>

Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer Deposit-Lizenz (Keine Weiterverbreitung - keine Bearbeitung) zur Verfügung gestellt. Gewährt wird ein nicht exklusives, nicht übertragbares, persönliches und beschränktes Recht auf Nutzung dieses Dokuments. Dieses Dokument ist ausschließlich für den persönlichen, nicht-kommerziellen Gebrauch bestimmt. Auf sämtlichen Kopien dieses Dokuments müssen alle Urheberrechtshinweise und sonstigen Hinweise auf gesetzlichen Schutz beibehalten werden. Sie dürfen dieses Dokument nicht in irgendeiner Weise abändern, noch dürfen Sie dieses Dokument für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, aufführen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Mit der Verwendung dieses Dokuments erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Terms of use:

This document is made available under Deposit Licence (No Redistribution - no modifications). We grant a non-exclusive, non-transferable, individual and limited right to using this document. This document is solely intended for your personal, non-commercial use. All of the copies of this documents must retain all copyright information and other information regarding legal protection. You are not allowed to alter this document in any way, to copy it for public or commercial purposes, to exhibit the document in public, to perform, distribute or otherwise use the document in public.

By using this particular document, you accept the above-stated conditions of use.

sofia

Sonderforschungsgruppe
Institutionenanalyse

Zukunftsperspektiven der Elektromobilität – Treibende Faktoren und Hemmnisse in ökonomischer Sicht

Thomas Döring und Birgit Aigner-Walder

sofia-Diskussionsbeiträge 11-7, Darmstadt 2011

ISBN: 978-3-941627-10-9

Sofia-Diskussionsbeiträge
zur Institutionenanalyse
Nr. 11-7

ISSN 1437 – 126X

ISBN 978-3-941627-10-9

Thomas Döring und Birgit Aigner-Walder

Zukunftsperspektiven der Elektromobilität – Treibende Faktoren und Hemmnisse in ökonomischer Sicht

Gliederung

1 Einführung in die Problemstellung	3
2 Umweltwirkungen einer verstärkten Nutzung von Elektromobilität	6
2.1 Unmittelbare ökologische Effekte von Elektrofahrzeugen	6
2.2 Zusätzlich zu berücksichtigende Umweltwirkungen	8
3 Mikroökonomische Bestimmungsfaktoren der Nutzung von Elektromobilität	11
3.1 Nutzungskosten, Reichweite und Sicherheit von Elektrofahrzeugen	11
3.2 Infrastrukturausstattung, Anschaffungs- und Lebenszykluskosten	16
4 Makroökonomische Aspekte einer verstärkten Nutzung von Elektromobilität	19
4.1 Zukünftiges Investitionsverhalten im Automobilssektor einschließlich komplementärer Produktkomponenten	19
4.2 Auswirkungen auf die Entwicklung von Rohstoff- und Energiemärkten	22
4.3 Auswirkungen auf Marktanteile, Wertschöpfungskette und Strukturwandel im Automobilssektor	24
5 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse	28

Darmstadt und Klagenfurt, November 2011.

1

Einführung in die Problemstellung

Als in ökologischer Sicht das Klima schonende und in diesem Sinne „saubere“ Alternative zur vorherrschenden Mobilitätsform auf der Basis von Verbrennungsmotoren hat das Thema „Elektromobilität“ in den zurückliegenden Jahren sowohl innerhalb der Automobilbranche als auch in der breiten Öffentlichkeit erheblich an Aufmerksamkeit gewonnen. Dies gilt nicht nur für Länder wie Deutschland, Frankreich, die USA oder auch Japan, die traditionell aufgrund ihrer Funktion als Standorte einer weltweit orientierten Automobilindustrie sich des Themas in der jüngeren Vergangenheit verstärkt angenommen haben. Auch in Ländern wie Österreich hat das Thema Elektromobilität einen erheblichen Aufmerksamkeitszugewinn verzeichnet. So hat erst kürzlich das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie einen „Nationalen Einführungsplan Elektromobilität“ vorgelegt¹, der neben Strategien und Instrumenten zur vermehrten Einführung von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen auch vorrangige Anwendungs- und Einsatzbereiche definiert. Im Mittelpunkt dieses Plans steht das Ansinnen, das österreichische Verkehrssystem durch eine intensivere Vernetzung von Industrie, Forschung und Politik dahingehend zu optimieren, dass eine gesamtgesellschaftlich effektive ebenso wie an den individuellen Bedürfnissen orientierte Nutzung alternativer Mobilitätsformen und Antriebstechnologien (und hier insbesondere in Form der Elektromobilität) in Zukunft gewährleistet werden kann. Damit eng verzahnt ist die Zielvorgabe, dass bis zum Jahr 2020 jedes vierte neu zugelassene Auto in Österreich über einen alternativen Antriebsmechanismus verfügen sollte, um auf diese Weise mit zu einem nachhaltigen Energiemanagement in Österreich beizutragen. Dies entspricht einer Zahl von 130.000 bis 150.000 Elektrofahrzeugen im genannten Jahr.²

Auch im nördlichen Nachbarland Deutschland finden sich ähnlich ambitionierte Ziele mit Blick auf die Einführung von Elektrofahrzeugen. So hat die deutsche Bundesregierung erst jüngst die Vorgabe formuliert, dass bis zum Jahr 2020 sich 1 Mio. Elektroautos auf den Straßen des Landes bewegen sollen, was einem Anteil von rund 2,2 % des gesamten PKW-Fahrzeugbestandes entsprechen würde.³ Wie ambitioniert dieses Ziel ist, wird deutlich, wenn man berücksichtigt, dass bis Mitte des Jahres 2010 gerade einmal 1.642 Elektro-

¹ Siehe hierzu Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (2010).

² Siehe hierzu Presseaussendung des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie vom 15. März 2010. Siehe für Österreich ebenso die Studie von Pötscher et al. (2010).

³ Siehe für diese Zielvorgabe die Presseaussendung der deutschen Bundesregierung vom 3. Mai 2010.

fahrzeuge auf Deutschlands Straßen unterwegs waren.⁴ Weniger schleppend wie auf dem Markt für Elektroautos verlief bislang die Entwicklung im Bereich der Elektrofahrräder („Pedelecs“): Während im Jahr 2005 noch lediglich rund 25.000 dieser Pedelecs in Deutschland verkauft wurden, waren es im Jahr 2008 bereits annähernd 110.000 Stück und in 2009 sogar mehr als 150.000 Elektrofahrräder, was gegenüber dem Vorjahr einem Anstieg von 36 % entspricht. Für 2010 geht der Zweirad-Industrie-Verband (ZIV) von 160.000 bis 180.000 verkauften Pedelecs in Deutschland aus.⁵

Diese Entwicklungen der jüngeren Vergangenheit sind umso bemerkenswerter, wie es sich bekanntermaßen im Fall der Elektromobilität keinesfalls um eine grundlegend neue Mobilitätsform als Reaktion auf die öffentliche Diskussion um Klimaschutz und steigende Energiepreise handelt. Vielmehr wurden schon vor mehr als 150 Jahren Autos mit Strom betrieben, dies allerdings weniger aus ökologischen Motiven als vielmehr aufgrund von Effizienzüberlegungen, die auf den deutlich höheren Wirkungsgrad von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu konventionellen Verbrennungsmotoren zurückzuführen sind.⁶ Den ökonomischen Gesetzmäßigkeiten von Angebot und Nachfrage folgend sorgte jedoch eine vergleichsweise kostengünstige und zugleich energiereiche Antriebsressource (Diesel bzw. Benzin) dafür, dass elektrisch betriebene Fahrzeuge über Jahrzehnte aus dem Fahrzeugmarkt verdrängt wurden. Aufgrund dieses Sachverhalts zwischenzeitlich schon als technologisches Auslaufmodell klassifiziert, scheinen Elektrofahrzeuge in Anbetracht von Klimaproblematik, abnehmenden Erdölvorkommen sowie Innovationen im Bereiche der Batterietechnik gegenwärtig eine neue Marktchance zu bekommen.⁷ Nichtsdestotrotz findet die aktuelle Rückkehr der Elektrofahrzeuge auf den entsprechenden Märkten nur in kleinen Schritten statt. Dies gilt insbesondere für Elektroautos und Elektromotorräder, bei denen sich noch im Jahr 2009 die insgesamt angebotene Menge der sieben größten Hersteller gerade einmal auf etwas mehr als 6.000 Fahrzeuge belief.⁸ Verantwortlich hierfür dürfte – neben anderen

⁴ Siehe Deutsches Clean Tech Institut (2010: 76). Demgegenüber hat sich in Deutschland zumindest die Zahl der Hybridfahrzeuge in den zurückliegenden beiden Jahren annähernd verdoppelt.

⁵ Siehe hierzu auch Stelzer (2010) ebenso wie Deutsches Clean Tech Institut (2010: 78).

⁶ Während der Wirkungsgrad von elektrischen Antriebssystemen bei annähernd 100 % liegt, erreichen Dieselmotoren im Vergleich dazu lediglich einen Wert von 40 % und Benzinmotoren sogar nur von 30 %. Siehe hierzu auch Deutsches Clean Tech Institut (2010: 10).

⁷ Siehe zu dieser Einschätzung ebenfalls Straßmann (2010). Hinzu kommen des Weiteren staatliche Regulierungen zum Klimaschutz, die – wie etwa in den USA – bis zum Ende dieses Jahrzehnts den Verkauf der meisten heutigen Automobile mit Verbrennungsmotor unmöglich machen werden. Siehe hierzu auch Andresen/Fass (2011: 22).

⁸ Im Einzelnen handelte es sich dabei um den iReva (Indien) mit 3.000 Fahrzeugen, Mitsubishi (Japan) mit 850 Fahrzeugen, Tesla (USA) mit 700 Fahrzeugen, BMW (Deutschland) mit 600 Fahrzeugen, Think (Norwegen) mit 400 Fahrzeugen, BYD (China) mit

Faktoren – nicht zuletzt auch sein, dass die seinerzeitigen Hemmnisse für eine stärkere Marktdurchdringung in Gestalt einer unzureichenden Lade-Infrastruktur sowie begrenzter Energiespeichermöglichkeiten auch heute noch virulent sind.⁹ Dies erklärt zugleich, warum das Thema Elektromobilität nicht allseits auf einhellige Zustimmung trifft, sondern sich sowohl in der öffentlichen Diskussion als auch in der wissenschaftlichen Literatur nach wie vor auch kritische Einschätzungen bezüglich der Zukunftsfähigkeit dieser Mobilitätsform finden.¹⁰

Vor diesem Hintergrund versucht der vorliegende Beitrag eine ökonomische Antwort auf die Frage zu geben, ob die verschiedenen Formen von Elektromobilität eine realistische Chance haben, in den nächsten Jahren nennenswerte Marktanteile zu gewinnen. Aus ökonomischer Sicht stehen dabei vor allem drei Aspekte im Mittelpunkt der Betrachtung. Zum einen ist dies die Fragestellung, wie die potenziellen ökologischen Effekte einer vermehrten Nutzung von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu den bestehenden konventionellen Mobilitätsformen einzuschätzen sind (Kapitel 2). Dabei sollen sowohl die umweltbezogenen Vorteile, aber auch die – bei einer umfassenderen Betrachtung der Elektromobilität in den Blick zu nehmenden – ökologischen Folgen näher untersucht werden. Jenseits dieser rein umweltbezogenen Perspektive sind darüber hinaus die mikroökonomischen Aspekte von Elektromobilität genauer zu beleuchten (Kapitel 3). Im Mittelpunkt dieser Betrachtung steht die Frage, unter welchen Rahmenbedingungen damit gerechnet werden kann, dass die potenziellen Nutzer dieser neuen Mobilitätsform vermehrt von konventionellen Fahrzeugen auf elektrisch angetriebene Fahrzeuge umsteigen werden. Oder anders formuliert: Welche Hemmfaktoren lassen sich identifizieren, die eine verstärkte Substitution zwischen beiden Mobilitätsalternativen gegenwärtig (noch) behindern. Darüber hinaus ist der Frage nachzugehen, welche makroökonomischen Effekte mit einer verstärkten Nutzung von Elektromobilität verbunden sein werden (Kapitel 4). Im Mittelpunkt dieser Überlegungen stehen gesamtwirtschaftliche Nutzen-Kosten-Überlegungen in Form einer Abschätzung der möglichen Auswirkungen dieser neuen (Mobilitäts-)Technologie auf Beschäftigung, Strukturwandel, Investitionsverhalten, Energiebedarf oder auch Rohstoffpreise, um nur einige in diesem Zusammenhang wichtige makroökonomische Kenngrößen zu nennen. Den Abschluss des Beitrags bildet eine Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse (Kapitel 5).

300 Fahrzeugen sowie Smart (Deutschland) mit 200 Fahrzeugen. Siehe zu den Daten Amann/Petersdorff (2010).

⁹ Siehe zu dieser Einschätzung auch Deutsches Clean Tech Institut (2010: 10).

¹⁰ Siehe stellvertretend den Beitrag von Döring/Aigner (2011).

2 Umweltwirkungen einer verstärkten Nutzung von Elektromobilität

Die am häufigsten genannten positiven Aspekte einer vermehrten Nutzung von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen sind die ökologischen Vorteile dieser Mobilitätsform in Gestalt eines im Vergleich zu konventionellen Antriebstechniken niedrigeren Energieverbrauchs und einer geringeren Luftverschmutzung. Die ökologischen Auswirkungen von Elektrofahrzeugen bedürfen jedoch einer genaueren Betrachtung, wobei grundsätzlich zwischen unmittelbaren (direkten) ökologischen Effekten und mittelbaren (zusätzlich zu berücksichtigenden) Umwelteffekten unterschieden werden kann.

2.1 Unmittelbare ökologische Effekte von Elektrofahrzeugen

Bezogen auf den Energieverbrauch gelten Elektrofahrzeuge im Vergleich zu herkömmlichen (Benzin oder Diesel betriebenen) Fahrzeugen als deutlich effizienter. So benötigen konventionelle Fahrzeuge – abhängig vom Fahrzeugtyp – gut zwei- bis viermal so viel Energie für das Zurücklegen derselben Wegstrecke. Beispielsweise beträgt der Energieverbrauch eines elektrisch angetriebenen Ultraleichtfahrzeugs ungefähr 10 kWh auf 100 Kilometern, was umgerechnet einem Verbrauch von 1 Liter Benzin entspricht. Aber auch wenn man schwere (auf die Nutzung von vier Personen ausgelegte) Fahrzeugtypen miteinander vergleicht, steigt der Energieverbrauch entsprechender Elektrofahrzeuge auf lediglich 20 kWh pro 100 Kilometer, was umgerechnet einem Benzinverbrauch von 2 Litern entspricht. Das gleiche Fahrzeug – allerdings ausgestattet mit einem herkömmlichen Verbrennungsmotor – benötigt demgegenüber für die gleiche Wegstrecke 5 Liter Diesel bzw. 8 Liter Benzin. Zu diesem positiven ökologischen Effekt eines vergleichsweise niedrigen unmittelbaren Energieverbrauchs ist bei der Bewertung von Elektrofahrzeugen noch darüber hinaus zu berücksichtigen, dass während des Fahrbetriebs nur geringe Lärmbelastigungen, keine Feinstaubemissionen sowie keine CO₂- oder NO_x-Abgase entstehen.¹¹

Jenseits dieser auf den ersten Blick positiven Umweltwirkung von Elektrofahrzeugen zeigen jedoch eine Reihe von Studien, dass unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus von entsprechenden E-Fahrzeugen mit vergleichbarer Größe und ähnlichen Ausstattungsmerkmalen wie bei treibstoffbetriebenen Fahrzeugen diese durch einen fast identischen Ausstoß an Treibhaus-

¹¹ Siehe stellvertretend für die genannten Daten zu den unmittelbaren ökologischen Effekten von Elektrofahrzeugen Engel (2005).

gasen pro Kilometer gekennzeichnet sind.¹² Ein eindeutiger Vorteil von Elektrofahrzeugen ist nur dann gegeben, wenn die benötigte Energie primär aus regenerativen Energiequellen gewonnen wird. Würde in Deutschland der einleitend für das Jahr 2020 politisch formulierte Zielwert von einer Million Elektroautos realisiert, so wäre damit ein Energiebedarf von rund 1,98 Mrd. kWh verbunden, was etwa 0,3 % des deutschen Stromverbrauchs in 2009 entsprechen würde. Mit Blick auf Österreich wäre die gleiche Zahl von Elektrofahrzeugen mit einem zusätzlichen Energiebedarf von 3 % verbunden, wenn man ebenfalls das Jahr 2009 als Bezugsbasis wählt. Hinzu käme ein weiterer Energiebedarf für Pedelecs, andere Elektrofahrzeuge sowie für den Betrieb von Stromtankstellen. Je höher dabei der Anteil an erneuerbaren Energien (Windkraft, Sonnenenergie, Wasserkraft, Bio-Energie) bei der Stromerzeugung ist, umso besser fällt die Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen aus. Geht man beispielsweise von einem Bruttostromverbrauch aus, der zu 30 % aus regenerativen Energien gewonnen wird, könnten eine Million Elektrofahrzeuge schätzungsweise 1,14 Mrd. Tonnen CO₂ vermeiden. Bei einem Anteil von 50 % erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung könnte der bestehende CO₂-Ausstoß sogar um rund 1,88 Mrd. Tonnen reduziert werden.¹³

Ein Land wie Österreich wäre bereits aktuell in der Lage, zumindest die zuerst genannte Einsparung an CO₂-Emissionen zu realisieren, da der Anteil an erneuerbaren Energiequellen aufgrund der vergleichsweise intensiven Nutzung von Wasserkraft bereits im Jahr 2009 bei über 29 % lag und bezogen auf das Jahr 2011 sogar mit einem Anstieg dieses Wertes auf 34 % gerechnet wird.¹⁴ Zumindest bezogen auf diesen ökologisch wichtigen Aspekt scheint Österreich für einen verstärkten Einsatz von Elektrofahrzeugen geradezu prädestiniert zu sein. Der Anteil an regenerativen Energien an der Stromerzeugung fällt demgegenüber in Deutschland mit 16 % (Stand 2010)¹⁵ merklich niedriger aus, so

¹² Siehe stellvertretend die Studie von Pehnt/Höpfner (2007). In ähnlicher Weise stellt auch die Agentur für Erneuerbare Energien für Deutschland fest: „Lädt ein Elektrofahrzeug den durchschnittlichen deutschen Strommix, so liegt sein Ausstoß mit 107 Gramm CO₂-Äquivalente pro Kilometer nur gering unter dem Niveau eines vergleichbaren konventionellen Verbrennungsmotors“ (zitiert nach Lamparter 2010). Berücksichtigt man die CO₂-Lebenswegbilanz (d.h. neben dem rein betriebsbedingten Schadstoffausstoß auch jenen der produktionsbedingten Vorkette), kommen zu den genannten 107 Gramm CO₂ pro Kilometer noch weiter knapp 40 Gramm CO₂ pro Kilometer hinzu. Dieser Wert für ein Elektroauto entspricht fast genau jenem Wert, der aktuell auch für Diesel Pkw veranschlagt wird (99 Gramm betriebsbedingte CO₂ pro Kilometer plus weitere 37 CO₂ pro Kilometer unter Einbezug der CO₂-Emissionen der Vorkette). Lediglich die CO₂-Lebenswegbilanz eines benzinbetriebenen durchschnittlichen Neuwagens fällt mit 227 Gramm CO₂ pro Kilometer deutlich höher als bei einem Elektrofahrzeug aus. Siehe zu diesen Werten auch Helmers (2011).

¹³ Siehe zu diesen Daten Deutsches Clean Tech Institut (2010: 38).

¹⁴ Siehe für diese Einschätzung den Beitrag von Buchacher/Menasse (2009).

¹⁵ Diese 16 % der Bruttostromerzeugung stammen in Deutschland aus der Nutzung von Windkraft, Biomasse, Wasserkraft, Photovoltaik sowie Müll. Nur wenn man auch die Energiegewinnung aus Kernkraft mit hinzurechnen würde, die in 2010 bei 23 % lag,

dass die unmittelbaren ökologischen Vorteile einer verstärkten Nutzung von Elektrofahrzeugen zum aktuellen Zeitpunkt nur in begrenztem Maße realisiert werden könnten. Richtet man darüber hinaus den Blick auf Länder wie China oder auch Indien, die als aufstrebende Schwellenländer zur Deckung ihres für das weitere wirtschaftliche Wachstum erforderlichen (rasant steigenden) Energiebedarfs vorrangig auf eine Stromgewinnung unter Nutzung fossiler Energieträger (Kohle) setzen, fällt die Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen entsprechend schlechter aus.¹⁶

Aber auch wenn der Anteil an erneuerbaren Energien an der gesamten Stromerzeugung sowohl in den Industrieländern als auch in den Ländern nachholender wirtschaftlicher Entwicklung in den kommenden Jahren deutlich ansteigen sollte, kann aus umweltökonomischer Sicht kritisch hinterfragt werden, ob eine Verwendung dieser Energieträger im Verkehrsbereich unter Berücksichtigung des aktuellen Entwicklungsstands der Elektromobilitäts-Technologie ebenso wie deren vorrangiger Nutzung im Bereich des Individualverkehrs sowohl unter Effizienz- als auch unter Ökologieüberlegungen die richtige Allokationsentscheidung wäre. Vielmehr wäre zu prüfen, ob die mit regenerativen Energien verbundene Vermeidung von klimaschädlichen Luftschadstoffen nicht zweckmäßiger in solchen gesellschaftlichen Bereichen zum Einsatz kommen sollte, wo ein aktuell vergleichsweise hoher Energieverbrauch (z.B. energieintensive Wirtschaftsbranchen oder auch der Bereich der privaten Haushalte jenseits des Mobilitätsaspektes) zu hohen CO₂-Emissionen führt, die auf diese Weise merklich reduziert werden könnten.

2.2

Zusätzlich zu berücksichtigende Umweltwirkungen

Ob eine verstärkte Nutzung von erneuerbaren Energien primär im Verkehrssektor und damit zur Erhöhung der ökologischen Effektivität von Elektrofahrzeugen erfolgen sollte, kann aber auch noch unter einem anderen Blickwinkel kritisch diskutiert werden. Der Grund hierfür kann im Energiespeicher (d.h. der Batterie) gesehen werden, der nach wie vor den problematischsten Teil eines Elektrofahrzeugs darstellt. Dies gilt nicht vorrangig aufgrund des Sachverhalts, dass – etwa im Fall der Verwendung einer Lithium-Ionen-Batterie – nur 86 % der gespeicherten Energie für den Antrieb des Fahrzeugs während der Betriebsphase zur Verfügung stehen, während die restlichen 14 % aufgrund von chemischen Reaktionen innerhalb der Batterie verloren gehen.¹⁷ Unter Um-

würde sich der Anteil der regenerativen Energien deutlich erhöhen. Der aufgrund der bekannten Risiken politisch angestrebte vollständige Ausstieg aus der Kernenergienutzung dürfte kurz- bis mittelfristig jedoch nur durch einen verstärkten Einsatz von fossilen Energiequellen zu realisieren sein, so dass zumindest kurzfristig mit keinem nennenswert höheren Anteil erneuerbarer Energien an der deutschen Stromerzeugung zu rechnen ist.

¹⁶ Siehe hierzu auch Deutsches Clean Tech Institut (2010: 38).

¹⁷ Siehe hierzu auch Assendorf (2009).

weltaspekten von größerer Bedeutung ist vielmehr, dass bereits der Herstellungsprozess einer solchen Batterie mit einem hohen Energiebedarf verbunden ist. Dies gilt nicht allein für die fabrikmäßige Fertigung der Batterie als solche. Vielmehr muss hier die gesamte Produktionskette (kritisch) in den Blick genommen werden, zu der vor allem auch die Extraktion der benötigten Rohstoffe (neben Lithium etwa ebenso Silizium) zu rechnen ist. Gerade mit letzterem ist dabei ein zum Teil nicht unerheblicher Schadstoffausstoß verbunden. Auch wenn hierzu keine exakten Daten vorliegen, dürfte allein der Sachverhalt diese Überlegungen stützen, dass zur Gewinnung der benötigten Rohmaterialien in den entsprechenden Grubenfeldern erhebliche Energiemengen sowohl im Rahmen des Schürfprozesses als auch beim (globalen) Transport aufgewendet werden müssen. Damit verbunden ist wiederum ein zusätzlicher Ausstoß an CO₂-Emissionen, der ebenfalls bei der Erstellung einer vollständigen Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen zu berücksichtigen wäre.¹⁸

Der erhebliche Energieverbrauch, der bezogen auf die gesamte Produktionskette bei der Herstellung einer Batterie anfällt, schlägt sich in der Energiebilanz eines Elektrofahrzeugs mit einem Durchschnittswert in Höhe von 48-50 Gramm CO₂ pro Kilometer nieder. Zusammen mit den CO₂-Emissionen, die sich im Rahmen der Erzeugung jener Energiemenge ergeben, die für den unmittelbaren Gebrauch eines Elektrofahrzeugs erforderlich ist (ca. 0,2 kWh pro Kilometer), resultiert daraus eine Gesamtemissionsmenge in der Größenordnung von rund 160 Gramm CO₂ pro Kilometer.¹⁹ Berücksichtigt man zudem, dass sowohl durch die technische Entwicklung energiesparender Motoren als auch durch einen vergleichsweise „zurückhaltenden“ Fahrstil die gegenwärtige CO₂-Bilanz konventioneller Fahrzeuge zukünftig noch verbessert werden kann, würden Elektrofahrzeuge ihren auf den ersten Blick bestehenden ökologischen Vorteil gegenüber treibstoffbetriebenen Fahrzeugen mehr oder weniger stark einbüßen.

Jenseits dessen ist noch ein weiterer Punkt von Bedeutung, der in Verbindung steht mit dem Gewicht der verwendeten Materialien bei der Herstellung eines Fahrzeugs (und hier insbesondere bei der Antriebstechnik). So beinhalten die Standardmotoren konventioneller Fahrzeuge (mit Öl gekühlte) Turboverstärker oder Kompressoren, welche aus sehr leichten Aluminiumteilen bestehen. Lediglich Pleuel, Pleuel, Pleuel, Pleuel sowie einige tragende Teile sind aus Stahl und damit durch ein größeres Gewicht gekennzeichnet. Im Unterschied dazu setzt sich der gesamte Antrieb eines Elektrofahrzeugs aus schweren Materialien zusammen: den Stahl- bzw. speziellen Eisenteilen des Magnetkreises, dem mit einer Metalllegierung versehenen Dauermagneten sowie den eben-

¹⁸ Siehe zu dieser Feststellung bereits Döring/Aigner (2011: 37).

¹⁹ Siehe zu dieser Angabe Assendorf (2009). Dieser Wert würde sich erst dann wieder zugunsten der Elektromobilität verbessern, wenn der zu deckende Energiebedarf weitgehend aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen werden könnte.

falls schweren Kupferwindungen. Darüber hinaus besitzen die für die Energiespeicherung benötigten Verbindungsleitungen – allesamt Kupferkabel – ein hohes Gewicht (insbesondere im Fall von Starkstromladekabeln bis zu 1000 Ampère). Unter ökologischen Aspekten gilt diesbezüglich die einfache Einsicht, dass mit einem größeren Gewicht zugleich der Energiebedarf und damit verbunden – bei bestehendem Energiemix – auch der CO₂-Ausstoß steigt.

Fasst man die bisherigen Überlegungen zusammen, ist zunächst festzuhalten, dass beim gegenwärtigen Stand der Nutzung von regenerativen Energiequellen zur Stromerzeugung sowie angesichts des Gewichts von mit konventionellen Fahrzeugen vergleichbaren Elektromobilen deren ökologischer Vorteil – wenn überhaupt – nur marginal ausfällt. In Anbetracht dieser eher ernüchternden Feststellung gewinnt allerdings ein weiterer Umwelteffekt von Elektrofahrzeugen an Relevanz, der bislang ausgeblendet wurde. So könnte sich ein zusätzlicher ökologischer Vorteil einer verstärkten Durchsetzung von Elektromobilität daraus ergeben, dass die Batterien von Elektroautos als ergänzende Stromspeicher innerhalb des gesamten Stromnetzes eingesetzt werden („Vehicle-to-Grid“).²⁰ Dem liegt die technisch anspruchsvolle Vorstellung zugrunde, dass auf Basis einer zweiseitigen „Kommunikation“ zwischen Fahrzeug und Stromnetz eine bestehende Flotte an Elektroautos zu einem virtuellen Regelkraftwerk verknüpft werden könnte. Dies wäre eine mögliche Lösung für das Problem der Bereitstellung großer Stromspeicherkapazitäten, welches vor allem aus der zusätzlichen Einspeisung von Sonnen- und Windenergie resultiert, bei denen es sich bekanntermaßen um keine kontinuierlichen und damit in gleichbleibender Quantität zur Verfügung stehende Energiequellen handelt. Die technische Logik des Stromnetzes zwingt jedoch dazu, dass Angebot und Nachfrage im Netz jederzeit übereinstimmen müssen. Im Fall einer schwankenden Energieerzeugung könnten jedoch zu deren Ausgleich die Batterien von Elektroautos als ein Speicherpuffer fungieren. Investitionen in die Entwicklung und Umsetzung solcher intelligenten Netzstrukturen („Smart Grid“) sind ökonomisch allerdings erst dann zu erwarten, wenn für die Zukunft mit einer nennenswerten Verbreitung von Elektrofahrzeugen gerechnet werden kann. Die Bestimmungsfaktoren einer entsprechend erhöhten Nachfrage nach Elektrofahrzeugen sind mehrheitlich mikroökonomischer Natur.

²⁰ Siehe hierzu und zu den nachfolgenden Ausführungen Engel (2006: 6). Siehe ebenso Deutsches Clean Tech Institut (2010: 43) sowie Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (2010: 6).

3 Mikroökonomische Bestimmungsfaktoren der Nutzung von Elektromobilität

Aus ökonomischer Sicht wird die Nachfrage eines Gutes (hier: Elektrofahrzeuge) durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst, zu denen unter anderem der Preis eines Gutes, der Preis naher Substitute (hier: treibstoffgetriebener Fahrzeuge), das Einkommen der potentiellen Nachfrager (als Bestimmungsfaktor der individuellen Zahlungsfähigkeit), die jeweiligen Bedürfnisse, Vorlieben und Geschmäcker (kurz: die Präferenzen als Bestimmungsfaktor der individuellen Zahlungsbereitschaft) sowie die Erwartungen in Hinblick auf die zukünftige Entwicklung des Marktes für das entsprechende Gut gehören.²¹ Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie wahrscheinlich der Wechsel von einem konventionellen Fahrzeug zu einem Elektrofahrzeug ist unter Berücksichtigung der damit verbundenen Opportunitätskosten (d.h. der für den Fall des Wechsels entgangenen Vorteile aus der Nutzung treibstoffgetriebener Fahrzeuge und deren charakteristischen Eigenschaften).

3.1 Nutzungskosten, Reichweite und Sicherheit von Elektrofahrzeugen

Für eine erste Einschätzung der mit einer verstärkten Nutzung von Elektrofahrzeugen verbundenen Opportunitätskosten kann ein Vergleich der direkten Nutzungs- bzw. Betriebskosten als zweckmäßig angesehen werden. Danach zeigen ökonomische Studien, dass die Energiekosten für den Gebrauch eines Elektrofahrzeuges sich im Durchschnitt auf rund 4 Euro pro 100 Kilometer belaufen, was lediglich der Hälfte dessen entspricht, was an direkten Kosten für die Nutzung eines treibstoffbetriebenen Fahrzeugs gegenwärtig zu veranschlagen ist. Allerdings sind im Fall des Elektrofahrzeugs weitere Kosten zu berücksichtigen, die aufgrund der Batterieabnutzung entstehen und sich auf rund 20 Euro je 100 Kilometer belaufen. Der Grund hierfür ist, dass bezogen auf den aktuellen Stand der Technik eine Batterie nach 250 bis zu 1.500 Ladevorgängen erneuert werden muss. Die Zahl der maximal zu realisierenden

²¹ Siehe hierzu stellvertretend als Standardwerke im Bereich der Mikroökonomie Man-kiw/Taylor (2008), Pindyck/Rubinfeld (2006) oder auch Samuelson/Nordhaus (1987). Herkömmlicherweise wird als weiterer Bestimmungsfaktor der Nachfrage auch die Anzahl der potentiellen Käufer genannt, die das gesamte Marktvolumen nachfrageseitig definiert. Da es bei den nachfolgenden Überlegungen vorrangig um Abwägungsgründe für die individuelle Kaufentscheidung von Elektrofahrzeugen geht, kann dieser Faktor jedoch vernachlässigt werden. Es sei dennoch darauf hingewiesen, dass auch die Anzahl der Käufer – wenngleich lediglich indirekt – die individuelle Kaufentscheidung beeinflussen kann. Dies ist dann der Fall, wenn eine große Anzahl an effektiven Käufern auf Seiten der Anbieter eines Gutes die Realisierung von Skaleneffekten ermöglicht. Die daraus resultierenden niedrigeren Stückkosten können – je nach Wettbewerbsintensität im betreffenden Markt – zu Preissenkungen beim angebotenen Gut führen, was sich wiederum positiv auf die individuelle Kaufbereitschaft auswirken kann.

Ladezyklen variiert dabei nicht nur in Abhängigkeit vom Batterietyp (Blei-Batterie, Nickel-Metallhydrid-Batterie, Lithium-Ionen-Batterie etc.), sondern auch unter Einfluss der Außentemperatur (siehe Abbildung 1).

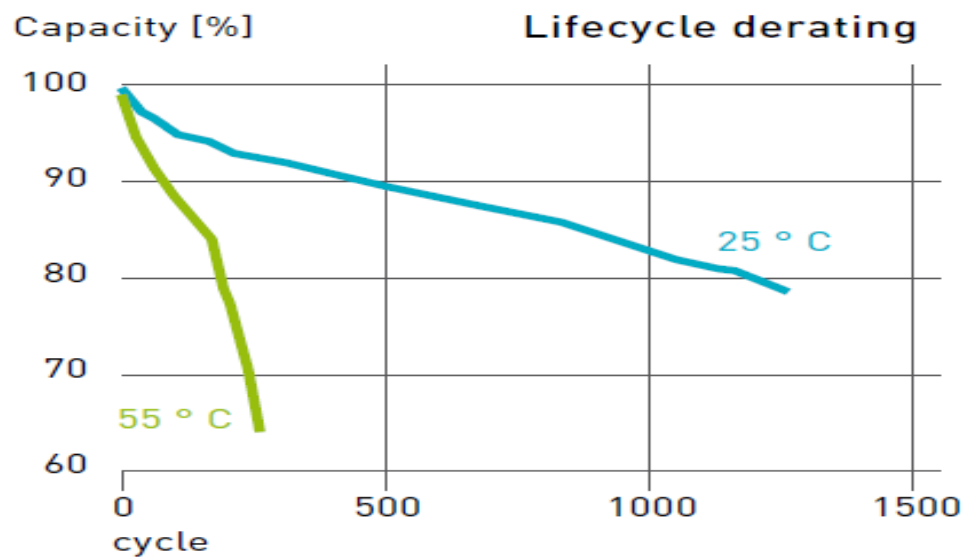


Abbildung 1: Abhängigkeit der Lebensdauer einer Batterie von der Temperatur

Quelle: Klima- und Energiefonds (2009).

Der erhebliche Unterschied in den direkten Nutzungskosten zwischen konventionell und elektrisch angetriebenen Fahrzeugen ist Ausdruck der divergierenden Energiedichte der verschiedenen Antriebsstoffe bzw. Speichermedien: Um die Energiedichte von einem Liter Dieselöl (annähernd 10 kWh) zu erreichen, bedarf es einer 333 kg schweren Blei-Batterie, einer 167 kg schweren Nickel-Metallhydrid-Batterie oder einer 55 kg schweren Lithium-Ionen-Batterie. Damit erreichen aktuell selbst modernste Akkus gerade einmal 8 % der energetischen Leistungsfähigkeit von Dieselöl. Und dies bei rund 5.000 Euro für eine Blei-Batterie, ca. 20.000 Euro für eine Nickel-Metallhydrid-Batterie sowie knapp 35.000 Euro für eine Lithium-Ionen-Batterie. Die Höhe der direkten Nutzungskosten eines Elektrofahrzeugs wird somit entscheidend von den Möglichkeiten der Speicherung von elektrischer Energie bestimmt. Je mehr Energie (kWh) sich folglich in einem Kilogramm Batterie unterbringen lässt, desto leichter und kleiner kann die Batterie werden und desto niedriger dürften die direkten Nutzungskosten ausfallen.²²

²² Der bisherige Fortschritt bei der Weiterentwicklung der Speichertechnologie verlief in den zurückliegenden Jahren und Jahrzehnten vergleichsweise langsam. Während die

Bezüglich der Präferenzen auf Seiten der Nachfrager kann davon ausgegangen werden, dass die potentiellen Nutzer von Elektrofahrzeugen die gleiche Qualität und Quantität des Gutes „Mobilität“ bezüglich Reichweite, zeitliche Verfügbarkeit oder Sicherheit erwarten werden. Auch in diesem Zusammenhang stellt wiederum die Batterie eine besondere Herausforderung dar. Problematisch ist hierbei zum einen die räumliche Reichweite von Elektrofahrzeugen, die gegenwärtig 150 bis 200 Kilometer beträgt, bevor die Batterie erneut aufgeladen werden muss. Im Vergleich zu einem treibstoffgetriebenen Fahrzeug (aktuelle Reichweite: 600 bis 1.000 Kilometer) weisen Elektromobile damit einen erheblichen Wettbewerbsnachteil auf. Hinzu kommt, dass die Reichweite eines Elektrofahrzeugs zudem von topographischen ebenso wie klimatischen Faktoren abhängt, d.h. je bergiger der Streckenverlauf und je wärmer die Außentemperatur, umso niedriger ist die Reichweite eines Elektrofahrzeugs.²³ Wird während einer Fahrt schließlich auch noch die Heizung oder Klimaanlage genutzt, kann die Leistungsfähigkeit um weitere 30-50 % reduziert werden. Für einen positiven Anreiz zugunsten einer verstärkten Nutzung von Elektromobilen gegenüber konventionellen Fahrzeugen wäre aus ökonomischer Sicht jedoch eine annähernd gleiche Reichweite erforderlich. Diese Einschätzung wird dadurch bestätigt, dass laut einer Umfragen in Deutschland im Jahr 2010 rund 87 % der potentiellen Nachfrager eine Reichweite von unter 250 Kilometern für nicht akzeptabel erachten²⁴ – und dies obwohl im Jahresdurchschnitt weniger als 10 % aller Fahrten oberhalb dieser Reichweitengrenze liegen. Das ist jedoch kein Widerspruch, sondern verdeutlicht aus ökonomischer Sicht lediglich den hohen Optionswert, der einer (entfernungsbezogen) jederzeit flexiblen Nutzung des eigenen Fahrzeugs seitens der Nachfrage beigemessen wird.

Aus der aktuell (noch) geringen Reichweite von Elektrofahrzeugen („low-range usage“) ergeben sich weitere Opportunitätskosten. Wenn in Anbetracht dessen potentielle Konsumenten die Gesamtheit ihrer Mobilitätsbedürfnisse in

ersten Kondensatoren zur Speicherung von elektrischer Energie bereits vor 250 Jahren erfunden wurden (Stichwort: Leidener Flasche), konnten erst mit Hilfe von Blei-Batterien seit dem Ende des 19. Jahrhunderts größere Energiemengen gespeichert werden. Aber erst mit Erfindung der Lithium-Ionen-Batterie vor rund 20 Jahren konnten Elektrofahrzeuge zu einer realistischen Alternative im Vergleich zu konventionellen Antriebsformen avancieren. Siehe hierzu auch Straßmann (2010). Es bleibt abzuwarten, inwieweit die gegenwärtigen Forschungsanstrengungen den technologischen Fortschritt in diesem Bereich beschleunigen können. Siehe zu diesem Punkt ebenso Klima- und Energiefonds (2009). Anstelle einer Reduzierung des Gewichts der Batterien auf dem Weg einer Erhöhung der Energiedichte, könnten die (gewichtsabhängigen) direkten Nutzungskosten aber auch durch die Verwendung von ultra-leichten Materialien in der Herstellung der Fahrzeuge verringert werden. In Frage kämen diesbezüglich beispielsweise Materialien aus Kohlenstofffasern, die allerdings aktuell – etwa im Vergleich zur gleichen Menge Aluminium – noch mehr als das 15-fache kosten. Siehe hierzu auch die entsprechenden Ausführungen in Lamparter (2010: 18).

²³ Siehe hierzu stellvertretend Boston Consulting Group (2010).

²⁴ Siehe zu diesem Umfragewert Deutsches Clean Tech Institut (2010: 103).

flexibler Weise befriedigen wollen, dann dürfte dies häufig die Anschaffung von mehr als nur einem Fahrzeug erforderlich machen, um auch größere Entfernungen („high-range usage“) problemlos bewältigen zu können. Dies bedeutet jedoch zum einen, dass die Zahlungsbereitschaft für ein Elektrofahrzeug – insbesondere dann, wenn die Anschaffung von zwei Fahrzeugen zwingend notwendig ist – tendenziell niedrig sein wird. Dies heißt zum anderen aber auch, dass die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen in starkem Maße vom jeweiligen Haushaltseinkommen abhängig sein wird. Oder anders formuliert: Nur Haushalte mit hohem Einkommen dürften überhaupt in der Lage sein, sich Elektrofahrzeuge kaufen zu können, während eine mengenmäßig große Nachfrage von Haushalten mit vergleichsweise niedrigen Einkommen aufgrund budgetärer Beschränkungen kaum zu erwarten ist. Aber selbst für den Fall, dass private Haushalte sich für die Anschaffung eines Elektrofahrzeugs entscheiden, hätten sie es bei der gegenwärtigen Marktsituation schwer, ein geeignetes Angebot zu finden. So sind sowohl Anzahl als auch Variationsbreite der Produkte im Vergleich zum Markt für treibstoffgetriebene Fahrzeuge zum aktuellen Zeitpunkt sehr niedrig (siehe Tabelle 1).

Neben der zeitlichen Verfügbarkeit eines den variierenden Präferenzen der Konsumenten entsprechenden Angebots kommen des Weiteren bislang nicht hinreichend geklärte Sicherheitsfragen hinzu. Auch hier ist aus Sicht möglicher Opportunitätskosten insbesondere die Batterietechnik wiederum ein Schlüsselfaktor. So stellt zum einen die Brand- und Explosionsgefahr nach wie vor eines der größten Probleme im Bereich der Speichertechnik dar, da Batterien grundsätzlich aus Materialien bestehen, die heftig miteinander reagieren können. Dies gilt beispielsweise für Lithium-Batterie-Varianten, die zwar allesamt vergleichsweise langlebig sind, zugleich aber auch als besonders explosiv gelten, da das hochreaktive Lithium zu Überhitzung neigt.²⁵ Inwieweit diesbezüglich die Entwicklung neuer Batterievarianten nicht nur zu einer größeren Reichweite sondern auch zu einem verbesserten Thermomanagement und damit zu einer höheren Nutzersicherheit führt, bleibt zum aktuellen Zeitpunkt noch abzuwarten. Darüber hinaus besteht noch ein weiteres Sicherheitsrisiko, welches aus dem hohen Gewicht der Batterien resultiert und dazu führt, dass diese im Fall einer Kollision zur Gefahr für die Insassen eines Fahrzeugs werden können. Diesbezüglich dürfte die Entwicklung leichter Batterien auch mit Blick auf ein verbessertes Unfallverhalten zwingend notwendig sein, um die Akzeptanzbereitschaft von Elektrofahrzeugen zu erhöhen.²⁶

²⁵ Siehe zu dieser Feststellung auch Straßmann (2010).

²⁶ Siehe zu dieser Einschätzung bereits Döring/Aigner (2011: 38). Siehe auch Pötscher et al. (2010: 22).

Tabelle 1: Erhältliche E-Fahrzeuge (Stand: Oktober 2011)

Marke	Modell	Leistung [kW]	Ladezeit [h]	Reichweite [km]
Bdoto	eDucato	140	8	90
Bdoto	eFiorino	60	8	110
Bdoto	eKangoo	60	8	110
Bdoto	eScudo	60	8	130
Bdoto	eTrafic	60	8	90
Citroen	C-Zero	49	ca. 6	150
EcoCraft	EcoCarriel EL	15	6-8	80
EcoCraft	EcoCarrier ES	15	6-8	80
Fiat	500	24,5	7	120
Fiat	Doblo Electric	15	6-8	120
Fiat	Fiorino Electric	15	6-8	120
Fiat	Scudo Electric	30	6-8	100
Land Rover	Defender	75	16	100-120
Mercedes	Sprinter	30	6-8	120
Mitsubishi	i-MiEV	49	ca. 6	150
NF	Nano	3	6-8	90
Peugeot	iOn	49	ca. 6	150
Piaggio	Porter	10,5	8	110
Renault	Master	30	6-8	110
REVA	NXR City	13	8	80
REVA	NXR Intercity	25	8	160
REVA	REVA i	6	6-8	80
Skoda	Fabia	30	6-8	80-100
Skoda	Praktik	30	6-8	80-100
Skoda	Roomster	30	6-8	80-100
Tazzari	Zero	15	5-9	140
Tesla	Roadster	221	4	250-400
Think	City	k.A.	10	120-180

Quelle: ÖAMTC (2011), eigene Darstellung.

Weitere Opportunitätskosten verbinden sich schließlich auch mit den Ladezeiten von marktüblichen Elektrofahrzeugen, die die Betankungszeiten eines konventionellen Fahrzeugs um ein Vielfaches übersteigen. Während bei letztgenanntem Fahrzeugtyp nicht mehr als 5 Minuten ausreichen, um rund 100.000 kWh im Tank aufzunehmen, benötigen Elektrofahrzeuge 8-12 Stunden für das Wiederaufladen der Batterie an der Haushaltssteckdose. Selbst im Fall einer Schnellaufladung („fast charging“) beansprucht der Ladevorgang üblicherweise ca. 30 Minuten.²⁷ Unabhängig von der Ladedauer kommt hinzu, dass 10-30 % der Energie beim Ladevorgang der Batterie verloren gehen, was für einen potentiellen Konsumenten noch ein weiterer Grund sein könnte, hinsichtlich der neuen Mobilitätsform zunächst eine abwartende Haltung einzunehmen.

3.2

Infrastrukturausstattung, Anschaffungs- und Lebenszykluskosten

Das Problem der vergleichsweise langen Ladezeiten verweist auf das grundlegendere Problem einer zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur unzureichend ausgebauten Infrastruktur für Elektrofahrzeuge. Dies betrifft neben entsprechenden Werkstätten und Servicestellen ebenso die Zahl an öffentlich zugänglichen Ladestationen, die ein möglichst schnelles Laden der Batterie ermöglichen. Entsprechende Schnellladestationen sind jedoch vergleichsweise teuer und daher aktuell nur für Firmen oder Forschungszwecke finanzierbar. Bis zum Jahr 2020 wird allerdings mit weiterentwickelten Ladesystemen gerechnet, die durch deutlich höhere Spannungen und Stromstärken gekennzeichnet sein werden.²⁸ Sowohl einige Hersteller von Elektroautos als auch einige Länder (Dänemark, Israel) bevorzugen Batteriewechsel anstelle von Ladestationen. Für ein solches System spricht, dass die ansonsten langen Stromladezeiten durch ein robotergestütztes Wechseln der Batterie deutlich kürzer ausfallen würden. Ein weiterer Vorteil wäre, dass Elektrofahrzeuge auf diese Weise deutlich günstiger verkauft werden könnten, da die Batterie zum Anschaffungszeitpunkt lediglich geleast werden muss, womit Elektrofahrzeuge gegenüber konventionellen Fahrzeugen an Wettbewerbsfähigkeit gewinnen könnten. Allerdings müssten entsprechende Wechselstationen sehr große Mengen an Batterien vorhalten, um den bestehenden Bedarf zu decken. Parallel dazu müssten aber auch die Stationen als solche aufgebaut werden, was in der Summe (Batterievorhaltung und Netz an Stationen) jedoch mit einem erheblichen Kapitalbedarf – bei ungesicherter betriebswirtschaftlicher Rentabilität – verbunden wäre. Ein solches Netz an Wechselstationen ist aber auch angesichts der bislang mangelnden Standardisierung der Batterien für die nähere Zukunft wenig realistisch.

²⁷ Siehe etwa Lamparter (2010) oder auch Pehnt/Höpfner (2007).

²⁸ Siehe hierzu und zu den nachfolgenden Ausführungen Deutsches Clean Tech Institut (2010: 39f.).

Damit ist auch nicht zu erwarten, dass die Anschaffungskosten eines Elektrofahrzeugs in absehbarer Zeit deutlich sinken werden. Wiederum vor allem aufgrund der Batterie liegen die Mehrkosten bei einem unteren Mittelklassewagen aktuell je nach Hersteller zwischen 10.000 und 15.000 Euro und damit um den Faktor 2,5 über den Anschaffungskosten eines konventionellen Fahrzeugs. Laut einer aktuellen Studie²⁹ werden jedoch die Anschaffungskosten von 89 % der Befragten beim Kauf eines Elektrofahrzeugs als besonders wichtig eingestuft. Es muss dabei gegenwärtig davon ausgegangen werden, dass auch im Jahr 2025 die Herstellungskosten eines Elektrofahrzeugs immer noch um rund 60 % über denen eines konventionellen Fahrzeugs liegen werden. In der gleichen Studie wird darauf verwiesen, dass die Konsumenten in Deutschland jedoch lediglich einen Preisaufschlag beim Elektrofahrzeug in Höhe von etwas mehr als 20 % (bzw. rund 2.500 Euro) akzeptieren würden. Eine andere Studie kommt für Österreich zu dem Ergebnis, dass zum aktuellen Zeitpunkt 40 % der potenziellen Nachfrager nicht bereit sind, Mehrkosten – egal in welcher Höhe – für Alternativentriebe in Kauf zu nehmen.³⁰ Als preisgünstiger erweisen sich Elektrofahrzeuge nur dann, wenn man die gesamten Kosten des Lebenszyklus („Total Cost of Ownership“) in den Blick nimmt und dabei zugleich von zukünftig sowohl steigenden Ölpreisen als auch sinkenden Batteriekosten ausgeht.

Eine entsprechende Studie der Boston Consulting Group aus dem Jahr 2009 vergleicht die unterschiedlichen Lebenszykluskosten verschiedener Antriebstechnologien mit geringem CO₂-Ausstoß (rein elektrischer Antrieb, alternative Antriebe jenseits reiner Elektromotoren einschließlich Hybridtechnologien, verbrauchsarme Verbrennungsmotoren) miteinander.³¹ Danach stellen zwar reine Elektroantriebe jene Antriebstechnologie dar, welche die größten Mengen an CO₂-Emissionen zu vermeiden in der Lage ist. Sie sind aus ökonomischer Sicht jedoch nicht die kosteneffektivste Form der CO₂-Vermeidung. Letzteres trifft vielmehr auf verbrauchsarme Verbrennungsmotoren zu, bei denen sich die Kosten zur Reduktion von einem Prozent CO₂-Emissionen bei gegebenen Energiepreisen auf 50-100 Euro belaufen. Demgegenüber entstehen bei reinen Elektroantrieben Vermeidungskosten in Höhe von 98-197 Euro. Während die umweltbezogene Kosteneffektivität bei der Kaufentscheidung potenzieller Nachfrager allerdings eine eher nachrangige Rolle spielen dürfte, trifft dies nicht in gleicher Weise auf die Höhe der Lebenszykluskosten zu. Die Studie zeigt, dass Elektrofahrzeuge aus Konsumentensicht unter Kostenaspekten vergleichsweise unattraktiv sein werden, solange der Ölpreis sich auf einem

²⁹ Siehe Arnold et al. (2010: 12). Siehe ebenso Deutsches Clean Tech Institut (2010: 39f.) sowie Pötschel et al. (2010: 23f.).

³⁰ Siehe hierzu die Umfrageergebnisse der entsprechenden Studie der Generali Gruppe (2010) für Österreich.

³¹ Siehe ausführlich BCG – Boston Consulting Group (2009). Siehe für eine Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse dieser Studie ebenso Döring/Aigner (2011: 38).

moderaten Niveau bewegt und die Einführung von Elektrofahrzeugen nicht zugleich staatlicherseits gefördert wird, was gegenwärtig weder in Österreich noch in Deutschland der Fall ist.³²

Elektrofahrzeuge müssen – laut der Studie – bei einem Vergleich der für einen Fünfjahreszeitraum berechneten durchschnittlichen Lebenszykluskosten als Funktion des Rohölpreises eines in Deutschland gekauften und gefahrenen Fahrzeugs mit einer der jeweils untersuchten Antriebstechnologien aktuell als (noch) vergleichsweise unattraktiv bewertet werden. Geht man von Batteriekosten in Höhe von 500 Euro (700 USD) je kWh aus, liegen die Lebenszykluskosten eines Elektrofahrzeugs deutlich über jenen eines Fahrzeugs mit verbrauchsarmen Verbrennungsmotor. Eine wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit des Elektrofahrzeugs wäre danach erst dann erreicht, wenn sich der Rohölpreis auf einem Niveau von 197 Euro (280 USD) je Barrel bewegen würde. Nur für den Fall, dass die gegenwärtigen Batteriekosten vergleichsweise stark sinken (z.B. auf 353 Euro bzw. 500 USD pro kWh), kann davon ausgegangen werden, dass die wirtschaftliche Attraktivität von Elektrofahrzeugen steigt. Dies wäre ab einem Rohölpreis in der Bandbreite zwischen 70 und 84 Euro (100 und 125 USD) je Barrel der Fall. Zum Vergleich: Aktuell bewegt sich der Rohölpreis auf dem Weltmarkt in einer Bandbreite zwischen 100 und 110 USD je Barrel (Stand: September 2011), während die Batteriekosten in Höhe von rund 700 USD je kWh zu veranschlagen sind. Damit muss zum gegenwärtigen Zeitpunkt davon ausgegangen werden, dass die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit rein elektrischer Antriebe – gemessen anhand der Lebenszykluskosten – noch nicht gegeben ist.

³² Dies gilt etwa nicht in Ländern wie Frankreich oder auch den USA, wo aktuell der Kauf von Elektrofahrzeugen durch staatliche Prämienzahlungen gefördert wird.

4 Makroökonomische Aspekte einer verstärkten Nutzung von Elektromobilität

Abweichend von den bisherigen Überlegungen ist die makroökonomische Perspektive nicht auf das individuelle Konsumentenverhalten ausgerichtet.³³ Vielmehr stehen hier die möglichen gesamtwirtschaftlichen Nutzen- und Kosteneffekte eines mehrheitlichen Umstiegs auf elektrisch betriebene Fahrzeuge im Mittelpunkt des Interesses. Hierzu zählen die Effekte einer intensivierten Nachfrage nach Elektrofahrzeugen auf das wirtschaftliche Wachstum und den Strukturwandel, damit verbundene Beschäftigungswirkungen ebenso wie Änderungen im gesamtwirtschaftlichen Innovations- und Investitionsverhalten, die Entwicklung auf den relevanten Rohstoffmärkten oder auch die Auswirkungen auf das staatliche Budget, um nur einige Aspekte zu nennen. Aufgrund des Tatbestands, dass bislang noch keine Studien vorliegen, welche die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen der Elektromobilität umfassend beleuchten, werden nachfolgend lediglich einige wichtige makroökonomische Aspekte schlaglichtartig hervorgehoben und diskutiert.

4.1 Zukünftiges Investitionsverhalten im Automobilssektor einschließlich komplementärer Produktkomponenten

Mit Blick auf den Automobilssektor als einer der volkswirtschaftlichen Schlüsselbranchen in Deutschland wie in Österreich kann gegenwärtig weder der Nachfrage der Kunden noch der technischen Entwicklung eine eindeutige Richtung für das Investitionsverhalten entnommen werden. So gehen etwa aktuelle Studien für Deutschland³⁴ davon aus, dass auch 2020 noch mehr als 95 % der Autos durch einen Verbrennungsmotor angetrieben werden. Dieser Marktanteil treibstoffbetriebener Fahrzeuge soll – so die entsprechende Prognose – auch bis 2030 lediglich auf 87 % zurückgehen. Für Österreich sehen die Zukunftsprognosen nicht anders aus.³⁵ Zwar zählt Deutschland gegenwärtig – neben den USA, Frankreich, China und Japan – zu jenen Ländern, die im Bereich der Elektromobilität weltweit als führend gelten, wenn man die Messergebnisse des „Electric Vehicle Index“³⁶ zugrunde legt. Die vierteljährlich er-

³³ Siehe zum Gegenstandsbereich der Makroökonomik im Überblick Blanchard/Illing (2009), Burda/ Wyplosz (2005), Mankiw (2003) oder auch Rittenbruch (2000).

³⁴ Siehe stellvertretend die Studie von McKinsey (2009).

³⁵ Siehe stellvertretend die Studie von Pötscher et al. (2009).

³⁶ Siehe Wirtschaftswoche Online (2010). Siehe zu dem von McKinsey entwickelten Index auch Götze/Rehme (2011: 4). Der Index umfasst neun Indikatoren, zu denen auf der Nachfrageseite (1) der aktuelle Marktanteil, (2) der prognostizierte Marktanteil, (3) die angebotenen Modelle von E-Autos, (4) die Fahrtkostensparnis durch E-Autos, (5) staatliche Zuschüsse sowie (6) die ökologischen und sonstigen Vorteile von E-Autos gehören. Auf der Angebotsseite kommen (7) der Anteil der E-Autos an der nationalen Fahrzeug-

hobenen Daten, die den Entwicklungsstand der Elektromobilität verschiedener Länder erfassen und die sowohl Indikatoren zur Nachfrage und Nutzung als auch zur Produktion von reinen Elektroautos ebenso wie Hybridautos umfassen, zeigen aber auch, dass Deutschland im Vergleich zu den anderen Ländern in der Spitzengruppe an Vorsprung verliert. Österreich taucht demgegenüber nicht unter den zwölf führenden Nationen im Bereich Elektromobilität auf, zu der – zusätzlich zu den bereits genannten – auch Länder wie Italien, Südkorea, Dänemark Großbritannien, Portugal, Spanien oder Irland gehören.

Grundsätzlich gilt für Deutschland wie für Österreich, dass Investitionen der Automobilhersteller in die Elektromobilität mit einem nicht unerheblichen unternehmerischen Risiko verbunden sind. Diese Unsicherheit verstärkt sich noch dadurch, dass sich selbst innerhalb der Alternativen zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch keine überlegene Variante abzeichnet. Die Hersteller schwanken vielmehr zwischen verschiedenen Formen von Antriebstechnologien, zu denen vor allem der Hybridantrieb, der Elektroantrieb mit einem kleinen Verbrennungsmotor zur Verlängerung der Reichweite, der reine Batteriebetrieb sowie die Brennstoffzelle zählen. Es kann in Anbetracht dessen nicht überraschen, dass sich das Investitionsverhalten auf solche Fahrzeugtypen konzentriert, die durch eine hohe „Multifunktionalität“ gekennzeichnet sind.³⁷ Dies impliziert, dass die Hersteller vorrangig die Entwicklung von Fahrzeugtypen vorantreiben, die durch eine prinzipielle Verwendbarkeit verschiedener Antriebstechnologien gekennzeichnet sind.

Ein weiterer bedeutsamer Investitionsbereich betrifft die Weiterentwicklung der Batterietechnologie, die – wie bereits an früherer Stelle dargelegt – eine Schlüsselkomponente für die zukünftige Marktentwicklung im Bereich der Elektromobilität darstellt.³⁸ Zum einen wird argumentiert, dass ohne grundlegende Innovationen im Batteriebereich in Gestalt einer deutlichen Verlängerung der Reichweite auf 500-700 Kilometer pro Batterieladung sowie einer Verkürzung der Ladezeiten auf 5-10 Minuten ein massenhafter Absatz von Elektrofahrzeugen auch 2020 nicht zu erwarten ist. Darüber hinaus sind die Batteriekosten ein wesentlicher Bestimmungsfaktor der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit von Elektrofahrzeugen. Allerdings divergieren Prognosen der Kostenentwicklung von Batterien in den nächsten Jahren vergleichsweise stark. Am besten geeignet sind hierbei noch solche Prognose-Modelle, bei denen die gesamten Batteriekosten in verschiedene Teilkostenkomponenten

produktion, (8) die Anzahl vorgestellter E-Auto-Prototypen nationaler Hersteller sowie (9) staatliche Förderung von Forschung und Entwicklung und sonstiger komplementärer Infrastruktur hinzu. Der Index gibt dabei an, zu wie viel Prozent ein Land den Grad an Elektromobilität erreicht, den Experten für das Jahr 2020 vorhersagen. Für die USA liegt danach der aktuelle Wert bei 41 %, für Frankreich bei 38,6 % und für Deutschland – ebenso wie für China – bei 28,6 %.

³⁷ Siehe zu dieser Feststellung auch Schramm (2010).

³⁸ Siehe hierzu und zu den nachfolgenden Ausführungen Boston Consulting Group (2009).

(Arbeitskräfteeinsatz, F&E, Materialien, Abschreibungen, Ausschuss, Handels-
 spanne etc.) zerlegt werden, um unter Berücksichtigung der Kosteneinfluss-
 faktoren für jede dieser Komponenten sowie unter der Annahme eines be-
 stimmten Produktionsvolumens die zukünftige Entwicklung der gesamten
 Batteriekosten abzuschätzen.

Die Verwendung entsprechender Modelle³⁹ führt zu dem Ergebnis, dass 70-
 75 % der Batteriekosten mit dem Produktionsvolumen variieren, d.h. in Ab-
 hängigkeit von der Herstellungsmenge können Skaleneffekte und damit nied-
 rigere Preise erzielt werden, die bis zum Jahr 2020 zu einer schrittweisen Re-
 duzierung der Batteriekosten führen sollen. Damit würde sich der bereits seit
 1999 abzeichnende Trend in der Entwicklung der Batteriekosten auch in den
 nächsten Jahren fortsetzen (siehe Abbildung 3). Allerdings zeigen diese Mo-
 dellrechnungen auch, dass bei 25-30 % der Batteriekosten (bzw. der entspre-
 chenden Komponenten, zu denen benötigte Rohstoffe ebenso wie handelsüb-
 liche Teile einer Batterie zählen) keine Skaleneffekte zu erwarten sind.

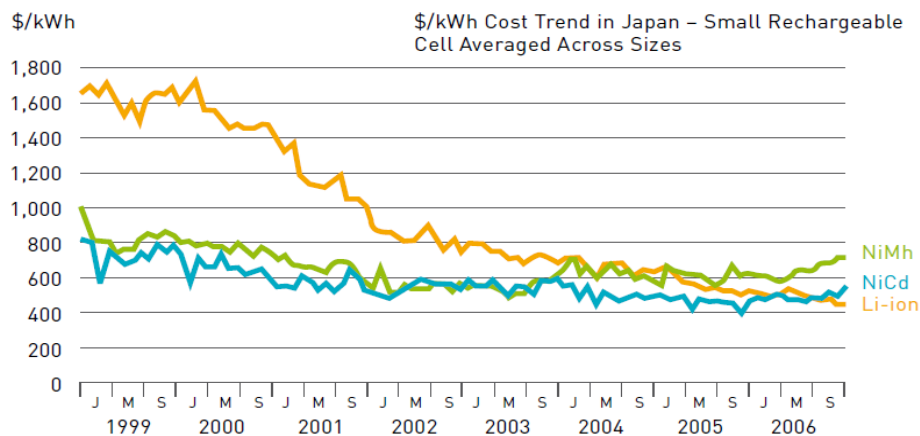


Abbildung 3: Vergleich der Batteriekosten für den Zeitraum 1999 bis 2006
 Quelle: Energie- und Klimafonds (2009).

Insgesamt wird der gesamte Batteriemarkt für Elektrofahrzeuge weltweit auf
 ein Volumen von 17 Mrd. Euro geschätzt, wobei mit einer Intensivierung des
 globalen Wettbewerbs entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Batta-
 rien zu rechnen ist. Dabei wird davon ausgegangen, dass insbesondere im Be-
 reich der Herstellung von Batteriezellen der Konkurrenzkampf zwischen den
 Produzenten besonders stark ausfallen wird. Mittel- bis langfristig wird dies –
 so die weitere Annahme – dazu führen, dass den Herstellern von Batteriezellen
 eine Schlüsselstellung innerhalb des gesamten Marktes für Elektromobilität

³⁹ Siehe für eine solche Prognose-Modell und die damit geschätzte Kostentwicklung BCG –
 Boston Consulting Group (2010).

zukommen wird. Dessen weiteres Wachstum hängt entscheidend vom Innovationsverhalten im komplementären Batteriemarkt ab. Schaut man sich diesbezüglich die Patentaktivitäten der jüngeren Vergangenheit in diesem Bereich an, ist deren Zahl im Zeitraum von 1999 bis 2008 weltweit um 17 % gestiegen. Dies entspricht einem doppelt so schnellen Wachstum wie in den zehn Jahren zuvor und liegt für den genannten Betrachtungszeitraum zudem um zehn Prozentpunkte über dem Wachstum aller übrigen Patentaktivitäten.⁴⁰ Hinsichtlich der unterschiedlichen Batterietypen waren dabei in Westeuropa, den USA, Japan und China knapp 62 % der Patentanmeldungen im Bereich der Speichertechnologie auf Lithium-Ionen-Batterien konzentriert, deren Zahl allein innerhalb des Zeitraums von 2005 bis 2008 um 26 % angestiegen ist.

Neben dem Batteriemarkt stellt die Bereitstellung der benötigten Stromladeinfrastruktur einen weiteren wichtigen Komplementärmarkt im Bereich der Elektromobilität dar.⁴¹ Geht man von schätzungsweise 14 Mio. Fahrzeugen mit einem elektrischen Antrieb insgesamt in Westeuropa, den USA, Japan und China im Jahr 2020 aus (davon knapp 11 Mio. als Hybrid), werden die Kosten zum Errichten einer komplementären Ladeinfrastruktur auf rund 14 Mrd. Euro veranschlagt, wovon allein 70 % auf Westeuropa und die USA entfallen. Bis 2015 – so die Erwartung – wird die Zahl der Ladestationen weltweit bis auf 4,7 Mio. ansteigen, wobei von den bis dahin neu verkauften Ladestationen allein die Hälfte aus China stammen wird, das bereits aktuell über komparative Vorteile in diesem Bereich verfügt. Ohne nachhaltige F&E-Anstrengungen der westlichen Industrieländer besteht die Gefahr, dass diesbezüglich noch ein größerer Teil des Marktes für Ladestationen in Zukunft an die asiatische Konkurrenz verloren gehen wird.

4.2

Auswirkungen auf die Entwicklung von Rohstoff- und Energiemärkten

Bei einer verstärkten Nutzung von Elektrofahrzeugen sollte aus gesamtwirtschaftlicher Sicht – neben den bislang bereits diskutierten Punkten – ein besonderes Augenmerk auf der zukünftigen Entwicklung der relevanten Rohstoffmärkte liegen. In dem Maße, wie die Lithium-Ionen-Batterien durch eine vergleichsweise hohe Leistungsfähigkeit gekennzeichnet sind, ist davon auszugehen, dass die Nachfrage nach diesem Leichtmetall in den kommenden Jahren deutlich ansteigen wird. Folgt man aktuellen Prognosen, soll sich der Markt für diesen Batterie-Typ bis zum Jahr 2020 – ausgehend vom Status quo

⁴⁰ Siehe zu den genannten Daten Boston Consulting Group (2010). Siehe ebenso Döring/Aigner (2011: 39).

⁴¹ Siehe hierzu und zu den nachfolgenden Ausführungen BCG – Boston Consulting Group (2009) sowie Deutsches Clean Tech Institut (2010). Es wird davon ausgegangen, dass mit Blick auf die genannte Zahl an elektrisch angetriebenen Fahrzeugen der Energiebedarf im Zeitraum von 2020 bis 2030 weltweit um jährlich 1 % ansteigen wird.

– auf ein Umsatzvolumen von rund 34,5 Mrd. Euro verdreifachen.⁴² Allerdings ist nicht davon auszugehen, dass alle Unternehmen, die aktuell entsprechende Batterien auf dem Markt anbieten, von dieser positiven Entwicklung profitieren werden. So ist die gesamte Branche – vergleichbar der IKT-Branche zu Beginn der 1990er Jahre – neben einigen großen Unternehmen durch eine Vielzahl kleinerer Betriebe gekennzeichnet, von denen nicht alle den anstehenden hohen Investitionsbedarf bewältigen können werden, der mit der skizzierten Marktexpansion verbunden sein wird. Folglich ist absehbar mit entsprechenden wirtschaftlichen „Schieflagen“ und Insolvenzen einzelner Unternehmen in diesem Bereich zu rechnen.

Auch ist des Weiteren zu berücksichtigen, dass gegenwärtig mehr als 30 % der globalen Produktion von Lithium durch ein einziges Unternehmen erfolgt (SQM in Chile), womit sich die Gefahr einer marktbeherrschenden Stellung mit entsprechend negativen Folgen für die zukünftige Preisentwicklung dieses Rohstoffes verbindet. Hinzu kommt darüber hinaus, dass aus Sicht der Industrieländer die mengenmäßig größten Vorkommen von Lithium in geopolitisch unsicheren Regionen liegen (Bolivien, Afghanistan, China). Bisweilen wird sogar gemutmaßt, dass die weltweiten Lithium-Vorkommen für eine Massenfertigung entsprechender Batterien nicht ausreichend sind. Mit beiden genannten Punkten verbindet sich die Schlussfolgerung, dass die aktuell im Mobilitätssektor bestehende Abhängigkeit von einem immer knapper werdenden Rohstoff (hier: Erdöl) lediglich durch die Abhängigkeit von einem anderen (sehr) knappen Rohstoff (Lithium) ersetzt wird. Aktuelle Schätzungen gehen allerdings davon aus, dass die bekannten Lithium-Vorkommen – selbst für den Fall einer stark ansteigenden Nachfrage – über eine zeitliche Reichweite von mehr als 100 Jahren verfügen.⁴³ Nichtsdestotrotz ist festzustellen, dass die erst für die Zukunft erwartete Knappheit dieses Rohstoffs bereits in der Gegenwart für entsprechende Spekulationen und damit einer Verteuerung von Lithium an den globalen Rohstoffbörsen sorgt.⁴⁴

Vor diesem Hintergrund ist verständlich, dass neben der reinen Förderung von Lithium zur Herstellung von Batterien auch das Recycling von Batterien an Bedeutung gewinnt. Dies gilt umso mehr, wie im Fall einer beschädigten Batterie mit 100 bis 1.000 Zellen nicht selten weniger als 5% der Zellen nicht mehr funktionsfähig sind. Grundsätzlich steht damit einer Wiederverwendung solcher beschädigten Batterien zumindest technisch nichts im Weg. Das Problem ist auch hier vorrangig ökonomischer Natur, was seinen Niederschlag darin findet, dass das Ersetzen nicht mehr funktionsfähiger Batteriezellen vergleichsweise arbeits- und folglich auch kostenaufwendig ist. Dies hat zur Fol-

⁴² Siehe zum genannten Marktvolumen etwa Schramm (2010).

⁴³ Siehe zu den zurückliegenden Ausführungen ebenso wie zu den genannten Daten Deutsches Clean Tech Institut (2010: 33).

⁴⁴ Siehe zu dieser Entwicklung auch Zacharakis (2010).

ge, dass gegenwärtig eine Vielzahl von Batterien einfach entsorgt wird, anstelle sie einer Wiederaufarbeitung zuzuführen. Da die Wiederverwertung von in der Batterie enthaltenen (knappen) Rohstoffen sowohl arbeits- als auch energieintensiv ist, zählt die Entwicklung fortschrittlicher Recycling-Technologien in diesem Bereich zu einer der Zukunftsaufgaben der Elektromobilität.⁴⁵ Zugleich kann hier aufgrund der skizzierten Rahmenbedingungen mit einem erheblichen künftigen Marktpotenzial gerechnet werden, so dass Investitionen in diesem Technologiesegment als vergleichsweise lohnend eingestuft werden können.

Eine Betrachtung der zum Markt für Elektrofahrzeuge komplementären Märkte wäre ohne die Einbeziehung des Energiemarktes und seiner zukünftigen Entwicklung unvollständig. Konzentriert man sich dabei zunächst auf die Mengen- und Preiseffekte und geht man von den bestehenden Versorgungsstrukturen in Deutschland oder Österreich aus, so zeigen Studien⁴⁶, dass bereits eine relativ kleine Zahl von Elektrofahrzeugen bei einem ungesteuerten Stromladeverhalten zu einer problematischen Leistungsnachfrage führen kann. Dies gilt insbesondere dann, wenn Elektrofahrzeuge in nennenswerter Zahl im Berufsverkehr genutzt werden, um nach Feierabend aufgeladen zu werden. In einem solchen Fall würde das Aufladen der Elektrofahrzeuge mit der ohnehin allabendlich vorhandenen Spitzenlast zusammentreffen, d.h. zu einem Zeitpunkt erfolgen, wo die freien Energieerzeugungskapazitäten sehr gering sind und der zusätzliche mengenmäßige Mehrbedarf zu steigenden Energiepreisen führt. Eine gezielte Lastverschiebung durch intelligente Steuerung der Stromladezeiten in die Nacht, wo genügend freie Kraftwerkskapazitäten verfügbar sind, würde nicht nur zur Aufrechterhaltung der Stabilität des Versorgungsnetzes beitragen, sondern könnte bei – im Unterschied zum Status quo – flexibler Preisgestaltung je nach Stromladezeit auch dafür sorgen, dass ein Teil der mit einer effizienteren Netzauslastung verbundenen Unternehmensgewinne an die Konsumenten (erhöhte Konsumentenrente) weitergegeben werden.

4.3

Auswirkungen auf Marktanteile, Wertschöpfungskette und Strukturwandel im Automobilssektor

Folgt man erneut der schon zitierten Studie der Boston Consulting Group⁴⁷, hängt die zukünftige Entwicklung der Nachfrage nach Fahrzeugen mit unterschiedlicher Antriebstechnologie von der Entwicklung der Rohölpreise ab, die den „Substitutionsdruck“ in diesem volkswirtschaftlichen Teilmarkt maßgeb-

⁴⁵ Siehe hierzu bereits Döring/Aigner (2011: 39).

⁴⁶ Siehe hierzu etwa die Untersuchungen von Schill (2010a: 5f.) und Schill (2010b).

⁴⁷ Siehe zu den nachfolgenden Modellierungsergebnissen Boston Consulting Group (2009).

lich beeinflusst. Dabei wurde eine Modellrechnung durchgeführt, bei der die verschiedenen Marktanteile für Neuzulassungen im Jahr 2020 bezogen auf fünf verschiedene Antriebstechnologien (reine Elektrofahrzeuge, Elektrofahrzeuge mit Reichweiteverlängerung, Hybridfahrzeuge einschließlich Elektroantrieb, Benzinfahrzeuge, Dieselfahrzeuge) unter Einbezug von vier Schlüsselmärkten (Westeuropa, USA, Japan, China) sowie im Rahmen von drei unterschiedlichen Szenarien bezüglich der Rohölpreisentwicklung (Preisverfall auf 40 Euro je Barrel, konstanter Preis in Höhe von 100 Euro je Barrel, Preisanstieg auf 220 Euro je Barrel) betrachtet wurden. In allen drei Modellrechnungen und in allen vier betrachteten Märkten bleiben konventionelle Verbrennungsmotoren (Benzin und Diesel) auch im Jahr 2020 die dominante Antriebstechnologie. Der Marktanteil von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben schwankt demgegenüber je nach Szenario zwischen 12 und 45 %, wobei im Fall eines konstant bleibenden Rohölpreises auf dem heutigen Niveau mit einem Marktanteil von 28 % gerechnet werden kann.

Bezogen auf verschiedene Fahrzeugkategorien wird in der genannten Studie darüber hinaus davon ausgegangen, dass reine Elektrofahrzeuge noch am stärksten innerhalb des urbanen Raumes zum Einsatz kommen werden (Kategorie des „city car“).⁴⁸ Schon innerhalb der Gruppe der „Kleinwagen“ wird dieser Antriebstechnik eine geringere Relevanz beigemessen, wobei als Gründe für diese Einschätzung sowohl auf das Problem der geringen Reichweite als auch auf die im inter-urbanen Raum nicht hinreichende Ausstattung mit Stromladestationen verwiesen wird. Mit Blick auf die beiden Kategorien der mittelgroßen und großen Fahrzeuge werden innerhalb der alternativen Antriebstechnologien vor allem Hybrid-Fahrzeugen die größten Marktchancen eingeräumt (geschätzter Marktanteil für das Jahr 2020: 18-26 %). Es ist jedoch zu beachten, dass die Ergebnisse der genannten Modellrechnungen mit mehr oder weniger großen Unsicherheiten verbunden sind.

Mit einer größeren Prognosesicherheit ist demgegenüber die Einschätzung versehen, dass bei einer verstärkten Nutzung von Elektrofahrzeugen das Geschäft mit den Motoren in Zukunft erheblich an wirtschaftlicher Bedeutung gewinnen wird. Dabei ist damit zu rechnen, dass vor allem die Zulieferunternehmen den Fahrzeugherstellern Wertschöpfungsanteile streitig machen werden. Ausschlaggebend für diese Verschiebung innerhalb der Wertschöpfungskette dürfte sein, dass im Unterschied zum Markt für Verbrennungsmotoren der Komponentenmarkt für Elektromotoren und Batterien nach jüngsten Schätzungen volumenmäßig mehr als doppelt so groß sein wird. Allein im Bereich der Motoren wird hierbei bis zum Jahr 2030 mit einem Umsatzanstieg in Deutschland um 150 % auf dann 459 Mrd. Euro gerechnet. Damit wird der erwartete Umsatzanstieg im Bereich der Herstellung von Antrieben wesentlich schneller verlaufen als jener im Bereich der Fahrzeugproduktion. Inwieweit

⁴⁸ Siehe hierzu auch Pötscher et al. (2010: 59ff.).

dabei die aktuell bestehenden Innovationsvorsprünge asiatischer Unternehmen im Komponentenmarkt für Elektromotoren (vor allem bei der Batterietechnologie) aus europäischer Sicht aufgeholt werden können, kann zum gegebenen Zeitpunkt nicht abgeschätzt werden.⁴⁹ Soll jedoch eine dauerhafte Importabhängigkeit verbunden mit einem Verlust an Wertschöpfungsanteilen und Arbeitsplätzen im Bereich des Automobilssektors vermieden werden, sind erhebliche – auch staatlich geförderte – F&E-Anstrengungen erforderlich, wobei allein für Deutschland der Bedarf an entsprechenden F&E-Mitteln aktuell auf rund 4 Mrd. Euro geschätzt wird.

Jenseits der zuletzt genannten großräumigen Strukturverschiebungen im globalen Maßstab wird es aber auch bezogen auf den Automobilssektor in den einzelnen Ländern (so etwa auch in Deutschland) aller Voraussicht nach zu einem Strukturwandel kommen. Dabei werden insbesondere die Bereiche der Informations- und Kommunikationstechnik, der Energieversorgung sowie der traditionellen Automobilhersteller in Zukunft enger zusammenarbeiten (müssen), um geeignete Geschäftsmodelle zu entwickeln, die im Unterschied zur Vergangenheit nicht mehr allein auf den Verkauf von Fahrzeugen ausgerichtet sein werden, sondern die vielmehr die Vermittlung attraktiver umfassender Mobilitätskonzepte zum Gegenstand haben werden.⁵⁰ Dabei haben alle Elemente der neuen Wertschöpfungskette (Rohstoffbeschaffung, Fahrzeugherstellung, Zulieferung bei Motoren, Batterien und Leistungselektronik, Stromversorgung und Ladestationen, neue Geschäfts- und Dienstleistungsmodelle) das Potenzial zur Schaffung von zusätzlichen Arbeitsplätzen. Allein die entsprechende Schätzung für Deutschland geht von ca. 250.000 neu generierten Arbeitsplätzen bis zum Jahr 2020 aus. In Ländern wie den USA oder auch China dürfte die Zahl der zusätzlichen Arbeitsplätze angesichts der massiven finanziellen Fördermaßnahmen zur Anschaffung von Elektrofahrzeugen sogar noch höher ausfallen.

Zwar liegen für Österreich keine aktuellen Schätzungen zukünftig zu erwartender Beschäftigungseffekte im Fall einer verstärkten Nutzung von Elektrofahrzeugen vor. Demgegenüber – anders als für Deutschland – ist eine Modellrechnung verfügbar, die in schematischer Form die gesamtwirtschaftlichen Nutzen- und Kosteneffekte eines deutlichen Anstiegs der Zahl von Elektroautos in Österreich einander gegenüberstellt. Zwar ist die von PriceWaterhouseCoopers angefertigte Studie⁵¹ vorrangig auf die Auswirkungen des vermehrten Einsatzes von Elektrofahrzeugen auf die Energiewirtschaft ausgerichtet. Sie umfasst jedoch auch eine vereinfachte Analyse der volkswirtschaftlichen

⁴⁹ Siehe hierzu stellvertretend Andresen/Fasse (2010: 22).

⁵⁰ Siehe zu dieser Einschätzung ebenso wie zu den nachfolgenden Ausführungen Deutsches Clean Tech Institut (2010: 70f.). Siehe hierzu auch Pötscher et al. (2010: 65ff.) ebenso wie McKinsey (2009: 27).

⁵¹ Siehe ausführlich PriceWaterhouseCoopers (2009). Siehe für eine Zusammenfassung der Ergebnisse ebenso Döring/Aigner (2011: 39f.).

Effekte, die mit diesem Mehreinsatz für Österreich verbunden sein könnten. Ausgangspunkt der Modellrechnung ist die Annahme, dass der Marktanteil von Elektroautos bis zum Jahr 2020 auf 20 % ansteigen wird, was einer Zahl von rund 1 Mio. Fahrzeugen entsprechen und zu einer Steigerung der Energienachfrage um etwa 3 % führen würde. Die Kosten für die Ausstattung mit Stromtankstellen werden in der Studie mit ca. 650 Mio. Euro veranschlagt. Um auch die Auswirkungen auf den öffentlichen Sektor zumindest ansatzweise mit zu berücksichtigen, wird zudem beachtet, dass gegenwärtig die Mineralölsteuereinnahmen teilweise zur Finanzierung der Aufwendungen im Bereich des Erhalts und Ausbaus der Verkehrsinfrastruktur beitragen. Eine gestiegene Zahl an Elektrofahrzeugen würde hier zu einer finanziellen Lücke im öffentlichen Haushalt in Höhe von rund 894 Mio. Euro führen. Da Elektrofahrzeuge ebenso wie konventionelle Fahrzeuge die bestehende Verkehrsinfrastruktur nutzen, müssten diese Aufwendungen zwingend anderweitig gedeckt werden.

Neben diesen gesamtwirtschaftlichen Kosten lassen sich aber auch – folgt man der Studie – diverse Nutzeneffekte identifizieren. Zum einen führt die verstärkte Nutzung von Elektrofahrzeugen selbst aufgrund von Mehreinnahmen aus der Umsatzsteuer und Energieabgabe durch den erhöhten Verkauf sowie die Nutzung von Strom zu gestiegenen Steuereinnahmen in Höhe von geschätzten 95 Mio. Euro. Daneben würde sich durch die schrumpfende Zahl treibstoffbetriebener Fahrzeuge die bestehende Abhängigkeit von Ölimporten reduzieren, was zu entsprechend geringeren Ausgaben in Höhe von bis zu 739 Mio. Euro führen kann. Des Weiteren impliziert der mit der elektrischen Antriebstechnologie einhergehende Rückgang von CO₂-Emissionen eine Vermeidung von Umweltschäden und damit verbundenen umwelterhaltenden Maßnahmen in einer Größenordnung von ca. 73 Mio. Euro. Schließlich lassen sich auch für den Energiesektor positive Nutzeneffekte in Form von direkten Einsparungen in Höhe von 349 Mio. Euro benennen. Sie resultieren daraus, dass durch den vermehrten Einsatz von Elektrofahrzeugen bei Verwendung intelligenter Speichersysteme („Vehicle-to-Grid“ bzw. „Smart Grid“) die vorhandenen Netzkapazitäten im Bereich der Energiewirtschaft effizienter genutzt werden können, so dass – trotz gesteigener Gesamtnachfrage – die Energiepreise relativ zum Status quo sinken könnten.⁵² Zum anderen induziert dieser Effekt darüber hinaus, dass aufgrund der genannten Effizienzgewinne auch die Investitionskosten innerhalb des Energiegewinnungssektors vergleichsweise niedriger ausfallen werden (geschätzte Einsparung: 1.035 Mio. Euro). Stellt man die geschätzten Nutzen- und Kostengrößen einander gegenüber, ergibt sich im Rahmen der Modellrechnung ein positiver Nettoeffekt durch den vermehrten Gebrauch von Elektrofahrzeugen für Österreich in Höhe von 750 Mio. Euro.

⁵² Siehe zu dieser Einschätzung auch Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (2010: 6).

5

Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

Vor dem Hintergrund der zurückliegenden Ausführungen zu den mikroökonomisch bedeutsamen Eigenschaften von Elektrofahrzeugen (Nutzungskosten, Anschaffungskosten, zeitliche Flexibilität der Nutzung, räumliche Reichweite etc.) ist ohne massive staatliche Förderanreize in absehbarer Zukunft mit keiner weitverbreiteten Nutzung von Elektromobilität zu rechnen. Dies gilt für Deutschland ebenso wie für Österreich und lässt den in beiden Ländern bis zum Jahr 2020 politisch als wünschenswert angesehenen Nutzungsgrad dieser Antriebstechnologie als unrealistisch erscheinen, wenn keine grundlegenden Innovationen im Bereich der Elektromobilität (insbesondere bei der Batterietechnologie) erfolgen. Dies schließt jedoch nicht aus, dass in bestimmten Marktnischen der Gebrauch von Elektrofahrzeugen umweltbezogen wie in wirtschaftlicher Hinsicht als zweckmäßig eingestuft werden kann. Dies betrifft vor allem den urbanen Raum, wo ein bislang wesentlicher Nachteil der Elektromobilität in Gestalt der geringen Reichweite keine oder eine lediglich untergeordnete Rolle spielt. Zudem eignen sich die städtischen Verdichtungs- und Agglomerationsräume nicht nur für eine verstärkte Nutzung von Elektroautos, sondern auch von E-Fahrrädern und E-Motorrädern. Für die Überwindung größerer räumlicher Distanzen dürften – bezogen auf den aktuellen Stand der Technik – demgegenüber am ehesten Hybridfahrzeuge für eine größere Nachfrage sorgen.

Die mit der Elektromobilität verknüpfte Erwartung positiver ökologischer Effekte wird sich aber nur dann erfüllen, wenn der nationale oder regionale Energiemix weit überwiegend aus regenerativen Energiequellen besteht. Zudem ist die gesamte Wertschöpfungskette bei der Beurteilung der ökologischen Wirkung von Elektrofahrzeugen in den Blick zu nehmen, was in der Regel zu einer Verschlechterung der Umweltbilanz dieser Antriebstechnologie im Vergleich zu konventionellen Antriebstechniken führt.

Aus makroökonomischer Sicht gilt zunächst grundsätzlich, dass Elektroautos ebenso wie Hochleistungsbatterien sowohl kapital- als auch wissensintensiv hergestellt werden, was beide Technologiesegmente dafür prädestiniert, um in Industrieländern wie Österreich oder Deutschland für positive Investitions-, Wachstums- und Beschäftigungseffekte zu sorgen. Trotz vieler noch bestehender Unklarheiten bezüglich der zu erwartenden gesamtwirtschaftlichen Effekte ist aber zumindest schon jetzt sicher, dass es für den Fall wachsender Marktanteile der Elektromobilität zu einer Neuverteilung der Wertschöpfungsanteile innerhalb des Automobilssektors sowohl zwischen bisherigen Produzenten und Zulieferern als auch zwischen alten und neuen Marktakteuren (Energieerzeuger, IKT-Branche) kommen wird. Ob der Elektromobilität mittel- bis langfristig der Durchbruch gelingt und es in der Tat zu einer solch grundlegenden Veränderung innerhalb des Automobilssektors kommen wird, hängt

letztlich sowohl vom technischen Fortschritt vor allem im Bereich der Energiespeichertechnik als auch der (Preis-)Entwicklung auf den komplementären Rohstoff- und Energiemärkten ab, da beide Einflussfaktoren einen entscheidenden Einfluss auf das Kostensenkungspotential bzw. die Wirtschaftlichkeit und damit die gesellschaftliche Durchsetzungsfähigkeit von Elektromobilität haben.

In Tabelle 2 findet sich eine zusammenfassende Darstellung der wichtigsten ökologischen und ökonomischen Implikationen von Elektromobilität. Zwar ist man sich auch im Automobilssektor sicher, dass die Elektromobilität zu den zukunftsweisenden Antriebstechniken zählt. Nichtsdestotrotz muss davon ausgegangen werden, dass bei dieser zwar umweltfreundlichen, aber nach wie vor teuren Alternative im Vergleich zu konventionellen Antriebstechniken mit einer langen Anlaufphase mit Blick auf eine breite gesellschaftliche Nutzung zu rechnen ist

Tabelle 2: Zusammenfassung der ökologischen und ökonomischen Effekte von Elektromobilität

	Energieverbrauch	CO₂-Emissionen	Gesamtemissionen	Sonstiges
Ökologische Effekte einer verstärkten Nutzung der Elektromobilität	Aufgrund einer höheren Energieeffizienz liegt der Energieverbrauch im Vergleich zu konventionellen Antriebstechniken bei gleichem Fahrzeugtyp um den Faktor 2,5 bis 4 niedriger.	Umfang der Vermeidung von CO ₂ -Emissionen hängt ab vom Energiemix (d.h. dem Anteil an regenerativen Energien). Zusätzlich: geringe Lärm-Emissionen, keine Feinstaub-Emissionen.	Unter Einbezug aller CO ₂ -Emissionen der gesamten Wertschöpfungskette (d.h. insbesondere auch der Batterie-Herstellung) nur noch geringe Vorteile gegenüber konventionellen Antriebstechniken.	Bei intelligenter Vernetzung der Elektrofahrzeuge mit dem Stromversorgungsnetz (Vehicle-to-Grid) Energieeinsparungen aufgrund besserer Netzauslastung möglich.
	Nutzungskosten	Nutzungseigenschaften	Gesamtkosten	Infrastruktur
Mikroökonomische Aspekte einer verstärkten Nutzung der Elektromobilität	Direkte Betriebskosten liegen um die Hälfte niedriger, bei Hinzurechnung der Kosten für die Batterie für gesamte Nutzungsdauer allerdings um den Faktor 2 über den Betriebskosten eines konventionellen Fahrzeugs.	Eine um den Faktor 3-6 niedrigere Reichweite (verringert sich noch weiter in Abhängigkeit von Topographie und Klima); Sicherheitsrisiken aufgrund von chemischen Prozessen in Batterie sowie deren Gewicht im Fall von Umfällen.	Aufgrund der Batterie liegen die gesamten Anschaffungskosten bei gleichen Fahrzeugtypen um 5.000 bis 15.000 € über denen eines konventionellen Fahrzeugs; wirtschaftlich Konkurrenzfähig ab einem Rohölpreis von 197 € je Barrel.	Infrastruktur für eine flächendeckende Nutzung zum Zeitpunkt (noch) nicht hinreichend ausgebaut; sehr hohe Energieladezeiten (8-12 Stunden bei Normalladung, 30 Minuten bei Schnellladung, zum Vergleich: 3 Minuten bei konventionellem Pkw).
	Rohstoffmarkt	Energiemarkt	Innovationen	Strukturwandel
Makroökonomische Aspekte einer verstärkten Nutzung von Elektromobilität	Vor allem das für Hochleistungsbatterien benötigte Lithium weltweit nur in wenigen (geopolitisch zum Teil unsicheren) Regionen verfügbar; Dauer der Vorkommen aktuell: 100 Jahre; zukünftige Preisentwicklung von Oligopolverhalten und Börsenspekulationen beeinflusst.	Steigerung des Energiebedarfs abhängig von „Flottengröße“; Sicherung stabiler Energiepreise erfordert bereits bei kleinen „Flottengrößen“ eine Stromlademanagement; Bedarf für flexible Preisgestaltung zur zeitlich effizienten Allokation der Stromladezeit.	Starker Anstieg der Patentaktivitäten insbesondere im Bereich der Batterietechnologie; geschätztes Kostensenkungspotenzial bei Batterien: 70-75 %; im Fahrzeugbereich Konzentration auf „multifunktional“ nutzbare Fahrzeugtypen (neben reinen Elektrofahrzeugen v.a. Hybridfahrzeuge).	Verschiebung der Wertschöpfungsanteile von bisherigen Fahrzeugherstellern auf Zulieferer (vor allem Produzenten von Elektromotoren und Batterien) sowie weitere Akteure Energiewirtschaft, IKT-Branche bezogen auf Energiebereitstellung sowie intelligentes Lade- und Mobilitätsmanagement.

Quelle: Eigene Zusammenstellung

6 Literaturverzeichnis

- Amann, M. und W. v. Petersdorff (2010): Alles hängt an der Batterie, in: Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung (18. April 2010), S. 38.
- Andresen, T. und M. Fasse (2011): Zulieferer profitieren vom Elektroauto, in: Handelsblatt (3 Januar 2011), S. 22-23.
- Arnold, H., Kuhnert, F., Kurtz, R. und W. Bauer (2010): Elektromobilität – Herausforderungen für Industrie und öffentliche Hand, Frankfurt am Main und Stuttgart.
- Asendorf, D. (2009): Die Mär vom emissionsfreien Fahren, in: Die Zeit, Nr. 39 vom 17. September 2009, S. 38.
- Blanchard, O. und G. Illing (2009): Makroökonomie, 4. Auflage, München et al.
- Boston Consulting Group (2009): The Comeback of the Electric Car? Boston.
- Boston Consulting Group (2010): Batteries for Electric Cars – Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020, Boston.
- Buchacher R. und S. Menasse (2009): Zukunftsreich, in: Profil, Nr. 33 vom 10. August 2009, S. 74-79
- Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (2010): Strategie und Instrumente sowie prioritäre Anwender- und Einsatzbereiche für den Nationalen Einführungsplan Elektromobilität, Wien.
- Burda, M.C. und C. Wyplosz (2005): Makroökonomie – eine europäische Perspektive, 2. Auflage, München.
- Deutsches Clean Tech Institut (2010): eMobilität – CleanTech-Branche: Treiber im Fokus, Bonn.
- Döring, T. und B. Aigner (2011): E-Mobility – Realistic Vision or Hype? In: Electrical Review, Vol. 87, S. 37-40.
- Engel T. (2005): Das Elektrofahrzeug als Regelenergiekraftwerk des Solarzeitalters, Online: http://www.object-farm.org/Solarkonzepte/Mobilitaet/V2G/V2G_Regelenergiekraftwerk_Solarzeitalter_112005.pdf.
- Engel, T. (2006): Vehicle to Grid – Das Elektroauto als Netzpuffer, in: Solarmobil Mitteilung, Nr. 63, S. 8-9.
- Generali Gruppe (2010): Generali-Autostudie 2010 – Autofahrer steigen wieder mehr aufs Gas, Presseinformation vom 4. Mai 2010.
- Götze U. und M. Rehme (2011): Elektromobilität – Herausforderungen und Lösungsansätze aus wirtschaftlicher Sicht, TU Chemnitz, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, WWDP 108-2011.
- Helmers, E. (2011): E-Auto schlägt Diesel, in: Die Zeit, Nr. 42 vom 13. Oktober 2011, S. 37.
- Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (2010): Dossier Elektromobilität und Dienstleistungen, Arbeitsbericht Nr. 39-2010, Berlin.
- Klima- und Energiefonds (2009): e-connected – Abschlussbericht, Wien.
- Lamparter, D.H. (2010): Volle Ladung, in: Die Zeit, Nr. 31 vom 29. Juli 2010, S. 17-18.

- Lamparter, D.H. (2011): Statt Abgas nur Wasser, in: Die Zeit, Nr. 9 vom 24. Februar 2011, S. 30.
- Mankiw, N.G. (2003): Makroökonomik, 5. Auflage, Stuttgart.
- Mankiw, N.G. und M.P. Taylor (2008): Grundzüge der Volkswirtschaftslehre, 4. überarbeitete und erweiterte Auflage, Stuttgart.
- Mas-Colell A., Whinston M.D. und J.R. Green (1995): Microeconomic Theory, Oxford.
- McKinsey Deutschland (2009): Wettbewerbsfaktor Energie – Neue Chancen für die deutsche Wirtschaft, Frankfurt am Main.
- ÖAMTC (2011): Übersicht E-Modelle. Online unter: www.oeamtc.at/?id=2500%2C1138283%2C%2C [Stand: 20.10.2011].
- Pehnt M. und U. Höpfner (2007): Elektromobilität und erneuerbare Energien, Heidelberg und Wuppertal.
- Pindyck, R.S. und D.L. Rubinfeld (2003): Mikroökonomik, 5. Auflage, München et al.
- Pötscher, F., Winter, R. und G. Lichtblau (2010): Elektromobilität in Österreich – Szenario 2020 und 2050, Wien.
- PriceWaterhouseCoopers (2009): Auswirkungen von Elektrofahrzeugen auf die Stromwirtschaft, Wien
- Rittenbruch, K. (2000), Makroökonomie, 11. Auflage, München.
- Samuelson, P.A. und W.D. Nordhaus (1987): Volkswirtschaftslehre – Grundlagen der Makro- und Mikroökonomik, Band 2, Köln.
- Schill, W.-P. (2010a): Elektromobilität – Kurzfristigen Aktionismus vermeiden, langfristige Chancen nutzen, in: DIW Wochenbericht, Nr. 27-28, S: 3-9.
- Schill, W.-P. (2010b): Electrical Vehicles in Imperfect Electricity Markets, DIW Discussion Papers, No. 1084, Berlin.
- Schramm, M. (2010): Elektroautos sind nicht aufzuhalten, in: Die Welt (3. April 2010), S. 19.
- Stelzer, J. (2010): Mühelos bergauf – Das Geschäft mit E-Fahrrädern läuft, in: Die Zeit, Nr. 37 vom 9. September 2010, S. 27.
- Straßmann, B. (2010): Zeit für das Elektroauto?, in: Die Zeit, Nr. 47 vom 18. November 2010, S. 47.
- Wirtschaftswoche Online (2010): Wie Evi die Bedeutung der Elektromobilität misst (<http://www.wiwo.de/unternehmen-maerkte/wie-evi-die-bedeutung-der-elektromobilitaet-misst-427720/>) (21.04.2010).
- Zacharakis, Z. (2010): Wie im Rausch – Mit der Elektromobilität haben auch Spekulanten das Lithium entdeckt, in: Die Zeit, Nr. 34 vom 19. August 2010, S. 28.