

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](mailto:iwmedien@iwkoeln.de)

[www.iwmedien.de](http://www.iwmedien.de)

Druck: Hundt Druck GmbH, Köln

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Globale Rahmenbedingungen im Weltautomobilmarkt</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>E-Mobilität: Was ist gemeint?</b>	<b>14</b>
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
<b>4</b>	<b>Herausforderungen an die E-Mobilität</b>	<b>29</b>
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
<b>5</b>	<b>Arbeitskräftebedarf der E-Mobilität</b>	<b>58</b>
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
<b>6</b>	<b>Die Kundensicht: Wann sich ein Elektroauto lohnt</b>	<b>73</b>
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
<b>7</b>	<b>Fazit</b>	<b>100</b>
	<b>Literatur</b>	<b>102</b>
	<b>Kurzdarstellung / Abstract</b>	<b>109</b>
	<b>Die Autoren</b>	<b>110</b>

# 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 (CO<sub>2</sub>) 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 Elektrofahrzeuge<sup>1</sup> 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

---

<sup>1</sup> 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 <sub>2</sub> -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