



## Elektromobilität

12. September 2011

Sinkende Kosten sind conditio sine qua non

Eine gemeinsame Studie mit:



Institut der deutschen  
Wirtschaft Köln

www.  
dbresearch.de

### Autoren

Eric Heymann  
+49 69 910-31730  
eric.heyman@db.com

Oliver Koppel  
IW Köln  
+49 221 4981-716  
koppel@iwkoeln.de

Thomas Puls  
IW Köln  
+49 221 4981-766  
puls@iwkoeln.de

### Editor

Tobias Just

### Publikationsassistentz

Sabine Berger

Deutsche Bank Research  
Frankfurt am Main  
Deutschland  
Internet: [www.dbresearch.de](http://www.dbresearch.de)  
E-Mail: [marketing.dbr@db.com](mailto:marketing.dbr@db.com)  
Fax: +49 69 910-31877

### DB Research Management

Thomas Mayer

**Auf der Elektromobilität ruhen große Hoffnungen.** Da die Ölreserven der Erde endlich sind und der Ölpreis steigen wird, soll Strom als alternativer Kraftstoff im Straßenverkehr einen Ausweg aus dieser „Kostenfalle“ aufzeigen. Zudem erhofft man sich einen Beitrag zum Klimaschutz, wenn der Strom für Elektrofahrzeuge durch erneuerbare Energien erzeugt wird.

**Da die Marktdurchdringung der E-Mobilität nur allmählich erfolgt, schätzen wir die First-Mover-Vorteile von Unternehmen gering ein.**

Eine Herausforderung für die Autoindustrie ist es, F&E-Aktivitäten hochfahren zu müssen, ohne dass diesen Investitionen kurzfristig ein entsprechender Markt gegenübersteht. Gleichzeitig müssen Autobauer die Energieeffizienz der konventionellen Antriebe stetig verbessern, die weiterhin das Kerngeschäft darstellen.

**In Deutschland können batterieelektrische Autos (BEV) im Jahr 2020 bei hoher staatlicher Förderung und schnellem technischen Fortschritt einen Marktanteil an den Pkw-Neuzulassungen von 6% bis 8% erreichen.** Ökonomisch wünschenswert wäre jedoch, wenn sich die Technologie primär aufgrund des technischen Fortschritts durchsetzte; dann dürfte der Marktanteil die 3%-Marke im Jahr 2020 aber wohl nicht überschreiten.

**Insgesamt sorgen vor allem die hohen Kosten der E-Mobilität dafür, dass sie in den kommenden Jahren ein Nischenmarkt bleiben wird.** Sinkende Kosten sind daher die wichtigste Bedingung, um das langfristig große Potenzial der Elektrifizierung des Antriebsstrangs heben zu können.

**Rohstoffverfügbarkeit, Stromverbrauch und -herkunft sowie Ladeinfrastruktur sind ein zweitrangiges Problem.** Auch die Reichweite der Fahrzeuge ist zunächst kein K.O.-Kriterium; die potenziellen Erstkunden werden sich an diesen limitierenden Faktor anpassen.

**Um Leitanbieter in der E-Mobilität zu werden, sind viele Fachkräfte notwendig.** Wir schätzen, dass allein der jährliche Bedarf an Akademikern relevanter Fachrichtungen von aktuell rund 20.000 auf etwa 26.000 Personen im Jahr 2020 steigen wird. Diesen Bedarf zu decken, wird eine große Herausforderung für die Branche.

**Die staatliche Förderung der E-Mobilität ist ein schmaler Grat.** Kaufprämien sind teuer – und das Gegenteil von Technologieoffenheit. Die Unterstützung der Grundlagenforschung ist dagegen zu befürworten. Auch die Mehrfachanrechnung von BEV auf das CO<sub>2</sub>-Flottenziel der Hersteller könnte ein Hebel sein.

**Unter dem Strich gleicht der Weg in die elektromobile Zukunft einer Evolution und nicht einer Revolution.** BEV sind dabei nur eine Option. Im Spektrum der E-Mobilität stehen Plug-in-Hybride (PHEV) und Autos mit Range Extender (REEV) in direkter Konkurrenz zu ihm. Als wirtschaftlichste Alternative kommen auf Mittel- und Langstrecken vorerst verbrauchsoptimierte Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor und insbesondere im Stadtverkehr Voll-Hybrid-Autos in Frage.

## 1. Hoffnungsträger Elektromobilität

Aktuell elektrisiert das Thema Elektromobilität (E-Mobilität) die Öffentlichkeit. Dabei ist diese Technologie gar nicht neu. Vor gut 100 Jahren waren Elektroautos und Benziner noch auf Augenhöhe. Dann haben sich jedoch die fossilen Energieträger Benzin und Diesel durchgesetzt. Warum rückt die 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 in diesem Bereich?

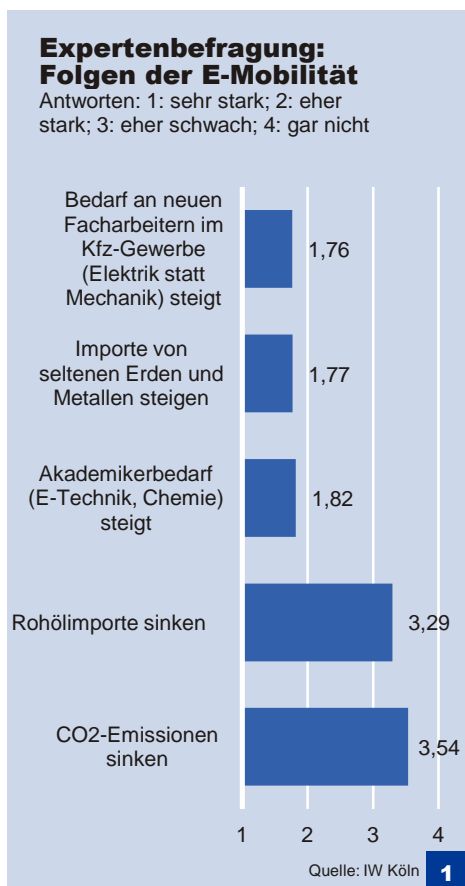
Die Antworten hierauf basieren im Kern auf der Hoffnung, dass die E-Mobilität dazu beitragen kann, wirtschaftliche, ökologische und soziale Probleme des Straßenverkehrs abzumildern oder zu lösen:

- Die Ölreserven der Erde sind endlich, und der Ölpreis dürfte in Zukunft steigen. 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.
- Wenn man zudem unterstellt, dass der Strombedarf für Elektrofahrzeuge durch erneuerbare Energien gedeckt wird, sinken die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs.
- Der höhere Wirkungsgrad von Elektrofahrzeugen und die niedrigen lokalen Schadstoff- und Lärmemissionen sprechen aus ökologischer Sicht ebenfalls für die E-Mobilität.
- Erneuerbare Energien werden wichtiger. In Deutschland soll ihr Anteil am Stromverbrauch bis 2020 von zuletzt knapp 20% auf 35% steigen. Da die Stromerzeugung aus Erneuerbaren stark schwankt, sollen Batterien der Elektrofahrzeuge als Pufferspeicher dienen und damit ein Baustein zur Stabilität der Stromnetze bzw. zur Versorgungssicherheit werden.
- Die Bundesregierung verfolgt das Ziel, bis zum Jahr 2020 etwa 1 Mio. Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen zu bringen.<sup>1</sup> Dies geht einher mit der Idee, Leitmarkt und Leitanbieter im Bereich E-Mobilität zu werden.
- Mitunter wird die E-Mobilität als Teil innovativer Verkehrssysteme gesehen. Diese sollen sich durch eine bessere, IT-gestützte intermodale Vernetzung der Verkehrsträger, eine flexiblere Nutzung von Fahrzeugen und veränderter Eigentümerstrukturen auszeichnen. So würden sich Automobilhersteller in Kooperation mit ÖPNV-Unternehmen zu Anbietern von integrierten Mobilitätskonzepten wandeln.
- 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 ihrer individuellen Präferenzen sehr unterschiedlich gewichten.

### **Sind die Erwartungen an die E-Mobilität realistisch?**

Im folgenden Bericht werden wir analysieren, wie realistisch die Erwartungen an die E-Mobilität sind. Wir gehen ferner der Frage nach, mit welchen marktwirtschaftlichen und ordnungspolitischen Instrumenten Regierungen die E-Mobilität unterstützen wollen und

<sup>1</sup> Die 1 Mio. Elektrofahrzeuge im Jahr 2020 umfassen laut Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) übrigens 45% batterieelektrische Autos, 50% Plug-in-Hybrid-Autos sowie 5% Plug-in-Hybrid-Nutzfahrzeuge.



**Schrittweise Elektrifizierung des Antriebsstranges:**

Auf dem Weg vom konventionellen Fahrzeug zum Elektroauto gibt es Abstufungen:

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

**Voll-Hybrid:** Als Voll-Hybrid werden Fahrzeuge bezeichnet, die über einen Elektromotor und eine Verbrennungsmaschine verfügen, wobei der elektrische Antriebsstrang auf kurzen Strecken rein elektrisches Fahren ermöglicht. Die Batterie kann über Bremskraftrückgewinnung geladen werden, die eigentliche Energiequelle im Fahrzeug ist aber der Verbrennungsmotor.

**Plug-in-Hybrid:** Der Plug-in-Hybrid (PHEV) verfügt ebenfalls über einen elektrischen und einen konventionellen Antriebsstrang. Der elektrische Antriebsstrang ist aber so dimensioniert, dass ein großer Teil der Fahrleistung elektrisch erfolgen kann. Ein weiteres Kennzeichen ist die Option, die Batterie am Stromnetz aufzuladen. Ein PHEV verfügt also über zwei Energiequellen.

**Hybrid mit Range Extender:** Beim Range Extender (REEV) ist der Elektromotor alleine für den Vortrieb zuständig. Der eingebaute Verbrennungsmotor dient als Generator, mit dem im Bedarfsfall die Batterie geladen werden kann, was aber auch über das Stromnetz möglich ist.

**Reines Elektrofahrzeug:** Das batterieelektrische Fahrzeug (BEV) besitzt ausschließlich einen elektrischen Antriebsstrang, dessen Batterie über das Stromnetz gespeist wird.

können. Zudem schätzen wir das Marktpotenzial für Elektrofahrzeuge in Deutschland im Jahr 2020, basierend auf verschiedenen Szenarien. An geeigneten Stellen ergänzen wir unsere Aussagen durch die Ergebnisse der Befragungen des Umweltexpertenpanels des Instituts der deutschen Wirtschaft.

**E-Mobilität: Was ist gemeint?**

Vorab ist natürlich die Frage zu klären, was wir im vorliegenden Bericht unter „E-Mobilität“ verstehen. Es gibt nämlich viele Möglichkeiten, Elektrizität im Autoverkehr einzusetzen (siehe Textbox). Wenn wir in diesem Bericht von E-Mobilität sprechen, meinen wir reine Elektrofahrzeuge. Wenn wir von dieser Definition abweichen, weisen wir ausdrücklich darauf hin. Wir beziehen uns primär auf Pkw. Nur am Rande gehen wir auf die Potenziale elektrischer Antriebe bei Zweirädern und Nutzfahrzeugen ein.

**2. Herausforderungen an die E-Mobilität**

In diesem Kapitel beleuchten wir verschiedene Aspekte der E-Mobilität. Wir orientieren uns dabei so weit wie möglich an der Wertschöpfungskette.

**Rohstoffbedarf – Importabhängigkeit bleibt bestehen**

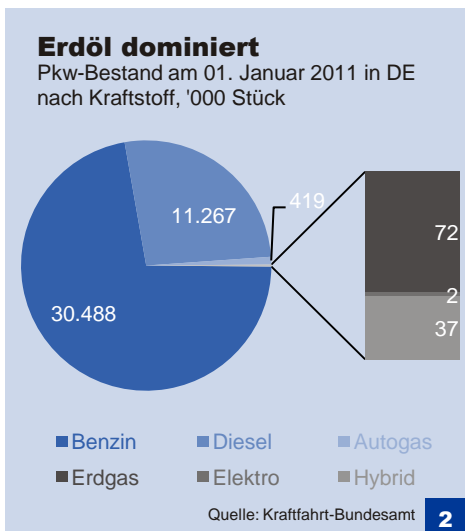
Der Straßenverkehr basiert auf dem Primärenergieträger Erdöl. Von 42,3 Mio. Pkw in Deutschland fahren 99,7% ausschließlich mit einem Kraftstoff, der aus Rohöl gewonnen wird. Der wichtigste alternative Primärenergieträger ist das Erdgas. Das batterieelektrische Auto (BEV) ist heute hingegen weltweit ein absolutes Nischenprodukt. So waren Anfang 2011 gerade einmal 2.307 BEV in Deutschland beim Kraftfahrt-Bundesamt gemeldet.

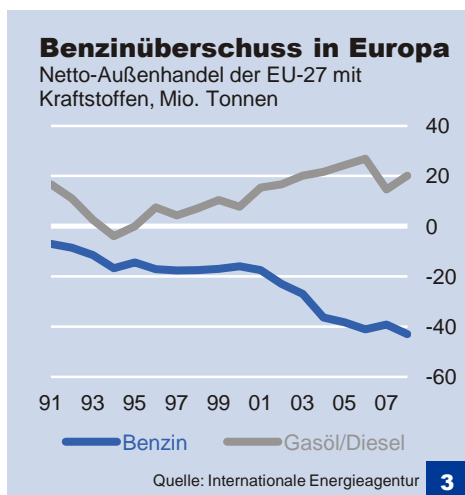
Der Rohölpreis hat sich zwischen 1998 und 2011 in etwa verzehnfacht. Angesichts steigender Nachfrage und endlicher Rohölvorräte wollen viele Länder ihre Ölimporte verringern. Zumindest in Europa werden BEV bis 2020 praktisch keinen Einfluss auf die Erdölimporte haben, da die Importmenge primär vom Dieserverbrauch in Europa bestimmt wird. BEV dürften dagegen vor allem kleine Benziner ersetzen, bei deren Kraftstoff die EU ohnehin Netto-Exporteur ist (siehe unten).

Raffinerien können aus einer Tonne Rohöl nur ein relativ fixes Verhältnis an Diesel und Benzin gewinnen. Da in Europa der Dieselmotor im Pkw-Bestand weit verbreitet ist, hat Europa heute Benzin im Überfluss und ist knapp an Dieseldieselkraftstoff. Aus diesem Grund hat die EU-27 im Jahr 2008 netto 43 Mio. Tonnen Benzin exportiert. Dies entspricht mehr als dem doppelten Benzinverbrauch Deutschlands. Hauptabnehmer waren die USA. Zeitgleich wurden netto 20 Mio. Tonnen Diesel in die EU-27 importiert. Eine Reduktion des Benzinverbrauchs würde zunächst wohl vor allem den Benzinexport erhöhen, während sich die vom Dieselbedarf geprägten Rohölimporte kaum ändern dürften. Das gilt insbesondere, da Elektromotoren im dieseldieselbetriebenen Schwerlastverkehr nicht eingesetzt werden können. Die weitere Verbesserung der Verbrennungsmotoren ist daher auf absehbare Zeit der effektivere Weg, den Rohölimportbedarf zu reduzieren.

**Kein geologisches Versorgungsrisiko bei Lithium**

Durch den Bau von Elektroautos entstehen zusätzliche Importabhängigkeiten. Von den Materialien, die zum Bau moderner Batterien benutzt werden, gibt es in Europa keine abbauwürdigen Vorkommen. Eine herausgehobene Stellung nimmt dabei das Lithium ein.





3

### Grundbegriffe der Geologie

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

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

**Statische Reichweite:** Der Zeitraum, über den die Rohstoffreserven bei konstanter Fördermenge ausreichen.

### Recycling wird wichtiger

Da Lithium von allen Metallen das höchste elektrochemische Potenzial aufweist, ist es auch aus künftigen Batterien nicht wegzudenken. Mit zunehmender Elektrifizierung des Antriebsstrangs wird die Lithiumnachfrage daher spürbar steigen.

Prinzipiell ist Lithium weltweit in ausreichender Menge vorhanden. Im Jahr 2010 wurden global 25.300 Tonnen Lithium gefördert. Die Weltreserven werden vom US Geological Service (USGS) auf 13 Mio. Tonnen geschätzt, was eine statische Reichweite der Lithiumreserven von über 500 Jahren ergibt. Hinzu kommen Ressourcen von 33 Mio. Tonnen. Problematischer ist die räumliche Verteilung der Vorkommen. Die weltweiten Lithiumreserven konzentrieren sich auf Chile mit 7,5 Mio. Tonnen und China mit 4,5 Mio. Tonnen. Die größten Lithiumressourcen finden sich in Bolivien mit 9 Mio. Tonnen.

### Wenige Unternehmen dominieren den Markt

Auch auf Seiten der Lithium produzierenden Unternehmen ist eine sehr hohe Marktmachtkonzentration vorhanden. Die fünf größten Unternehmen teilen sich 80% des Marktes. Der größte Teil des Lithiumhandels wird in Form von Lithiumcarbonat abgewickelt, welches ein Grundstoff für die Produktion von anderen Lithiumverbindungen ist. Die Weltnachfrage nach Lithiumcarbonat ist in den letzten Jahren stark angestiegen. Nach Angaben des führenden Produzenten von Lithiumcarbonat (Chemetall) ließen sich aus der globalen Lithiumproduktion aktuell etwa 135.000 Tonnen Lithiumcarbonat herstellen, die oben genannten Reserven signalisieren, dass die Förderung von Lithium und damit auch die Herstellung Lithiumcarbonat stark ausbaufähig ist. Hauptabnehmer sind Aluminiumerzeuger, aber auch Batteriehersteller weiten die Nachfrage stark aus. Als Daumenregel kann gelten, dass etwa 0,6 kg Lithiumcarbonat notwendig sind, um eine Lithium-Ionen-Batterie mit einer Speicherkapazität von 1 kWh zu bauen. Chemetall schätzt, dass für die Produktion von 1 Mio. BEV knapp 15.000 Tonnen Lithiumcarbonat notwendig wären. Die Zahlen verdeutlichen, dass die geologische Verfügbarkeit von Lithium selbst dann kein Hindernis für den Ausbau der E-Mobilität darstellen dürfte, wenn sie sich zu einem Massenmarkt entwickeln würde. Ein Versorgungsrisiko könnte lediglich aufgrund der hohen Marktkonzentration entstehen. So bleibt abzuwarten, ob Länder wie China und Bolivien dauerhaft verlässliche Lieferanten sein werden.

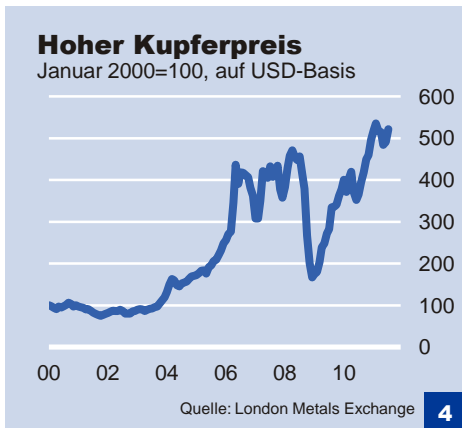
Aufgrund der wachsenden Nachfrage ist mit einem weiteren Anstieg der Preise für Lithiumcarbonat zu rechnen. Der Verkaufspreis pro Kilo Lithiumcarbonat stieg zuletzt stark an. Da der Kilopreis damit immer noch unter EUR 10 liegt, ist der Anteil des Lithiums an den Gesamtkosten eines Batteriesystems noch zu gering, um von einem Preisrisiko zu sprechen.

Die in einer Batterie verwendeten Rohstoffe können wieder aufbereitet werden. Dies spricht dafür, die Einführung von Lithium-Ionen-Batterien im Automobilbereich mit dem Aufbau eines umfassenden Batterierecyclings zu flankieren. Dadurch können Versorgungsrisiken minimiert werden. Allerdings sind die heutigen Recyclingverfahren gemessen an den Rohstoffpreisen noch teuer.

### Kupferbedarf steigt

Ein weiterer wichtiger Rohstoff für Elektroautos ist Kupfer, das vor allem für den Elektromotor und das auf höhere Stromflüsse ausgelegte Bordnetz verwendet wird. Die weltweite Minenproduktion betrug 2010 etwas mehr als 16 Mio. Tonnen. Bei geschätzten Reser-





4

**Seltene Erden für E-Mobilität wichtig**

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

In der Vergangenheit hat China durch eine aggressive Preispolitik praktisch ein Monopol bei der Förderung seltener Erden errungen. Gut 97% der Weltproduktion von 124.000 Tonnen kommen laut USGS aus China. Inzwischen nutzt China diese Position als politisches Instrument und hat beispielsweise Exportbeschränkungen erlassen. In der Folge wurden in anderen Ländern neue Minenprojekte angestoßen, die aber noch nicht die Märkte beliefern. Ähnlich wie beim Lithium bestehen in diesem Bereich also eher politische Risiken für die Rohstoffversorgung im Bereich der E-Mobilität. Allerdings wächst die Nachfrage nach seltenen Erden rasant. Es wird mit einem Nachfrageplus von 50% bis 2015 gegenüber heute gerechnet, so dass es in den nächsten Jahren möglicherweise zu Versorgungsengpässen und/oder hohen Preiserhöhungen kommen kann, da der Abschluss von Vorkommen oftmals ein langwieriges Verfahren ist. Das Preisrisiko für die E-Mobilität ist aber recht gering, da die eingesetzte Menge pro Fahrzeug klein ist.

ven von 600 Mio. Tonnen ergibt das eine statische Reichweite der Reserven von 37 Jahren. Das ist ein etwas kürzerer Zeitraum, als er für die Erdölreserven ausgewiesen wird. Der größte Produzent ist Chile mit einem Weltmarktanteil von 34%. Weder bei der Länder- noch bei der Unternehmenskonzentration sind größere Risiken durch Marktmacht zu erkennen. Zudem ist Kupfer gut zu recyceln. Bereits heute liegt die Recyclingquote für Kupfer in Deutschland bei über 50%, und es wird erwartet, dass sie bis 2020 auf 70% ansteigt. Aufgrund des hohen Kupferpreises ist damit zu rechnen, dass beim Recycling von Fahrzeugen das hier verbaute Kupfer zu einem sehr hohen Anteil zurückgewonnen wird.

In einem heutigen Fahrzeug der Kompaktklasse werden ca. 25 kg Kupfer verbaut. Bei einem Elektroauto wird laut Wirtschaftsvereinigung Metalle mit einem Bedarf von rd. 65 kg pro Auto gerechnet. Die Produktion von 1 Mio. Elektroautos würde also zu einem Nachfrageanstieg von 40.000 Tonnen führen (0,25% der Weltminenproduktion). Da Kupfer in vielen Wachstumsbranchen verwendet wird, steigt die Nachfrage allerdings so stark, dass ein Preisrisiko besteht. Immerhin hat sich der Kupferpreis in zehn Jahren annähernd verfünffacht und liegt aktuell an der Marke von USD 10.000 pro Tonne.

**Batterietechnik – noch großer Entwicklungsbedarf**

Die Batterie stellt die höchste technische Hürde für das Elektroauto dar. Im Prinzip sind zwar alle Bestandteile eines elektrischen Antriebsstranges sehr reife Industrieprodukte. Elektromotoren, Inverter, Batterien und Ladegeräte gibt es schon seit gut 150 Jahren. Die einzelnen Komponenten weisen daher sehr hohe Effizienzgrade auf. Die Energiewandlungsverluste in Form von Wärme liegen bei allen Komponenten unterhalb von 10%, was die hohe Effizienz von Elektroautos begründet. Allerdings ist das weitere Innovationspotenzial der reinen Energiewandler (Elektromotor, Inverter) vergleichsweise gering. Das gilt aber nicht für die Batterie, die sowohl Energiewandler als auch Energiespeicher ist. Hier gibt es noch erhebliche Entwicklungspotenziale, weshalb wir uns auf die Batterie konzentrieren.

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

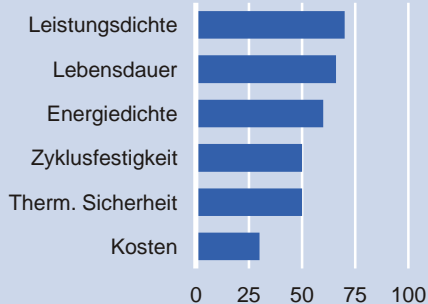
- Sicherheit: Der Sicherheitsaspekt ist gerade für die gebräuchlichen Lithium-Ionen-Batterien ein Problem, da sich metallisches Lithium bei Luftkontakt und Überschreiten seines Schmelzpunktes entzündet und mit Wasser oder Schaum nicht gelöscht werden kann. Bei Kontakt mit Wasser findet eine heftige Reaktion statt. Bei einem Verkehrsunfall ist das Risiko gegeben, dass eine dieser Implikationen eintritt. Das Brandrisiko muss daher noch deutlich verringert werden. Ferner muss etwa bei einem Unfall gewährleistet sein, dass das gesamte Bordnetz schlagartig entladen wird (Hochvolteigensicherheit).
- Lebensdauer: Die Batterie ist mit Abstand der teuerste Teil eines BEV. Ihre Lebensdauer bestimmt auch die mögliche Einsatzdauer des Fahrzeugs. Ein BEV mit defekter Batterie ist ein wirtschaftlicher Totalschaden. Ein Problem liegt darin, dass etwa Lithium-Ionen-Batterien mit der Zeit und mit der Zahl der Ladezyklen „altern“, da die Elektroden oxidieren. Wenn sich die Speicherkapazität der Batterie durch diese Prozesse um mehr als 20% ihrer ursprünglichen Kapazität reduziert hat, gilt die Batterie

### Hochvolteigensicherheit

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

### Batterietechnik: Noch hoher Entwicklungsbedarf

Zielerreichungsgrad\*, %



\* Zielerreichungsgrad einer Lithium-Ionen-Batterie im Automobilbereich.

Quelle: Robert Bosch AG

5

### Begriffserklärung Batterien

**Lithium-Ionen-Technik:** Diese Batterietechnik dominiert heute im Bereich der Konsumentenelektronik. Als größter Vorteil gegenüber anderen Batterien gilt die erzielbare Energiedichte. Bei einer Lithium-Ionen-Batterie ist in der Anode Lithium als aktives Material eingelagert. Als Reaktionspartner in der Kathode werden heute oft Kobalt oder Eisenphosphat verwendet. Bei einer Lithium-Kobalt-Batterie hat das eingesetzte Material eine theoretische Energiespeicherkapazität von ca. 570 Wh/kg.

**Batteriezelle:** Eine Zelle ist der Grundbaustein heutiger Batterien. Jede Zelle ist ein kleiner Energiespeicher und -wandler, wobei ihre Speicherkapazität von der Menge an elektrochemisch aktivem Material in der Zelle bestimmt wird. Eine heutige Lithium-Ionen-Zelle kann eine Spannung von bis zu 4 Volt erzeugen und erreicht eine Energiedichte von 140 bis 170 Wh/kg.

**Stack:** Ein Stack (Stapel) besteht aus mehreren zusammengeschalteten Batteriezellen.

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

als ausgefallen. Eine marktfähige BEV-Batterie sollte 15 Kalenderjahre oder 300.000 gefahrene Kilometer überstehen, bevor diese Marke unterschritten wird; dies entspräche näherungsweise 2.000 bis 3.000 Ladevorgängen.

- Ein Batteriesystem für ein BEV muss eine sehr viel größere Leistung, Spannung und Energie bereitstellen als es in der Konsumelektronik der Fall ist. In der Konsequenz müssen die zu integrierende Steuerungselektronik und das notwendige Thermomanagement völlig anders konstruiert werden. Als Zielgrößen sollte eine marktfähige Batterie im BEV eine Spannung von ca. 400 Volt, eine Leistungsdichte von 1.800 Watt pro Kilogramm und eine Energiedichte von 200 Wattstunden pro Kilogramm erreichen; diese Ziele sind heute zu 50 bis 65% erreicht.
- Temperaturresistenz: Eine Lithium-Ionen-Batterie funktioniert optimal bei rd. 35°C. Bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes kommt es zu drastischen Leistungseinbußen, und bei Temperaturen oberhalb von 45°C altert die Batterie rapide. Ein umfassendes Thermomanagement ist nötig, um das Batteriesystem im optimalen Temperaturband zu halten.

Setzt man die genannten Anforderungen mit den Werten für ein existierendes Batteriesystem ins Verhältnis, so zeigt sich, dass noch großer Entwicklungsbedarf besteht. Es gibt mehrere große „Baustellen“: Kosten, Zyklusfestigkeit und Energiedichte.

Das größte Problem besteht bei den Kosten. Das gilt insbesondere für die Lithium-Ionen-Batterien, welche derzeit die höchsten Energiedichten aufweisen. Verschiedene Untersuchungen geben für Batteriesysteme im Automobilbereich ein Kostenziel von etwa EUR 200 pro kWh an, ab dem die Batterie mit Benzin wirtschaftlich konkurrieren könnte. Zu den aktuellen Batteriekosten gibt es viele verschiedene Angaben. Sie stimmen aber darin überein, dass das genannte Kostenziel noch sehr weit entfernt ist. Für den Endkunden dürften die Kosten für Lithium-Ionen-Zellen im Bereich von EUR 700 bis EUR 800 pro kWh Speicherkapazität liegen, für die heute erhältlichen Batteriesysteme für Elektroautos liegt der Wert in der Gegend von EUR 1.000 pro kWh. Damit kostet die 16 kWh Batterie eines Mitsubishi i-MiEV aktuell annähernd doppelt so viel wie ein kompletter, ähnlich großer Kleinwagen.

### Ambitionierte Ziele zur Kostendegression

Um die Batterie zu schonen, ist die Entladetiefe von Lithium-Ionen-Batterien begrenzt. Im Regelfall sollten nicht mehr als 80% der Batteriekapazität auch wirklich genutzt werden. Somit liegen die Kosten des nutzbaren Batteriespeichers eigentlich deutlich über den Herstellerangaben. Aktuell wird mit erheblichen Kostensenkungen durch die Großserienfertigung von Batteriezellen für den Automobilbereich gerechnet. Die Herstellungskosten sollen bis 2020 um zwei Drittel sinken. Dies ist ein ambitioniertes Ziel, denn relevante Kostenbestandteile der Lithium-Ionen-Batterie lassen sich durch Größenvorteile und Lernkurveneffekte in der Fertigung nur schwer reduzieren. Insbesondere die Rohstoffkosten werden tendenziell steigen. Zudem dürften sich Interkalationsmaterialien (Elektroden) und die reaktiven Stoffe in der Kathode als Preistreiber erweisen. Den Anteil der von der Produktionsmenge unabhängigen Komponenten schätzt die Boston Consulting Group auf bis zu 30% der Gesamtkosten.

### Energiedichte deutlich kleiner als bei flüssigen Kraftstoffen

Die zweite große Baustelle liegt in der erreichbaren Energiedichte der Batteriesysteme. Hiervon hängt vor allem die Reichweite eines

**Was kommt nach der Lithium-Ionen-Technologie**

**Lithium-Schwefel:** Diese Konzept ist in der Entwicklung wohl am weitesten fortgeschritten. Es vereint eine hohe theoretische Energiedichte des aktiven Materials von 2.500 Wh/kg mit relativ geringen Kosten. Als größtes Problem sind die heute unzureichende Zyklenfestigkeit und die schlechte Ausnutzung des aktiven Materials zu nennen.

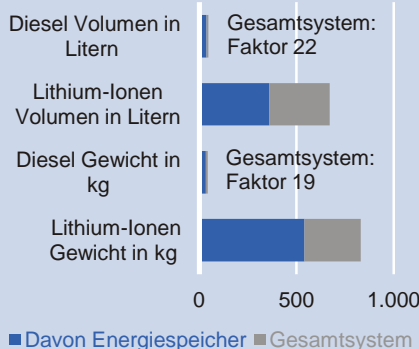
**Lithium-Luft:** Mit Lithium-Luft-Batterien lässt sich theoretisch die Energiedichte von Diesel erreichen. Die Hauptprobleme sind die Zyklenfestigkeit und der Schutz des Lithiums vor der Feuchtigkeit in der Umgebungsluft.

**Semi-Solid-Fuel-Cell:** Ein völlig neues Batteriekonzept, bei dem die Energie in einem Gel gespeichert wird, welches in den Energiewandler gepumpt und anschließend geladen oder einfach ausgetauscht wird. Durch die Trennung von Speicher und Energiewandler sind höhere Energiedichten und geringe Kosten erreichbar. Größtes Problem ist aktuell die Steigerung der Leistungsabgabe und -aufnahme.

BEV ab. Angepeilt wird eine Verdoppelung der heute erreichbaren Energiedichte von 0,1 kWh/kg auf gut 0,2 kWh/kg; in den letzten 15 Jahren war hier eine durchschnittliche Verbesserung von knapp 5% p.a. zu verzeichnen.<sup>2</sup> Aber selbst wenn dieses Ziel erreicht wird, ist das BEV weit von den Reichweiten konventioneller Fahrzeuge entfernt. Ein Liter Diesel speichert in etwa 9,5 kWh, was einer Energiedichte von 12 kWh/kg entspricht. Aktuell liegt die Energiedichte von Benzin also um den Faktor 100 über dem Wert von Lithium-Ionen-Batterien. Bezieht man die höhere Energieeffizienz eines elektrischen Antriebsstranges mit ein, so bleibt ein Verhältnis von etwa 1 zu 20 übrig. Dieser Faktor beschränkt das mögliche Einsatzgebiet von BEV weitgehend auf die Kurz-, maximal auf die Mittelstrecke, denn ein Batteriesystem, welches ausreichend Energie für größere Entfernungen aufnehmen kann, würde zu groß und zu schwer für einen Pkw werden. Das gilt insbesondere, wenn man berücksichtigt, dass auch alle zusätzlichen Stromverbraucher wie Heizung, Klimaanlage oder Radio beim BEV aus der Batterie gespeist werden müssen. Um im Mittel- und Langstreckenbereich Fuß zu fassen, wird das BEV auf die Entwicklung von Post-Lithium-Ionen-Technologien angewiesen sein. Diese befinden sich aber heute noch im Stadium der Grundlagenforschung und werden frühestens in zehn bis 15 Jahren am Markt sein. Bis dahin werden es also vor allem PHEV oder REEV sein, welche dem konventionellen Fahrzeug auf der Mittel- und Langstrecke schrittweise Konkurrenz machen.

**Zu groß für die Langstrecke**

Für 500 km Reichweite benötigt man:



**Neue Wertschöpfungsketten werden sich herausbilden**

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

**Etablierte Autohersteller haben Startvorteile**

**Autobauer: Hohe Forschungsausgaben für kleinen Markt**

Unter der Motorhaube hat ein reines Elektroauto nur wenig mit einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor gemein. Um die technischen Potenziale eines BEV optimal nutzen zu können, sollte es daher komplett neu konstruiert werden. Dies eröffnet branchenfremden Unternehmen die Chance, in den Automarkt einzudringen, wobei dies in manchen Ländern (z.B. in China) massiv staatlich unterstützt wird. Die heutigen Autobauer besitzen aber auch Startvorteile, da die Einhaltung von Sicherheits- und Qualitätsanforderungen großes Systemwissen verlangt, das sich Neueinsteiger erst erarbeiten müssen; zudem sind viele technisch anspruchsvolle Ausstattungsmerkmale eines Fahrzeugs vom Antriebsstrang unabhängig. Gerade die Hersteller mit etablierten Marken müssen auch darauf achten, dass sie sich erst dann im heutigen Nischenmarkt der BEV positionieren,

<sup>2</sup> Vgl. Service, Robert F. (2011). Getting there. Science Vol. 332. Juni 2011. Washington.



### Elektroantrieb für Nutzfahrzeuge

Bei den Nutzfahrzeugen fallen die Potenziale des batteriegestützten Elektroantriebes je nach Einsatzgebiet sehr unterschiedlich aus.

Im Straßengüterfernverkehr sind heute keine Elektroantriebe vorstellbar. Anders ist die Lage bei Nutzfahrzeugen für die innerstädtische Distribution. Diese haben einen optimalen Fahrzyklus für Elektroantriebe:

- tägliche Fahrstrecke ca. 100 km;
- Durchschnittsgeschwindigkeit unter 20 km/h;
- viele Stopps. Im Praxistests einer großen Handelskette wurden über 30 Stopps pro Stunde ermittelt;
- hohe Energierückgewinnungsrate wegen des Anteils von Stop-and-Go-Verkehr. Im Test wurden 79% der verbrauchten Energie durch Bremskraftrückgewinnung regeneriert.

Zudem können sie dank größerem Bauraum und höherer Tragkraft auf günstigere Batteriesysteme wie die Zebra-Batterie zurückgreifen. Dennoch stellen die hohen Kosten auch im Nutzfahrzeugbereich die große Hürde da. Bei einem aktuellen Fahrzeug mit 100 km Reichweite liegen die Mehrkosten über EUR 60.000 gegenüber der Dieselvariante des Modells.

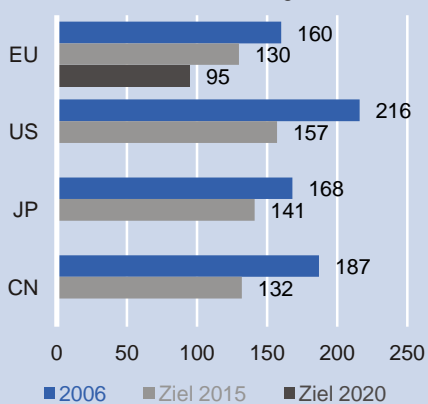
wenn die neue Technologie ihren hohen Qualitätsstandards voll entspricht. Übereilte Markteinführungen könnten sonst die Marke im Markt der konventionellen Fahrzeuge schwächen. Da ein Auto ein äußerst komplexes Produkt ist, dauert so eine Entwicklung mehrere Jahre und kann für ein einzelnes Modell durchaus mehr als EUR 1 Mrd. kosten. Problematisch ist auch, dass das BEV zunächst im Klein- und Kompaktwagensegment eingeführt werden wird, wo die Kunden eher kostensensibel sind. Normalerweise werden neue Technologien zunächst in der Oberklasse eingeführt, wo die Zahlungsbereitschaft für Innovationen recht hoch ist und der relative Preisaufschlag gemessen an den Gesamtkosten geringer ist als bei Kleinwagen.

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

Zeitgleich müssen die Hersteller auch massiv in die Weiterentwicklung des konventionellen Antriebsstranges investieren, denn dieser wird noch lange das Hauptgeschäftsfeld der Autobauer bleiben. Aufgrund immer schärferer gesetzlicher Vorgaben an Schadstoffausstoß und Kraftstoffverbrauch besteht auch hier Investitionsbedarf in Forschung und Entwicklung. In den letzten Jahren kam zudem in den wichtigen Automärkten eine CO<sub>2</sub>-Regulierung hinzu, und der Kraftstoffverbrauch eines Autos hat als Kaufkriterium beim Endkunden an Bedeutung gewonnen. Die etablierten Hersteller müssen somit mehrere Technologien parallel weiterentwickeln, um für die Zukunft gerüstet zu sein. Derzeit steckt die deutsche Automobilindustrie rd. EUR 10 Mrd. pro Jahr an F&E-Aufwendungen in die Entwicklung effizienterer bzw. neuer Antriebe (ca. 50% des gesamten F&E-Budgets der Branche).

### Weltweite CO<sub>2</sub>-Begrenzung

CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für Pkw in g/km



Quelle: Internationale Energieagentur **7**

### Zulieferer: Stellung der Systemzulieferer wird gestärkt

Auch für die Automobilzulieferer, die für mehr als 70% der automobilen Wertschöpfung stehen, bedeutet die Einführung von BEV Chance und Risiko. Insbesondere für die großen Systemzulieferer (TIER 1) eröffnen sich Chancen. Ihr Produktportfolio umfasst viele Komponenten (Elektronik, Elektromotoren), die im elektrischen Antriebsstrang zum Einsatz kommen. Da sie zudem über große Erfahrung als Systemintegratoren verfügen, können sie als Schnittstelle zwischen etablierten Zulieferern und Marktneulingen fungieren; beispielsweise bei der Integration von Thermomanagement und Zellfertigung. Beachtenswert ist auch, dass es für TIER 1-Zulieferer tendenziell einfacher sein wird, Größenvorteile zu erzielen. Gerade bei Baugruppen wie Elektromotoren sind hierfür hohe Stückzahlen erforderlich, die sich am ehesten realisieren lassen, wenn man mehrere Hersteller beliefern kann.

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





## Deutsche Firmen im Bereich Elektromobilität

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

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

**Grundstoffe:** In Deutschland sind mehrere Firmen angesiedelt, die bei der Produktion von Vorprodukten für die Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien eine starke Marktposition haben. So ist die Firma Chemetall der Weltmarktführer bei der Produktion von Lithiumcarbonat und verfügt auch über eine starke Marktstellung bei der Herstellung weiterer Lithiumverbindungen.

**Funktionsmaterialien:** In Deutschland ist z.B. Evonik in der Entwicklung und Herstellung von Interkalationsmaterialien für Elektroden und sicheren Separatoren engagiert; dies ist eine zentrale Aufgabe innerhalb der Wertschöpfungskette des BEV.

**Elektronik:** In Deutschland ist eine leistungsfähige Elektronikindustrie angesiedelt, die bei der Entwicklung der Leistungselektronik für Batterien eine Schlüsselrolle einnehmen kann. Zu nennen wären beispielsweise Infineon als größter Produzent von Chips für den Autobau oder Siemens, die zusammen einen großen Teil des Bordnetzes abdecken.

**Thermomanagement:** Für Elektroautos ist die Kühlung der Batterie elementar wichtig. In Zukunft werden ganz neue Kühlsysteme für die Hochleistungsbatterien im Auto entwickelt werden, wobei der Trend in Richtung Flüssigkühlung geht. Hier ist der Zulieferer Behr gut positioniert.

**Systemzulieferer:** In Deutschland sind gleich mehrere Systemzulieferer angesiedelt, die bei der Fortentwicklung des elektrischen Antriebsstranges eine Schlüsselposition einnehmen. So beliefert Continental einen großen französischen Autobauer mit elektrischen Antriebssträngen. Der weltgrößte Zulieferer Bosch deckt ebenfalls den gesamten Antriebsstrang ab und ist über das mit Samsung geschlossene Joint Venture SB LiMotive auch in die Fertigung von Batteriesystemen eingestiegen.

Es wird aber auch Zulieferer geben, deren Markt künftig schrumpfen wird. Ein konventioneller Antriebsstrang umfasst etwa 1.400 Bauteile. Viele davon werden von hoch spezialisierten mittelständischen Zulieferern hergestellt. Bereits die Hybridisierung und der Trend zum Downsizing verringern den Teilebedarf. Ein BEV verzichtet sogar komplett auf zahlreiche Bauteile. Daher ist das bisherige Geschäftsmodell dieser Spezialisten langfristig gefährdet. Neben dem eigentlichen Motor würde auch das komplexe Abgassystem obsolet, das Getriebe wäre viel kleiner dimensioniert. Insgesamt lassen sich über 100 verschiedene Baugruppen identifizieren, die im BEV entfallen. Längerfristig dürfte dies den bereits heute laufenden Konzentrationsprozess in der mittelständisch organisierten Zulieferbranche verstärken.

### Maschinenbau: Veränderte Nachfrage zu erwarten

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

### Hoher Akademikerbedarf für E-Mobilität schwer zu decken

Um Deutschland als Leitmarkt für Elektrofahrzeuge zu positionieren, bedarf es einer Vielzahl neu ausgebildeter Fachkräfte und des frühen Aufbaus der erforderlichen Kompetenzen. Die betroffenen Qualifikationsgruppen reichen von Ausbildungsberufen der dualen Berufsbildung über Aufstiegsfortbildungen wie Industriemeistern und Technikern bis hin zu technisch-naturwissenschaftlichen Akademikern. Hier konzentrieren wir uns auf Akademiker und meinen damit im Folgenden grundsätzlich jene Fachkräfte, die für die E-Mobilität relevant sind.

Die für die E-Mobilität wichtigen Studiengänge rekrutieren sich im Wesentlichen aus technisch-naturwissenschaftlichen Fachrichtungen wie Ingenieurwissenschaften, Physik und Informatik. Das Einbinden und Vernetzen dieser Disziplinen stellt eine Herausforderung dar. Denn zahlreiche unterschiedliche Fachrichtungen müssen die Basis für eine gemeinsame wissenschaftliche Zusammenarbeit im Bereich der Forschung, Entwicklung und Produktion bilden. Die höchste Priorität bei der Kompetenzentwicklung im akademischen Bereich sollte laut NPE auf der Fahrzeugtechnik liegen, beispielhaft in den Bereichen Inverter, Leistungselektronik, Antriebsregelung, Range-Extender sowie Hochvolt-/Bordnetz. Von exponierter Bedeutung für die Batterieentwicklung sind Qualifikationen in der Elektrochemie, die als Teilbereich der physikalischen Chemie und mithin der Physik subsumiert wird. Zudem werden Materialwissenschaftler zur Entwicklung von Funktionsmaterialien benötigt.

Die Herausforderung aus Sicht der Bildungspolitik besteht aus unserer Sicht nicht darin, völlig neue Studiengänge zu schaffen, sondern vielmehr darin, das dezentral in den bereits vorhandenen Disziplinen vorhandene Wissen zu vernetzen und neu zusammenzuführen. Die im Rahmen der Bologna-Reform eingeführten modularisierten Studiengänge erweisen sich hier als sehr großer Vorteil. So umfasst ein exemplarisches Qualifikationsprofil eines Akademikers im Bereich E-Mobilität Kompetenzen in der Elektrotechnik, der Elektro-

### Für E-Mobilität relevante Akademiker und Branchen

Relevante Akademiker: Akademische Kompetenzen werden insbesondere in den Bereichen Spezifische Batterieforschung (Elektrochemie, Elektrische Energiespeicherung), Leistungselektronik, Materialforschung mit Fokus auf Funktionsmaterialien, Leichtbau, Produktion und Automatisierung, Infrastruktur der Ladestationen sowie Architektur und Bau der Infrastrukturen benötigt. Im Rahmen dieser Studie werden Akademiker mit Abschluss der folgenden Fachrichtungen als relevant für die E-Mobilität betrachtet: Fahrzeugbau und Verkehrstechnik, Physikalische Technik, Physik, Informatik, Fertigungs- bzw. Produktionstechnik, Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Elektrizität, Energie, Elektrotechnik, Elektronik und Automation, Telekommunikation, Gesundheitstechnik und Feinwerktechnik sowie Wirtschaftsingenieurwesen.

Relevante Branchen: Im Rahmen dieser Studie werden die folgenden Branchen als relevant für die E-Mobilität betrachtet: Herstellung von Akkumulatoren und Batterien, Elektromotoren, Generatoren und Transformatoren, Elektrizitätsverteilungs- und Elektrizitätsschaltanlagen, isolierten Elektrokabeln, -leitungen und -drähten, elektrischen Ausrüstungen (anderweitig nicht genannt), elektronischen Bauelementen, Mess-, Kontroll-, Navigations- u.ä. Instrumenten und Vorrichtungen, industriellen Prozesssteuerungseinrichtungen, Kraftwagen und Kraftwagenmotoren, Karosserien, Aufbauten und Anhängern, land- und forstwirtschaftlichen Maschinen, Teilen und Zubehör für Kraftwagen und Kraftwagenmotoren, Krafträdern, Fahrrädern und Behindertenfahrzeugen, sowie Fahrzeugbau (anderweitig nicht genannt), Elektrizitätsversorgung, Kraftfahrzeughandel, -instandhaltung u. -reparatur, Forschung und Entwicklung in den Bereichen Natur-, Ingenieur-, Agrarwissenschaften und Medizin, technische, physikalische und chemische Untersuchungen sowie Hochschulen und andere Bildungseinrichtungen des Tertiärbereichs.

chemie sowie der Werkstoffkunde. Ein derartiges Profil lässt sich deutlich zielführender und effizienter durch die Kombination eines Bachelor-Studiengangs Elektrotechnik in Kombination mit einem anschließenden Master-Studiengang in einer Spezialisierungsrichtung erreichen als im Rahmen eines klassischen Diplomstudien-gangs der reinen Elektrotechnik. Auch ermöglicht die Modularisierung eine zeitnahe und flexible Anpassung an die künftigen Bedürfnisse des Arbeitsmarktes, die sich mit fortschreitender Marktdurchdringung der E-Mobilität und Änderung der zugehörigen technischen Rahmenbedingungen (neue Batterietechniken, Antriebstechniken, Materialien etc.) kontinuierlich wandeln werden.

### Quantitative Bedarfsanalyse für Akademiker

Eine streng nach einzelnen Fachrichtungen differenzierende Abschätzung des künftigen akademischen Arbeitskräftebedarfs ist wegen dieser fächerübergreifenden Vernetzung nicht sinnvoll. An dieser Stelle führen wir daher eine quantitative Bedarfsanalyse auf Ebene aller für die E-Mobilität relevanten Akademiker durch. Dabei muss berücksichtigt werden, dass weit über die E-Mobilität eine Nachfrage nach solchen Akademikern besteht. So konkurriert die E-Mobilität mit zahlreichen Wachstumsbranchen (z.B. IT-Sektor) um dieselben Fachkräfte (z.B. Elektro- und Maschinenbauingenieure, Informatiker). Die E-Mobilität ist also ein wichtiger, aber nicht der einzige Treiber des Bedarfs nach Akademikern dieser Fachrichtungen. Ein Näherungswert für den Akademikerbedarf der E-Mobilität ist der Bedarf an Akademikern in den Kernbranchen der E-Mobilität (Fahrzeugbau, Elektroindustrie sowie weitere elektroaffine Branchen des Verarbeitenden Gewerbes, Kfz-Handel, -instandhaltung und -reparatur, Hochschullehrer für die Ausbildung der benötigten Akademiker).

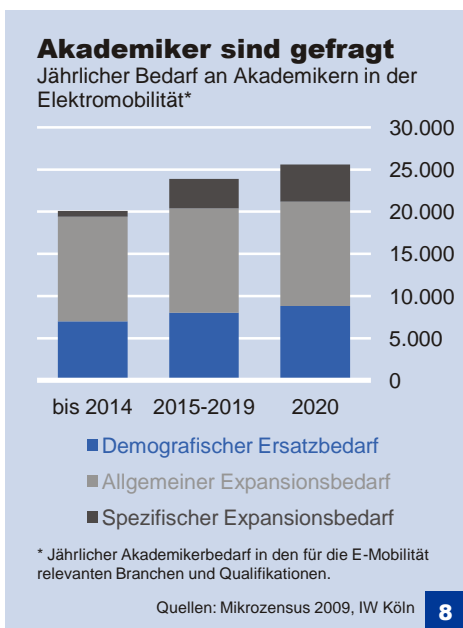
Eine Sonderauswertung des aktuellen Mikrozensus, der repräsentativen Bevölkerungsstichprobe Deutschlands, zeigt, dass im Jahr 2009 rd. 350.000 oder 28% aller Akademiker relevanter Fachrichtungen in den Kernbranchen der E-Mobilität beschäftigt waren.

### Drei Faktoren für steigenden Beschäftigungsbedarf maßgeblich

Die bis zum Jahr 2020 wirksam werdenden Beschäftigungsbedarfe akademischer Qualifikationen können in drei Komponenten unterteilt werden. Erstens müssen die Arbeitgeber diejenigen Arbeitskräfte ersetzen, die altersbedingt aus dem Erwerbsleben ausscheiden; hier liegen verlässliche und altersdifferenzierte Daten bezüglich der heutigen Beschäftigungssituation in diesem Arbeitsmarktsegment vor, und der demografische Ersatzbedarf bis zum Jahr 2020 lässt sich gut abschätzen. Bis 2014 verlassen im Durchschnitt jährlich knapp 25.000 Akademiker mit relevanten Qualifikationen altersbedingt das Erwerbsleben, etwa 7.000 davon in den Kernbranchen der E-Mobilität. Bis zum Jahr 2020 steigt dieser jährliche Ersatzbedarf in der Gesamtwirtschaft auf über 34.000 und in den Kernbranchen auf 8.800 Personen an. Dieser wachsende Bedarf ist u.a. der Tatsache geschuldet, dass im Betrachtungszeitraum zunehmend geburtenstarke Jahrgänge die gesetzliche Rentenaltersgrenze erreichen.

Zweitens wird ein genereller Expansionsbedarf wirksam, der sich aus Struktur-trends wie der bevorzugten Beschäftigung hochqualifizierter Arbeitskräfte und dem langfristigen volkswirtschaftlichen Wachstum speist. So ist die Beschäftigung von Akademikern relevanter Fachrichtungen im Mittel der Jahre 2000 bis 2009 außerhalb der Kernbranchen um 2,7% oder 21.200 Personen p.a. gestiegen, innerhalb der Kernbranchen sogar um jährlich 4,3% oder 12.400

**Spezifischer Expansionsbedarf vor allem im Akademikerbereich**

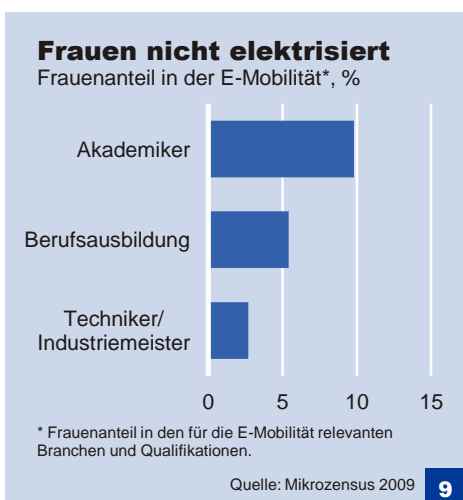


Personen. Wir erwarten, dass dieser Bedarf im laufenden Jahrzehnt, nicht zuletzt angesichts der global zunehmenden Bedeutung erneuerbarer Energien, mindestens ähnlich stark wachsen wird.

Drittens führt die Einführung der E-Mobilität zu spezifischen volkswirtschaftlichen Effekten; dazu zählen u.a. Änderungen in der automobilen Wertschöpfungskette oder Investitionen in notwendige Infrastruktur. Diese lösen einen für die E-Mobilität spezifischen Expansionsbedarf aus, ohne dass der Fachkräftebedarf im Bereich konventioneller Antriebe sinke. Die NPE erwartet bis zum Jahr 2020 netto rd. 30.000 zusätzliche Arbeitsplätze, basierend auf dem Ziel von 1 Mio. Elektroautos im Bestand. Davon entstehen die meisten im Automobilbau, viele aber auch in komplementären Branchen wie der Energieversorgung. Der Großteil des Netto-Zuwachses wird auf akademische Qualifikationen entfallen. Für die Berechnung des spezifischen Expansionsbedarfs an Akademikern rechnen wir mit einem Anteil von 80%. Der spezifische Zusatzbedarf wird wegen der nur allmählichen wachsenden Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen zunächst mit etwa 700 zusätzlichen Akademikern jährlich moderat ausfallen, zum Ende des Betrachtungszeitraums jedoch mit etwa 4.400 zusätzlichen Akademikern jährlich eine volkswirtschaftlich relevante Größenordnung annehmen.

**Über 20.000 Akademiker werden pro Jahr benötigt**

Zusammengenommen werden innerhalb der Kernbranchen der E-Mobilität aktuell jährlich 20.000 relevante Akademiker benötigt, um altersbedingt aus dem Erwerbsleben ausscheidende Personen zu ersetzen und den Zusatzbedarf decken zu können. Bis zum Jahr 2020 steigt dieser Gesamtbedarf kontinuierlich auf jährlich 26.000 Personen an. Gesamtwirtschaftlich dürfte der jährliche Bedarf relevanter Akademiker von aktuell 59.100 auf über 72.000 Personen im Jahr 2020 ansteigen. 2009 wurden rd. 56.000 Erstabsolventen relevanter Studiengänge an deutschen Hochschulen ausgebildet, von denen viele Deutschland nach dem Examen wieder verlassen (s.u.). Hinzu kommt, dass das Lehrangebot in der Elektrotechnik zwischen 2002 und 2008 um knapp 11% zurückgegangen ist und die Auslastung der Studienkapazität zuletzt trotzdem erst bei 77% lag. Trotz der in jüngster Zeit positiven Entwicklung der Absolventenzahlen in relevanten Studiengängen liegt die Arbeitsnachfrage damit schon heute deutlich über dem Angebot. In vielen Berufszweigen herrschen bereits Fachkräfteengpässe, die sich künftig angesichts einer steigenden Nachfrage und eines nicht im gleichen Maße steigenden, womöglich gar sinkenden Angebots zu verschärfen drohen.



**Akademische Fachkräftepotenziale für die E-Mobilität**

Welche Fachkräftepotenziale können nun zur Deckung des künftigen akademischen Arbeitskräftebedarfs der E-Mobilität aktiviert werden?

- Weibliche Akademiker: 2009 waren weniger als 10% aller Akademiker, die in den Kernbranchen der E-Mobilität beschäftigt waren, weiblich; bei sonstigen Akademikern (z.B. Wirtschaftswissenschaftler, Juristen) waren es dagegen 38%. Aktuell niedrige Frauenanteile an den Erstabsolventen relevanter Fachrichtungen (z.B. Elektrotechnik: 7,7% im Jahr 2009) lassen keine Trendumkehr in der Frauenpartizipation erkennen. Unter den Erstabsolventinnen insgesamt nimmt der Anteil relevanter Studiengänge sogar ab. Die für die E-Mobilität relevanten Fachrichtungen konnten von der insgesamt starken Expansion weiblicher Akademiker nur unterproportional profitieren. Zusammenfassend muss be-



### Wenig Potenzial bei Teilzeitbeschäftigten

#### Berufliche Bildung: Ebenfalls große Herausforderungen

Während die Fachkräfteversorgung der E-Mobilität mit Akademikern in erster Linie ein quantitatives Problem ist, liegt die Herausforderung in der beruflichen Aus-, Fort- und Weiterbildung primär auf qualitativer Ebene, konkret der Qualifizierung des Personals. Die Qualifizierungsprofile der bereits heute bewährten Ausbildungsgänge (z.B. Kfz-Mechatroniker, Elektroniker für Automatisierungstechnik, Systeminformatiker) können im Rahmen entsprechender Fort- und Weiterbildungen (z.B. Arbeiten an Hochvolt-eigensicheren Fahrzeugen, Wartung von Hochleistungsbatterien) angepasst und erweitert werden. Neben der reinen Fahrzeugtechnik liegen Qualifizierungsbedarfe im Bereich der Systemdienstleistungen (z.B. Netz-anbindung, -integration und -rückspeisung), der Ladeinfrastruktur (z.B. Steuerungstechnik) sowie im Fahrzeugservice (z.B. Rettungseinsätze bei offenen Hochvoltssystemen). Die für die E-Mobilität relevanten beruflichen Bildungsgänge weisen sogar eine noch geringere Frauenpartizipation als ihre akademischen Pendanten aus. So sind in den Kernbranchen der E-Mobilität weniger als 3% aller relevanten Techniker und Industriemeister sowie rd. 5% aller relevanten Absolventen einer Berufsausbildung weiblich. Da im Bereich der beruflichen Bildung im Gegensatz zu den Akademikern jedoch kein volkswirtschaftlich relevanter Zusatzbedarf entstehen wird, wirkt sich dieser Umstand (noch) nicht als limitierender Faktor für die Fachkräfteversorgung aus.

zweifelt werden, dass weibliche Akademiker während des Zeitraums bis 2020 einen substanziell höheren Beitrag als bislang zur Deckung des akademischen Fachkräftebedarfs der E-Mobilität leisten könnten.

- Teilzeitbeschäftigte Akademiker: Im Jahr 2009 waren weniger als 6% aller relevanten Akademiker, die in den Kernbranchen beschäftigt waren, teilzeiterwerbstätig.<sup>3</sup> Von dieser geringen Anzahl an Teilzeitkräften wiederum war weniger als jede Fünfte unfreiwillig teilzeiterwerbstätig. Selbst wenn es gelänge, sämtliche in den relevanten Branchen unfreiwillig teilzeiterwerbstätigen Akademiker als Vollzeitbeschäftigte zu aktivieren, beträfe dies einmalig weniger als 4.000 Personen. Dieses quantitativ unbedeutende Aktivierungspotenzial teilzeiterwerbstätiger Akademiker beschränkt sich auf die relevanten Qualifikationen: Bei sonstigen Akademikern betrug die Teilzeitquote 21%.
- Arbeitslose Akademiker: Im August 2011 waren 2.680 Elektroingenieure in Deutschland arbeitslos gemeldet. Zugleich waren alleine bei der Bundesagentur für Arbeit (BA) 3.064 offene Stellen für Elektroingenieure registriert. Gesamtwirtschaftlich waren sogar etwa 20.000 offene Stellen für Elektroingenieure sofort zu besetzen. Auch bei Maschinenbauingenieuren (3.960 Arbeitslose, 5.177 BA-gemeldete offene Stellen, über 30.000 offene Stellen insgesamt) liegt die Fachkräftenachfrage seit langem deutlich über dem Fachkräfteangebot. In zahlreichen Qualifikationen rund um die E-Mobilität herrscht aktuell praktisch Vollbeschäftigung. Auch sind weniger als 25% aller arbeitslosen Akademiker in diesem Segment laut IAB ein Jahr oder länger ohne Beschäftigung. Beim Großteil dieser Arbeitslosen handelt es sich somit um temporäre Sucharbeitslosigkeit. Insgesamt fallen die aktivierbaren Arbeitsmarktpotenziale gering aus.
- Bildungsausländer: Unter den Absolventen relevanter Studiengänge sind in Deutschland überproportional viele Bildungsausländer<sup>4</sup> vertreten – in der Elektrotechnik etwa 20% aller Studierenden. Im Jahr 2009 lag der Anteil der Bildungsausländer unter den Erstabsolventen relevanter Studiengänge bei rd. 10%. Sie stammen zu großen Teilen aus China, Indien oder der Türkei. Nicht zuletzt die immer noch vorhandenen Restriktionen, denen sich Absolventen aus Nicht-EU-Staaten beim Arbeitsmarktzutritt gegenübersehen, führen jedoch dazu, dass zwei Drittel der hier ausgebildeten Bildungsausländer Deutschland nach dem Studium wieder verlassen und damit dem deutschen Arbeitsmarkt nicht zur Verfügung stehen. Dabei verspricht dieser Personenkreis eine besonders einfache Integration, da Inhalte und Qualität der Studienabschlüsse den hiesigen Arbeitgebern bekannt sind und die Absolventen in der Regel bereits über umfassende Deutschkenntnisse verfügen. Rechnet man konservativ damit, dass 50% der Bildungsausländer eines relevanten Absolventenjahrgangs (etwa 5% aller Absolventen), Deutschland nach dem Examen wieder verlassen, beträgt der Verlust – und damit auch das aktivierbare Arbeitskräftepotenzial – aktuell mehr

<sup>3</sup> Als Teilzeiterwerbstätigkeit gilt dabei eine Beschäftigung im Umfang von weniger als 32 Wochenstunden. Relevant ist der arbeitsvertraglich festgelegte, nicht der tatsächlich geleistete Arbeitsumfang.

<sup>4</sup> Bildungsausländer sind Personen, die ihre Hochschulzugangsberechtigung im Ausland erworben haben und in der Regel über eine ausländische Staatsangehörigkeit verfügen.



**Mehr ausländische Studierende notwendig**

als 2.800 Absolventen jedes Jahr.<sup>5</sup> Bereits heute und auch mit Perspektive 2020 stellen diese Bildungsausländer das bedeutendste Potenzial zur Sicherung der Fachkräfteverfügbarkeit im Bereich der E-Mobilität dar, welches es über eine aktive öffentliche Retentions- und Integrationspolitik systematisch zu aktivieren gilt. Unternehmen und Bildungseinrichtungen sollten bestrebt sein, mehr ausländische Studierende für deutsche Hochschulen zu gewinnen. In den USA liegt der Anteil der Bildungsausländer unter den Studierenden technisch-naturwissenschaftlicher Fachrichtungen laut National Science Foundation bei rund 25%. Von den Promotionen in diesem Bereich geht gar jede dritte an einen Bildungsausländer.

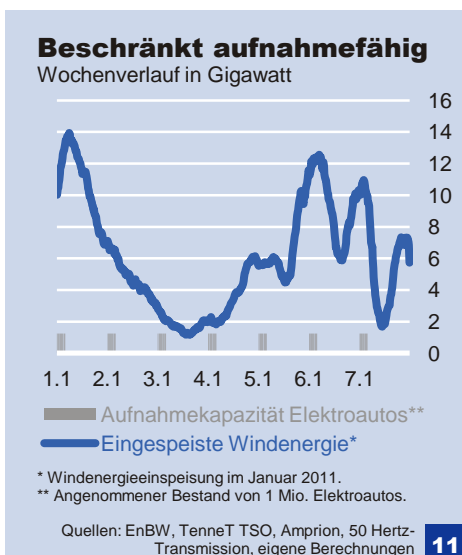
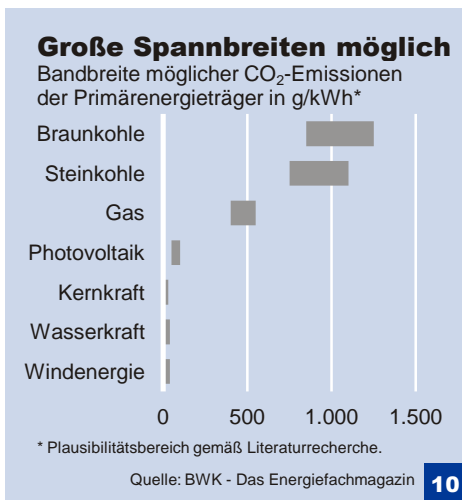
**Strombedarf und Stromquelle: Derzeit kein Problem**

**Strombedarf steigt zunächst nur wenig**

Der zusätzliche Strombedarf durch E-Mobilität ist vorerst vernachlässigbar. Unter den Annahmen, dass 1 Mio. reine Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren, dass diese Fahrzeuge im Jahresdurchschnitt 20 kWh pro 100 Kilometer Fahrleistung verbrauchen (Kompakt- bis Mittelklasse) und eine durchschnittliche Fahrleistung von 10.000 km pro Jahr aufweisen, beträgt der Stromverbrauch „nur“ 2 Mio. MWh. Gemessen am deutschen Bruttostromverbrauch des Jahres 2010 entspricht dies lediglich einem Anteil von 0,3%. Ein Ausbau des Kraftwerksparks allein aufgrund der zunehmenden Bedeutung der E-Mobilität muss also vorerst nicht erfolgen, zumal viele Elektrofahrzeuge nachts – also in Zeiten ansonsten schwacher Nachfrage – aufgeladen werden dürften.

**Beitrag zur Netzstabilität bleibt überschaubar**

Die Möglichkeit, Elektroautos in der Nacht aufzuladen, hat das Interesse der Stromnetzbetreiber geweckt. Denn im Zuge des Ausbaus der erneuerbaren Energien haben sie zunehmend mit der schwankenden Einspeisung von erneuerbarem Strom zu kämpfen. Windenergie zeigt z.B. große Schwankungen in der Einspeisung. Dies belastet die Stabilität des Stromnetzes sehr stark und muss durch konventionelle Kraftwerke oder Pumpspeicher ausgeglichen werden. Die in das Stromnetz eingespeiste Leistung muss aber umgehend abgerufen werden. Das hat in der Vergangenheit in windreichen Nächten bereits zu negativen Strompreisen an der Leipziger Strombörse geführt. Die nächtliche Stromnachfrage durch Elektroautos kann helfen, diese Situationen zu entschärfen. Allerdings sollte man die Möglichkeiten des Elektroautos angemessen einschätzen. Wenn 1 Mio. BEV in Deutschland gemeldet wären, läge ihre Energiespeicherkapazität unter günstigen Annahmen<sup>6</sup> bei 5.000 MWh. Würden diese Fahrzeuge etwa 4 Stunden zum Laden brauchen, resultierte eine mögliche Leistungsabnahme von 1.250 MW. Das ist ein Puffer, liegt aber von der Leistung her in der Größenordnung eines großen Pumpspeicherwerks; die Nennleistung aller Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland liegt bei etwa 7 GW (Speicher ca. 40 GWh). Grafik 11 verdeutlicht, dass die Aufnahmekapazität von Elektroautos begrenzt ist.



<sup>5</sup> Auch unter fiskalischen Aspekten würde die deutsche Volkswirtschaft von einer Retention dieser Bildungsausländer profitieren. Bislang trägt der deutsche Staat den Großteil von deren Ausbildungskosten, während die Erträge dieser Bildungsinvestition in der Regel von deren Heimatländern beziehungsweise Ländern mit einer qualifikationsorientierten Zuwanderungspolitik abgeschöpft werden.  
<sup>6</sup> Annahmen: 50% der BEV hängen am Netz; Speicherkapazität der Batterie: 20 kWh; tatsächlich nutzbare Kapazität: 15 kWh; Entladegrad: 66%.

**Windenergie: Einspeiseprofil und Verbrauch**

Die eingespeiste Windenergieleistung in Deutschland weist verschiedene Zyklen auf. Im Winter ist die erzeugte Leistung, aber auch die Leistungsschwankung tendenziell höher als im Sommer. Im Fallbeispiel vom 01.01.2011 bis 07.01.2011 schwankt die eingespeiste Leistung der Windturbinen zwischen 13.700 MW und 850 MW.

Im Tageszyklus der Windenergieeinspeisung lag die Leistungsspitze im Beispiel häufig in den Stunden nach Mitternacht, während die Mittagsstunden relativ leistungsschwach sind. In der Beispielwoche liegt die durchschnittliche eingespeiste Windenergieleistung zwischen Mitternacht und 3 Uhr bei knapp 7.200 MW, während sie zwischen 12 Uhr und 15 Uhr nur etwa 4.950 MW beträgt.

Die Stromverbrauchsspitze ist hingegen typischerweise in den Mittagsstunden und am frühen Abend zu verorten. In den Nachstunden liegt der Stromverbrauch hingegen deutlich unter dem Tagesdurchschnitt.

**Ausbau der erneuerbaren Energien speziell zur Förderung der E-Mobilität nicht notwendig, da der Stromsektor ohnehin dem Emissionshandel unterliegt**

Damit das Stromnetz stabil bleibt, müssen die Schwankungen auch künftig vor allem über den konventionellen Kraftwerkspark ausgeglichen werden. Das BEV kann nur einen kleinen Beitrag leisten, insbesondere wenn man bedenkt, dass sich die installierte Kapazität von Wind- und Sonnenenergie bis 2020 in etwa verdoppeln soll. Theoretisch wäre es auch möglich, die gespeicherte Energie in den Spitzenlastzeiten wieder in das Netz abzugeben und damit Verbrauchsspitzen abzufedern. Dies würde aber eine ausgefeilte Infrastruktur voraussetzen, die sowohl entsprechende Netzanschlüsse als auch Abrechnungstechnik beinhaltet. Zudem würde dies eine deutliche Erhöhung der jährlichen Ladezyklen nach sich ziehen, was die Lebensdauer der Fahrzeugbatterie reduzieren könnte. Wirtschaftlich ist dies heute noch nicht.

***Stromherkunft in der EU aus ökologischer Sicht irrelevant, ...***

Ökologisch interessant ist die Frage, wie der Strom für Elektrofahrzeuge erzeugt wird. In der Tat macht es einen erheblichen Unterschied für die CO<sub>2</sub>-Bilanz eines Elektroautos, ob der von ihm genutzte Strom auf Basis erneuerbarer Energien oder Kernkraft (also weitgehend CO<sub>2</sub>-frei) erzeugt wird oder aber aus Kohlekraftwerken stammt.

Beim aktuellen deutschen Strommix (Daten des Umweltbundesamtes) liegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen für ein Fahrzeug der Kompaktklasse mit einem Verbrauch von 20 kWh pro 100 Kilometer bei gut 110 Gramm pro Kilometer. Dies entspricht bei einem Auto mit Benzinmotor einem Verbrauch von etwa 4,6 Litern pro 100 gefahrenen Kilometern. Dies ist ein Wert, der von vielen Kleinwagen und Voll-Hybridautos zwar bereits heute erreicht bzw. unterschritten wird, der jedoch deutlich besser ist als der durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Ausstoß von neu zugelassenen Pkw in Deutschland (2010: 151,7 g/km) und unterhalb der im 1. Kapitel erwähnten Zielvorgabe der EU liegt.

***... denn Emissionshandel deckelt Emissionen***

In Deutschland und der EU macht es aber hinsichtlich der rechnerischen CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Elektroautos faktisch keinen Unterschied, ob der Strom durch Erneuerbare oder in einem Braunkohlekraftwerk erzeugt wird. Denn die Energiewirtschaft unterliegt dem EU-Emissionshandel, der eine Obergrenze für die CO<sub>2</sub>-Emissionen dieses Sektors vorgibt. Wenn durch mehr Elektroautos die Nachfrage nach Strom aus fossilen Quellen und damit nach Emissionszertifikaten steigt, führt der Emissionshandel dazu, dass die Emissionen an anderer Stelle eingespart werden; die CO<sub>2</sub>-Bilanz ändert sich nicht und fällt innerhalb des Energiesektors genauso hoch aus als würden die Elektroautos mit CO<sub>2</sub>-freiem Strom betrieben.

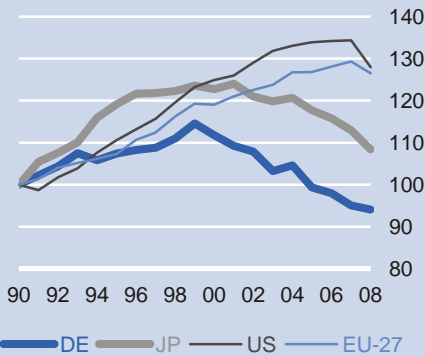
BEV werden in der EU von der Politik derzeit nicht nur wie Fahrzeuge ohne CO<sub>2</sub>-Emissionen behandelt. Es besteht sogar die Möglichkeit, die (unterstellten) Null-Emissionen von Elektroautos mehrfach auf das Flottenziel der Autohersteller anzurechnen. Da der für die Fahrzeuge produzierte Strom dem Emissionshandel unterliegt, kann man dieser Argumentation folgen, solange nicht die Zahl der Emissionszertifikate wegen des steigenden Anteils an Elektroautos erhöht würde. Durch die faktische Teilnahme der BEV am Emissionshandel werden ihre tatsächlichen Emissionen durch den Strommix bestimmt; die Emissionszertifikate unterscheiden nicht nach Stromherkunft. In der politischen Argumentation wird parallel zur steigenden Bedeutung der E-Mobilität ein Ausbau der Erneuerbaren gefordert. Für die Akzeptanz der E-Mobilität bei den Kunden mag dies förderlich sein. Aus ökologischer Sicht ist dies nicht notwendig,

**CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs**

Auch in anderen großen Industrieländern haben energieeffizientere Verbrennungsmotoren bereits dazu geführt, dass das Wachstum der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs abgebremst oder gar gesenkt wurde. Deutschland ist dabei der Vorreiter. Hierzulande liegen die Emissionen bereits unter denen des Kyoto-Basisjahres 1990. Auch in Japan gehen die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs zurück. Selbst in den USA hat sich der Anstieg deutlich verlangsamt. Die größten Zuwächse verzeichnet China. Hier haben sich die Emissionen des Straßenverkehrs seit 1990 in etwa verfünffacht. Absolut liegen sie heute mehr als doppelt so hoch wie in Deutschland.

**Deutschland ist Vorreiter**

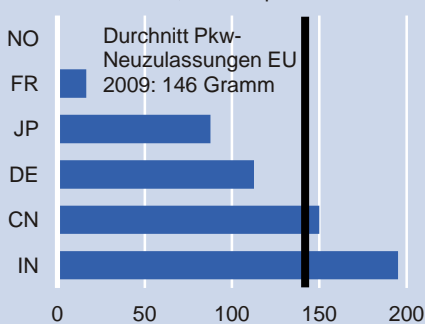
CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs, 1990=100



Quelle: Internationale Energieagentur **12**

**Der Strommix entscheidet**

CO<sub>2</sub>-Emissionen, Gramm pro Kilometer\*



\* Basierend auf einem Elektroauto mit einem Verbrauch von 20 kWh pro 100 Kilometer.

Quellen: Umweltbundesamt, Emissionfactors.com **13**

wenn die Zahl der Emissionszertifikate trotz des Mehrverbrauchs durch Elektroautos konstant bleibt bzw. auch die geplante jährliche Absenkung der Emissionsobergrenze nicht angepasst wird.

**Elektrofahrzeuge unterliegen indirekt dem Emissionshandel**

Der positive Klimaeffekt der E-Mobilität liegt vor allem darin, dass Treibhausgasemissionen in einem Sektor, der nicht dem EU-Emissionshandel unterliegt, vermindert werden.<sup>7</sup> Stattdessen trifft die steigende Nachfrage nach Strom und wohl auch nach Emissionszertifikaten auf ein jeweils begrenztes Angebot. Würden die 1 Mio. Elektrofahrzeuge in Deutschland entsprechend viele Autos mit gleicher jährlicher Fahrleistung (10.000 km) und einem durchschnittlichen Benzinverbrauch von 6 Litern pro 100 Kilometer ersetzen, sänke der CO<sub>2</sub>-Ausstoß um etwa 1,4 Mio. Tonnen. In Anbetracht dessen, dass die jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland seit 1999 um 30 Mio. Tonnen (rd. 18%) sanken, ist das ein eher bescheidener Beitrag, den das Elektroauto leisten kann.

Der genannte Beitrag der Elektroautos im Jahr 2020 entspricht rd. 1% der heutigen CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland. Diese Relation zeigt bereits, dass die geforderten und auch zu erwartenden Emissionsreduktionen auch im kommenden Jahrzehnt primär durch effizientere Verbrennungsmotoren erbracht werden müssen. Auch die fortschreitende Hybridisierung wird hier eine wachsende Rolle spielen. Allerdings teilen Hybride und Elektroautos ein Problem. Die durch sie erzielten Emissionsreduktionen weisen sehr hohe Vermeidungskosten auf. Beim BEV liegen heute die Vermeidungskosten pro Tonne CO<sub>2</sub> im vierstelligen Euro-Bereich, während die im Emissionshandel abgebildeten gesamtwirtschaftlichen Vermeidungskosten im Jahr 2020 vermutlich deutlich unter EUR 50 pro Tonne liegen werden (aktuell EUR 13).

**Klimabilanz von Elektroautos nicht zwangsläufig positiv**

Anders ist dagegen die Situation in Ländern ohne Emissionshandel. In diesen Ländern entscheidet allein die CO<sub>2</sub>-Intensität des nationalen Strommixes über die Klimaverträglichkeit von Elektroautos (Abbildung). Beispielsweise fiele die CO<sub>2</sub>-Bilanz eines Elektroautos deutlich schlechter aus, wenn der Strom auf Basis des chinesischen Kraftwerksparks mit seinem hohen Anteil an Kohlekraftwerken mit niedrigem Wirkungsgrad produziert würde. Übertragen auf das oben genannte Beispiel lägen die CO<sub>2</sub>-Emissionen – basierend auf dem chinesischen Energiemix – in einer Größenordnung von 150 g/km.<sup>8</sup> Da in China weder der Energiesektor noch die Wirtschaft allgemein einem Emissionshandelssystem unterliegen, würde ein Ausbau der E-Mobilität dort unter den aktuellen Gegebenheiten gesamtwirtschaftlich nicht zu einer Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber einem Szenario ohne E-Mobilität führen (siehe Grafik).

In Norwegen, das ebenfalls nicht am Emissionshandel teilnimmt, kann die E-Mobilität dagegen dazu beitragen, die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu verringern. Aufgrund des sehr hohen Anteils der weitgehend CO<sub>2</sub>-freien Wasserkraft lägen die CO<sub>2</sub>-Emissionen des erwähnten Elektroautos umgerechnet bei nur 1g/km.

<sup>7</sup> Die positiven Effekte der E-Mobilität auf lokale Schadstoff- und Lärmemissionen sind unbestritten.

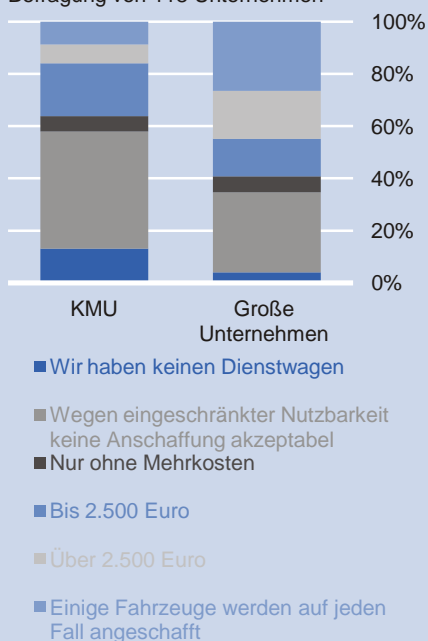
<sup>8</sup> Die Zahl basiert auf den bei www.emissionfactors.com ausgewiesenen Zahlen zu den durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen des Kraftwerksparks pro kWh. In der Literatur und Presse finden sich aber zum Teil deutlich höhere Werte.

### E-Mobilität in China: Die Motive

China dürfte das Thema E-Mobilität nicht in erster Linie aus Klimaschutzgründen oder zur Reduktion von Treibhausgasemissionen forcieren. Im Vordergrund stehen stattdessen die Ziele, die Abhängigkeit des Landes von Ölimporten und die Luftverschmutzung in den schnell wachsenden Städten des Landes zu verringern. Zudem will sich China in der E-Mobilität einen technologischen Vorsprung erarbeiten, weil der Rückstand gegenüber Unternehmen aus Europa, Japan/Korea und Nordamerika bei den traditionellen Antriebstechnologien groß ist; in der jungen Technologie will das Land von Beginn in der Spitzengruppe mit dabei sein, was die hohen Fördermittel für die E-Mobilität und heimische Unternehmen erklärt.

### Verbesserungsbedarf bei Technik und Kosten

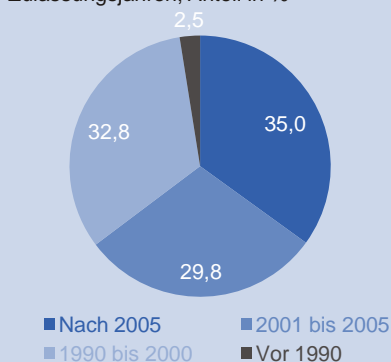
Welche Mehrkosten sind akzeptabel?  
Befragung von 118 Unternehmen



Quelle: IW Köln **14**

### Hohes Durchschnittsalter

Deutscher Pkw-Bestand nach Zulassungsjahren; Anteil in %



Quelle: Kraftfahrt-Bundesamt **15**

## Die Kundensicht: Wann sich ein Elektroauto lohnt

In vielen Diskussionen um die E-Mobilität stehen technologische Aspekte im Fokus. Dabei wird die Rolle des Kunden häufig vernachlässigt, obwohl ein Umstieg auf Elektrofahrzeuge vom Autofahrer erhebliche Verhaltensänderungen verlangt: Am augenfälligsten ist dabei, dass er im Gegensatz zu heute kürzere Reichweiten in Kauf nehmen muss. Und der Kunde muss zudem bereit sein, einen erheblichen Preisaufschlag gegenüber Benzinern oder Diesel-Pkw zu zahlen, der sich nur bei sehr hohen Fahrleistungen amortisiert.

Häufig wird die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen und Autos mit Verbrennungsmotor auf Basis der „Total Costs of Ownership“ (TCO) verglichen. Dies ist ein gerechtfertigtes Vorgehen, weil dabei alle Kostenkomponenten des Erwerbs und der Nutzung eines Fahrzeugs berücksichtigt werden. Auch die NPE hat in ihrem Bericht vom Mai 2011 solche Wirtschaftlichkeitsvergleiche anhand des TCO-Ansatzes vorgenommen. Danach liegt der Kostennachteil des Elektroautos zu Beginn des laufenden Jahrzehnts – je nach Fahrzeugsegment und Halter des Fahrzeugs (privat oder gewerblich) – zwischen EUR 5.000 und EUR 11.000. Die Lücke soll bis 2020 auf EUR 2.000 bis EUR 4.000 fallen. Nach Kalkulationen der NPE sinkt der gesamte Kostennachteil von Elektrofahrzeugen künftig also deutlich, bleibt aber auch in knapp zehn Jahren noch signifikant.

### Annahmen zum Kostenvergleich optimistisch für E-Mobilität

Eine kritische Analyse der Annahmen ist aus unserer Sicht gerechtfertigt. So basiert der Kostenvergleich der NPE auf der Annahme, dass die zu vergleichenden Autos in der Kompaktklasse auf eine jährliche Fahrleistung von 15.000 km und in der Mittelklasse sogar auf 30.000 km kommen. Dieser Wert ist aus unserer Sicht sehr hoch gewählt, denn die mittlere Fahrleistung von Benzinern in Deutschland liegt derzeit unter 12.000 km; bei Diesel-Pkw beträgt sie rd. 20.000 km. Wir halten es für unwahrscheinlich, dass Elektrofahrzeuge (BEV und PHEV) im Durchschnitt derart hohe jährliche Fahrleistung erreichen. Beim TCO-Vergleich begünstigen solche Annahmen die E-Mobilität aufgrund ihrer im Vergleich zum Verbrennungsmotor niedrigen variablen Kosten erheblich.

Zudem wird ein enormer technischer Fortschritt angenommen. So sollen sich die Batteriekosten von heute etwa EUR 800 pro kWh (laut NPE) innerhalb von nur drei Jahren halbieren; wie vorne ausgeführt, halten wir dieses Tempo des Fortschritts zumindest für ambitioniert. Diese Annahme führt ebenfalls dazu, dass Elektrofahrzeuge im Kostenvergleich besser abschneiden als wir es für wahrscheinlich halten.

Ferner wird beim TCO-Vergleich eine Nutzungsdauer der Fahrzeuge von zehn Jahren unterstellt. Tatsächlich dürften Pkw heute durchschnittlich aber spürbar länger genutzt werden.<sup>9</sup> Der Effekt dieser Annahme auf den Kostenvergleich ist nicht eindeutig. Denn eine längere Nutzungsdauer (und damit Fahrleistung) wirkt positiv auf die TCO-Bilanz des Elektroautos. Eine Lebensdauer von mehr als zehn Jahren kann die (teure) Batterie durchaus erreichen; Leistungsverluste wird sie in dieser Zeitspanne aber in jedem Fall erleiden.

<sup>9</sup> Das Kraftfahrt-Bundesamt weist keine Zahlen mehr zum Lebensalter von Autos bei Abmeldung aus. Das Durchschnittsalter der aktuell in Deutschland zugelassenen Pkw beträgt 8,3 Jahre. Knapp 15 Mio. (oder 35%) der aktuell im Bestand befindlichen Autos in Deutschland wurden im Jahr 2000 oder früher zugelassen.





### Amortisationsrechnung I

**Reales Beispiel:** Wir vergleichen zwei real verfügbare Autos mit ähnlicher Größe und Ausstattung, basierend auf heutigen Benzin- und Strompreisen. Auf der einen Seite schauen wir uns den Toyota Aygo mit Benzinmotor (1 Liter Hubraum) an. Der Listenpreis (bei gehobener Ausstattung) liegt bei rd. EUR 11.000. Der kombinierte Durchschnittsverbrauch beträgt 4,6 Liter Benzin auf 100 Kilometer. Wir unterstellen aber, dass das Fahrzeug überwiegend im Stadtverkehr eingesetzt wird und nehmen daher den innerörtlichen Verbrauch; das sind 5,5 Liter pro 100 Kilometer. Wir unterstellen ferner einen Benzinpreis von EUR 1,60 pro Liter. Diesem Auto stellen wir den Mitsubishi i-MiEV gegenüber, ein reines Elektrofahrzeug, das von einer Lithium-Ionen-Batterie mit einer Kapazität von 16 kWh angetrieben wird. Der Listenpreis liegt knapp über EUR 34.000, wobei die Ausstattung etwas umfangreicher ist als beim Toyota Aygo. Der Normverbrauch beträgt etwa 10 kWh auf 100 Kilometer. Wir kalkulieren mit einem Strompreis von EUR 0,22 pro kWh. Bei diesen Annahmen amortisiert sich der höhere Kaufpreis für das Elektroauto erst ab einer Fahrleistung von über 330.000 Kilometern. Beide Fahrzeuge werden in ihrem Lebenszyklus kaum diese Fahrleistung erreichen. Das aktuelle Elektroauto ist unabhängig von der geringeren Reichweite dem Konkurrenzmodell mit Verbrennungsmotor aus wirtschaftlicher Sicht weit unterlegen.

### Amortisationsrechnung II

**Fiktives Beispiel 2020:** In unserem zweiten Wirtschaftlichkeitsvergleich unterstellen wir einen rasanten technischen Fortschritt in der Batterietechnologie, der zu einer starken Kostenreduktion führt. Unser Beispiel bezieht sich auf ein Fahrzeug aus der Kompaktklasse. Der Preisunterschied auf der Einkaufsseite liegt bei „nur noch“ EUR 10.000. Den Verbrauch des Benziners setzen wir mit 7 Litern auf 100 Kilometer an. Für das Elektrofahrzeug rechnen wir mit (nur) 15 kWh pro 100 Kilometer. Wir unterstellen ferner, dass der Benzinpreis schneller steigt als der Strompreis: Wir rechnen mit einem Benzinpreis von EUR 1,85 pro Liter und mit einem Strompreis von EUR 0,24 je kWh. Dabei unterstellen wir, dass der Staat etwaige Mindereinnahmen bei der Energiesteuer (Mineralölsteuer) nicht durch eine höhere Stromsteuer kompensiert. Selbst unter diesen für das Elektroauto positiven Annahmen wird der Amortisationszeitpunkt erst nach gut 100.000 Kilometern Fahrleistung erreicht. Ein Voll-Hybrid würde sich bei überwiegender Nutzung im Stadtverkehr sehr viel früher amortisieren, vor allem weil die Anschaffungskosten näher am Konkurrenzmodell liegen.

Schließlich könnten die Annahmen der NPE hinsichtlich des Ölpreises (USD 99 pro Barrel im Jahr 2020) zu vorsichtig sein. Wir rechnen bis dahin mit einem deutlich höheren Ölpreis – und damit auch mit einem höheren Benzin- und Dieselpreis. Dies wiederum würde die Wettbewerbsfähigkeit von Autos mit Verbrennungsmotor gegenüber Elektrofahrzeugen verglichen mit den Annahmen der NPE verschlechtern – konstante Strompreise vorausgesetzt.

Unter dem Strich sind wir der Auffassung, dass Elektrofahrzeuge in der TCO-Analyse der NPE durch die getroffenen Annahmen gegenüber Autos mit Verbrennungsmotor begünstigt werden. Vor allem die unterstellte hohe jährliche Fahrleistung sowie den schnellen technischen Fortschritt sehen wir kritisch. Gleichwohl sind auch wir der Auffassung, dass sich der Kostenabstand verringern wird.

### Hohe Fahrleistung für Amortisation notwendig

Als Alternative zum TCO-Ansatz haben wir für einen Wirtschaftlichkeitsvergleich zwei verschiedene Amortisationsrechnungen erstellt. Die wichtigsten Einflussfaktoren sind der Kaufpreis des Fahrzeugs sowie die durch die Nutzung anfallenden variablen Energiekosten. Wir unterstellen, dass es zwischen Elektrofahrzeugen und Benzinern bzw. Diesel-Pkw bezüglich der Unterhaltskosten (z.B. Wartung, Steuern, Versicherung) keine entscheidenden Unterschiede gibt. Zwar dürften die Wartungskosten eines Elektrofahrzeugs niedriger sein als bei einem Auto mit Verbrennungsmotor, z.B. weil es weniger Verschleißteile hat. Ferner dürften etwaige Reparaturkosten bei Elektroautos höher ausfallen, u.a. weil anfangs nur wenige Werkstätten entsprechende Arbeiten durchführen können. Zudem fällt bei reinen Elektrofahrzeugen nach geltendem Recht für fünf Jahre keine Kfz-Steuer an. Dagegen kostet die Versicherung bei Elektroautos aufgrund des höheren Kaufpreises mehr.

Eine solche Amortisationsrechnung ist aus unserer Sicht auch deshalb gerechtfertigt, weil sie eher dem Kalkül eines privaten Autokäufers entspricht als eine TCO-Analyse. Wir unterstellen, dass für den Kauf und die Nutzung von Elektrofahrzeugen keinerlei Subventionen gewährt werden.

### Geringe Reichweite kein grundsätzliches Problem ...

Die Beispielrechnungen (siehe Textboxen) zeigen, wie anspruchsvoll es ist, die Wettbewerbsfähigkeit des Elektroautos zu erreichen, zumal der technische Fortschritt auch bei Benzinern und Diesel-Pkw weitergeht: Bis 2020 dürften die durchschnittlichen Verbräuche um mindestens 25% sinken – z.B. durch kleinere Motoren (Downsizing), Benzindirekteinspritzung oder Leichtbau. Die hohen Kosten von BEV sind also die entscheidende Hürde für deren Markterfolg. Die kurze Reichweite von Elektroautos ist aus unserer Sicht dagegen kein K.O.-Kriterium für Kunden. Denn in Europa beträgt die durchschnittliche zurückgelegte Distanz einer Autofahrt etwa 30 bis 40 Kilometer pro Tag. Und an 80% aller Tage wird ein Auto weniger als 40 Kilometer gefahren. Dies sind Werte, die sogar von PHEV oder REEV im Elektromodus zurückgelegt werden können.

### ... für potenzielle Erstkunden

Wenn man von wirtschaftlichen Aspekten absieht, bieten sich BEV, PHEV oder REEV daher als Zweitwagen für Familien, Kurzstreckenpendler bzw. Menschen in Stadtrandlagen oder als Stadtauto an; ein Stellplatz in einer Garage mit Stromanschluss ist hilfreich für die Akzeptanz. Als gewerbliche Kunden sind Unternehmen prädestiniert, die z.B. im städtischen Lieferverkehr oder im mobilen Pflege-

**Zielkonflikt in der E-Mobilität**

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

dienst tätig sind. Sie kommen auf geringe tägliche Kilometerleistungen, die rein elektrisch bewältigt werden können. Bei ihnen kommt als großer Vorteil hinzu, dass sie in ihren Betrieben leicht eine Ladeinfrastruktur errichten können; da viele Fahrzeuge nachts geladen werden dürften, reicht in der Regel eine einfache Steckdose. Natürlich werden sich viele Unternehmen Elektroautos in jedem Fall anschaffen. Auch wohlhabende, technikaffine Privatleute, für die die höheren Kosten keine große finanzielle Belastung darstellen, zählen zu den Erstkunden – und das schon heute.

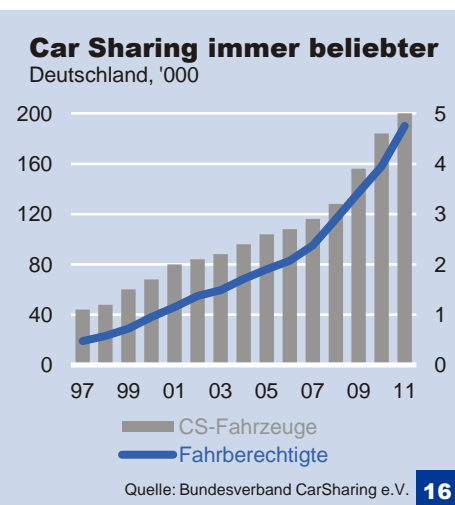
Grundsätzlich werden sich BEV auch in der näheren Zukunft nicht rechnen. Die Batteriekosten sind dabei der entscheidende Kostentreiber. Sie müssen in den kommenden Jahren durch technischen Fortschritt und Größenvorteile in der Produktion um etwa 70% bis 80% sinken, damit reine Elektroautos im Massenmarkt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

**Alternative Mobilitätskonzepte gewinnen an Bedeutung ...**

In der jüngeren Vergangenheit gewinnen alternative Mobilitätskonzepte in Deutschland an Bedeutung. Im Mittelpunkt steht dabei häufig die Idee, dass die Kunden in erster Linie mobil sein möchten und nicht unbedingt ein eigenes Fahrzeug besitzen wollen. Je nach Mobilitätsbedürfnis greifen sie auf die für sie passende Kombination von Verkehrsmitteln zurück (z.B. Pkw, ÖPNV, Fahrrad). Car Sharing, das in den letzten Jahren ein stetiges Wachstum in Deutschland verzeichnet hat, oder verschiedene Mietwagensysteme sind Beispiele, in denen Pkw eine wichtige Rolle spielen. Dabei kann die Flexibilität des automobilen Individualverkehrs – wenn auch mit etwas Planungsvorlauf – in Anspruch genommen werden, ohne die hohen Fixkosten eines eigenen Autos tragen zu müssen. Die Nutzung solcher Angebote kann durch den Einsatz von modernen Informations- und Kommunikationstechnologien erleichtert werden; diese sollen z.B. dem Kunden helfen, das nächste Auto zu lokalisieren. Gerade für junge, städtische Bevölkerungsgruppen sind solche Konzepte interessant, da sie im Alltag nur selten ein eigenes Fahrzeug benötigen. Für die Automobilindustrie und den Autohandel resultieren hieraus Geschäftsoptionen als Mobilitätsdienstleister.

**... verhelfen der E-Mobilität allein aber nicht zum Durchbruch**

Häufig wird argumentiert, dass solche Mobilitätskonzepte prädestiniert seien, um die Marktdurchdringung der E-Mobilität zu steigern. Auf den ersten Blick kann man hierfür gute Gründe finden, denn viele Konzepte sind auf den Stadtverkehr ausgelegt. Zudem müssen die Kunden nicht die hohen Anschaffungskosten eines eigenen Elektroautos tragen. Auf den zweiten Blick sind jedoch Zweifel angebracht. So besitzen Elektroautos – abgesehen von geringen lokalen Emissionen – kein Alleinstellungsmerkmal, das sie gegenüber anderen Fahrzeugen (z.B. Kleinwagen mit Benzinmotor) auszeichnet. Im Klartext: Car Sharing und Mietwagenmodelle funktionieren auch sehr gut mit preiswerteren Autos mit klassischem Verbrennungsmotor und sind wirtschaftlich lukrativer – zumindest solange der Staat deren Nutzung in Innenstadtlagen nicht massiv verteuert



**Sparsame Kleinwagen mit Verbrennungsmotor wirtschaftlich lukrativer für moderne Mobilitätskonzepte**



oder verbietet, was politisch nur schwer durchzusetzen sein wird. Abgesehen vom günstigeren Preis besitzen Verbrenner sogar den Vorteil, dass sie für das System aufgrund der höheren Reichweite und kürzerer Tankzeiten länger für die Nutzung durch die Kundenschaft zur Verfügung stehen.

### **Batterie-Leasing oder Wechselstationen: Wer zahlt?**

Es existieren weitere Ideen bzw. erste Angebote, mit denen E-Mobilität einem größeren Kundenkreis zugänglich gemacht werden soll. Eine Option besteht darin, dass der Kunde Elektroautos (oder die eingebauten Batterien) nicht kaufen, sondern nur leasen kann und sie nach einiger Zeit (z.B. drei Jahre) wieder an den Hersteller oder Händler zurückgibt. Das Hauptargument für das Leasing-Modell liegt erneut darin, dass der Kunde nicht den hohen Kaufpreis eines Elektroautos zahlen muss, sondern „nur“ eine monatliche Leasingrate, mit der die Stromkosten, Wartung usw. abgegolten sind. Auch dieses Konstrukt hört sich zunächst erfolversprechend an. Das entscheidende Problem bleibt aber auch hier ungelöst: Die höheren Kosten müssen von irgendeiner Stelle getragen werden – entweder vom Autohersteller bzw. dem Händler über Quersubventionen, vom Kunden über eine hohe Leasingrate oder vom Staat über Zuschüsse.

Eine weitere Idee, die ebenfalls darauf basiert, dass der Kunde nicht Eigentümer der Batterie ist, verfolgt zusätzlich das Ziel, das Reichweitenproblem von Elektroautos zu lösen. Im Kern stehen Wechselstationen für Batterien, an denen die leere Batterie gegen eine aufgeladene Batterie getauscht werden soll. Die großflächige Umsetzung dieser im Grunde guten Idee steht aus unserer Sicht jedoch vor gewaltigen Hürden. So wird pro Elektroauto mehr als eine Batterie benötigt; dies erhöht die Kosten des Systems. Ferner sind enorme Investitionen in die entsprechende Infrastruktur notwendig. Würden sehr viele Fahrzeuge die Wechselstationen nutzen, wären die logistischen Herausforderungen enorm (z.B. Transport und Lagerung von Batterien). Das Konzept verlangt ein hohes Maß an Normung im Fahrzeug- und Batteriebau. Denn an den Wechselstationen müssen perspektivisch sowohl die Batterien von Kleinwagen als auch von Luxuslimousinen getauscht werden. Dies wirft technologische Probleme auf. Denn Batterien und Unterboden müssen genormt sein. Auch der exakte Anschluss an das Bordnetz und die Belüftung müssen einheitlich und sicher sein. Diese Standardisierung würde die Möglichkeiten des Fahrzeugdesigns beschränken. Es ist fraglich, ob die Autohersteller hieran ein Interesse haben.

Es ist aus heutiger Sicht realistischer, dass das Problem der geringen Reichweiten durch PHEV oder REEV adressiert wird. Die Möglichkeiten der Elektrifizierung des Antriebsstranges sind hier flexibler und ökonomisch sinnvoller. Letztlich zeigen die skizzierten Konzepte zur Förderung der E-Mobilität erneut, dass sinkende Kosten die *conditio sine qua non* für den Markterfolg der E-Mobilität sind.

### **Ladeinfrastruktur: Ausbau vorerst nur punktuell nötig**

Der Einstieg in die E-Mobilität erfordert den Aufbau einer Ladeinfrastruktur. Folgende Aspekte sind dabei wichtig:

- Angesichts der erwarteten langsamen Marktdurchdringung von Elektroautos kann auch der Aufbau der Ladeinfrastruktur schrittweise erfolgen. Laut NPE wären für 1 Mio. Elektroautos etwa 900.000 Ladepunkte ausreichend (bis 2014 knapp 120.000 Ladestationen). Die meisten Ladestationen dürften auf den Grundstücken der privaten und gewerblichen Kunden zu finden sein.

### **Elektroantrieb für Zweiräder**

Anders als im Automobilbereich, entwickelt sich für elektrisch angetriebene Zweiräder schon heute eine Marktlösung. So wurden 2010 weltweit bereits über 30 Mio. Elektrofahräder (Pedelecs) verkauft, davon über 90% in China. Der Markterfolg in China erklärt sich zum Teil durch die ordnungsrechtlichen Rahmenbedingungen. Man benötigt keine Betriebserlaubnisse für diese Zweiräder, und in einigen Großstädten sind Motorroller verboten. Auch die Nachfrage nach rein elektrisch betriebenen Zweirädern (Elektroller) wächst stark.

Gründe für die schnelle Marktdurchdringung liegen in den niedrigeren Kosten, weil die Batterie sehr klein ausfallen kann. So kostet in China ein Pedelec kaum mehr als USD 200. Elektroller werden in Deutschland für unter EUR 1.000 angeboten.

Vorteilhaft ist auch, dass viele Probleme des BEV vermieden werden:

- Zweiräder sind für die Kurzstrecke prädestiniert. Ein Reichweitenproblem besteht faktisch nicht.
- Eine umfangreiche Ladeinfrastruktur ist nicht zwingend notwendig. Der Stromanschluss im Haushalt reicht häufig aus, da die Batterie bei vielen Modellen mit in die Wohnung genommen und dort aufgeladen werden kann.

Letztlich basieren elektrische Fahrräder auf einer gänzlich anderen Technologie als Elektroautos.

### Frühzeitig mit Investitionen in Infrastruktur beginnen

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

Es versteht sich fast von selbst, dass die öffentliche Ladeinfrastruktur künftig unabhängig vom Eigentümer allen Nutzern diskriminierungsfrei zur Verfügung stehen sollte und dass die Bezahlung und Abrechnung unkompliziert sein muss. Auch Aspekte des Datenschutzes müssen adressiert werden.

- Der Aufbau der Ladeinfrastruktur erfordert hohe Investitionen. Gerade Ladestationen im öffentlichen Raum kosten nach Einschätzung der NPE zwischen EUR 4.700 und EUR 9.000 pro Ladepunkt. Schnellladesysteme sind heute noch deutlich teurer. Es ist offensichtlich, dass sich diese Investitionen allein über die verkaufte Strommenge nicht rechnen werden. Das Potenzial, zusätzliche Einnahmen über Werbung oder Mehrwertdienste (z.B. Informationsangebote) zu generieren, halten wir für begrenzt. Öffentliche Ladestationen werden also auf Zuschüsse des Staates oder Quersubventionen der Industrie bzw. Energiewirtschaft angewiesen sein. Ladestationen auf privaten oder gewerblichen Grundstücken (oftmals eine einfache Steckdose) sind deutlich billiger oder bereits vorhanden. Parkhausbetreiber können durch Ladestationen einen Mehrwert für ihre Kunden anbieten und so einen Anreiz haben, zu investieren.
- Die meisten privaten und gewerblichen Erstkunden von Elektroautos dürften über eine eigene Ladestation verfügen oder diese zu relativ niedrigen Kosten installieren können. Es ist zudem zu erwarten, dass diese Erstkunden die Fahrzeugnutzung im Wissen um eine zunächst nur begrenzt verfügbare öffentliche Ladeinfrastruktur planen werden. Das heißt, sie werden für längere Strecken auf eine Alternative zurückgreifen können.

Unter dem Strich gibt es ausreichend viele potenzielle Nutzer von Elektroautos, die im privaten und/oder beruflichen Umfeld ohne große Kosten verlässlich auf eine Ladestation (Steckdose) für ein Elektroauto zurückgreifen könnten. Als empirische Indikatoren sei die Zahl von gut 10 Mio. Einfamilienhäusern in Deutschland genannt, von denen die meisten in der städtischen Peripherie über eine Garage oder Pkw-Stellplatz verfügen dürften. Erste Praxistests mit kleineren Elektrofahrzeugflotten zeigen, dass sich die Nutzer schnell an die eingeschränkte Reichweite anpassen. Daher sind wir der Auffassung, dass das weitgehende Fehlen einer zusätzlichen öffentlichen oder halböffentlichen Ladeinfrastruktur (z.B. auf Parkplätzen von Supermärkten) kein fundamentaler Hemmschuh für einen beginnenden Massenmarkt sein muss. Lediglich das große Potenzial von städtischen Kunden, die nicht über eine Garage bzw. einen festen Stellplatz verfügen, wird man ohne den Aufbau einer öffentlichen Ladeinfrastruktur nur schwer heben können. Hier müssen die Anbieter zusammen mit den jeweiligen Kommunen praktikable Lösungen finden (z.B. Stromanschluss an der Straßenlaterne), um diese potenziellen Kunden vom Kauf eines Elektroautos zu überzeugen; logistische Probleme (Zahl der Stellplätze, Abrechnungssysteme) sind freilich nicht trivial.

In der längeren Frist ist es aus ökonomischen und ökologischen Gründen erstrebenswert, dass die Fahrzeugbatterien automatisch in Schwachlastzeiten aufgeladen werden. Dies erfordert Investitionen in intelligente Stromnetze und Zähler (Smart Grids).<sup>10</sup> Ein Anreiz für die Kunden, diese Investitionen zu tätigen, läge darin, den Strompreis in Zeiten geringer Nachfrage zu senken.

### 3. Politische Optionen zur Förderung der E-Mobilität

Wir haben gezeigt, dass die E-Mobilität aufgrund der hohen Kosten und anderer Unsicherheiten derzeit noch weit von einem wirtschaftlich tragfähigen Massenmarkt entfernt ist, langfristig jedoch ein

<sup>10</sup> Vgl. Auer, Josef und Stefan Heng (2011). Smart Grids: Energiewende erfordert intelligente Elektrizitätsnetze. Deutsche Bank Research. E-economics 84. Frankfurt am Main.





### **Hohe Förderung der Technologie erstaunlich**

grundsätzlich großes Potenzial bietet. Es ist zu beobachten, dass die Regierungen in vielen Ländern die E-Mobilität durch verschiedene Maßnahmen unterstützen oder diese in Aussicht stellen.

Es ist erstaunlich, dass ein Nischenprodukt wie das BEV, das wirtschaftlich auf absehbare Zeit noch nicht konkurrenzfähig ist und hohe CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten verursacht, eine derart hohe politische Unterstützung genießt – und das nicht nur in Ländern mit eigener Automobilindustrie. Eine solche frühzeitige Festlegung zur Förderung einer speziellen Technologie birgt vor allem dann für den Staat hohe (finanzielle) Risiken, wenn kein Ausstieg aus der Förderung festgesetzt wird. Es ist zudem das exakte Gegenteil von technologieoffener staatlicher Förderpolitik, denn es versperrt potenziell den Weg für eventuell bessere Speichertechnologien (z.B. Wasserstoff). Man kann die Förderung der E-Mobilität mit Blick auf die statische Effizienz der Technologie also grundsätzlich sehr kritisch sehen, sie ist aber politische Realität.

### **Endlichkeit vom Öl als Grund für staatliche Förderung akzeptabel**

#### ***Politische Motivationen unterschiedlich***

Die übergeordneten Motive zur Förderung der Technologie dürften vor allem darin liegen, dass die globalen Ölreserven endlich sind und der Übergang ins „Zeitalter nach dem Öl“ frühzeitig begonnen werden sollte, um plötzliche wirtschaftliche Friktionen zu vermeiden. Zudem erhofft man sich einen Beitrag zur Bekämpfung des Klimawandels, obwohl es kostengünstigere Maßnahmen gibt, um CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren. Im Vertrauen auf den technischen Fortschritt (dynamische Effizienz) könnte man dann die Förderung einer heute noch nicht wettbewerbsfähigen Technologie begründen.

Darüber hinaus sind die Motive für die politische Förderung in den einzelnen Staaten sehr unterschiedlich. In Ländern, in den die Automobilindustrie ein wichtiger Arbeitgeber ist, spielt die Unterstützung der heimischen Industrie sicherlich eine Rolle, wenngleich die Unternehmen bei der Entwicklung der E-Mobilität von Land zu Land unterschiedlich weit sind. Wenn alle anderen Nationen die Technologie fördern, ist es mit Blick auf ein faires Wettbewerbsumfeld für die Politik schwer zu argumentieren, als einziges Land in diesem „Subventionswettlauf“ nicht mitzumachen.

### **Industriepolitik spielt in vielen Staaten eine große Rolle**

Das industriepolitische Motiv dürfte gerade in China groß sein, denn in einer jungen Branche kann man durch staatliche Zuschüsse leichter „internationale Champions“ aufbauen. Aber auch in Frankreich und den USA dürfte die Förderung der jeweils heimischen Unternehmen eine große Rolle spielen; in Frankreich kommt hinzu, dass der Anteil der weitgehend CO<sub>2</sub>-freien Kernenergie am Strommix hoch ist. In Deutschland werden bislang keine direkten Zuschüsse zum Kauf von Elektroautos in Aussicht gestellt, dennoch soll die Technologie und damit auch die hiesige Industrie gefördert werden.

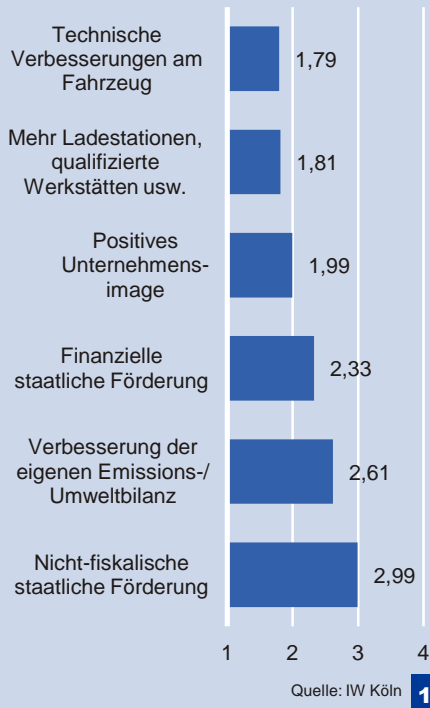
Ein weiteres Argument für die Förderung der E-Mobilität liegt in der Möglichkeit, lokale Schadstoff- und Lärmemissionen zu verringern. Das oben erwähnte Argument der CO<sub>2</sub>-Reduktion ist besonders in jenen Ländern glaubwürdig, die nicht über eine eigene Automobilindustrie verfügen, und die Technologie dennoch fördern (z.B. Niederlande, Dänemark). Die Tatsache, dass die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der E-Mobilität sehr hoch sind, spielt für die politische Willensbildung hier offenbar keine große Rolle.

#### ***Privilegien im Straßenverkehr unproblematisch***

Elektrofahrzeuge sind auf absehbare Zeit wirtschaftlich noch nicht rentabel. Wenn die Politik die Technologie direkt oder indirekt dennoch unterstützen möchte, gibt es hierfür viele Möglichkeiten, mit

### Expertenbefragung: Instrumentenwirksamkeit

Antwortkategorien: 1: sehr stark, 2: eher stark, 3: eher schwach, 4: gar nicht



### Das Risiko, auf die falsche Technologie zu setzen, ist beträchtlich

spezifischen Vor- und Nachteilen: Man kann zwischen monetären und nicht-monetären Maßnahmen unterscheiden sowie zwischen Maßnahmen, die beim Endkunden oder bei der Industrie ansetzen. Im Folgenden beleuchten wir verschiedene Förderoptionen.

Zu den klassischen nicht-monetären Anreizen zur Förderung der E-Mobilität, die sich an den Endkunden richten, zählen Privilegien für Elektrofahrzeuge im Straßenverkehr (z.B. Nutzung von Busspuren oder besonders ausgewiesenen Parkplätzen). Solche Maßnahmen sind aus ordnungspolitischer Sicht relativ unproblematisch; die Begünstigung gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor kann man u.a. mit den niedrigeren lokalen Schadstoff- und Lärmemissionen begründen. Es müssen zwar juristische und technische Voraussetzungen geschaffen werden, aber dies sollte auch kurzfristig umzusetzen sein. Naturgemäß stößt eine solche Privilegierung mit steigender Zahl von Elektrofahrzeugen an logistische Grenzen; ihre Wirkung dürfte langfristig nachlassen; das IW-Umweltexpertenpanel signalisiert zudem, dass solche Privilegien bei der Kaufentscheidung eher eine untergeordnete Rolle spielen. Die Privilegien für Elektrofahrzeuge könnten natürlich durch Straßenbenutzungsgebühren oder gar Fahrverbote für traditionelle Pkw z.B. in bestimmten Stadtteilen ergänzt werden (z.B. City-Maut), die freilich monetären Charakter haben. Wir halten umfassende Regelungen dieser Art aber kurz- und mittelfristig weder für angemessen noch für politisch durchsetzbar.

### Monetäre Anreize ...

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

Viele Staaten setzen auf eine Mischung aus direkten und indirekten Subventionen. Dabei liegen die Gesamtbeträge teilweise im fünfstelligen Bereich, also in einer Größenordnung, für die man einen gut ausgestatteten Kleinwagen kaufen könnte. Die indirekten Zuschüsse umfassen vor allem verschiedene steuerliche Erleichterungen, verbesserte Abschreibungsregeln oder verbilligte Kredite für die Finanzierung der Fahrzeuge.<sup>11</sup>

### ... bergen hohe Risiken

Direkte Kaufprämien besitzen gegenüber indirekten Subventionen den Vorteil, dass sie transparenter sind und mit weniger Transaktionskosten verbunden sein dürften. Zudem ist der Kreis der potenziell Begünstigten bei pauschalen Zuschüssen höher als bei indirekten steuerlichen Regelungen.

Wenn das politische Ziel lautet, möglichst viele Elektroautos in den Markt zu bringen, verfügen staatliche Kaufprämien über eine hohe Effektivität. Man kann monetäre Anreize aber aus vielen Gründen sehr kritisch sehen. Es handelt sich um einen Markteingriff, der eine bestimmte Technologie begünstigt, von der die Politik heute nicht wissen kann, wann sie sich ohne Subventionen im Markt behauptet. Durch hohe Zuschüsse verhilft man zwar einer Technologie in einem

<sup>11</sup> Die NPE behandelt in ihrem jüngsten Bericht mögliche monetäre Anreize.



### Sollte sich der Staat die Förderung in Zeiten knapper Kassen leisten?

abgegrenzten Markt zum Durchbruch. Gleichzeitig besteht aber die Gefahr, dass andere Optionen, die langfristig ökonomisch und/oder ökologisch besser wären, nicht auf den Weg gebracht werden. Zudem führen Subventionen zu Besitzständen, weshalb sie stets schwer wieder abzubauen sind. Wenn eine solche Förderung beispielsweise zu Arbeitsplätzen in den relevanten Branchen führt, wird eine Rückführung der Subventionen solange schwierig sein, wie die Technologie noch nicht eigenwirtschaftlich angeboten werden kann.

Grundsätzlich kann man kritisch hinterfragen, ob sich die Regierungen in Zeiten chronisch knapper öffentlicher Kassen solche Zuschüsse leisten sollten. Denn aufgrund des aktuell und auch mittelfristig hohen Kostennachteils von Elektrofahrzeugen werden staatliche Fördermaßnahmen schnell sehr teuer, wenn die E-Mobilität die Nische verlassen soll. Würden in Deutschland die bis 2020 angestrebten 1 Mio. Fahrzeuge (inklusive PHEV) z.B. mit „nur“ EUR 5.000 pro Auto gefördert, läge der staatliche Subventionsbedarf bei EUR 5 Mrd. – freilich verteilt über knapp zehn Jahre. Die Kostenlücke der Fahrzeuge wäre damit nicht geschlossen.

#### **Wenn finanzielle Förderung, dann mit klar definiertem Ende**

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

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

Ein Nachteil einer solchen Förderpolitik läge u.a. darin, dass es bei einem schnellen technischen Fortschritt zu Mitnahmeeffekten käme. Zudem ist die Gewährung des Zuschusses nach dem Windhundverfahren nicht unproblematisch. Ein weiteres Problem in der Praxis dürfte darin liegen, dass eine solche Förderpolitik in gewissem Rahmen international abgestimmt werden müsste.

Um es noch einmal zu betonen: Wir stehen einer monetären Förderung für den Kauf von Elektroautos sehr skeptisch gegenüber. In Deutschland sollen die monetären Anreize für den Kauf von Elektroautos gering ausfallen. Das Ziel, Leitmarkt für die E-Mobilität zu

#### **Rechenbeispiel für staatliche Förderung**

Es wird angenommen, dass in Deutschland ab 2015 der Absatz von maximal 250.000 Elektroautos (BEV, PHEV, REEV) mit EUR 10.000 pro Auto gefördert wird.

Es wird ferner angenommen, dass die maximale Zahl der geförderten Fahrzeuge linear um 25.000 pro Jahr und die Förderung ebenfalls linear um EUR 1.000 pro Jahr sinken. Ab 2025 gäbe es in diesem Beispiel dann keine Förderung mehr.

Wenn die Förderkontingente komplett im jeweiligen Jahr ausgeschöpft würden, käme auf den Staat eine maximale nominale Fördersumme von gut EUR 9,6 Mrd. zu – verteilt auf zehn Jahre. In den Genuss der Förderung kämen in diesem Beispiel 1,375 Mio. Autos.

### Unterstützung der Grundlagenforschung ordnungspolitisch unbedenklich

#### CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten im Straßenverkehr sehr hoch

Ein grundsätzlicher Kritikpunkt zur Regulierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Fahrzeugen liegt in den hohen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten von alternativen Antriebstechnologien wie der E-Mobilität. Letztlich führen die staatlichen Vorgaben dazu, dass es für das homogene und in der EU auch handelbare Gut CO<sub>2</sub> zu unterschiedlichen Preisen kommt. Dies ist ein Zeichen für ökologische und ökonomische Ineffizienz – entspricht aber der politischen Realität

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

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

werden, wird man so zwar nicht erreichen; es ist aber angesichts der geringen Größe des eigenen Marktes ohnehin ein ambitioniertes Ziel. Für die hiesige Industrie muss dies aber nicht zwangsläufig eine schlechte Nachricht sein. Denn wenn sie wettbewerbsfähige Produkte entwickelt und auf den Markt bringt, kann sie von den höheren Fördersätzen in anderen Ländern profitieren.<sup>12</sup>

#### Förderung der Industrie wirkt auf den Wettbewerb

Die bisherigen Fördermaßnahmen setzten beim Endkunden an. Die Politik kann die E-Mobilität auch unterstützen, indem die relevanten Unternehmen gefördert werden. Mit Blick auf das Ziel, Leitanbieter in diesem Bereich zu werden, ist dies auch ein probates Mittel. Dabei sind Zuschüsse für die Grundlagenforschung ein geeignetes Instrument und ordnungspolitisch unbedenklich, wenn sie diskriminierungsfrei gewährt werden. Zudem sollte sich der Staat zusammen mit der Industrie in Teilbereichen der E-Mobilität für Normierung und Standardisierung einsetzen (z.B. bei der Ladeinfrastruktur), ohne Wettbewerb a priori auszuschließen.

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

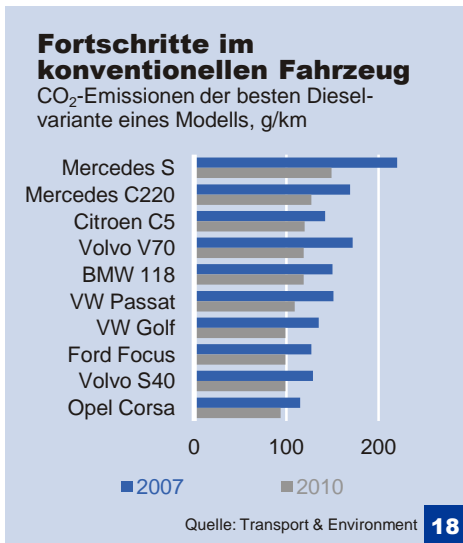
#### Ordnungsrecht: Auflagen zu CO<sub>2</sub>-Emissionen wichtiger Hebel

Eines der effektivsten, aber in der Regel auch ineffizientesten Instrumente in der Umweltpolitik ist das Ordnungsrecht (siehe Textbox), zu dem auch die erwähnten Privilegien im Straßenverkehr zählen. Das Ordnungsrecht spielt für die E-Mobilität über eine andere Wirkungsweise bereits heute eine wichtige Rolle, denn die Auflagen zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Autos sind einer der wichtigsten Treiber zur „Förderung“ dieser Technologie: Insbesondere das EU-Ziel, die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen neuer Pkw bis 2020 auf 95 Gramm pro Kilometer zu senken, wird die Elektrifizierung des Antriebsstrangs vorantreiben, denn bei Zielverfehlung drohen empfindliche Strafzahlungen. Auch in anderen Staaten gibt es CO<sub>2</sub>-Grenzwerte, die bislang weniger streng ausfallen. Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs ist für das Erreichen dieser Reduktionsziele und das Vermeiden der Strafen ein wichtiger Faktor.

Aus unserer Sicht wäre es angemessen, wenn die Politik die E-Mobilität basierend auf diesen Vorgaben förderte. So könnte sie es erlauben, die niedrigen Emissionen von neu zugelassenen Elektrofahrzeugen (BEV, PHEV, REEV) jeweils für eine gewisse Zeit (und degressiv ausgestaltet) mehrfach auf den Flottenverbrauch der einzelnen Hersteller anzurechnen. Eine solche Mehrfachanrechnung wird derzeit auf EU-Ebene angewendet, ist aber umstritten. Dadurch

<sup>12</sup> Beispielsweise profitieren in der Photovoltaikindustrie ausländische Hersteller von Solarzellen und -modulen von den hohen Einspeisevergütungen in Deutschland.





hätte die Industrie den Anreiz, mehr Elektrofahrzeuge zu verkaufen und den Kaufpreis im Rahmen einer Mischkalkulation zu senken.

Für die Mehrfachanrechnung spricht, dass es den Staat wenig kostet. Lediglich entgangene Strafzahlungen im Falle einer Zielverfehlung der Hersteller wären zu nennen; diese sind freilich nicht haushaltswirksam und stünden ohnehin der EU zu. Ein Nachteil der Regelung ist natürlich, dass die tatsächlichen Emissionen der Fahrzeugflotte höher ausfallen als im System mit Mehrfachanrechnung kalkuliert. Kritiker der Mehrfachanrechnung sehen darüber hinaus die Gefahr, die Autoindustrie könne ihre Anstrengungen zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen zurückfahren. Diese Gefahr kann man aber weitgehend bannen, indem man die Mehrfachanrechnung auf einen Zeitraum begrenzt, in dem das Elektroauto als Nischenprodukt anzusehen ist. Zudem dürften steigende Ölpreise die Branche veranlassen, die spezifischen Emissionen ihrer Autos zu senken.

### Förderpolitik ist Gratwanderung

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

Das Instrument, das den Staat wenig kostet, aber spürbare Anreize zum Verkauf von Elektrofahrzeugen setzt, ist deren befristete Mehrfachanrechnung auf das Flottenziel der Autohersteller. Wir sehen hierin einen wichtigen Hebel für eine schnellere Marktdurchdringung von Elektroautos, der die Kosten weitgehend der Automobilindustrie anlastet. Für gewerbliche Kunden bzw. private Nutzer von Dienstwagen könnten Sonderabschreibungen bzw. Vergünstigen bei der Dienstwagenregelung (z.B. Ansetzung eines niedrigeren Bruttolistenpreises) spürbare – freilich finanzielle – Anreize sein.



### 4. Marktpotenzial in Deutschland: Vier Szenarien

Wir haben vier Szenarien skizziert und auf deren Basis das Absatzpotenzial für BEV in Deutschland im Jahr 2020 geschätzt (siehe Textbox). Hierfür haben wir uns auf zwei Treiber als wesentliche Einflussfaktoren für das Marktpotenzial festgelegt: Erstens die Höhe staatlicher monetärer Anreize für den Kauf von Elektroautos und zweitens den Grad des technischen Fortschritts in der E-Mobilität, der entscheidenden Einfluss auf die Kostenentwicklung hat. Die staatlichen Anreize können hoch oder gering ausfallen, der technische Fortschritt schnell oder langsam erfolgen. Je nach Ausprägung der beiden Faktoren ergeben sich also vier Szenarien (siehe schematische Darstellung).

Von einer hohen staatlichen (direkten/indirekten) Förderung sprechen wir bei Beträgen von (deutlich) mehr als EUR 5.000 pro Auto. Je nach Fahrzeugsegment würde eine solche Subvention dazu bei-

### Szenarioanalyse des Marktpotenzials

Im **Szenario I** (hohe Förderung, schneller technischer Fortschritt) könnte der Anteil der BEV an den Pkw-Neuzulassungen im Jahr 2020 in einer Größenordnung von 6% bis 8% liegen (7% entsprächen knapp 220.000 Einheiten). Die Autos sind aufgrund des schnellen technischen Fortschritts und der hohen Förderung für eine nennenswerte Kundengruppe eine interessante Alternative geworden. Auch PHEV und REEV dürften – Förderung vorausgesetzt – in diesem Szenario zusammen einen Marktanteil in ähnlicher Größenordnung verbuchen.

Im **Szenario II** (geringe Förderung, schneller technischer Fortschritt) dürfte der Marktanteil dagegen nur etwa 1% bis 3% betragen (bei 2% wären es gut 60.000 Stück). Trotz des schnellen technischen Fortschritts werden sich die meisten Kunden von den – ohne Zuschuss – hohen Gesamtkosten abschrecken lassen. PHEV und REEV könnten etwas besser abschneiden, weil bei ihnen der Kostennachteil gegenüber Verbrennern oder Voll-Hybrid-Autos aufgrund des schnellen technischen Fortschritts kleiner geworden ist als bei BEV.

Im **Szenario III** (geringe Förderung und langsamer technischer Fortschritt) werden BEV auch 2020 noch nicht ihre Nischenrolle verlassen haben; ihr Marktanteil an den Pkw-Neuzulassungen liegt dann unter 0,5%. Auch die Marktanteile von PHEV und REEV bleiben unter der 1%-Marke. Die Fahrzeuge sind aus Kundensicht wirtschaftlich nicht interessant.

Schließlich könnte der Marktanteil von BEV im Jahr 2020 im **Szenario IV** (hohe Förderung, langsamer technischer Fortschritt) etwa 3% bis 4% an den Pkw-Neuzulassungen erreichen (knapp 110.000 Einheiten bei 3,5%). Im Vergleich zum Szenario II ist zu erkennen, dass eine höhere staatliche Förderung die potenziellen Kunden eher zum Kauf anregen würde als ein schneller technischer Fortschritt, zum letzterer im Szenario IV immer noch beträchtlich ist. Der Marktanteil von PHEV und REEV kann bei ähnlicher Förderung auch ähnliche Marktanteile erreichen.

tragen, einen nennenswerten Teil des Kostennachteils von Elektroautos zu schließen. Eine geringe staatliche Förderung setzen wir mit Beträgen zwischen EUR 0 und EUR 2.500 an; EUR 2.500 war der im Rahmen der Abwrackprämie gezahlte Zuschuss.

Einen schnellen technischen Fortschritt unterstellen wir bei einer Reduktion der Batteriekosten um zwei Drittel oder mehr bis zum Jahr 2020 (entspricht in etwa den Annahmen der NPE). Zudem schließt schneller technischer Fortschritt auch signifikante Verbesserungen bei der Energiedichte der Batterien und damit bei der Reichweite der Fahrzeuge ein (im Durchschnitt mehr als 200 Kilometer). Von langsamem technischen Fortschritt sprechen wir bei einer Kostensenkung gegenüber heute von weniger als 50%.

### Wirtschaftliches Umfeld im Jahr 2020: Keine Überraschungen

Alle Szenarien basieren auf weiteren Annahmen zum automobilen Umfeld. Das reale BIP in Deutschland ist bis dahin durchschnittlich um etwas weniger als 1,5% pro Jahr gewachsen; die strukturelle Arbeitslosigkeit ist u.a. aufgrund der demografischen Entwicklung auf etwa 2,5 Mio. gesunken. Die Zahl potenzieller Autobesitzer hat sich kaum verändert, wenngleich die Zahl der Menschen über 65 Jahre gegenüber heute um mindestens 2 Mio. Menschen gestiegen sein wird (zu Lasten der Alterskohorte der 20- bis 64-Jährigen). Der Pkw-Bestand wird bis 2020 von 42,3 Mio. auf dann rd. 44 Mio. Einheiten gestiegen sein. Im Durchschnitt dürften pro Jahr in Deutschland rd. 3,1 Mio. Pkw verkauft werden. Sowohl Benzin- und Dieselpreise als auch der Strompreis haben sich erhöht. Die relativen Preise sind relativ konstant geblieben; man kann natürlich Argumente für Verschiebungen der relativen Preise in beide Richtungen finden. Der Durchschnittsverbrauch von reinen Benzinern und Dieselpkw ist um 30% gesunken. Wir unterstellen keine ordnungspolitischen Einschränkungen für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (z.B. Fahrverbote, City-Maut). Dagegen gibt es in einigen Städten mit hohem Verkehrsaufkommen Sonderrechte für Elektroautos.

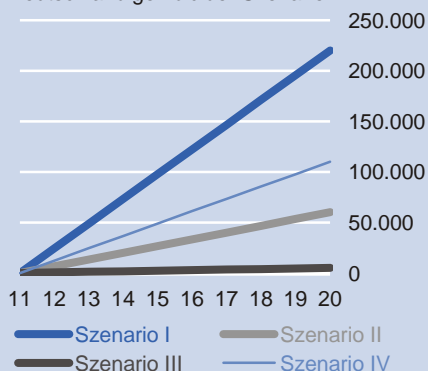
Die einzelnen Szenarien (siehe Textbox) zeigen, dass das Absatzpotenzial für Elektroautos im Jahr 2020 in Abhängigkeit von den beiden Haupteinflussfaktoren stark schwankt; in der Literatur finden sich Schätzungen zwischen 1% und 10%. Es ist zu erkennen, dass das Ziel von 1 Mio. Elektroautos (BEV, PHEV, RREV) wohl nur im Szenario I mit Sicherheit erreicht würde. Aus ökonomischer Sicht halten wir jedoch das Szenario II für sinnvoll. Denn hier würde sich die Technologie primär aufgrund des technischen Fortschritts und weniger wegen staatlicher Subventionen (allmählich) durchsetzen. Mit Blick auf die aktuelle Diskussion in Deutschland, in der die politischen Entscheidungsträger zumindest einer starken direkten Förderung von Elektrofahrzeugen skeptisch gegenüberstehen, könnte Szenario II auch das wahrscheinlichste sein.

### Globales Marktpotenzial vorerst klein

Die Szenarien sind von großer Unsicherheit über den technischen Fortschritt und die Förderpolitik geprägt. Will man nun das globale Potenzial für Elektroautos im Jahr 2020 abschätzen, nehmen die Unsicherheiten noch deutlich zu. Es ist klar, dass der Marktanteil von Elektroautos in Ländern mit dauerhaft hoher Förderung auch am höchsten sein wird (z.B. China, Frankreich, USA). Dagegen dürften sie in jenen Schwellenländern kaum eine Rolle spielen, in denen die Technologie nicht gefördert wird, weil sie schlicht zu teuer ist. Ohne Förderung wird der Marktanteil von Elektroautos z.B. in Indien, den ASEAN-Staaten oder Lateinamerika auch in zehn Jah-

### Szenarien im Vergleich

Neuzulassungen von BEV in Deutschland gemäß der Szenarien\*



\* Unterstellt ist eine lineare Entwicklung der Neuzulassungen.

Quellen: DB Research, IW Köln



ren nur im homöopathischen Bereich liegen. Der weltweit größte Automobilzulieferer Bosch rechnet damit, dass 2020 von den global gut 100 Mio. Verkäufen von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen (2010: rd. 70 Mio.) nur etwa 3% BEV oder PHEV sein werden.

Eine Prognose über das Jahr 2020 fällt aufgrund der dann rapide steigenden Unsicherheiten zum technischen Fortschritt extrem schwer. Die Weichen werden derzeit jedoch so gestellt, dass zumindest im Pkw-Bereich die Elektrifizierung des Antriebsstrangs auch über das Jahr 2020 hinaus weiter steigen wird. Die Bundesregierung strebt bis 2030 die Zielgröße von 6 Mio. Elektroautos im Pkw-Bestand an (Anteil von rd. 14%).

## 5. Fazit und Ausblick

Hohe Kosten und der Entwicklungsstand der Batterien sorgen dafür, dass die E-Mobilität derzeit und auch in den kommenden Jahren nur ein Nischenmarkt ist. Sinkende Kosten sind die mit Abstand wichtigste Bedingung, um das Potenzial der Technologie zu heben. Alle anderen Herausforderungen (z.B. geringe Reichweite, Ladeinfrastruktur, Stromquelle) sind gemessen an der Kostenfrage zunächst zweitrangig. Dennoch ist langfristig damit zu rechnen, dass der Verbrennungsmotor durch den Elektromotor zumindest ergänzt wird.

In welcher Form und in welchem Umfang das geschehen wird, ist heute noch offen. BEV sind nur eine Option. Im Spektrum der E-Mobilität stehen PHEV und REEV in direkter Konkurrenz zum BEV, die je nach Fahrzeugsegment unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Die Nachteile der oben genannten Fahrzeuge in puncto Kosten und/oder Reichweite bleiben vorerst signifikant. Als wirtschaftlichste Alternative kommen auf Mittel- und Langstrecken vorerst vor allem sparsame Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor und insbesondere im Stadtverkehr Voll-Hybrid-Autos in Frage. Ohnehin gleicht der Weg in die elektromobile Zukunft einer Evolution und nicht einer Revolution. BEV, PHEV und REEV können dort ihre Nischenposition am schnellsten verlassen, wo sie am stärksten gefördert werden. Eine solche Förderpolitik kann aber für die Regierungen schnell sehr teuer werden. Ohnehin ist die Förderpolitik für die Regierungen ein schmaler Grat.

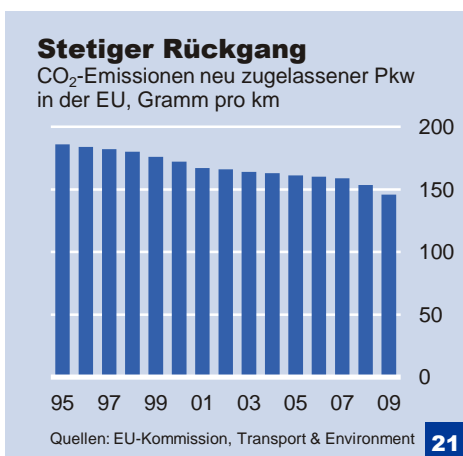
Die nur allmähliche und zumeist staatlich geförderte Marktdurchdringung der E-Mobilität ist die große Herausforderung für die Automobilindustrie. Sie muss ihre F&E-Aktivitäten in diesem Bereich hochfahren, ohne dass diesen Investitionen kurzfristig ein entsprechender Markt gegenüberstünde; viele Investitionen können sogar Sunk-Cost-Charakter haben, wenn der Durchbruch zum Massenmarkt ausbleibt. Gleichzeitig müssen Autobauer die Energieeffizienz der konventionellen Antriebe stetig verbessern. Die Unternehmen sollten sich möglichst früh um die relevanten Fachkräfte bemühen, denn hier zeichnen sich Engpässe ab; Stipendien oder Kooperationen mit Universitäten wären hier eine Option.

Aufgrund des evolutionären Charakters der E-Mobilität schätzen wir die bisherigen First-Mover-Vorteile von Unternehmen in diesem Bereich als gering ein. Nicht unbedingt die schnellsten, sondern die besten Angebote am Markt werden den Unternehmen langfristig die günstigsten wirtschaftlichen Perspektiven bieten. Angesichts der Unsicherheiten zur Marktentwicklung kann es demnach klare Second-Mover-Vorteile geben.

Eric Heymann (+49 69 910-31730, eric.heyman@db.com)

Oliver Koppel (+49 221 4981-716, koppel@iwkoeln.de)

Thomas Puls (+49 221 4981-766, puls@iwkoeln.de)



21

## Ausgewählte Literatur

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, PricewaterhouseCoopers (2010). Elektromobilität: Herausforderungen für Industrie und öffentliche Hand. Frankfurt am Main.

Leszczensky, Michael et al. (2011). Bildung und Qualifikation als Grundlage der technologischen Leistungsfähigkeit Deutschlands. Bericht des Konsortiums „Bildungsindikatoren und technologische Leistungsfähigkeit“. Hannover.

NPE (2011). Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Berlin/Bonn.

NPE (2011). Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Anhang. Berlin/Bonn.

NPE (2011). Zwischenbericht der NPE AG 6 – Ausbildung und Qualifizierung. Berlin/Bonn.

OECD (2010). International Migration Outlook: SOPEMI 2010. Paris.  
Transport & Environment (2009). How to avoid an electric shock. Electric cars: From hype to reality. Brüssel.

VDA (2011). Elektromobilität. Eine Alternative zum Öl. Berlin.

VDA (2010, Hrsg.). Tagungsband zum 12. Technischen Kongress in Ludwigsburg sowie die darin enthaltenen Beiträge. Berlin.

© Copyright 2011. Deutsche Bank AG, DB Research, D-60262 Frankfurt am Main, Deutschland. Alle Rechte vorbehalten. Bei Zitaten wird um Quellenangabe „Deutsche Bank Research“ gebeten.

Die vorstehenden Angaben stellen keine Anlage-, Rechts- oder Steuerberatung dar. Alle Meinungsäußerungen geben die aktuelle Einschätzung des Verfassers wieder, die nicht notwendigerweise der Meinung der Deutsche Bank AG oder ihrer assoziierten Unternehmen entspricht. Alle Meinungen können ohne vorherige Ankündigung geändert werden. Die Meinungen können von Einschätzungen abweichen, die in anderen von der Deutsche Bank veröffentlichten Dokumenten, einschließlich Research-Veröffentlichungen, vertreten werden. Die vorstehenden Angaben werden nur zu Informationszwecken und ohne vertragliche oder sonstige Verpflichtung zur Verfügung gestellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Angemessenheit der vorstehenden Angaben oder Einschätzungen wird keine Gewähr übernommen.

In Deutschland wird dieser Bericht von Deutsche Bank AG Frankfurt genehmigt und/oder verbreitet, die über eine Erlaubnis der Bundesanstalt für Finanzdienstleistungsaufsicht verfügt. Im Vereinigten Königreich wird dieser Bericht durch Deutsche Bank AG London, Mitglied der London Stock Exchange, genehmigt und/oder verbreitet, die in Bezug auf Anlagegeschäfte im Vereinigten Königreich der Aufsicht der Financial Services Authority unterliegt. In Hongkong wird dieser Bericht durch Deutsche Bank AG, Hong Kong Branch, in Korea durch Deutsche Securities Korea Co. und in Singapur durch Deutsche Bank AG, Singapore Branch, verbreitet. In Japan wird dieser Bericht durch Deutsche Securities Limited, Tokyo Branch, genehmigt und/oder verbreitet. In Australien sollten Privatkunden eine Kopie der betreffenden Produktinformation (Product Disclosure Statement oder PDS) zu jeglichem in diesem Bericht erwähnten Finanzinstrument beziehen und dieses PDS berücksichtigen, bevor sie eine Anlageentscheidung treffen.

Druck: HST Offsetdruck Schadt & Tetzlaff GbR, Dieburg

Print: ISSN 1430-7421 / Internet: ISSN 1435-0734 / E-Mail: ISSN 1616-5640