Fraunhofer ISI

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG ISI

GESELLSCHAFTSPOLITISCHE FRAGESTELLUNGEN DER ELEKTROMOBILITÄT

Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI analysiert die Rahmenbedingungen von Innovationen. Wir erforschen die kurz-, mittel- und langfristigen Entwicklungen von Innovationsprozessen und die gesellschaftlichen Auswirkungen neuer Technologien und Dienstleistungen. Auf dieser Grundlage stellen wir unseren Auftraggebern aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft Handlungsempfehlungen und Perspektiven für wichtige Entscheidungen zur Verfügung. Unsere Expertise liegt in der breiten wissenschaftlichen Kompetenz sowie einem interdisziplinären und systemischen Forschungsansatz.

Mit momentan 190 Mitarbeitern in den Bereichen Wissenschaft, Technik und Verwaltung bieten wir ein kompetentes, hoch motiviertes Team, das den vielfältigen Anforderungen unserer Auftraggeber mit wissenschaftlicher Kompetenz und einem systemischen Forschungsansatz gerecht wird. 350 Projekte im Jahr 2010 sind Ausdruck dieser erfolgreichen Arbeit.

EINLEITUNG

Mit der Elektromobilität werden große Hoffnungen verbunden – auf dem weiten Weg zu einer elektromobilen Gesellschaft sind aber noch eine Reihe von Herausforderungen zu lösen, die oftmals unterschätzt werden. Diese Broschüre gibt einen Überblick über den aktuellen technischen Entwicklungsstand, eine Bewertung aus ökonomischer, ökologischer und gesellschaftlicher Perspektive sowie eine Übersicht über interessante Erstmärkte und Entwicklungsszenarien dieser neuen Form der Mobilität.

Die Elektromobilität wird im staatlichen „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität" als wesentliches Element eines zukunftsfähigen Verkehrssystems identifiziert. Mit dem zunehmenden Umstieg auf elektrische Fahrzeuge werden große Hoffnungen und Ziele verbunden: die Abhängigkeit Deutschlands von Ölimporten und den Verbrauch fossiler Ressourcen zu reduzieren, Emissionen sowohl global (CO_2) als auch lokal (Schadstoffe, Lärm) zu minimieren und zudem ein multimodales Mobilitätsverhalten zu fördern. Auch in wirtschaftlicher Hinsicht weckt die Etablierung der Elektromobilität große Hoffnungen. Deutschland hat sich das Ziel gesetzt, im internationalen Wettbewerb zum Leitmarkt oder zumindest zum Leitanbieter für Elektromobilität zu werden, um so die starke deutsche Stellung im Automobilbau wie auch die damit verbundenen Arbeitsplätze, heimische Wertschöpfung und Exportchancen für die Zukunft zu sichern. Bis 2020 sollen nach dem Willen der Bundesregierung eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren.[1]

Der Vision einer elektromobilen Gesellschaft, welche dazu beitragen könnte, die oben erwähnten Probleme unserer heutigen Verkehrssysteme zu lösen, stehen jedoch eine Reihe von Herausforderungen im Wege: So sind noch diverse technische Aspekte insbesondere im Bereich der Batterie, aber auch hinsichtlich Infrastruktur und der Integration der Elektromobilität in die Energiesysteme zu lösen. Nicht zuletzt stellt die Nutzerakzeptanz eine zentrale Voraussetzung für eine erfolgreiche Verbreitung batteriebetriebener Fahrzeuge dar, über die bisher nur wenige belastbare Studien existieren.

Um der Komplexität des Themas gerecht zu werden, arbeitet ein Verbund von 33 Fraunhofer-Instituten gemeinsam an verschiedenen Aspekten der Elektromobilität. Das Fraunhofer ISI untersucht dabei vor allem die Fragestellungen: Welche Rolle kann Elektromobilität im zukünftigen Verkehr spielen? Wie ökologisch ist die Elektromobilität? Welche Entwicklungen existieren im Bereich der Batterien und wie sieht eine sinnvolle Ladeinfrastruktur aus? Wie ist die Akzeptanz der Nutzer? Wie kann eine umfassende Verbreitung von Elektrofahrzeugen erreicht werden und was sind interessante und tragfähige Erstmärkte?

Diese und weitere Fragen zur Elektromobilität werden im Rahmen der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität (FSEM), gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, am Fraunhofer ISI analysiert, deren wichtigste Ergebnisse hier dargestellt werden. Weiterführende Texte und Informationen, die man zu einer Vertiefung und ausführlichen Darstellung benötigt, werden in den einzelnen Abschnitten zitiert und können mit Hilfe des Literaturverzeichnisses leicht gefunden werden.

Die Vielseitigkeit und Komplexität des Themas Elektromobilität, aber auch die zahlreichen Verknüpfungsmöglichkeiten sind in der „Landkarte der Elektromobilität" auf der folgenden Doppelseite angedeutet, deren Themen in dieser Broschüre behandelt werden.

LANDKARTE DER ELEKTROMOBILITÄT

Schematische Darstellung wichtiger Einflüsse und Entwicklungen

Infrastruktur

Systeme

öffentliche Ladesäulen

Standardisierung

einfache Handhabung

Aufbau & Verbreitung

Vergleich H_2-Infrastruktur

Politische Entwicklungen

Elektroautosubventionen

Ladeinfrastruktur

Leitmarkt Elektromobilität

Gesetze & Steuern

Marktentwicklungen

Unterschied BEV & PHEV

Konkurrenzfahrzeuge

Vertriebsmodelle

Automobilindustrie

Marktdurchdringung

Technologie

Batterietechnologie

Reichweite & Effizienz

Smart Traffic

Konkurrenzentwicklungen

weitere Fahrzeugformen

Nachhaltigkeit

CO_2-Ausstoß

Batteriepreis

Rohstoffpreise & Verfügbarkeit

Rohstoffnutzung

Lithium

Öl

Kupfer

Benzin

Seltene Erden

Energiewirtschaft

Smart Grid

Netzbetrieb

Strom-Mix

Netzausbau

Energiesystemintegration

Ökobilanz Elektrofahrzeug

Wirtschaftsverkehr

Pendler

Flottenverkehr

Gesellschaftliche Entwicklungen

Mobilitätsentwicklung

Sicherheit

Demographischer Wandel

Umweltbewusstsein

Auswirkung auf Stromnachfrage

Carsharing

Verkehrskonzepte

Nutzerakzeptanz

Lärmemissionen

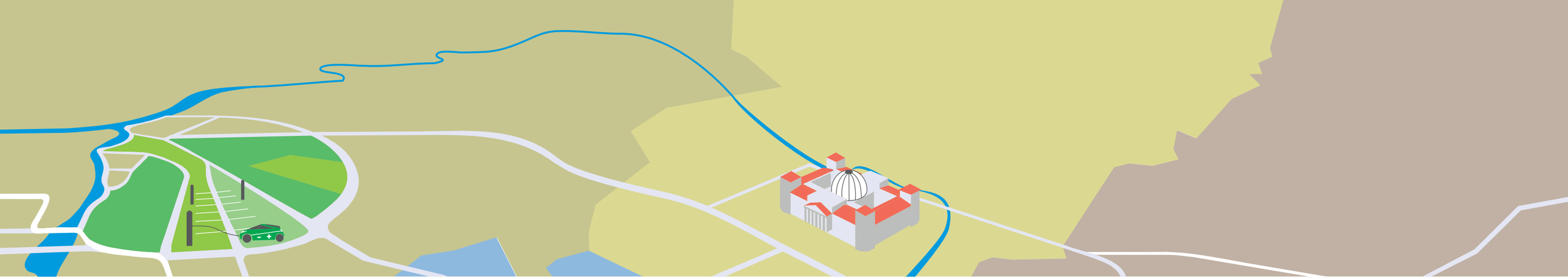
Umweltschutz

Fahrgefühl

Erstmärkte

Innovativität

Early Adopters



INHALT

6 WAS WIRD UNTER ELEKTROMOBILITÄT VERSTANDEN?

8 IST ELEKTROMOBILITÄT ÖKOLOGISCH?

10 ZEICHNEN SICH ENGPÄSSE BEI ROHSTOFFEN AB?

13 WARUM IST DIE BATTERIE DIE SCHLÜSSELTECHNOLOGIE?

14 WO UND WIE BELÄDT MAN SEIN ELEKTROFAHRZEUG?

18 WAS IST AUS ENERGIEWIRTSCHAFTLICHER PERSPEKTIVE ZU BEACHTEN?

20 WAS SIND VIELVERSPRECHENDE GESCHÄFTSMODELLE?

22 WAS WEISS MAN ÜBER DIE KUNDENAKZEPTANZ?

25 WIE SIEHT ES MIT DER MARKTPENETRATION UND INTERESSANTEN ERSTMÄRKTEN AUS?

27 WAS SIND ZUKÜNFTIGE MOBILITÄTSKONZEPTE?

28 WAS LÄSST SICH SCHLUSSFOLGERN?

29 ABKÜRZUNGEN UND BEGRIFFE

30 LITERATURQUELLEN

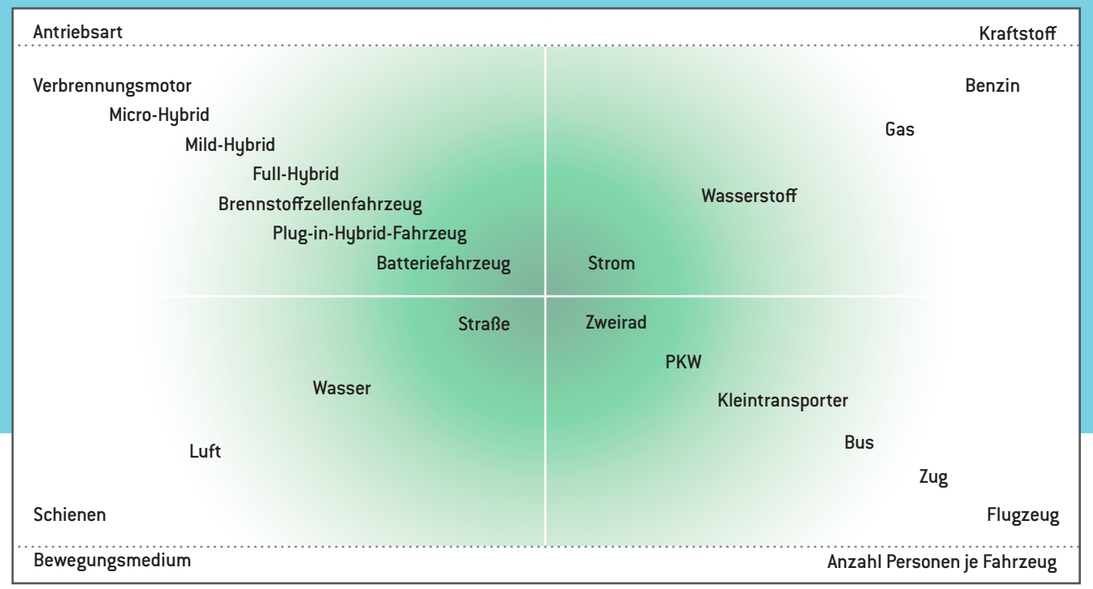


ABB 1 Begriffsfeld Elektromobilität im engeren Sinne ▶

WAS WIRD UNTER ELEKTRO-MOBILITÄT VERSTANDEN?

Elektromobilität ist ein vielseitiger Begriff mit vielen Facetten und Verbindungen zu unterschiedlichsten Themen. Elektromobilität ist aus rein technischer Sicht schwer zu fassen, da sehr verschiedene Aspekte unter Elektromobilität verstanden und zusammengefasst werden. Im engeren Sinne bezeichnet Elektromobilität den elektrisch angetriebenen Individualverkehr (typischerweise auf der Straße). Die ganz oder teilweise elektrisch angetriebenen Fahrzeuge für diesen Individualverkehr werden schlicht Elektrofahrzeuge genannt. Im weiteren Sinne wird unter Elektromobilität aber auch die Einbindung von Elektrofahrzeugen in Energie- und Verkehrssysteme verstanden.

Elektromobilität im engeren Sinne: Elektrofahrzeuge im Individualverkehr

Welche Fahrzeuge genau als Elektrofahrzeuge betrachtet werden und zu welchem Grad oder aus welchem Speicher sie elektrische Energie für ihren Antrieb nehmen, ist nicht einheitlich festgelegt. Einige Beispiele sollen den engeren Rahmen von Elektromobilität verdeutlichen.

Ein eindeutiges Beispiel für ein Elektrofahrzeug und entsprechend für Elektromobilität ist das reine Batteriefahrzeug (BEV) in Form eines PKW. Dieses verfügt über eine große Batterie als Speicher und wird ausschließlich von einem Elektromotor bewegt. Nur über eine Batterie und einen Elektromotor werden beispielsweise auch Gabelstapler und Elektroroller angetrieben. Elektrische Motorboote und elektrische Rollstühle zählen ebenso zum elektrisch angetriebenen Individualverkehr und sind eine Form von Elektromobilität im engeren Sinne.

Eindeutig keine Form der Elektromobilität sind Straßenbahnen oder elektrisch angetriebene Züge. Diese fahren zwar rein elektrisch, gehören aber nicht zum Individualverkehr. Konventionelle PKW mit Benzin- oder Dieselmotoren sind auch keine Elektrofahrzeuge, denn obwohl sie über eine Batterie verfügen, wird diese nicht zum Antrieb des Fahrzeuges verwendet.

Grenzfälle für Elektrofahrzeuge gibt es viele. Der Grad der Elektrifizierung des Antriebssystems in einem modernen PKW ist mit den vielen existierenden Hybridvarianten nahezu kontinuierlich. Ein Hybridfahrzeug kann mit einer relativ großen Batterie ausgestattet, aber ohne Anschlussmöglichkeit an das Stromnetz ausgelegt sein. Je nach Beitrag zur Fahrleistung werden sie in Micro-, Mild- und Full-Hybrid unterschieden und dienen im Wesentlichen der Effizienzsteigerung. Bei gleicher Batteriegröße und gleichem Antriebssystem entscheidet im Zweifelsfall nur das Vorhandensein eines entsprechenden Steckers zum Aufladen der Batterie am Stromnetz (Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge – PHEV). Auch Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) werden nicht immer zu den Elektrofahrzeugen gezählt, obwohl sie rein elektrisch angetrieben werden. Allerdings verfügen sie zumeist nur über eine kleine Batterie, unter anderem zur Rückgewinnung der Bremsenergie (Rekuperation), die nicht zum Antrieb verwendet wird. Sie nutzen als Energieträger Wasserstoff, der erst im Fahrzeug in Strom umgewandelt wird. Ein Pedelec, also ein Fahrrad mit Tretunterstützung durch einen Elektromotor, kann ebenso wie neue Flugzeugprototypen, die nur mit Solarzellen und Elektromotor auskommen, nicht klar zugeordnet werden.

Es zeigt sich, dass viele Kriterien im Umfeld der „Elektromobilität im engeren Sinne" eine Rolle spielen und der Übergang vom herkömmlichen Verbrenner zum reinen Elektrofahrzeug fließend ist. ABB 1 stellt vier dieser Kriterien dar und sortiert das Begriffsfeld. In der Mitte von ABB 1 finden sich prototypische Beispiele oder Eigenschaften von Elektrofahrzeugen. Die Zuordnung zum Begriffsfeld nimmt nach außen hin stark ab.

MYTHOS 1

„Die begrenzte Reichweite macht Elektrofahrzeuge im Alltag unbrauchbar."

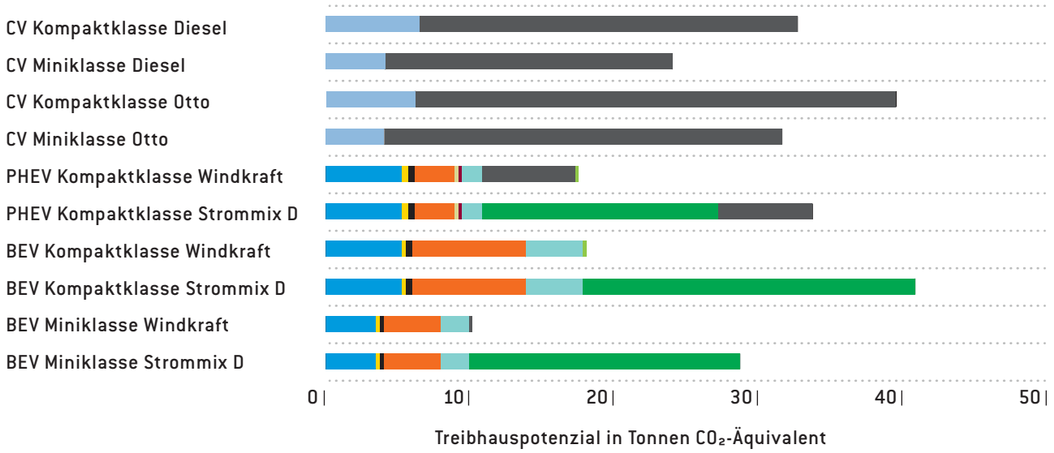
Die Mehrzahl der Privat-PKW in Deutschland – circa 80 Prozent – legen am Tag weniger als 60 Kilometer zurück.[2] Diese Fahrten wären problemlos mit Elektrofahrzeugen auf Batteriebasis zu bewältigen. Elektromobilität ist zudem nicht auf reine Batteriefahrzeuge beschränkt. Per Steckdose aufladbare Elektrofahrzeuge mit einem kleinen zusätzlichen Verbrennungsmotor (Plug-in-Hybride) garantieren lange Fahrstrecken und schnelle Betankungszeiten. Gleichzeitig profitieren sie auf Alltagsstrecken von den geringeren Verbrauchskosten im Vergleich zum herkömmlichen Fahrzeug.

Elektromobilität im weiteren Sinne: Die Einbindung von Elektrofahrzeugen in Energie- und Verkehrssysteme

Im weiteren Sinne umfasst Elektromobilität auch die Integration von elektrisch angetriebenem Individualverkehr in bestehende oder weiterzuentwickelnde Verkehrs- und Energiesysteme. Ein wichtiger Aspekt ist die Möglichkeit, Elektrofahrzeuge gesteuert zu beladen, um fluktuierende Energieträger besser in das Energiesystem zu integrieren oder um elektrische Energie in Elektrofahrzeugen zwischenzuspeichern und später bei Bedarf ins Stromnetz zurückzuspeisen. Hinzu kommen Entwicklungen im Verkehr insgesamt. Mit neuer Kommunikationstechnologie und zahlreichen Entwicklungen in der IT-Branche ist das Planen von Reisen und Buchen von Transportmitteln einfacher geworden – Elektrofahrzeuge werden hierbei als ein Baustein des intermodalen Verkehrs diskutiert.

Zusammenfassend kann festgehalten werden: Elektromobilität ist elektrisch bewegter Individualverkehr und umfasst im weiteren Sinne elektrisch angetriebene Fahrzeuge und ihre Integration in Verkehrs- und Energiesysteme. Der Übergang zwischen Elektrofahrzeugen und nichtelektrischen Fahrzeugen ist fließend, sodass keine scharfe Abgrenzung möglich ist.

Für die vorliegende Broschüre bezieht sich „Elektromobilität" auf Fahrzeuge mit Traktionsbatterien im Personen- sowie im Lieferverkehr. Es werden also auch Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge behandelt, welche neben einer Batterie noch einen Verbrennungsmotor haben, aber durch die Möglichkeit zum Netzanschluss auch rein elektrisch fahren können. Brennstoffzellen-Fahrzeuge werden hier nicht näher betrachtet.



Annahmen: Jahresfahrleistung 14.300 km, Fahrzeuglebensdauer 12 Jahre, Batterielebensdauer 8 Jahre, Fahrzeugverbrauch nach ADAC EcoTest (inklusive Nebenverbraucher), Emissionsprofile CV nach Handbook Emission Factors for Road Transport 3.1

BEV: Batterieelektrisches Fahrzeug
PHEV: Plug-in-Hybrid-Fahrzeug
CV: Konventionelles Fahrzeug mit Verbrennungsmotor

ABB 2 Beiträge der Herstellung und Nutzung verschiedener Fahrzeugkonzepte zum Treibhauspotenzial über die komplette Nutzung in Deutschland

IST ELEKTROMOBILITÄT ÖKOLOGISCH?

Umfangreiche Studien, zum Beispiel die des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) oder der *International Energy Agency* (IEA), zeigen, dass bei ambitionierten Klimaschutzzielen der Verkehrssektor seine Treibhausgasemissionen deutlich reduzieren muss.[3] Dabei ist gleichzeitig ein starkes Wachstum der Verkehrsleistung durch die wirtschaftliche Entwicklung, unter anderem in den BRICS-Staaten (dies sind Brasilien, Russland, Indien, China und Südafrika), und die weltweite Zunahme der Bevölkerung von heute knapp sieben Milliarden auf rund zehn Milliarden in 2050 zu schultern.

Wenn das Zwei-Grad-Ziel der Vereinten Nationen noch erreicht werden soll, müssen die spezifischen CO_2-Emissionen von PKW auf rund 20 Gramm pro Kilometer im Jahr 2050 gesenkt werden. Solch ein Wert ist mit benzin- und dieselbetriebenen PKW aufgrund des Carnot-Wirkungsgrades technisch nicht erreichbar (zum Vergleich: von der Quelle bis zum Antriebsrad gerechnet liegen die CO_2-Emissionen benzinbetriebener PKW derzeit bei durchschnittlich 150 Gramm pro Kilometer). Deshalb kommen entsprechende Studien fast einhellig zu dem Schluss, dass der motorisierte Individualverkehr langfristig weitgehend auf Elektrofahrzeuge (an dieser Stelle einschließlich Brennstoffzellenfahrzeuge) umgestellt werden muss. Eine deutlich positive Treibhausgasbilanz kann jedoch auch mit der Elektromobilität nur dann erreicht werden, wenn CO_2-arme oder -freie Energiequellen, zum Beispiel erneuerbare Energien, verwendet werden (siehe auch ABB 2).

Die genauere Beantwortung der Frage des ökologischen Nutzens und optimalen Einsatzgebietes alternativer Fahrzeugkonzepte erfordert eine umfassende Untersuchung aller entlang des Fahrzeuglebenszyklus entstehenden Umweltwirkungen – vom Rohstoffabbau über die Herstellung und Nutzung bis hin zur Verwertung und Entsorgung der Fahrzeuge am Lebensende. Nur so werden alle potenziell entstehenden Umweltbeiträge erfasst und gegebenenfalls eine Verlagerung von Umweltproblemen innerhalb der Lebenszyklusphasen vermieden. Basierend auf dem Lebenszyklusgedanken stellt die Methode der Ökobilanz ein geeignetes Werkzeug dar, um die Auswirkungen der verschiedenen Fahrzeugkonzepte auf die Umwelt zu quantifizieren. Damit werden eine belastbare Grundlage für die Bewertung des ökologischen Nutzens und ein fairer Vergleich zu heutigen Fahrzeugkonzepten geschaffen.

Neben der Vermeidung lokaler Emissionen zeichnen sich elektrifizierte Antriebe insbesondere durch die potenziell geringeren Umweltbeiträge während der Nutzungsphase aus. Durch die Verwendung rein regenerativen Stroms (zum Beispiel Strom aus Windkraft) können die Umweltbeiträge der Fahrzeugnutzung im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen drastisch reduziert werden. Durch den in Deutschland beschlossenen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energieträger wird die CO_2-Bilanz für Elektrofahrzeuge mittel- und langfristig immer besser. Kurzfristig ist eine positive Bilanz zu erreichen, indem sichergestellt wird, dass der Strom für den Fahrbetrieb von Elektrofahrzeugen nur aus zusätzlichen erneuerbaren Energiequellen kommt.

Dem Verbrauch im Betrieb stehen die höheren Umweltbeiträge der Herstellungsphase gegenüber. Gerade in den Komponenten des Batteriesystems oder des Elektromotors werden verstärkt seltene Werkstoffe und High-Tech-Materialien (zum Beispiel für Elektromotoren: Neodym, Dysprosium; für Batteriesysteme: Kobalt, Graphit) mit hohen Umweltbeiträgen im Rohstoffabbau und der Aufbereitung eingesetzt, um eine gute Performance bei geringem Gewicht zu realisieren.

Die Ergebnisse der im Rahmen der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität durchgeführten Ökobilanzstudie zeigen, dass die Herstellung des benötigten Batteriesystems aufgrund des hohen Gewichts und der in den Zellen verwendeten Materialen, insbesondere des in der Kathode verwendeten Kobalts (es wurden hier Li-NMC analysiert), einen bedeutenden Anteil zu den Umweltwirkungen der Herstellungsphase der Fahrzeuge beiträgt. Das Ökobilanzergebnis der Fahrzeugkonzepte wird demnach sehr stark von der Technologie, der Dimensionierung des verwendeten Batteriesystems und damit auch der elektrischen Reichweite der Fahrzeuge beeinflusst. Je nach Auslegung des Batteriesystems liegt seine zusätzliche Masse bei 150 bis 450 Kilogramm und trägt zwischen 30 und 60 Prozent zum Treibhauspotenzial eines Elektrofahrzeuges bei. Im Vergleich zu heutigen Fahrzeugkonzepten mit Antrieben mit Verbrennungsmotor liegen die Beiträge der Herstellungsphase der Elektrofahrzeugkonzepte um einen Faktor von etwa 1,5 bis 2 höher.

Eine weitere wichtige Einflussgröße stellt die Lebensdauer des Batteriesystems dar. Liegt diese unter der Nutzungsdauer des Fahrzeuges, steigen die CO_2-Beiträge entsprechend dem notwendigen Austauschaufwand an.

Um die höheren Beiträge der Herstellungsphase im Vergleich zu den konventionellen Fahrzeugen zu kompensieren, sind somit höhere Fahrleistungen erforderlich. Dies bedeutet wiederum, dass elektromobile PKW heutiger Bauart in Megacities bei individueller Nutzung in der Regel ökologisch nicht sinnvoll sind, da sie üblicherweise nicht die dafür erforderliche jährliche Fahrleistung erreichen. Ein Plug-in-Hybrid-Fahrzeug kann auch bei geringen Fahrleistungen von circa 9.000 Kilometern im Jahr ökologisch durchaus mit Dieselfahrzeugen mithalten oder diese sogar übertreffen, da es in der Regel über ein kleineres Batteriesystem verfügt. Wichtig ist hierbei, dass es überwiegend für Fahrten im Stadt- und stadtnahen Bereich genutzt wird, da dann die Vorteile von Elektroantrieben in der Teillast gegenüber konventionellen Antrieben zum Tragen kommen.

Neben den CO_2-Emissionen gehören zu einer ökologischen Bewertung der Elektromobilität auch die Auswirkungen auf lokale Emissionen wie Feinstaub oder Ozonvorläufersubstanzen. Hier kann die Elektromobilität deutlich zu einer Umweltentlastung beitragen. Die Summe der finanziellen Auswirkungen der einzelnen Umweltbelastungen kann man über das „Konzept der externen Kosten" darstellen. ABB 3 zeigt die externen Kosten von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen bei Verwendung von regenerativem Strom. Dann ergeben sich sowohl im Stadtbereich, bei einem Vergleich von kleinen Batteriefahrzeugen mit kleinen Benzinfahrzeugen, wie auch im Kompaktklassebereich, wo Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge mit entsprechenden konventionellen Fahrzeugen verglichen werden, deutlich niedrigere Umweltkosten. Die Vorteile liegen bei fast 200 Euro pro Jahr pro PKW, beim derzeitigen Strommix sind sie geringer.

Kontrovers wird die mögliche Lärmminderung im Straßenverkehr durch Elektrofahrzeuge diskutiert. Nach einer aktuellen Studie

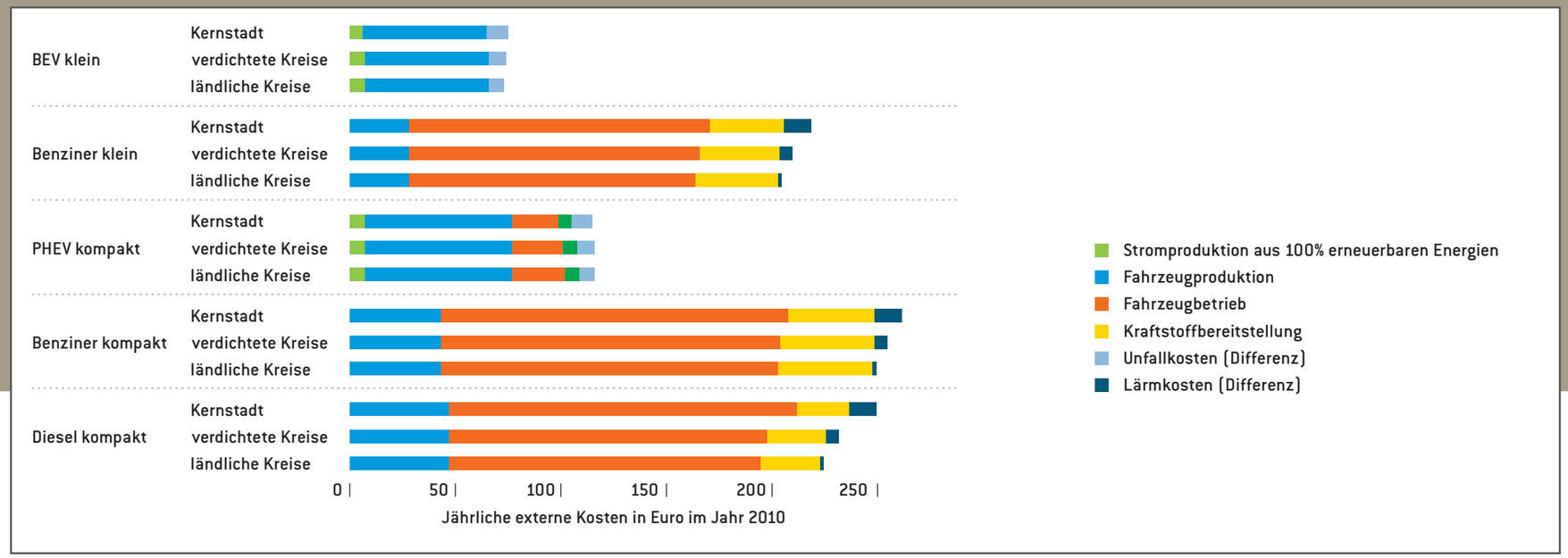


ABB 3 Vergleich der externen Kosten pro PKW für Elektrofahrzeuge und Verbrennungsfahrzeuge für Deutschland Externe Kosten: hier die monetär bewerteten Umweltschäden aus Emissionen einschließlich Lärm und Unfällen für die räumlichen Gebiete Kernstadt, Verdichtungszentren und ländliche Kreise

Kritische Rohstoffe	
Antimon	Indium
Beryllium	Magnesium
Kobalt	Niobium
Flussspat	Platingruppenmetalle
Gallium	Seltene Erden
Germanium	Tantal
Graphit	Wolfram

TAB 1 Kritische Rohstoffe laut EU – grau unterlegt sind die für Elektrofahrzeuge relevanten Stoffe

der WHO reduziert Verkehrslärm die Lebenserwartung und -qualität beträchtlich.[4] Auch von tatsächlichen sowie potenziellen Nutzern von Elektrofahrzeugen wird die Lärmreduktion immer wieder als wichtiger Vorteil der Elektromobilität hervorgehoben. Allerdings weisen amerikanische Studien darauf hin, dass Hybridfahrzeuge durch ihre leise Fahrweise eine höhere Unfallgefahr mit sich bringen könnten. Auch wenn sich dies bestätigt, sollte der Vorteil der Lärmminderung nicht ungenutzt bleiben und Elektrofahrzeuge gar mit künstlichen Geräuschen ausgestattet werden. Um eine Unfallgefahr zu reduzieren, könnte in aktive und passive Sicherheitssysteme investiert werden. Tatsächlich steigt die Höhe des Geräuschpegels durch PKW durch höhere Geschwindigkeiten an, sodass eine Geschwindigkeitsreduzierung auch gleichzeitig eine Lärmminderung bedeutet (siehe auch Mythos 6 auf Seite 24).

ZEICHNEN SICH ENGPÄSSE BEI ROHSTOFFEN AB?

Schon heute werden in Autos eine Vielzahl von Metallen genutzt. Zum Teil sind diese an kaum sichtbaren Stellen eingesetzt und kaum zu ersetzen, wie etwa Zink als Aktivator im Vulkanisationsprozess bei der Reifenherstellung. Zum Teil findet man sie direkt vor unseren Augen, wie in den Legierungen für die Karosserie, die unterschiedlich ausgeführt sein können.

Die Änderungen beim Umstieg auf die Elektromobiliät betreffen in erster Linie den Antriebsstrang. Hier wird der Verbrennungsmotor durch eine Batterie mit einem Elektromotor ersetzt. Der erwartete Boom beim Rohstoffbedarf betrifft circa drei Kilogramm Lithium als Ladungsträger in der Lithium-Ionen-Batterie, einige Kilogramm Nickel, Mangan, Kobalt und andere als Elektrodenmaterialien, circa ein Kilogramm Neodym und Dysprosium für den Permanentmagnet im Traktionsmotor und etwa 40 Kilogramm Kupfer für den Motor und Stromleitungen im Fahrzeug. Hinzu kommt Platin als Katalysator beim Einsatz von Brennstoffzellen.

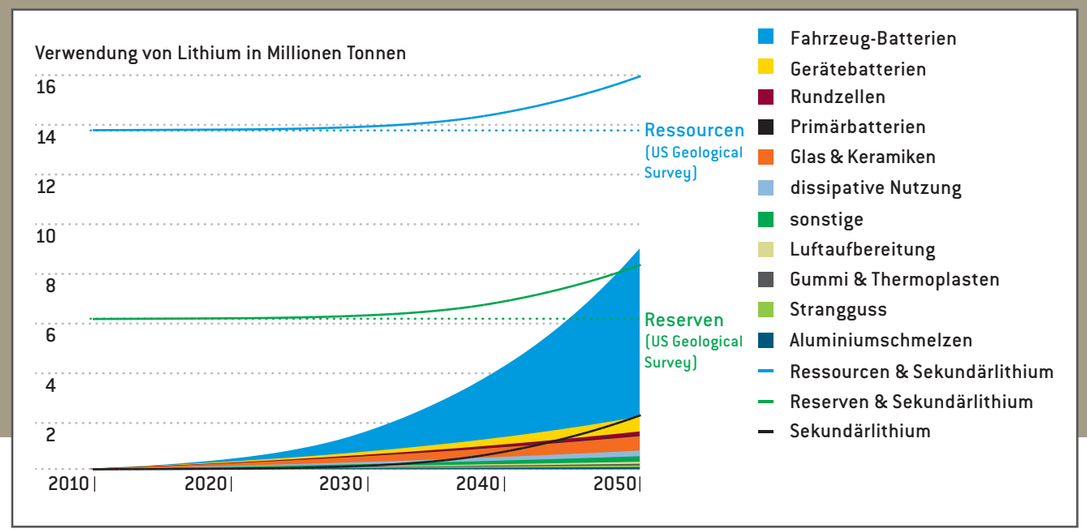
Vergleicht man die von der Europäischen Union als kritisch identifizierten Metalle (TAB 1) mit den Metallen, die zusätzlich für die Elektromobilität benötigt werden, so ist zu erkennen, dass zukünftig vor allem die Versorgung mit Kobalt, Platingruppenmetallen und Seltenen Erden schwierig werden könnte.[5]

Für Lithium und Kupfer sind am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI detaillierte Analysen erarbeitet worden.[6] Hierzu wurden zwei Szenarien für die Entwicklung bis zum Jahre 2050 betrachtet. Beim ersten Szenario, dem Pluralismus-Szenario, wird von einer Marktdurchdringung ausgegangen, bei denen Elektrofahrzeuge bis 2050 weltweit 50 Prozent der Neuzulassungen im motorisierten Individualverkehr erreichen, jedoch neben einer Vielzahl an anderen Antriebskonzepten bestehen. Unter Berücksichtigung der Verwendung von Sekundär-Lithium aus recyceltem Material sowie der Lithium-Nachfrage für andere Anwendungen (wie beispielsweise Ceranfelder, hitzebeständige Ofenfenster, Aluminiumschmelzen zur Fluoridreduzierung oder als Lithium-Hydroxid für Schmierfette) werden 2050 erst rund 20 Prozent der weltweit vorhandenen Lithium-Ressourcen verbraucht sein. Diese Berechnung geht von einer vorsichtigen Schätzung der Vorkommen aus. Dabei deckt das Recycling-Lithium circa 25 Prozent des Gesamtbedarfs. Bei einem zweiten Szenario, dem Dominanz-Szenario, wird mit einem 85-prozentigen Marktanteil von Elektrofahrzeugen bei den Neuzulassungen gerechnet. Auch in diesem Szenario kommt es bis 2050 nicht zu einer Erschöpfung der Lithium-Ressourcen. Allerdings werden im Dominanz-Szenario am Ende des Betrachtungszeitraums die bekannten Reserven erschöpft sein (siehe ABB 4). Die Reserven sind die mit heutigen Technologien zu heutigen Marktpreisen abbaubaren Vorkommen. Das heißt, die Kosten für Lithium werden mittelfristig steigen. Ein weitere Herausforderung ist, dass die Lithium-Vorkommen weltweit auf wenige Länder, insbesondere Bolivien und Chile, verteilt sind.

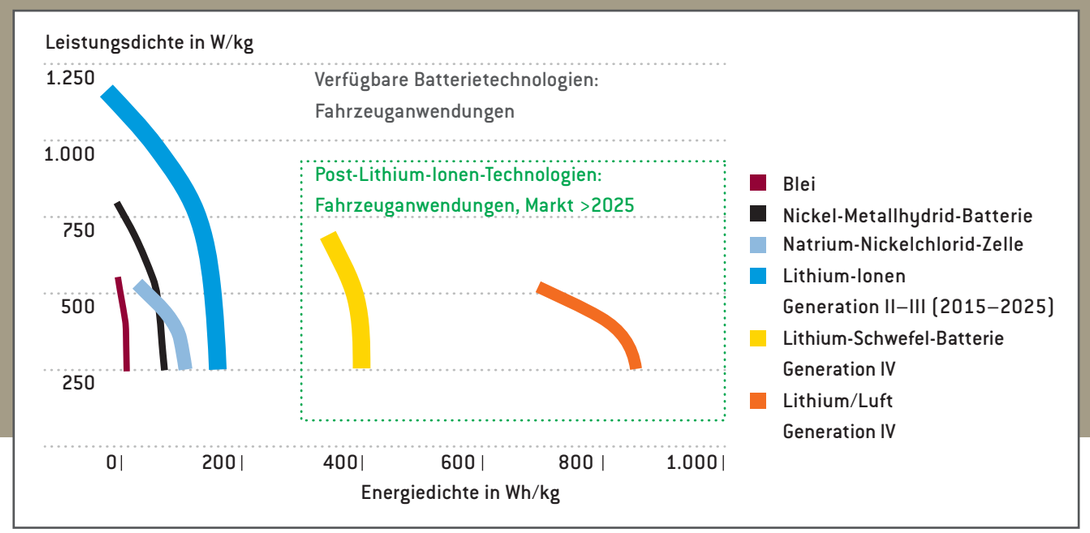
Für Kupfer ergibt die Analyse, dass der Verbrauch in den nächsten 40 Jahren nur wenig von der Elektromobilität beeinflusst wird. Im ersten Szenario gehen 2050 nur 14 Prozent des Kupfers in die elektromobile Anwendung, im Dominanz-Szenario 21 Prozent (siehe ABB 5). Das Sekundärkupfer deckt hierbei knapp 26 Prozent des Gesamtbedarfes im Jahr 2050; der wesentliche Wachstumsmarkt für Kupfer ist mit etwa 34 Prozent die Energieübertragung. Die geologischen Vorräte an Kupfer sind jedoch ausreichend, um die Nachfrage in allen Anwendungsbereichen in den nächsten Jahrzehnten zu decken. Bei beiden Szenarien werden aber die mit der heute verfügbaren Technik wirtschaftlich abbaubaren Kupferreserven Mitte der 30er Jahre des 21. Jahrhunderts erschöpft sein, das heißt es müssen neue Vorkommen erschlossen werden, deren Abbau höhere Kosten verursacht.

Ein ähnliches Bild ergibt sich nach ersten Ergebnissen auch bei den Magnetwerkstoffen Neodym und Dysprosium: die Elektromobilität stellt im Jahr 2050 im Dominanz-Szenario mit einem Verbrauch von 60 beziehungsweise 90 Prozent die größte Anwendung dar. Reserven sind weltweit genügend vorhanden, aber Lagerstätten von schwereren Seltenen Erden, zu denen Dysprosium gehört, finden sich vor allem in China, welches 2007 rund 90 Prozent der Importe an Seltenen Erden in die Europäische Union stellte. Hervorzuheben ist die relativ große Anzahl an aktuellen Minenprojekten außerhalb Chinas. Diese werden jedoch primär die Situation der leichten Seltenen Erden (unter anderem Neodym) entspannen, nicht aber die der schweren Seltenen Erden (unter anderem Dysprosium).

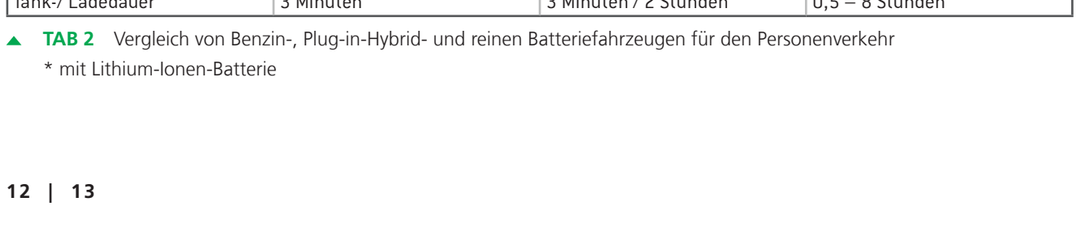
Zusammenfassend gibt es beim Thema „kritische Rohstoffe“ Unsicherheiten und großen Forschungsbedarf. Prognosen des weltweiten Bedarfs, der geologischen Reichweite und der Recyclingfähigkeit von Lithium und Kupfer zeigen, dass eine globale Verknappung zwar nicht zu befürchten ist, gleichwohl aber die Preise durch die stark steigende globale Nachfrage und die Konzentration auf wenige Lieferländer bis 2030 merklich steigen könnten. Quantitative Aussagen können hier jedoch, nicht zuletzt wegen des hohen spekulativen Anteils der Rohstoffpreise, kaum getroffen werden. Recyclingverfahren, Urban Mining – auf heutigen Deponien ist die Konzentration von manchen Stoffen höher als in bestimmten Abbauregionen – und die Entwicklung von Substituten sowie einer Rohstoffstrategie sind in diesem Zusammenhang wichtige Zukunftsthemen.



▲ **ABB 4** Kumulierte Verwendung von Lithium aufgeteilt nach den verschiedenen Verwendungsarten im zuvor beschriebenen Dominanz-Szenario



▲ **ABB 6** Energiedichte und Leistungsdichte von aktuellen und zukünftigen Lithium-Batterien[7]



▲ **ABB 5** Kumulierte Verwendung von Kupfer aufgeteilt nach den verschiedenen Verwendungsarten im zuvor beschriebenen Dominanz-Szenario

Eigenschaft	Benzin-Fahrzeug	Plug-in-Hybrid*	Batteriefahrzeug*
Energieinhalt (Tank/ Batterie)	445 kWh	200 + 10 kWh	24 kWh
Volumen (Tank/ Batterie)	50 Liter	25 + 50 Liter	> 100 Liter
Gewicht (Tank/ Batterie)	37 kg	20 + 100 kg	150 – 250 kg
Reichweite	> 700 km	50 + 600 km	< 150 km
Tank-/ Ladehäufigkeit	alle 2 Wochen	jeden Tag und alle 2 Wochen	alle 3 Tage voll / 30% pro Tag
Tank-/ Ladedauer	3 Minuten	3 Minuten / 2 Stunden	0,5 – 8 Stunden

▲ **TAB 2** Vergleich von Benzin-, Plug-in-Hybrid- und reinen Batteriefahrzeugen für den Personenverkehr
* mit Lithium-Ionen-Batterie

WARUM IST DIE BATTERIE DIE SCHLÜSSELTECHNOLOGIE?

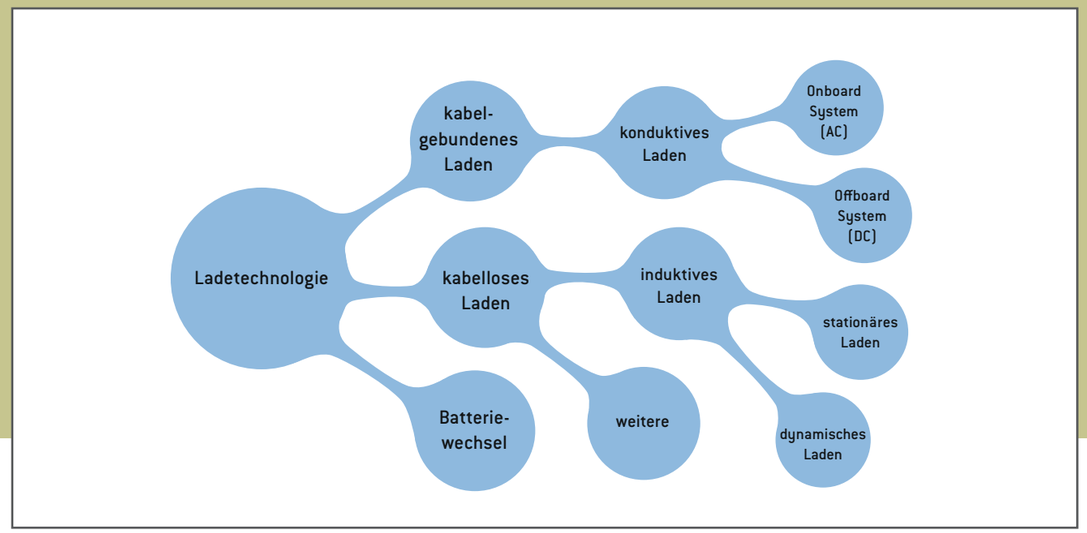
Für eine erfolgreiche, umfassende Markteinführung von Elektrofahrzeugen müssen noch eine Reihe an technischen Herausforderungen gelöst werden. Beispielsweise muss die On-Board-Leistungselektronik leichter und effizienter werden, Schnellladesysteme sowie neue technische Ansätze zur Klimatisierung und Wärmebereitstellung der Fahrgastzelle müssen entwickelt werden. Die Schlüsseltechnologie ist jedoch wegen ihres hohen Anteils an den Fahrzeugkosten und ihrem Einfluss auf die Reichweite die Batterie.

Heute ist die Lithium-Ionen-Batterie aufgrund ihrer hohen Energiedichte (bis zu etwa 160 Wattstunden pro Kilogramm in der Zelle und etwa 80 bis 100 Wattstunden pro Kilogramm für das Batteriesystem)[8] im Vergleich zu anderen verfügbaren Batteriearten das Optimum für Elektrofahrzeuge (siehe ABB 6). Um eine hohe Marktdurchdringung zu ermöglichen, müssen jedoch ihre Kosten ungefähr um einen Faktor drei auf 200 bis 300 Euro pro Kilowattstunde gesenkt werden. Zusätzlich muss die Lebensdauer von sieben auf mehr als zehn Jahre erhöht werden, Sicherheitsfragestellungen bei Fahrzeugunfällen gelöst und die Energiedichte optimiert werden.

Aufgrund ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften werden reine Elektrofahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterien auch künftig bei weitem nicht an die Reichweiten und Betankungszeiten konventioneller PKW herankommen (siehe TAB 2).

Langfristig ist die Weiterentwicklung der nächsten Batteriegeneration (wie Lithium-Luft-, Lithium-Schwefel-, Metall-Luft-Batterien) eine wesentliche Herausforderung. Mit künftigen Batterietypen erscheinen die Energiedichte und damit die Reichweite um den Faktor zwei bis fünf steigerbar, wodurch heutige Leistungsmerkmale von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren eher erreicht würden. Allerdings befindet man sich hier noch im Bereich der Grundlagenforschung. Mit der Markteinführung solcher Batterien rechnen Experten in frühestens zwölf bis 15 Jahren.

Die Eigenschaften der heute kommerziell verfügbaren Batterien führen dazu, dass reine Batteriefahrzeuge in den nächsten Jahren nur die Mobilitätsbedürfnisse bestimmter Marktsegmente abdecken können. Deshalb werden zurzeit verstärkt Plug-in-Hybride diskutiert, welche die Befürchtungen der Nutzer hinsichtlich der eingeschränkten Reichweite adressieren und den Einsatzbereich heutiger PKW fast vollständig abdecken könnten. Gleichzeitig sind Plug-in-Hybride mit ihrer kleineren Batterie deutlich günstiger in der Anschaffung und erlauben trotzdem hohe elektrische Fahranteile. Werte über 80 Prozent für den elektrischen Fahranteil sind möglich für die interessanten Kundengruppen mit dem entsprechenden Fahrverhalten und einer Batteriekapazität (zwischen sechs und zehn Kilowattstunden),[9] die weniger als die Hälfte von heute üblichen Batteriefahrzeugen von Volumenherstellern (20 bis 25 Kilowattstunden) beträgt. Die „Nationale Plattform Elektromobilität" rechnet entsprechend für 2020 mit mehr Plug-in-Hybriden als reinen Batteriefahrzeugen.[10] Diese stellen wegen der Kombination aus mechanischem und elektrischem Antrieb die



▲ **ABB 7** Verschiedene Ladetechnologien im Überblick[11]

Ladeart	Vorteile	Nachteile
per Kabel	+ einfache Handhabung + schnelle Ladung möglich + Technik bereits etabliert + geringe Kosten	– regelmäßiges Einstecken wird als Hürde wahrgenommen
kabellos	+ Wegfall des Kabels und damit kein Nutzereingriff erforderlich + geringer Verschleiß	– längere Ladedauer – genaue Positionierung nötig – Rückspeisung nicht möglich
Batteriewechsel	+ ermöglicht kurze Stopps und schnelle Weiterfahrt	– Batterietausch technisch aufwändig – Batteriestandardisierung nötig – viele Wechselstationen nötig

▲ **TAB 3** Übersicht der verschiedenen Ladetechnologien[14]

anspruchsvollste Form der Elektromobilität dar. Hier bietet sich aber auch eine Chance für Deutschland, da in diesen Bereichen große Kompetenzen vorhanden sind.[12]

Anders sieht es im Bereich der Batteriezellen aus, die einen erheblichen Teil an der Wertschöpfung bei Elektrofahrzeugen ausmachen. Hier weist Deutschland kaum noch Kompetenzen auf wissenschaftlicher und industrieller Seite auf. Diese müssen erst mühsam mit viel Kapital wieder aufgebaut werden. Offen dabei ist, ob der heutige Vorsprung, insbesondere asiatischer Länder, bei der Lithium-Ionen-Batterie überhaupt aufgeholt werden kann. Je nachdem erscheinen Investitionen in die nächste Batteriegeneration, wie Lithium-Schwefel-Batterien, erfolgversprechender oder sollten zumindest parallel betrieben werden.

Allerdings sei an dieser Stelle kurz auf die Konkurrenz zu den Brennstoffzellenfahrzeugen verwiesen. Diese decken, wie die Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge, auch die heutigen Nutzeranforderungen an einen PKW ab. Sie sind prinzipiell einfacher aufgebaut als die Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge und sie besitzen weniger mechanische Verschleißteile. Aber sie sind von den Kosten noch weiter vom Markt entfernt und auch der Infrastrukturaufbau für den Kraftstoff Wasserstoff gestaltet sich herausfordernd.[13]

WO UND WIE BELÄDT MAN SEIN ELEKTROFAHRZEUG?

Fahrzeuge benötigen Energie für ihren Antrieb. Verbrennungsfahrzeuge nutzen dafür die chemische Energie im Treibstoff, welche durch Verbrennung erzeugt wird. Für ein Elektrofahrzeug, das ganz oder teilweise elektrisch angetrieben ist, muss elektrische Energie in der Fahrzeugbatterie bereitstehen, die nach Verbrauch wieder aufgeladen wird.

Wie wird geladen?

Es gibt verschiedene Verfahren, um Batterien zu laden. Das Fahrzeug kann über ein Kabel oder auch kabellos mit einer externen Ladeeinheit verbunden sein. Eine weitere Möglichkeit ist der Batteriewechsel, bei dem die leere Batterie aus dem Fahrzeug entnommen und mit einer vollen Batterie getauscht wird. Die verschiedenen Ladetechnologien sind in ABB 7 zusammengestellt.

Das *kabelgebundene konduktive Laden* kann sowohl über Wechselstrom als auch Gleichstrom erfolgen. Wechselstromkonzepte sehen eine Ladeeinheit mit Gleichrichter im Fahrzeug vor, während Gleichstromladung die Leistungselektronik in der Säule unterbringt. Die verschiedenen Konzepte lassen unterschiedliche Ladeleistungen zu. Wechselstromladen kann an der bekannten Haushaltssteckdose mit maximal 3,7 Kilowatt bis hin zu Anschlüssen mit etwa 50 Kilowatt erfolgen. Aufgrund des zunehmenden Gewichts für die im Fahrzeug unterzubringende Leistungselektronik sind höhere Anschlussleistungen wechselstrombasiert kaum zu erzielen. Gleichstromkonzepte erlauben theoretisch deutlich höhere Anschlussleistungen. Um aber Ladezeiten unter fünf Minuten zu realisieren, benötigt man Anschlussleistungen von über 100 Kilowatt, was technisch aufwändig ist und zu hohen Kosten führt.

Eine Alternative ist die *kabellose Energieübertragung* per Induktion.[15] Die Leistung eines solchen Systems ist jedoch nicht hoch und die Ladeplatte und das Fahrzeug müssen in kleinem Abstand von einigen Zentimetern zueinander ausgerichtet sein. Zudem ist ein induktives System sowohl auf Seiten der Ladeinfrastruktur als auch auf Fahrzeugseite deutlich teurer.

Der *Batteriewechsel* an öffentlichen Tauschstationen ist als weiteres Modell zu nennen.[16] Um den Tausch zu vereinfachen und die Anzahl der benötigten Batterien zu reduzieren, müssten die Batterien sehr stark standardisiert werden, zudem sind die Kosten eines Wechselsystems hoch. Betrachtet man die Variantenvielfalt in der heutigen Automobilausstattung und -gestaltung, erscheint dies sehr unwahrscheinlich. Diese drei Konzepte sind in TAB 3 gegenübergestellt.

Zusammenfassend lässt sich die Frage „Wie wird geladen?" wohl so beantworten: Höchstwahrscheinlich wird dem kabelgebundenen Laden der Vorzug gegeben, da es einfach und sicher ist und die nötigen Geräte bereits vielerorts vorhanden sind. Andere Anwendungen finden eher in Nischen statt, zum Beispiel könnte induktives Laden in Fahrzeugflotten interessant sein.

Wo wird geladen?

Alle praktisch relevanten Lademöglichkeiten beanspruchen mehr Zeit als das Tanken wie man es heute kennt. Daher ist es sinnvoll, die Fahrzeuge dort zu laden wo sie längere Zeit stehen. Es stellt sich somit die Frage, an welchen Orten die nötige Infrastruktur besonders einfach zur Verfügung gestellt werden kann. Es ist üblich zwischen zu Hause (privat), am Arbeitsplatz oder anderen zugangsbeschränkten Parkmöglichkeiten (halböffentlich) sowie öffentlichen Standorten, zum Beispiel Ladesäulen in Stadtzentren, zu unterscheiden.[17]

Privater Bereich
Am einfachsten ist das Laden zu Hause: in der eigenen Garage oder über einen anderen Stromanschluss am Haus. Die Abrechnung erfolgt über den hauseigenen Stromvertrag. Diese Möglichkeit besteht insbesondere auf dem Land oder in Vororten. In geschlossenen städtischen Siedlungsgebieten werden Fahrzeuge hingegen häufig auf der Straße abgestellt, wo öfter keine direkte Anschlussmöglichkeit an das Stromnetz besteht. Jedoch hat die Mehrheit der PKW-Halter (zwischen 72 Prozent und 95 Prozent, je nach Gemeindegröße) die Möglichkeit, ihr Fahrzeug in einer Garage oder auf einem privaten Stellplatz abzustellen.[18] Dabei ist die Ladung und Abrechnung verhältnismäßig einfach zu realisieren.

Halböffentlicher Bereich
Über den Tag werden die Fahrzeuge immer wieder an den gleichen Orten abgestellt, wie zum Beispiel beim Arbeitgeber oder an Sportstätten. Dort sind Stromanschlüsse häufig vorhanden, sodass die Parkplätze vergleichsweise einfach mit Ladevorrichtungen ausgebaut werden können. Da das Parken hier häufig zugangsbeschränkt ist – es dürfen zum Beispiel nur Arbeitneh-

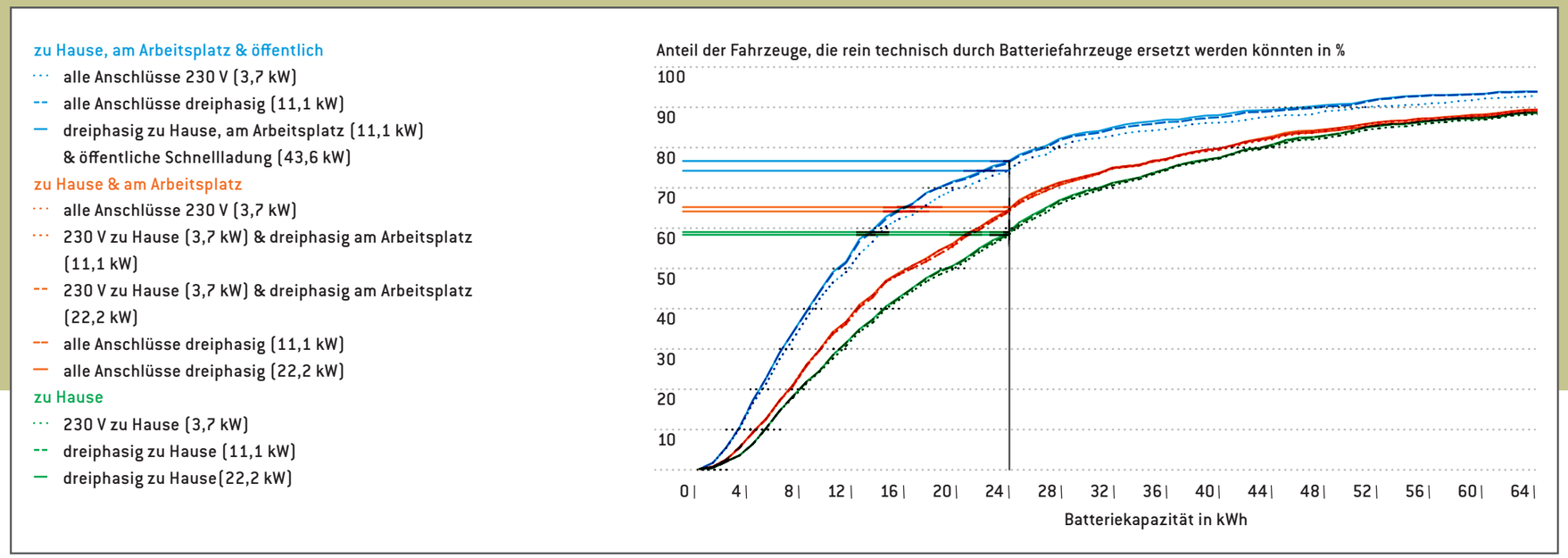


ABB 8 Simulierte Fahrten, die bei unterschiedlicher Batteriekapazität und verschiedenen Infrastrukturszenarien vollständig von Batteriefahrzeugen abgedeckt werden könnten

MYTHOS 2

„Hohe Ladeleistungen sind notwendig für Elektromobilität."

Im Durchschnitt steht ein PKW zu 96 Prozent der Zeit.[19] Je nach Standort, zum Beispiel am Arbeitsplatz, können große Teile dieser Zeit zum Laden genutzt werden. Eine Batterie für circa 100 Kilometer Reichweite (20 kWh bei 80 Prozent Entladetiefe = 16 kWh und Verbrauch von 0,16 kWh/km) ist mit einem normalen Hausanschluss in circa vier Stunden aufgeladen (16 kWh/3,7 kW = 4 h 20 min.). Insbesondere über Nacht ist deshalb ausreichend Zeit zur Ladung. Zudem altert eine Batterie bei höherer Ladeleistung schneller.[20]

mer oder Kunden auf diesen Parkplätzen parken – reicht es, die Ladung an der Steckdose zu ermöglichen und einfache, eventuell pauschale Abrechnungen vorzusehen. Aufgrund der relativ geringen Ladekosten (von circa 48 Euro im Monat bei einer Jahresfahrleistung von 14.300 km, einem Verbrauch von 20 Kilowattstunden pro 100 Kilometer und 0,20 Euro pro Kilowattstunde) kann gegebenenfalls ganz auf die Abrechnung verzichtet und die freie Bereitstellung als Engagement des Arbeitsgebers oder Vereins für emissionsarme Mobilität beworben werden. Ein wesentlicher Kostenvorteil der halböffentlichen Ladung besteht darin, dass der Parkraum selber nicht oder nur zum geringen Teil in die wirtschaftliche Bewertung einbezogen werden muss. Vergleichsweise macht dieser Kostenblock im innerstädtischen öffentlichen Parkraum einen wesentlichen Anteil aus. Weiterhin vorteilhaft ist bei der halböffentlichen Nutzung der bessere Schutz vor Vandalismus.

Öffentlicher Bereich

Sowohl für den Rest der parkenden Fahrzeuge, zum Beispiel in städtischen Wohnstraßen oder Siedlungen, als auch für Zwischenladungen auf längeren Fahrten wird der Aufbau von öffentlichen Ladesäulen propagiert.[21] Diese Ladeinfrastruktur ähnelt im Prinzip den früheren Telefonzellen aus der Zeit, als es noch keine Mobiltelefone gab. Nicht nur die Verwendung, sondern auch die Architektur einer Ladesäule gleicht der einer Telefonzelle: diese muss im öffentlichen Raum erkennbar, stabil gebaut, gegen Missbrauch geschützt und mit einem Abrechnungssystem ausgestattet sein. Dabei darf die abgerechnete Leistung nicht signifikant teurer als in den beiden zuvor genannten Ladeinfrastrukturen sein, da diese sonst nicht genutzt und somit kaum ausgebaut würden.

Um schnelle Ladungen, zum Beispiel für Zwischenladungen auf längeren Strecken, möglich zu machen, wird derzeit an Hochleistungsladestationen gearbeitet. Allerdings sind diese vergleichsweise teuer, und wer den Aufbau eines Netzes von Ladestationen finanzieren könnte, ist bislang unklar.

Auswertungen von Fahrprofilen zeigen, dass ein Großteil der Fahrten mit ausschließlich privater Ladeinfrastruktur bewerkstelligt werden könnte und der Aufbau öffentlicher Ladesäulen bei heutiger Fahrzeugtechnologie keinen signifikanten zusätzlichen Anteil an technisch möglichen Fahrten bieten würde (vergleiche ABB 8). Die Nutzergruppe, der kein privater Stellplatz zur Verfügung steht, ist, wie oben beschrieben, verhältnismäßig klein. Eine Nutzung von Elektromobilität ist aufgrund ihrer geringen Fahrleistung auf absehbare Zeit ökonomisch nicht sinnvoll.[22]

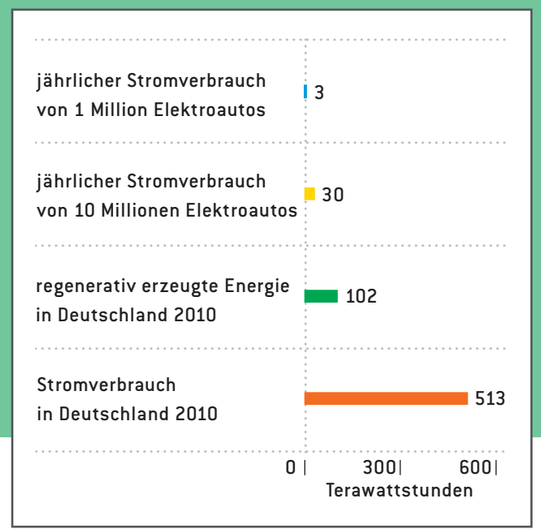
Ladeinfrastruktur	Abrechnung	Anschlussleistung	Strommehrkosten in Cent pro Kilowattstunde		
		maximal in kW	konduktiv	induktiv	Batterietausch
privat	nein	3,7	1–2	17–38	
		11–22	2–5	26–56	
halböffentlich	ja	11–22	4–13	21–42	
	nein		4–11	29–59	8–12
öffentlich	ja	11–22	9–34	43–95	
		43	5–19		
		100 (Gleichstrom)	10–21		

TAB 4 Kosten verschiedener Ladeinfrastrukturen umgelegt auf den zu ladenden Strom (Strommehrkosten)
Zum Vergleich: heute liegt der Strompreis im Haushaltsbereich bei 23 Cent pro Kilowattstunde
Annahmen: Laufleistung von 14.300 km/a, Verbrauch von 16 kWh/100km, Berechnung unter hoher Auslastung, wird aufgrund der hohen Kosten eine Infrastruktur gemieden, erhöhen sich dadurch die Kosten

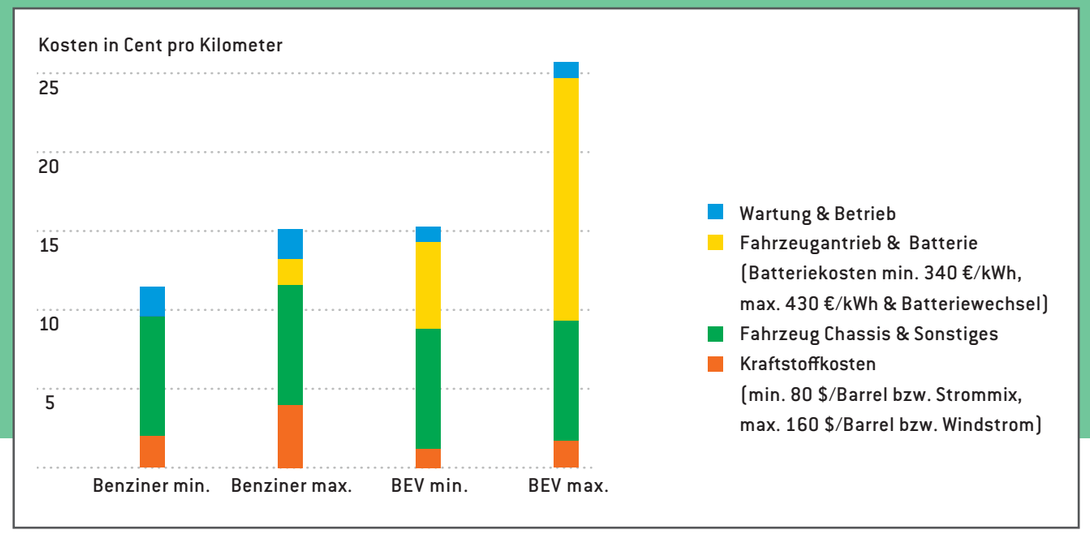
MYTHOS 3

„Man braucht öffentliche Ladesäulen für Elektrofahrzeuge."

Ein reines Elektroauto lohnt sich oftmals erst für Vollzeitpendler, die außerhalb eines Stadtzentrums wohnen. Sie fahren täglich eine große, aber nicht zu große Strecke und erreichen damit eine ausreichende Jahresfahrleistung.[23] Da diese Nutzergruppe zu 90 Prozent über eine eigene Garage oder einen Stellplatz am Haus verfügt, kann sie leicht und günstig privat laden und benötigt keine öffentliche Ladeinfrastruktur.[24]
Die Gruppe der sogenannten Laternenparker, also diejenigen, die ausschließlich im öffentlichen Raum parken, ist mit fünf Prozent keine sehr große Nutzergruppe und fährt in der Regel zu wenig, um die höheren Investitionen mit geringeren Verbrauchskosten zu decken.[25]
Verschiedene Teile des Wirtschaftsverkehrs, wie Paket- und Lieferdienste, verfügen über eine ausreichende Jahresfahrleistung bei begrenzter Tagesfahrleistung und planbaren Routen, sodass sich für sie ein Umstieg auf Elektrofahrzeuge lohnen könnte. Sie kehren regelmäßig zu festen firmeneigenen Stellplätzen zurück und könnten dort geladen werden.[26]



◀ **ABB 9** Vergleich des Stromverbrauchs von Elektrofahrzeugen in Terawattstundem mit dem Gesamtstromverbrauch Deutschlands



▲ **ABB 10** Vergleich der Kosten in Cent pro Kilometer für ein reines Elektrofahrzeug (BEV) und einen Kleinwagen mit Verbrennungsmotor im Jahr 2015 (in Deutschland mit einer jährlichen Fahrleistung von 14.000 Kilometern ohne Steuern)[31]

WAS IST AUS ENERGIEWIRTSCHAFTLICHER PERSPEKTIVE ZU BEACHTEN?

Aus der Perspektive der Stromwirtschaft stellt sich die Frage, welchen Einfluss die Elektromobilität künftig in ihrem Bereich haben wird. In der Diskussion um die Stromlücke in Deutschland, die Sicherstellung der Stromversorgung nach Fukushima und den Beschluss der Bundesregierung, schneller als geplant aus der Atomkraft auszusteigen, stellt sich zuerst die Frage, ob überhaupt genügend Strom für Elektromobilität bereitgestellt werden kann. Bis 2020 würde die Elektromobilität bei Erreichung von einer Million Elektrofahrzeugen gerade mal 0,6 Prozent des heutigen Stromverbrauchs benötigen (14.300 Kilometer im Jahr bei 0,20 Kilowattstunden pro Kilometer und 1 Million Fahrzeuge ergibt 2,86 Terawattstunden, siehe auch ABB 9). Bei höherer Marktpenetration, die allerdings erst deutlich nach 2020 zu erwarten ist (siehe ABB 14), wird sich das Problem jedoch verschärfen.

Die Bundesregierung hat aus ökologischen Gründen weiterhin beschlossen, den zusätzlichen Bedarf an elektrischer Energie durch die Elektromobilität aus erneuerbaren Energien zu decken.[27] Vorrangig sollte dafür der anderweitig nicht nutzbare Strom aus fluktuierenden erneuerbaren Energien genutzt werden. Für den darüber hinausgehenden Strombedarf für Elektromobilität sind weitere Ausbaupotenziale der erneuerbaren Energien zu erschließen. In Deutschland wurden im Jahre 2010 bereits 102 Terawattstunden erneuerbarer Elektrizität produziert.[28] Mit der gerade beschlossenen konsolidierten Fassung des Gesetzes für den Vorrang erneuerbarer Energien[29] wird in Deutschland ein Anteil von 35 Prozent an erneuerbaren Energien an der Stromversorgung bis spätestens zum Jahr 2020 und 80 Prozent spätestens bis zum Jahr 2050 angestrebt. Das heißt, man redet aller Wahrscheinlichkeit nach im Jahre 2020 über zusätzliche Mengen an erneuerbarem Strom für Elektromobiliät von deutlich unter zwei Prozent. Allerdings wird der höhere Anteil an erneuerbarem Strom die Strompreise weiter nach oben treiben, wobei die Höhe von der Entwicklung der Rahmenbedingungen, wie der Brennstoffpreisentwicklung der fossilen Energieträger und der Kostendegression der erneuerbaren Energien, abhängt. Dies hat jedoch nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtwirtschaftlichkeit der Elektromobilität (siehe ABB 10).

Wie die späteren Ausführungen zur Kundenakzeptanz von Elektrofahrzeugen zeigen werden, ist deren Umweltvorteil gegenüber herkömmlichen Fahrzeugen durch die Stromproduktion aus erneuerbaren Energien von hoher Relevanz. In diesem Zusammenhang kann auch die Frage gestellt werden, wie sich der gerade beschlossene beschleunigte Ausstieg aus der Kernenergie auswirken wird.[30] Für alle Sektoren, die dem CO_2-Handel unterstehen, einschließlich des Kraftwerkssektors, wurden bis 2020 europaweit CO_2-Emissionsmengen verbindlich festgelegt. Da derzeit keine Ansätze erkennbar sind, diese neu zu verhandeln, wird sich der Ausstieg nicht auf die CO_2-Emissionen in der Summe auswirken. Allerdings sind Preiseffekte wahrscheinlich, die daher resultieren, dass andere zusätzliche Maßnahmen zur CO_2-Minderung jetzt ergriffen werden müssen.

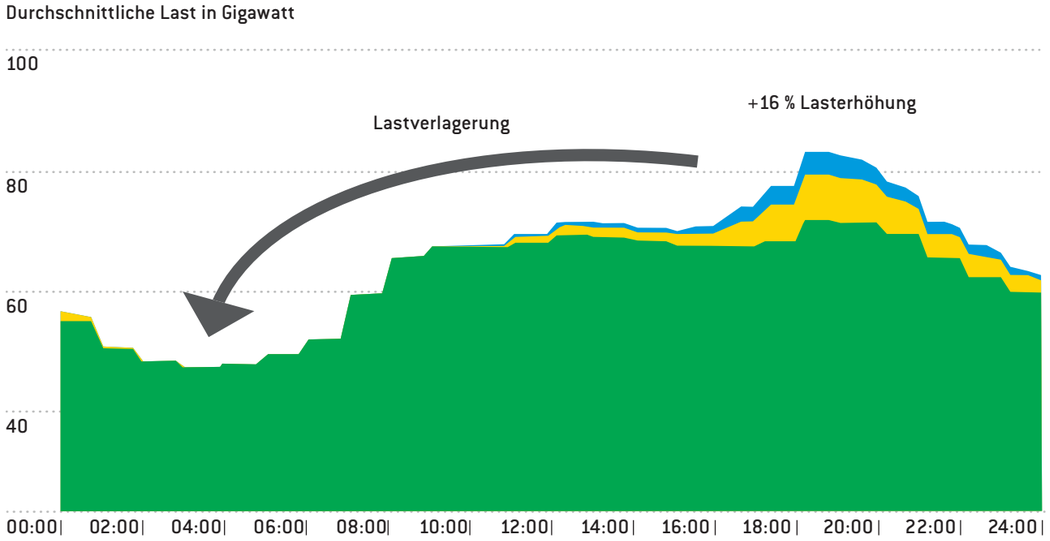
Der mit dem Ausstiegsbeschluss einhergehende beschleunigte Ausbau der erneuerbaren Energien wirkt sich somit wegen der Anforderung der Systemintegration fluktuierender erneuerbarer Energien positiv auf die Elektromobilität aus. Wenn nun Plug-in-Hybride oder reine Elektrofahrzeuge bidirektional am Stromnetz angeschlossen werden, dann kann über ein gesteuertes Ab- und Zuschalten des Beladevorganges aktive Lastverlagerung betrieben werden. Dies ist auch notwendig, denn wenn man sie ungesteuert laden würde, würde man neue Lastspitzen schaffen – gerade abends, wenn die Fahrzeuge zu Hause geladen würden (vergleiche ABB 11). Weiterhin muss überprüft werden, ob die lokalen Verteilnetze bei einer höheren Anzahl an angeschlossenen Elektrofahrzeugen nicht überlastet würden. Die beiden angesprochenen Problemfälle werden jedoch erst ab Fahrzeugzahlen von über einer Million relevant, also vermutlich erst nach 2020. Weichenstellungen wie der Netzausbau auf Verteilnetzebene sind wegen ihrer langen Planungs- und Umsetzungsdauern allerdings heute schon bei Investitionsentscheidungen zu berücksichtigen.

Bei einem bidirektionalen Netzanschluss könnten Elektrofahrzeuge, zumindest theoretisch, auch im Bereich des positiven Regel- und Reserveenergiemarktes teilnehmen. Eine Rückspeisung ist heute kaum wirtschaftlich, weil diese die Lebensdauer der Batterie – die heute noch sehr teure Komponente der Elektromobilität – stark reduzieren kann. Es ist ebenso zu berücksichtigen, dass das Speicherpotenzial von Elektrofahrzeugen zwar relevant ist, aber auch nicht überschätzt werden darf. Wegen der bestehenden Engpässe im deutschen Stromnetz kommt nur der regionale Fahrzeugbestand für die Stromspeicherung infrage, und die fluktuierenden erneuerbaren Energien fallen regional unterschiedlich an. So stehen nur rund fünf Millionen potenziell durch Elektroautos ersetzbare Fahrzeuge in Nordwestdeutschland zur Verfügung, um dort den Strom aus heutigen Onshore- und künftigen Offshore-Windanlagen speichern zu können. Weiterhin fällt die Überschussstrommenge, die gegebenenfalls nicht im Netz gespeichert werden kann, sehr unterschiedlich an, denn es entsteht viel Windstrom im Frühjahr und Herbst. Die PKW-Batterien weisen eine hohe Leistung auf, allerdings ist die speicherbare Energiemenge eher gering. Es ist somit das Fazit zu ziehen, dass die netzgebundene Elektromobilität in energiewirtschaftlich relevantem Umfang zur Lösung des Speicherproblems beitragen kann, aber die Potenziale auch nicht überschätzt werden dürfen.

MYTHOS 4

„Es gibt nicht ausreichend Strom für Elektroautos.“

Um die Ziele der Bundesregierung zu erreichen, müssen eine Million Elektroautos im Jahr 2020 auf deutschen Straßen fahren. Bei gleichbleibender durchschnittlicher Jahresfahrleistung von 14.300 Kilometern[32] und dem Verbrauch von 20 Kilowattstunden auf 100 Kilometern[33] wären dafür circa drei Terawattstunden pro Jahr notwendig. Dies entspricht etwa 0,6 Prozent des jährlichen Strombedarfs in Deutschland.[34] Da vermutlich nicht alle Elektroautos reine Batteriefahrzeuge sein werden, wird der tatsächliche Strombedarf sogar noch etwas geringer sein. Laden alle diese Elektrofahrzeuge gleichzeitig am heimischen Netz, so benötigen sie eine Leistung von 3,7 Gigawatt, was zwei Prozent der installierten deutschen Leistung entspricht.[35]



Annahmen: 3,7 kW Ladeanschluss, 85 % Ladeeffizienz, Monatsmittel beruhen auf November 2006 und 2007 (Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity), Fahrzeugbestand 42 Millionen, davon 20,2 % PHEV mit 50 km elektrischer Reichweite und 0,16 kWh/km-Verbrauch und 11,7 % Stadt-BEV mit 100 km elektrischer Reichweite und 0,11 kWh/km-Verbrauch

- Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)
- Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV)
- durchschnittlicher Strombedarf an Werktagen im November (ohne Feiertage)

ABB 11 Erhöhung der Last durch Elektrofahrzeuge, wenn immer nach dem letzten Weg geladen wird in Gigawatt

MYTHOS 5

„Elektrofahrzeuge können als Stromspeicher für erneuerbare Energien dienen."

Wenn eine große Zahl an Elektrofahrzeugen an das Stromnetz angeschlossen wird, können diese als Stromspeicher dienen, jedoch mit begrenztem Gesamtpotenzial. Falls eine Million Elektrofahrzeuge jeweils 10 kWh Speicher bereitstellen, sind das 10 GWh Kapazität. Dies entspricht ungefähr dem größten deutschen Pumpspeicherkraftwerk (Goldisthal mit 8,5 GWh) und reicht, um Deutschland für circa zehn Minuten komplett mit Strom zu versorgen.[36] Die Rückspeisung von Energie ist nur in bedingten Zeitfenstern lukrativ für den Kunden, zudem wird die Akzeptanz einer möglicherweise erhöhten Batteriealterung durch die Mehrbeanspruchung vom Nutzer als nachteilig empfunden.[37]

Es ist möglich, die Ladelast von Elektrofahrzeugen mit Hilfe eines intelligenten Lademanagements in Schwachlastzeiten zu verlagern, um zusätzliche Bedarfsspitzen zu vermeiden. Bei einer größeren Zahl von Elektrofahrzeugen werden bei richtigen technischen Voraussetzungen (Rückspeisemöglichkeit) jedoch interessante Potenziale zum Lastausgleich (mit beachtlicher Leistung aber nicht so großer Kapazität) gesehen.

WAS SIND VIELVERSPRECHENDE GESCHÄFTSMODELLE?

Das traditionelle Geschäftsmodell zwischen Herstellern und Nutzern von Fahrzeugen im Individualverkehr, bei dem die Fahrzeuge durch Kauf vollständig in den Besitz der Nutzer übergehen, wird zunehmend durch alternative Varianten ergänzt. Diese betreffen die Bereiche Fahrzeugbesitz, Mobilitäts- und Energiekonzepte, und sind zum Teil spezifisch für Elektrofahrzeuge, zum Teil jedoch auf alle Fahrzeugkonzepte anwendbar. Prominentestes Beispiel im Bereich der Mobilitätskonzepte ist das Carsharing, bei dem der Endkunde nicht mehr länger das Fahrzeug selbst besitzt, sondern bei Bedarf auf einen Fahrzeugpool des Anbieters zurückgreift. Der Kunde zahlt somit nur noch für die tatsächliche Nutzung des Fahrzeugs, wodurch hohe Anschaffungsinvestitionen und die Wartung entfallen, sowie je nach Bedarf verschiedene Fahrzeugtypen gewählt werden können. Unter Maßgabe aktueller Fahrprofile ergeben Simulationsrechnungen für ausgewählte deutsche Städte ein wirtschaftlich sinnvolles langfristiges Einsatzpotenzial von Elektrofahrzeugen im Carsharing von bis zu zehn Prozent, wobei sich kleinere Batterien um zehn Kilowattstunden schneller lohnen.[38] Zwar beträgt die Gesamtzahl von Carsharing-Fahrzeugen in Deutschland derzeit nur 5.000, bis 2020 können jedoch jährlich zweistellige Wachstumsraten erwartet werden.

Der hohe Preis und die relativ geringe oder unbestimmte Lebensdauer der Batterie legt nahe, dass neben traditionellen Firmen, wie Automobilherstellern und Mobilitätsanbietern, künftig neue Akteure wie Batteriehersteller oder Energieversorgungsunternehmen in den Markt eintreten. Um zukünftig nicht nur Fahrzeuge, sondern auch Mobilität anbieten zu können, werden innovative Geschäftsmodelle geschaffen, welche bislang nicht vorhandene komplexe Strukturen aufweisen und zu neuen Herausforderungen für alle am Thema Elektromobilität beteiligten Akteure führen. Dabei ist die integrierte Betrachtung der drei Komponenten „Fahrzeug und Batterie", „Infrastruktur" sowie „Systemdienstleistungen" notwendig, um die Geschäftsmodelle der unterschiedlichen Mobilitätskonzepte systematisch und ganzheitlich abzubilden.[39] Beispielsweise wird durch die Trennung der Eigentumsverhältnisse von Fahrzeug und Batterie, etwa durch separates Leasing der Batterie, je nach Art der Abrechnung (nach Zeit oder Ladezyklen), das Risiko einer vorzeitigen Batteriealterung vom Verkehrsteilnehmer auf den Fahrzeug- oder Batteriehersteller übertragen. Die zweite Komponente „Infrastruktur" legt alle Ausgestaltungsparameter für die Infrastruktur fest. Über die dritte Komponente „Systemdienstleistung" wird die Integration der Batterie als mobiler Speicher oder als Option des Lastausgleichs im Energienetz dargestellt.

Das wohl prominenteste Beispiel eines möglichen neuen Geschäftsmodells betreibt derzeit das Unternehmen „Better Place" in Israel und Dänemark. Durch Batteriewechselsysteme, welche eine leere Batterie gegen eine voll beladene Batterie in kurzer Zeit austauschen, können auch längere Strecken überbrückt werden. Während das Fahrzeug in Besitz des Kunden übergeht, bleibt die Batterie Eigentum des Herstellers.[40] Ob sich dieses Konzept für eine Verbreitung am Massenmarkt eignet, ist bisher allerdings unter anderem wegen der nötigen Standardisierung von großen Fahrzeugbatterien umstritten.

Daneben existieren weitere Ansätze, welche darauf abzielen, Elektrofahrzeuge intelligent in die täglichen Nutzungsprofile der Individuen einzubinden.[41] Diese unterschiedlichen Ansätze müssen jedoch auf ihre Vorteilhaftigkeit hin überprüft werden. So lassen sich für ein Elektrofahrzeug in Kombination mit dem Stromverbrauch des Privathaushalts des Endnutzers vier unterschiedliche Anwendungsfelder zur Integration von erneuerbaren Energien und Systemdienstleistungen betrachten. Beispielsweise könnte der Nutzer eines Elektrofahrzeugs die Fahrzeugbatterie als mobilen Speicher einsetzen und damit, solange das Fahrzeug zu Hause parkt, die verbleibende Energie der Batterie zu Spitzenlastzeiten in den privaten Haushalt zurückspeisen und seine Haushaltsgeräte, wie zum Beispiel Küchengeräte, PC oder Fernseher, versorgen. Elektrofahrzeuge werden somit ein wichtiger Bauteil in „Smart Grids" – einem sogenannten intelligenten Stromnetz. Die Beladung des Fahrzeugs kann zudem gezielt gesteuert und so in Niederstromzeitphasen verlagert werden, um zusätzliche wirtschaftliche Potenziale zu nutzen. Außerdem könnte eine verfügbare Photovoltaikanlage auf dem Dach des Privathaushaltes dazu genutzt werden, die Fahrzeugbatterie günstig aufzuladen.[42] Rechnungen im Rahmen der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität haben gezeigt, dass das Kombi-Modell „Privathaushalt inklusive Elektrofahrzeug", welches die Kombination aus Systemdienstleistungen und Einbindung erneuerbarer Energien darstellt, bei Vernachlässigung einer möglichen erhöhten Batteriealterung und zusätzlicher Kosten für Rückspeisung und Steuerung derzeit die wirtschaftlich interessanteste Lösung sein könnte. Wird die Batterie nicht als mobiler Speicher des Haushalts eingesetzt, sondern lediglich für Fahrzwecke genutzt, so schöpft der Kunde die zusätzlichen Potenziale der Batterie als mobiler Speicher nicht aus, was zu höheren Gesamtkosten für den Kunden führt. Damit die Nutzung von Elektrofahrzeugen jedoch wirtschaftlicher als der Einsatz von Verbrennungsfahrzeugen wird, müssen die

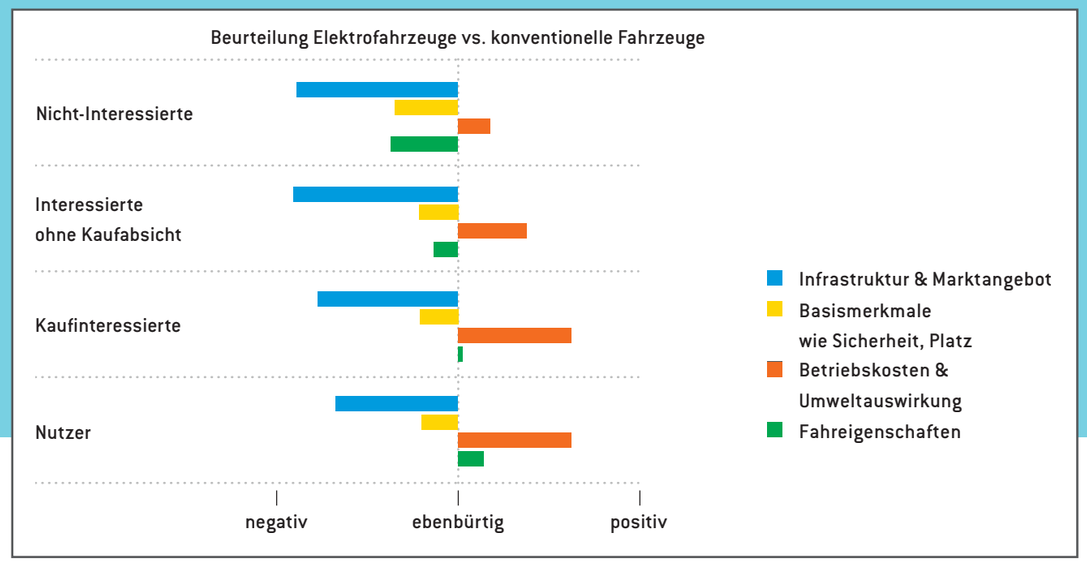


ABB 12 Beurteilung von Elektroautos im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen durch Gruppen mit unterschiedlichem Erfahrungs- und Wissensstand sowie Interesse an Elektroautos

Batteriekosten noch deutlich sinken und bzw. oder hinreichend große Fahrstrecken rein elektrisch zurückgelegt werden.

Außer den Untersuchungen für den Einsatz von Elektrofahrzeugen für den Individualverkehr existieren weltweit auch etliche Pilotprojekte für den Wirtschaftsverkehr. So haben beispielsweise Logistikdienstleister wie FedEx, UPS oder DHL damit begonnen, ihre Flotten teilweise mit Elektrofahrzeugen auszustatten und deren Einsatz im innerstädtischen Lieferverkehr zu testen. Der Einsatz von Elektrofahrzeugen in gewerblichen Fahrzeugflotten ist insbesondere deshalb interessant, weil sich der Fuhrpark entsprechend der Fahrprofile aus Verbrennungs- und Elektrofahrzeugen zusammenstellen lässt. Aufgrund der spezifischen Fahrprofile von Logistikdienstleistern, wie beispielsweise „back-to-base"-Fahrten, feste Einsatzfenster und im Voraus planbare Touren, die meist weniger als 100 Kilometer betragen, können auch reine Elektrofahrzeuge trotz ihrer eher geringeren Reichweite gezielt eingesetzt werden. Zudem kann zur Beladung ein fester Stellplatz auf dem Firmengelände bereitgestellt werden. Wegen der ausgereiften Tourenplanung im Wirtschaftsverkehr können die Einsatzbedingungen angepasst werden, indem die Batterieauslastung und die Jahresfahrleistung maximiert werden. Insbesondere bei stark steigenden Dieselpreisen und bei einer deutlichen Reduzierung des Batteriepreises, wird der Einsatz von Elektrofahrzeugen in diesem Segment wirtschaftlich.

WAS WEISS MAN ÜBER DIE KUNDENAKZEPTANZ?

Eine Umstellung auf Elektromobilität konfrontiert auch die Nutzer mit einem Systemwechsel in ihren Mobilitätsangewohnheiten. Fahrzeuge mit neuartigen Eigenschaften und anderem Fahrverhalten, ungewohnte Ladeprozesse und Infrastrukturen, sowie neue Geschäftsmodelle und Akteure erfordern Verhaltensänderungen und die Akzeptanz der Nutzer auf verschiedenen Ebenen. Insofern ist es wichtig, die Elektromobilität nicht nur aus technischer und wirtschaftlicher Sicht voranzutreiben, sondern auch die Wünsche und Bedürfnisse der Konsumenten systematisch zu erforschen und die weitere Entwicklung der Elektromobilität daran auszurichten. Denn ohne die Akzeptanz der Nutzer ist eine erfolgreiche Markteinführung der Elektromobilität nicht möglich.

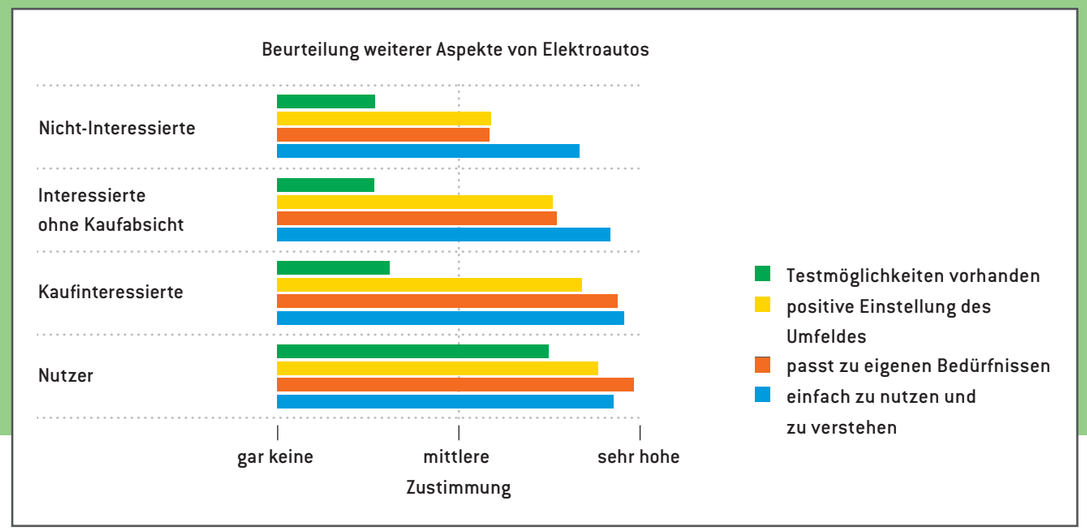
Die genauen Anforderungen von Kundenseite sind schwierig zu bestimmen, denn elektrisch betriebene Fahrzeuge befinden sich heute noch kaum auf dem Markt. Zu Beginn des Jahres 2011 waren laut Kraftfahrt-Bundesamt gerade 2.307 reine Elektrofahrzeuge bei über 40 Millionen zugelassenen PKW in Deutschland registriert. Tatsächliche Kundenerfahrungen, welche die sicherste Quelle für Folgerungen zur Kundenakzeptanz darstellen, können insofern nur begrenzt die Grundlage für Aussagen zu Nutzerakzeptanz und Kundenbedürfnissen bilden.

Bisherige Umfragen durch Marktforschungsinstitute in der Bevölkerung zeigen, dass Elektromobilität in Deutschland zunehmend an Bekanntheit erlangt und Effizienzvorteile sowie geringere Unterhaltskosten als wesentliche Vorteile von Elektrofahrzeugen wahrgenommen werden.[43] Gleichzeitig fehlen das notwendige Wissen sowie Erfahrungen mit Elektromobilität.[44] Bei mangelndem Wissen und fehlenden Erfahrungen richten Befragungsteilnehmer ihre Erwartungen aber stark an dem aus, was sie kennen: Elektroautos scheinen dann nur eine Chance zu haben, wenn sie hinsichtlich Preis und Leistungsmerkmalen wie Reichweite, Ladedauer und Höchstgeschwindigkeiten mit konventionellen Autos mithalten können.[45]

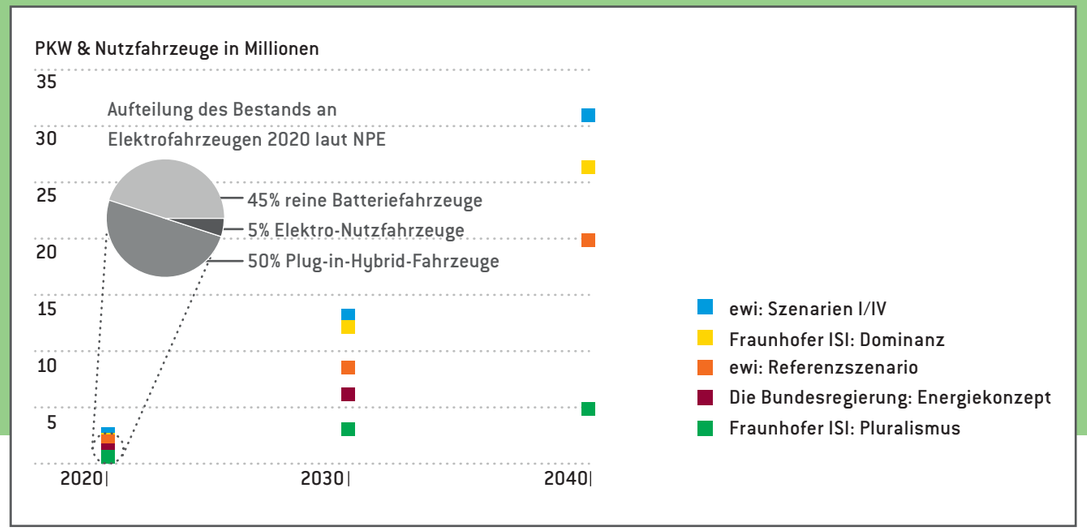
Eine vergleichende Breitenbefragung des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung ISI von vier Gruppen mit unterschiedlichem Erfahrungsstand (aktuellen Nutzern, Personen mit konkreten Anschaffungsintentionen, interessierten Personen ohne Kaufabsicht und bisher an Elektromobilität Nicht-Interessierten) zeigt, dass zwischen den Gruppen deutliche Unterschiede in der Wahrnehmung und Bewertung von Elektrofahrzeugen bestehen.[46] Die größte Rolle für die Kaufentscheidung spielt insgesamt die Einschätzung, wie sehr ein Elektroauto zum eigenen Lebensstil und der eigenen Persönlichkeit passt. Je besser Elektroautos also mit den eigenen Gewohnheiten und täglichen Aufgaben sowie mit den eigenen Einstellungen vereinbar erscheinen, desto höher ist die Bereitschaft, ein Elektroauto zu kaufen beziehungsweise zu nutzen. Weiterhin beeinflussen wahrgenommene Kosten- und Umweltvorteile sowie Fahreigenschaften die Kaufentscheidung potenzieller Kunden. Nutzer und Personen mit konkreter Kaufabsicht beurteilen Fahreigenschaften, Betriebskosten und Umweltauswirkungen von Elektrofahrzeugen sowie ihre Vereinbarkeit mit den eigenen Einstellungen und Bedürfnissen deutlich positiver als die bisher weniger Interessierten. Von den Nutzern und Kaufinteressierten werden außerdem eine positivere Einstellung und dementsprechende Reaktionen auf den Kauf von Elektrofahrzeugen im eigenen sozialen Umfeld wahrgenommen oder erwartet. Gerade bei den weniger interessierten Gruppen zeigt aber die wahrgenommene Akzeptanz von Elektrofahrzeugen im eigenen Umfeld oder in der Gesellschaft einen signifikanten Einfluss auf die Kaufabsicht. Nicht zuletzt ist insbesondere den an Elektromobilität interessierten Konsumenten sehr wichtig, dass Elektroautos umweltfreundlich und energiesparend sind – sie müssen nicht vorrangig darauf ausgerichtet sein, mit konventionellen Autos mitzuhalten. Auch die sozialwissenschaftliche Begleitforschung zu den Nutzererfahrungen im Rahmen der acht Modellregionen des Verkehrsministeriums zeigt die Bedeutung von Umweltvorteilen für die Nutzerakzeptanz der Elektromobilität.[47]

Workshops des Fraunhofer ISI mit potenziellen Nutzern von Elektrofahrzeugen weisen darauf hin, dass diese ihre Mobilitätsbedürfnisse auch mit einem Elektrofahrzeug auf angenehme Weise und ohne übermäßige Einschränkungen oder Aufwand erfüllen wollen. Auch hier zeigt sich, dass die interessierten Konsumenten aber keine so genannten „Rennreiselimousinen" wünschen, welche alle denkbaren Mobilitätsbedürfnisse erfüllen. Entscheidend für die Akzeptanz erscheinen vielmehr attraktive Fahrzeugkonzepte und intelligente Geschäftsmodelle, welche an den tatsächlichen Bedürfnissen der Nutzer ausgerichtet sind.[48]

In Hinblick auf Maßnahmen zur Steigerung der Akzeptanz der Elektromobilität ist somit wichtig, dass eine positive Umweltbilanz und insgesamt ein gesellschaftlicher Nutzen der Elektromobilität sichergestellt und transparent kommuniziert werden. Zudem stellt eine Verbesserung der Testmöglichkeiten von Elektrofahrzeugen einen vielversprechenden Weg dar, Elektromobilität zu fördern. Entsprechende Angebote sind aus Sicht von Nicht-Nutzern nur



▲ **ABB 13** Beurteilung weiterer Aspekte von Elektroautos durch Gruppen mit unterschiedlichem Erfahrungs- und Wissensstand sowie Interesse an Elektroautos



▲ **ABB 14** Prognostizierte Bestandsentwicklung von Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen und reinen Batteriefahrzeugen in verschiedenen Studien für unterschiedliche Zukunftsszenarien

unzureichend vorhanden. Sie sind jedoch eine effektive Möglichkeit, die Passfähigkeit von Elektroautos zum eigenen Alltag zu überprüfen. Neben besseren und gezielteren Informationsmaßnahmen kann der öffentliche Sektor eine führende Rolle übernehmen und anerkannte Personen und Institutionen als prominente Vorreiter bei der Nutzung von Elektromobilität einsetzen. Zudem sollten Vorgänge, in denen sich Elektroautos von konventionellen Fahrzeugen unterscheiden, wie Ladeprozesse oder Routenplanung, so gestaltet und mit technischen Lösungen unterstützt werden, dass sie unkompliziert in der Handhabung sind und für die Nutzer leicht in den Alltag integriert werden können. Nicht zuletzt ist die weitere Kostenreduktion beziehungsweise eine Umverteilung durch intelligente Konzepte für die Verbreitung von Elektrofahrzeugen von Bedeutung. Weiterhin spielt natürlich auch die technische Weiterentwicklung der Fahrzeuge eine wichtige Rolle, um die noch vorhandenen Hemmnisse zu reduzieren.

Grundsätzlich sollten Maßnahmen vor allem auf die Konsumentengruppen abzielen, die sich bereits für Elektromobilität interessieren und einen Kauf in Erwägung ziehen. Wenn diese sich für Elektromobilität entscheiden und Elektrofahrzeuge vermehrt auf die Straßen bringen, können auch weitere Konsumentengruppen sich schrittweise von deren Alltagstauglichkeit überzeugen und die Elektromobilität anschaulich erleben. Wichtig bei allen Maßnahmen ist, dass die Wahrnehmungen in eine positive, aber realistische Richtung gelenkt und die Konsumenten bei Entscheidungen unterstützt werden, die zu ihren individuellen Anforderungen und Präferenzen passen.

MYTHOS 6

„Elektrofahrzeuge sind gefährlich, weil man sie nicht hört."

Elektrofahrzeuge haben ein geringes Motorengeräusch und sind bei geringen Geschwindigkeiten leiser als ein konventioneller PKW. Ab einer Geschwindigkeit von circa 30 km/h überwiegt jedoch das Reifenabrollgeräusch, sodass beide Fahrzeugarten gleich laut sind.[49] In Versuchen mit Sehbehinderten konnten nur bei geringen Geschwindigkeiten und im Stand Unterschiede zwischen Elektrofahrzeugen und neuen geräuscharmen herkömmlichen Autos ausgemacht werden.[50]

WIE SIEHT ES MIT DER MARKTPENETRATION UND INTERESSANTEN ERSTMÄRKTEN AUS?

Wie bereits dargelegt, werden in den kommenden Jahrzehnten reine Batteriefahrzeuge im Vergleich zu Verbrennungsfahrzeugen ähnlicher Größenklasse eine geringere Reichweite aufweisen. Eine Betrachtung der Mobilitätsprofile von PKW-Nutzern zeigt, dass die große Mehrheit der Fahrten aber auch mit reinen Batteriefahrzeugen problemlos bewältigt werden könnte (60 Prozent aller PKW-Fahrer könnten so alle Fahrten einer typischen Woche abdecken, auch wenn sie ausschließlich zu Hause an einer SchuKo-Steckdose laden). Trotz der niedrigeren Nutzungskosten (geringere Stromkosten im Vergleich zu Benzinkosten) werden aber aufgrund der höheren Anschaffungskosten auch in den kommenden Jahren hohe Fahrleistungen für einen wirtschaftlichen Einsatz von Elektrofahrzeugen erforderlich sein. Wirtschaftlich bedeutet hierbei, dass ein Elektrofahrzeug über seine gesamte Nutzungsdauer (Anschaffung und Betriebskosten) geringere Kosten als ein Verbrennungsmotor aufweist.

Im Bereich der Privatkunden sind zum Beispiel die potenziellen Erstnutzer aus ökonomischer Perspektive vor allem Vollzeitbeschäftigte aus Städten mit unter 100.000 Einwohnern, die regelmäßig 30 bis 50 Kilometer zur Arbeit pendeln. Rund vier bis acht Prozent der heutigen PKW könnten in wenigen Jahren durch reine Batteriefahrzeuge substituiert werden, sogar wenn ein fester PKW-Stellplatz oder eine Garage sowie ein Zweitwagen vorausgesetzt werden.[51]

Sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Perspektive erscheint somit die häufig geäußerte Forderung, im Individualverkehr in den Megacities PKW mit Verbrennungsmotoren durch PKW mit reinem Elektroantrieb zu ersetzen, wenig sinnvoll – zumal andere Verkehrsprobleme wie Staus oder Parkplatzprobleme damit nicht gelöst werden. Zudem ist der Aufbau einer öffentlichen Ladeinfrastruktur, wie sie in Großstädten für die sogenannten Laternenparker notwendig wäre, sehr teuer und müsste wahrscheinlich mit erheblichen öffentlichen Mitteln subventioniert werden – eine Forderung, die im zweiten Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität gestellt wird.[52] Sinnvoll als Ersatz für den individuellen PKW-Verkehr in Großstädten erscheinen hingegen neue Fahrzeugtypen wie elektromobile Kleinstfahrzeuge und Pedelecs sowie neue Mobilitätskonzepte, welche Elektrofahrzeuge in Carsharing-Flotten bzw. den öffentlichen Verkehr integrieren und so eine hohe Auslastung erreichen.[53]

Die Einbindung reiner Elektrofahrzeuge in Flotten hat zudem den Vorteil, dass alternative Fahrzeuge für weitere Strecken vorgehalten werden können. Untersuchungen im Bereich des Carsharings ergeben ein technisches und wirtschaftliches Potenzial von circa zehn Prozent der Fahrzeuge in größeren Städten. Ohne Subventionen könnten hier in den kommenden Jahren etwa die Hälfte (fünf Prozent) realisiert werden. Bei Einbezug großer Firmen- und Serviceflotten lässt sich jedoch ein wesentlich höheres Potenzial vermuten. Auch im Bereich von Kurier-, Express- und Paketdiensten (KEP-Dienste) weisen Fallstudien und kommerzielle Feldversuche auf ein bereits jetzt wirtschaftlich realisierbares Potenzial für Elektro-Lieferwagen im städtischen Bereich hin. Ausschlaggebend sind die Regelmäßigkeit der Touren bei einer tendenziell hohen

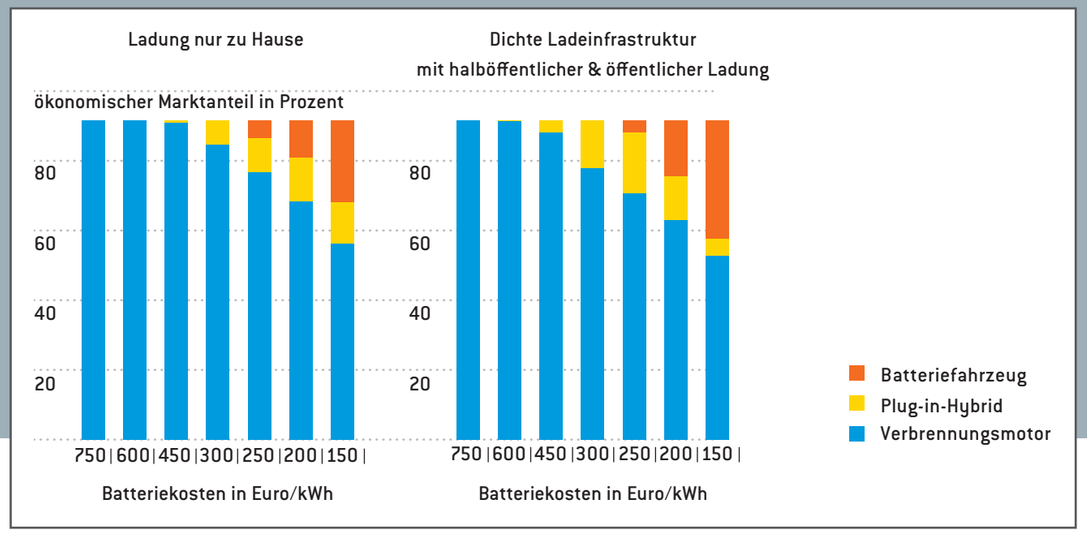


ABB 15 Ökonomische Marktanteile von Elektrofahrzeugen bei verschiedenen Batteriepreisen und aktuellen Treibstoff- und Strompreisen (von 1,40 Euro/Liter und 0,20 Euro/kWh)[55]

jährlichen Fahrleistung, geringe Gewichts- und Platzrestriktionen, sowie häufige Start-Stopp-Vorgänge. Auch hier zeigen sich kleine Fahrzeuge, welche den überwiegenden Teil des städtischen Wirtschaftsverkehrs prägen, als früher wirtschaftlich einsetzbar. Gerade der innerstädtische Lieferverkehr trägt zudem zu einer hohen Umweltbelastung bei, welche durch Elektrofahrzeuge bedeutend gemindert werden könnte. Insgesamt erscheinen jedoch auch hier unterstützende Rahmenbedingungen wie erweiterte Lieferzeitfenster, die Freigabe von Busspuren oder die Verfügbarkeit zusätzlicher Parkplätze für Elektro-Lieferfahrzeuge entscheidend für die breite Aufnahme von Elektrofahrzeugen durch Unternehmen.

Bei Plug-in-Hybriden stellt sich die Situation etwas anders dar. Durch die kleineren Batterien ist die Differenz zu konventionellen Fahrzeugen im Anschaffungspreis nicht so groß wie bei reinen Batteriefahrzeugen, die Vorteile des elektrischen Antriebs sind jedoch ebenso vorhanden. Viele der heutigen PKW-Nutzer könnten mit halb so großen Batterien, wie sie üblicherweise heute in reinen Batteriefahrzeugen verwendet bzw. angekündigt werden, über 80 Prozent aller gefahrenen Kilometer rein elektrisch zurücklegen.[54] Die reduzierte Batteriegröße hat zudem den Vorteil, dass die ökologische Belastung durch die Fahrzeugproduktion und der Rohstoffbedarf geringer sind. Dementsprechend erscheinen für Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge viele Einsatzbereiche sinnvoll, sowohl für private Vielfahrer als auch für Firmenflotten, denn je nach Anschaffungspreis, Jahresfahrleistung und Stadtfahranteil, können sich diese Fahrzeuge in wenigen Jahren amortisieren und eine positive Umweltbilanz erreichen.

Zur Abschätzung der langfristigen Entwicklung des gesamten Elektromobilitätsmarktes in Deutschland wurde bereits eine Reihe von Szenarien von verschiedener Seite entwickelt (siehe auch ABB 14). Die Vorhersagen des Marktanteils von Elektrofahrzeugen der verschiedenen Szenarien weichen dabei stark voneinander ab. Während anfangs die Prognosen zur Verbreitung der Elektromobilität in den nächsten 10 bis 20 Jahren sehr optimistisch waren, sind die Schätzungen heute vorsichtiger. Aus heutiger Sicht erscheint das Ziel der Bundesregierung von einer Million Elektrofahrzeugen im Jahre 2020 (und sechs Millionen für 2030) erreichbar, aber durchaus ambitioniert.

MYTHOS 7

„Elektrofahrzeuge sollen zuerst in Großstädten gefahren werden."

Reine Batteriefahrzeuge sind teuer in der Anschaffung, aber günstig im Verbrauch. Großstadtbewohner fahren mit (durchschnittlich) circa 9.000 Kilometern pro Jahr zu wenig, als dass sich die hohen Anschaffungskosten rechnen würden.[56] Weiterhin sind Elektrofahrzeuge in der Produktion energieintensiver und führen zu höheren Emissionen. Das heißt, dass aus ökonomischen und ökologischen Gründen Elektrofahrzeuge für Großstädte im Individualverkehr wenig geeignet sind. Für Pendler hingegen, die im Großraum einer Stadt wohnen, kann sich der Kauf eines Elektrofahrzeuges aufgrund der erhöhten Fahrleistung lohnen.[57] Auch für Sharing-Konzepte bieten sich in Großstädten neue Ansätze.

WAS SIND ZUKÜNFTIGE MOBILITÄTSKONZEPTE?

Durch die bevorstehende Verknappung fossiler Ressourcen bei gleichzeitigem Wachstum der Weltnachfrage ist die Umstellung der Antriebstechnik im Verkehr kaum vermeidbar. Während Ersatzlösungen wie Biokraftstoff vermutlich vornehmlich für den Fernverkehr benötigt werden, weil ihr die Energiedichte von E-Fahrzeugen nicht ausreichend ist, scheint die Elektrifizierung des Individualverkehrs sinnvoll und notwendig. Die Restriktionen bezüglich Reichweite und Ladezeiten bei reinen Batteriefahrzeugen müssen jedoch nicht in jedem Fall zu nennenswerten Einschränkungen in der Mobilität von Menschen und Gütern führen. Der internationale Erfolg von Carsharing- und Bikesharing-Systemen zeigt, dass die Integration der Verkehrssysteme und der Übergang zu neuen Konzepten sehr wohl möglich sind und bereits stattfinden.

Die kürzeren Reichweiten und längeren Ladezeiten von Elektrofahrzeugen sind zwar nicht für alle Fahrtwünsche geeignet, durch die Integration in gemischte Flotten lässt sich dieser Nachteil jedoch ausgleichen. Das Potenzial von zehn Prozent Elektrofahrzeugen in Carsharing-Angeboten sowie die Integration in Firmenflotten bieten sowohl Nutzern und Fahrzeugherstellern als auch potenziellen Käufern von Elektrofahrzeugen interessante Testmärkte. Insgesamt könnte sich hierdurch ein Trend weg vom eigenen PKW hin zu kollektiven Systemen etablieren; erste Anzeichen zeigen sich bereits in entsprechenden Mobilitätserhebungen.[58] Ferner zeigen Erhebungen des Mobilitätsverhaltens in Deutschland deutlich, dass Carsharing-Nutzer, bedingt durch die gelegentliche Notwendigkeit spontaner und längerer Fahrten, überdurchschnittlich häufig den öffentlichen Verkehr (ÖV) nutzen. Obwohl bis dato nur sehr vereinzelt Kooperationen zwischen beiden Systemen existieren, kann die Elektrifizierung des Individualverkehrs zu einer Durchmischung von PKW-Besitzern, Carsharing-Nutzern und ÖV-Kunden beitragen.

Infolge der Etablierung kooperativer Verkehrslösungen profitieren sowohl die Mobilitätsdienstleister als auch die Kommunen durch weniger Parkraumbedarf. Aufgrund des Trends hin zu kleineren Fahrzeugen wie Pedelecs oder Elektrorollern, aber auch Kleinst-PKW, kann zudem Stau vermieden oder im Idealfall können sogar Verkehrsflächen zu anderweitigen Nutzungen freigegeben werden. Hiermit und durch deren geringere Lärm- und Schadstoffemissionen, kann die Elektromobilität einen gewichtigen Beitrag zur Steigerung der Lebensqualität in unseren Städten leisten. Im Zuge des demografischen Wandels und der Alterung unserer Gesellschaft bieten Pedelecs oder ähnliche Kleinfahrzeuge zudem mehr und längere Mobilität für ältere Menschen. Im Gegenzug muss jedoch auch auf einen möglichen Rückgang der körperlichen Aktivität heutiger Radfahrer hingewiesen werden. Für konkrete Aussagen fehlt jedoch bisher eine verlässliche statistische Grundlage.

WAS LÄSST SICH SCHLUSSFOLGERN?

Plug-in-Hybride und reine Batteriefahrzeuge weisen ein relevantes Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz, zur Reduktion der Treibhausgasemissionen sowie lokaler Emissionen wie Schadstoffe und Lärm auf. Entscheidend für die gesamte Umweltbilanz ist jedoch die Art der Stromherstellung. Weiterhin zeigen Elektrofahrzeuge erst bei höheren Fahrleistungen eine positive Umweltbilanz, da sie energieintensiver in der Herstellung sind. Hohe Fahrleistungen sind gleichfalls eine Voraussetzung für einen ökonomischen Betrieb der Elektrofahrzeuge, da sie noch auf längere Zeit teurer in der Anschaffung sein werden und sich erst bei häufiger Nutzung durch die geringeren Betriebskosten rechnen.

Für relevante Marktanteile über die für 2020 angestrebte Anzahl von einer Million Elektrofahrzeuge müssen jedoch noch eine Reihe von Herausforderungen auf technologischer Seite gelöst werden, insbesondere bei der Batterieentwicklung. Zudem sind förderliche Rahmenbedingungen und intelligente Mobilitätskonzepte für eine ökologische, wirtschaftliche und nutzerfreundliche Mobilität zu schaffen. Der kurzfristig mögliche Markterfolg sollte realistisch eingeschätzt werden. Der Einsatz und die Verbreitung von Elektrofahrzeugen in gewissen Marktfeldern wie in Firmenflotten, im innerstädtischen Lieferverkehr sowie in aufgeschlossenen Privatkundensegmenten, welche eine hinreichende Fahrleistung aufweisen, erscheint realistisch, aber nicht selbstverständlich. Sinnvoll für den Einsatz in Megacities sind neue Fahrzeugtypen wie elektromobile Kleinstfahrzeuge und Pedelecs sowie neue Mobilitätskonzepte, welche Elektrofahrzeuge in Carsharing-Flotten oder den öffentlichen Verkehr integrieren.

Da reine Batteriefahrzeuge aufgrund der technologischen Grenzen bei den Batterien in den nächsten 10 bis 15 Jahren nur begrenzt konventionelle Fahrzeuge ersetzen können, erscheinen Plug-in-Hybride vielversprechend. Sie bieten die heute gewohnten Reichweiten und Betankungs- oder Ladezeiten. Durch die kleinere Batterie bieten sich ökonomische und ökologische Vorteile und sie können große Fahranteile rein elektrisch abdecken. Sie stellen jedoch bei der Antriebstechnologie die komplexeste Art der Elektromobilität dar. Eine Weiterentwicklung bestehender Konzepte ist noch erforderlich. Allerdings bieten sich hier auch wesentliche Chancen für die deutsche Industrie aufgrund der vorhandenen Kompetenzen. Diese stehen derzeit in Konkurrenz zu Brennstoffzellenfahrzeugen, die ebenfalls weitgehend die heute bekannten Mobilitätsmuster von PKWs bedienen können.

Für die weitere Förderung der Akzeptanz erscheinen verbesserte Informationen und Testmöglichkeiten sowie intelligente Konzepte wichtig, welche auch mit Elektrofahrzeugen eine angenehme und flexible Mobilität sicherstellen und Kosten und Risiken reduzieren oder umverteilen. Konsumenten wollen flexibel und umweltfreundlich „elektromobil" sein. Dementsprechend müssen für die Akzeptanz der Nutzer auch eine positive Umweltbilanz und insgesamt ein gesellschaftlicher Nutzen der Elektromobilität sichergestellt und transparent kommuniziert werden. Verdichten oder verfestigen sich hingegen entsprechende Zweifel, so dürfte dies sehr kritisch für die Marktausbreitung sein.

MYTHOS 8

„Das Batteriefahrzeug ist das Universalfahrzeug der Zukunft."

Aufgrund seiner beschränkten Reichweite und der nicht vernachlässigbaren Ladedauer können mit einem reinen Batteriefahrzeug nicht alle Fahrten durchgeführt werden.[59] Eine Alternative zur Erhöhung der Reichweite bei dennoch hohem elektrischem Fahranteil (circa 80 Prozent) und schnellem Tanken bieten Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge.[60] Auch Wasserstoff erlaubt es, auf engem Raum mehr Energie zu speichern als eine Batterie. Mit Brennstoffzellen kann dieser in Strom umgewandelt werden und damit auch ein Fahrzeug antreiben. Da sich damit auch größere Strecken zurücklegen lassen, stehen Wasserstofffahrzeuge in Konkurrenz zu batterieelektrischen Fahrzeugen. Welche Anteile verschiedene Antriebstechnologien am Verkehr der Zukunft haben werden, ist noch nicht vorhersagbar. Mehrere parallel genutzte Kraftstoff- und Fahrzeugkonzepte sind je nach Kundenanforderung jedoch wahrscheinlich.[61]

ABKÜRZUNGEN UND BEGRIFFE

Abkürzungen

BEV	Batteriefahrzeug (battery electric vehicle)
CV	Konventionelles Fahrzeug (conventional vehicle)
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug (fuel cell electric vehicle)
GWh	Gigawattstunde (1 GWh = 1 Million kWh)
kWh	Kilowattstunde
NPE	Nationale Plattform Elektromobilität
PHEV	Plug-in-Hybrid-Fahrzeug (plug-in hybrid electric vehicle)
TWh	Terawattstunde (1 TWh = 1 Milliarde kWh)
Wh	Wattstunden

Begriffe

Begriffserläuterungen in Anlehnung an Wikipedia, August 2011

Bidirektionaler Anschluss
Im Vergleich zum unidirektionalen Anschluss ermöglicht die bidirektionale Variante eine Informations- und Stromübertragung in beide Richtungen – ein bidirektional angeschlossenes Fahrzeug kann also auch Energie von seiner Batterie in das Stromnetz zurückspeisen.

Carnot-Wirkungsgrad
Der Carnot-Wirkungsgrad beschreibt den theoretisch maximal möglichen Wirkungsgrad bei der Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Energie.

CO_2-Äquivalent
Das Treibhauspotenzial (engl.: Global Warming Potential, Greenhouse Warming Potential oder GWP) oder CO_2-Äquivalent gibt an, wie viel eine festgelegte Menge eines Treibhausgases zum Treibhauseffekt beiträgt.

Externe Kosten
Negative externe Effekte werden auch als externe oder soziale Kosten, positive als externer Nutzen oder sozialer Ertrag bezeichnet. Extern heißt dabei, dass die Effekte (Nebenwirkungen) eines Verhaltens nicht (ausreichend) im Markt berücksichtigt werden.

Hybridantrieb
Der Hybridantrieb bezeichnet die Kombination verschiedener Techniken für den Fahrzeugantrieb. Im Falle eines Hybridfahrzeugs werden dabei zumeist ein Verbrennungs- in Kombination mit einem Elektromotor oder einer Brennstoffzelle verstanden.

Mikrohybrid
Grundsätzlich kennzeichnet ein Hybridfahrzeug das Vorhandensein zweier unterschiedlicher Antriebsquellen, was beim sogenannten Mikrohybrid nicht der Fall ist. Mikrohybridfahrzeuge verfügen über eine Start-Stopp-Automatik und Bremsenergierückgewinnung zum Laden des kleinen Starterakkus. Die Elektro-Maschine wird aber nicht zum Antrieb des Fahrzeugs genutzt. Vorteil ist, wie bei allen Hybridautomobilen, eine Kraftstoffeinsparung.

Mildhybrid
Der Elektroantrieb unterstützt den Verbrennungsmotor zur Leistungssteigerung („boosten"). Die Bremsenergie kann in einer Nutzbremse teilweise wiedergewonnen werden. Parallel arbeitende Hybridantriebe werden oft als Mildhybrid ausgeführt.

Paralleler Hybrid
Ein paralleler Hybrid besitzt im Vergleich zum seriellen Hybrid zwei Traktionsmotoren, die beide zum Antrieb eines Fahrzeugs verwendet werden können.

Plug-in-Hybrid-Fahrzeug (PHEV)
Ein PKW mit Hybridantrieb, dessen Batterie zusätzlich über das Stromnetz extern geladen werden kann.

Serieller Hybrid
Bei einem seriellen Hybrid ist im Vergleich zum parallelen nur ein Traktionsmotor vorhanden, der zweite Motor ist vorgelagert und dient nicht dem direkten Antrieb des Fahrzeugs. Ein Beispiel hierfür ist ein Fahrzeug mit Range-Extender, das einen Elektromotor zum Antrieb des Fahrzeugs verwendet, dessen Batterie mit einem zusätzlichen Verbrennungsmotor aufgeladen werden kann.

Smart Grid
Der Begriff intelligentes Stromnetz (engl. Smart Grid) umfasst die kommunikative Vernetzung und Steuerung von Stromerzeugern, Speichern, elektrischer Verbraucher und Netzbetriebsmitteln in Energieübertragungs- und -verteilungsnetzen der Elektrizitätsversorgung.

Vollhybrid
Vollhybridfahrzeuge sind mit ihrer elektromotorischen Leistung von mehr als 20 kW/t in der Lage, auch rein elektromotorisch zu fahren (einschließlich Anfahren und Beschleunigen) und stellen daher die Grundlage für einen Seriell-Hybrid dar.

Volllast/Teillast

Volllast ist ein Betriebszustand einer Antriebsmaschine, bei der sie bei gegebener Drehzahl das maximal mögliche Drehmoment bereitstellt. Wird sie über ein Drehzahlband bei Volllast betrieben, so fährt sie auf der Volllastkurve. Erbringt sie durch Drosselung der Energiezufuhr ein geringeres Drehmoment, so spricht man von Teillast.

LITERATURQUELLEN

1 – Vgl. Bundesregierung, „Regierungsprogramm Elektromobilität" (Berlin: BMWi, BMVBS, BMW, BMBF, 2011).

2 – Vgl. Biere, D., Dallinger, D. und Wietschel, M., „Ökonomische Analyse der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen", Zeitschrift für Energiewirtschaft 33, Nr. 2 (2009): S. 176.; MOP, „Mobilitätspanel Deutschland", 1994–2008. (Projektbearbeitung durch das Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe (TH). Verteilt durch die Clearingstelle Verkehr des DLR-Instituts für Verkehrsforschung: www.clearingstelle-verkehr.de, 2008).

3 – Vgl. International Energy Agency (IEA), „Energy Technology Perspectives 2010" (Paris, 2010); Kahn Ribeiro, S. et al., „Transport and its infrastructure", Climate Change 2007: Mitigation (Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], 2007).

4 – Vgl. World Health Organizaion (WHO), „Burden of disease from environmental noise – Quantification of healthy life years lost in Europe" (Bonn: WHO European Centre for Environment and Health, 2011).

5 – Vgl. European Comission (EC), „Critical raw materials for the EU, Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials", 2010.

6 – Vgl. Angerer, G. et al., „Lithium für Zukunftstechnologien – Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität" (Karlsruhe: Fraunhofer ISI, 2009); Angerer, G. et al., „Kupfer für Zukunftstechnologien – Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität" (Karlsruhe: Fraunhofer ISI, 2010).

7 – Quelle: Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), „Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität" (Berlin: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung, Mai 2011), S. 19.

8 – Vgl. Tübke, J., „Batterie-Technologien für E-Mobile: Stand heute und Zukunftsperspektiven", Mobility 2.0, Juli 2011 (2011): S. 42.

9 – Siehe Kley, F., „Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge" (Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011), S. 68.

10 – Vgl. Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), „Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität" (Berlin: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung, Mai 2011).

11 – Quelle: Kley, F., „Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge" (Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011), S. 8.

12 – Siehe auch Doll, C., „Zukunftsmarkt Hybride Antriebstechnik", Fallstudie im Rahmen des Forschungsprojektes Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern (Berlin: BMU/UBA, 2007), http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3453.pdf.

13 – Vgl. zu Wasserstoff und Infrastrukturaufbau sowie Vergleich Wasserstoff- und Batteriefahrzeuge: Ball, M. und Wietschel, M., „The Hydrogen Economy: Opportunities and Challenges", 1. Auflage (Cambridge University Press, 2009); Wietschel, M. und Bünger, U., „Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO_2-freie Endenergieträger – Studie im Auftrag der RWE", Endbericht (Karlsruhe: Fraunhofer ISI, Mai 2010); und auch Wietschel, M. et al., „Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?", GermanHy, Studie im Auftrag des BMVBS (Berlin: BMVBS: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, August 2009).

14 – Quelle: Kley, F., „Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge" (Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011), S. 13.

15 – Siehe auch Schraven, S., Kley, F., und Wietschel, M., „Induktives Laden von Elektromobilen – Eine techno-ökonomische Bewertung", Zeitschrift für Energiewirtschaft (2011): S. 1–11.

16 – Vgl. Better Place, „Battery switch station"(2009), http://www.betterplace.com/the-solution-switch-stations.

17 – Vgl. Wietschel, M., Kley, F., und Dallinger, D., „Eine Bewertung der Ladeinfrastruktur", ZfAW Zeitschrift für die Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft 3 (2009): S. 33–41, aber auch Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), „Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität"(2010), S. 21, http://www.elektromobilitaet.din.de/-sixcms_upload/media/3310/Normung-Roadmap_Elektromobilität.pdf; und Becker, T. A., „Electric Vehicles in the United States – A New Model with Forecasts to 2030"(2009).

18 – Vgl. Biere, D., Dallinger, D., und Wietschel, M., „Ökonomische Analyse der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen", Zeitschrift für Energiewirtschaft 33, Nr. 2 (2009): S. 177.

19 – Eigene Auswertung mit Daten aus MOP, „Mobilitätspanel Deutschland", 1994–2008 (Projektbearbeitung durch das Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe (TH), verteilt durch die Clearingstelle Verkehr des DLR-Instituts für Verkehrsforschung: www.clearingstelle-verkehr.de, 2008): Hierin beträgt die mittlere Fahrzeit pro PKW und Tag 63 Minuten.

20 – Siehe Kley, F., „Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge" (Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011), S. 68.

21 – Vgl. Bundesregierung, „Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung" (Berlin, August 2009) für den im Rahmen des „Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität" in Deutschland geforderten Ausbau der Beladeinfrastruktur.

22 – Der gesamte Abschnitt basiert wesentlich auf Kley, F., „Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge" (Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011), S. 68.

23 – Vgl. Biere, D., Dallinger, D. und Wietschel, M., „Ökonomische Analyse der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen", Zeitschrift für Energiewirtschaft 33, Nr. 2 (2009): S. 180.

24 – Vgl. Biere, D., Dallinger, D. und Wietschel, M., „Ökonomische Analyse der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen", Zeitschrift für Energiewirtschaft 33, Nr. 2 (2009): S. 177.

25 – Vgl. Kley, F., „Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge" (Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011), S. 131. Je nach Gemeindegröße kann dieser Anteil auch variieren und liegt zwischen ein und zehn Prozent. Siehe Biere, D., Dallinger, D. und Wietschel, M., „Ökonomische Analyse der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen", Zeitschrift für Energiewirtschaft 33, Nr. 2 (2009): S. 177.

26 – Vgl. Schwedes, O. und Kolloschke, I. , „Elektromobilität als technologischer Treiber der Stadtentwicklung"(2011), S. 7–8.

27 – Siehe Bundesregierung, „Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung" (Berlin, August 2009).

28 – Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), „Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland" (Berlin, März 2011).

29 – Vgl. Bundesministerium der Justiz (BMJ), „Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) – Konsolidierte (unverbindliche) Fassung des Gesetzestextes in der ab 1. Januar 2012 geltenden Fassung" (2009).

30 – Vgl. Bundesregierung, „REGIERUNGonline – Sicher, bezahlbar und umweltfreundlich ins Zeitalter der erneuerbaren Energien"(2011), http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2011/06/2011-06-06-energiewende-kabinettsbeschluss-doorpage-energiekonzept.html.

31 – Vergleiche für zugrunde liegende Zahlen und Annahmen: Wietschel, M. und Bünger, U., „Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO_2-freie Endenergieträger – Studie im Auftrag der RWE", Endbericht (Karlsruhe: Fraunhofer ISI, Mai 2010).

32 – Vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), „Verkehr in Zahlen 2010/2011" (Deutscher Verkehrs-Verlag, 2011), S. 153.

33 – Vgl. Helms, H. und Hanusch, J., „Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen" (Heidelberg: ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, März 2010), S. 12–13.

34 – 513 TWh im Jahr 2010, vgl. AG Energiebilanzen, „Energieverbrauch für Deutschland"(2011), Tabelle 7.1.

35 – Zurzeit circa 155 GW, vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), „Stromerzeugungskapazitäten, Bruttostromerzeugung und Bruttostromverbrauch" (Februar 2011), Tabelle 1.

36 – 500 TWh/a sind im Mittel 0,95 GWh pro Minute. Siehe auch Dallinger, D. und Wietschel, M., „Integration of intermittent renewable energy generation using price-responsive plug-in electric vehicles", Working Paper, Sustainability and Innovation (2011); sowie Lund, H. und Kempton, W., „Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G", Energy Policy, Volume 36, Issue 9 (September 2008): S. 3578–3587.

37 – Vgl. Kley, F., „Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge" (Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011), S. 68 und 123.; Peters, A. und Dütschke, E., „Zur Nutzerakzeptanz von Elektromobilität – Analyse aus Expertensicht", Working Paper, Sustainability and Innovation (2010), S. 25 und 26.

38 – Doll, C., Gutmann, M. und Wietschel, M., „Integration von Elektrofahrzeugen in Carsharing-Flotten – Simulation anhand realer Fahrprofile", Arbeitspapier im Rahmen der Fraunhofer-Systemforschung Elektromobilität (Karlsruhe: Fraunhofer ISI, 2011).

39 – Vgl. Kley, F., Lerch, C. und Dallinger, D., „New business models for electric cars – a holistic approach", Energy policy 39, Nr. 6 (2011): S. 3392–3403.; Mattes, K. et al., „Anwendungsfelder mobiler Energiespeicher – Eine Bestandsaufnahme und Perspektiven für die Konzeption aussichtsreicher Geschäftsmodelle für Elektrofahrzeuge", Working Paper, Sustainability and Innovation (2011).

40 – Vgl. Kley, F., Lerch, C. und Dallinger, D., „New business models for electric cars – a holistic approach", Energy Policy, Volume 39, Issue 6 (2011): S. 3392–3403.

41 – Vgl. Mattes, K. et al., „Anwendungsfelder mobiler Energiespeicher – Eine Bestandsaufnahme und Perspektiven für die Konzeption aussichtsreicher Geschäftsmodelle für Elektrofahrzeuge", Working Paper, Sustainability and Innovation (2011).

42 – Vgl. Dallinger, D., Krampe, D. und Wietschel, M., „Vehicle-to-grid regulation based on a dynamic simulation of mobility behavior", IEEE transactions on smart grid 2, Nr. 2 (2011): S. 302–313; Mattes, K. et al., „Anwendungsfelder mobiler Energiespeicher – Eine Bestandsaufnahme und Perspektiven für die Konzeption aussichtsreicher Geschäftsmodelle für Elektrofahrzeuge", Working Paper, Sustainability and Innovation (2011).

43 – Vgl. Technomar GmbH und TÜV SÜD, „Kurz- und mittelfristige Erschliessung des Marktes für Elektroautomobile, Deutschland – EU, Ergebnisse der Gemeinschaftsuntersuchung" (München, Oktober 2009).

44 – Vgl. Cheng, L. et al., „Elektromobilität. Herausforderungen für Industrie und öffentliche Hand" (Stuttgart: Fraunhofer IAO, 2010).

45 – Vgl. auch ADAC, „ADAC-Umfrage Kaufbereitschaft Elektroautos" (Landsberg a. Lech: ADAC Test und Technik, Technik Zentrum, Oktober 2009).

46 – Vgl. Peters, A. et al., „Elektroautos in der Wahrnehmung der Konsumenten – Zusammenfassung der Ergebnisse einer Befragung in Deutschland" (Karlsruhe: Fraunhofer ISI, Juni 2011).

47 – Vgl. Dütschke, E., Peters, A. und Hoffmann, J., „Was erwarten künftige Nutzer von elektrischen Fahrzeugen?", erste Zwischenanalyse der Nutzerbefragung aus den Modellregionen des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (in Vorbereitung) (Karlsruhe und Berlin, 2011).

48 – Vgl. Peters, A. und Hoffmann, J., „Nutzerakzeptanz von Elektromobilität: Eine empirische Studie zu attraktiven Nutzungsvarianten, Fahrzeugkonzepten und Geschäftsmodellen aus Sicht potenzieller Nutzer“ (Karlsruhe: Fraunhofer ISI, 2011).

49 – Vgl. Dudenhöffer, K. und Hause, L., „Hörbare Vehikel – Experimente zur Geräuschwahrnehmung von Elektroautos durch Handicap-Gruppen“, Unikate (2011), S. 54–55.

50 – Vgl. Dudenhöffer, K. und Hause, L., „Hörbare Vehikel – Experimente zur Geräuschwahrnehmung von Elektroautos durch Handicap-Gruppen“, Unikate (2011), S. 58–59.

51 – Vgl. Biere, D., Dallinger, D. und Wietschel, M., „Ökonomische Analyse der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen“, Zeitschrift für Energiewirtschaft 33, Nr. 2 (2009): S. 176.

52 – Vgl. Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), „Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität“ (Berlin: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung, Mai 2011).

53 – In der vom Fraunhofer ISI entwickelten Mobilitätsvision VIVER wird ein alternatives Mobilitätskonzept der Zukunft entwickelt. Vgl. Schade, W. et al., „VIVER – Vision für nachhaltigen Verkehr in Deutschland“ (Karlsruhe: Fraunhofer ISI, 2011).

54 – Vgl. Kley, F., „Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge“ (Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011), S. 133.

55 – Details in Kley, F., „Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge“ (Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011), S. 133.

56 – Vgl. Kley, F., „Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge“ (Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011), S. 131.

57 – Vgl. Biere, D., Dallinger, D. und Wietschel, M., „Ökonomische Analyse der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen“, Zeitschrift für Energiewirtschaft 33, Nr. 2 (2009): S. 180.

58 – Vgl. Bratzel, S., „Jugend und Automobil 2010 – Eine empirische Studie zu Einstellungen und Verhaltensmustern von 18 bis 25-Jährigen in Deutschland“ (Bergisch Gladbach: Center of Automotive Management, März 2010).

59 – Vgl. Kley, F., „Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge“ (Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011), S. 123.

60 – Vgl. Kley, F., „Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge“ (Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011), S. 133.

61 – Vgl. Schade, W. et al., „VIVER – Vision für nachhaltigen Verkehr in Deutschland“(Karlsruhe: Fraunhofer ISI, 2011).

IMPRESSUM

Herausgeber
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
info@isi.fraunhofer.de
www.isi.fraunhofer.de

Projektbetreuung und Kontakt
Prof. Dr. Martin Wietschel
Telefon +49 721 6809-254
Fax +49 721 6809-272
martin.wietschel@isi.fraunhofer.de

Förderung
Bundesministerium für Bildung und Forschung
Teil des Projektes „Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität (FSEM)“
http://www.fraunhofer.de/forschungsthemen/energie/elektromobilitaet/systemforschung-elektromobilitaet.jsp
Förderkennzeichen 13N10599

Autoren
David Dallinger
Dr. Claus Doll
Till Gnann
Dr. Michael Held
Fabian Kley
Christian Lerch
Dr. Frank Marscheider-Weidemann
Katharina Mattes
Dr. Anja Peters
Dr. Patrick Plötz
Dr. Marcus Schröter
Prof. Dr. Martin Wietschel

Layout und Illustrationen
Sabine Wurst
Mitarbeit: Lisa Theophil

Druck
E&B engelhardt und bauer, Karlsruhe

Stand
Oktober 2011
1. Auflage 2.500 Stück

Bestellung
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Bibliothek
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
Telefon +49 721 6809-218
bibl@isi.fraunhofer.de

© Fraunhofer-Institut für
System- und Innovationsforschung ISI, 2011