

## Bericht

### des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung

#### Technikfolgenabschätzung (TA)

#### Konzepte der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt

#### Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>Vorwort des Ausschusses</b> .....	4
<b>Zusammenfassung</b> .....	5
<b>I. Einleitung</b> .....	10
<b>II. Grundlagen und Referenzrahmen</b> .....	12
1. Technologien und Anwendungen .....	12
1.1 Energiespeicher .....	14
1.2 Leistungselektronik .....	21
1.3 Elektromotoren .....	21
1.4 Ladeinfrastruktur .....	23
1.5 Energiebereitstellung und Infrastrukturaufbau für FCEV .....	29
2. Marktpenetrationsszenarien .....	31
2.1 Heutiger Fahrzeugmarkt in Deutschland .....	31
2.2 Aktuelle Marktpenetrationsszenarien .....	31
2.3 Marktpenetration nach der NPE .....	38
2.4 Einflussfaktoren auf die Marktpenetration .....	39
2.5 Elektrische Zweiräder .....	39
2.6 Marktpenetrationsszenarien Brennstoffzellenfahrzeuge .....	40
2.7 Festlegung des deutschlandweiten Markthochlaufszenarios .....	41
3. Verkehrskonzepte .....	43
3.1 Überblick über Konzepte und Nachfrage .....	43
3.2 Elektrofahrzeuge im Carsharing .....	44

	Seite
3.3 Elektromobilität und ÖPNV .....	48
3.4 Elektrische Zweiräder .....	50
3.5 Elektromobilität im Wirtschaftsverkehr .....	51
3.6 Rolle der Kommunen .....	51
4. Energieszenarien .....	52
5. Internationale Technologieaktivitäten und Politikmaßnahmen .....	54
5.1 Technologieaktivitäten im Ländervergleich .....	54
5.2 Politikmaßnahmen im Ländervergleich .....	58
5.3 CO <sub>2</sub> -Grenzwerte für Pkw in der EU .....	65
<b>III. Bewertung</b> .....	<b>72</b>
1. Bewertung ökologischer Aspekte .....	72
1.1 Einleitung .....	72
1.2 Luftschadstoffe .....	75
1.3 Treibhauseffekt .....	79
1.4 Energieverbrauch .....	89
1.5 Externe Kosten .....	93
2. Bewertung ökonomischer Aspekte .....	96
2.1 Wirtschaftlichkeit für die Nutzer .....	96
2.2 Automobile Wertschöpfung .....	102
2.3 Strategische Positionierung der Automobilhersteller .....	108
2.4 Gesamtwirtschaftliche Effekte .....	109
2.5 Kritische Rohstoffe .....	115
3. Bewertung sozialer Aspekte .....	119
3.1 Akzeptanz .....	120
3.2 Nutzerverhalten .....	125
3.3 Verkehrslärm und Unfallgeschehen .....	127
<b>IV. Synthese</b> .....	<b>131</b>
1. Kritische Aspekte und Potenziale der Elektromobilität .....	131
1.1 Technologische Herausforderungen und Fahrzeugkonzepte .....	132
1.2 Volkswirtschaftliche Potenziale .....	133
1.3 Ökologische Auswirkungen .....	134
1.4 Lärmreduktion und Sicherheit .....	137
1.5 Kritische Rohstoffe .....	138
1.6 Erstmärkte und Zielgruppen .....	138
2. Förderung der Elektromobilität .....	139
2.1 Aktuelle Technologieaktivitäten und Fördermaßnahmen .....	140
2.2 Förderung von Forschung und Entwicklung .....	141
2.3 Monetäre Anreize .....	141
2.4 Nichtmonetäre Anreize .....	143
2.5 Ausbau einer Ladeinfrastruktur .....	144

---

	Seite
2.6 Neue Mobilitätskonzepte .....	145
3. Schlussfolgerungen und Handlungsoptionen .....	145
<b>Literatur</b> .....	148
1. In Auftrag gegebenes Gutachten .....	148
2. Weitere Literatur .....	148
<b>Anhang</b> .....	159
1. Tabellenverzeichnis .....	159
2. Abbildungsverzeichnis .....	160
3. Abkürzungen .....	164
<b>Glossar</b> .....	165

## Vorwort des Ausschusses

Mit der Elektromobilität werden viele Hoffnungen hinsichtlich einer nachhaltigen Entwicklung im Verkehrsbereich verbunden. Eine Reduktion des Verbrauchs fossiler Energieträger im Kontext klimapolitischer Ziele wie auch die Senkung lokaler Schadstoff- und Lärmemissionen treiben die Entwicklung und Verbreitung der Elektromobilität weltweit voran. Für die deutsche Wirtschaft ist es hierbei von großer Bedeutung, die Wettbewerbsfähigkeit der Automobilindustrie zu erhalten und somit Arbeitsplätze und Wirtschaftsleistung auch zukünftig zu sichern. Die Elektromobilität wurde dementsprechend im Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität (NEP) zu einem wesentlichen Element einer zukunftsfähigen Mobilität erklärt. Bis 2020 wird ein Bestand von 1 Million Elektrofahrzeugen in Deutschland angestrebt.

Vor diesem Hintergrund hat der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) beauftragt, die Auswirkungen einer Verbreitung der Elektromobilität in den nächsten ein bis zwei Dekaden in einer ganzheitlichen Betrachtung zu untersuchen, um auf dieser Basis mögliche Handlungserfordernisse und -optionen zu eruieren, die den verschiedenen Zielsetzungen einer nachhaltigen Verbreitung der Elektromobilität gerecht werden können. Der vorliegende Bericht zu „Konzepten der Elektromobilität und deren Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt“ analysiert dementsprechend die ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekte der Elektromobilität für Deutschland.

Aus ökologischer Sicht geht es um den möglichen Beitrag der Elektromobilität zur Senkung der klimarelevanten Emissionen, des Energieverbrauchs und der Luftverschmutzung. Die Analysen zeigen, dass eine deutlich positivere Treibhausgasbilanz mit der Elektromobilität erreicht werden kann, wenn CO<sub>2</sub>-arme oder -freie Energiequellen, z. B. erneuerbare Energien, verwendet werden. Auch bezogen auf die Umweltbelastungen durch Schadstoffemissionen in Deutschland fällt die Bilanz von Elektrofahrzeugen günstiger aus als die konventioneller Pkw.

Im Zentrum der ökonomischen Betrachtungen stehen die Wirtschaftlichkeit, die Implikationen auf die automobilen Wertschöpfungskette und Arbeitsplätze sowie die Versorgung mit bzw. der Verbrauch von kritischen Rohstoffen. Als ein wichtiges Ergebnis lässt sich feststellen, dass bei einer zukünftigen Verbreitung der Elektromobilität in Deutschland gesamtwirtschaftlich leicht positive Effekte auf die Beschäftigung und das Bruttoinlandsprodukt zu erwarten sind.

Hinsichtlich sozialer Implikationen werden die Themen Akzeptanz, Nutzerverhalten, Verkehrslärm und Unfallgeschehen behandelt. Es zeigt sich, dass für eine Verbreitung der Elektromobilität die Reduzierung der Anschaffungskosten, eine größere Auswahl an Modellen mit gängigen Qualitäts- und Komfortstandards, ein Angebot an attraktiven Mobilitäts- und Geschäftsmodellen, Testmöglichkeiten und nicht zuletzt eine transparente positive Umweltbilanz wichtige Voraussetzungen darstellen.

Auf Basis dieser Analysen werden im Rahmen einer Synthese die kritischen Aspekte und Potenziale der Elektromobilität sowie Strategien und Maßnahmen zur Förderung diskutiert. Abschließend werden politikrelevante Schlussfolgerungen gezogen und Handlungsoptionen aufgezeigt. Der Deutsche Bundestag erhält mit diesem Bericht eine umfangreiche, fundierte Informationsbasis sowie vielfältige Anregungen für die weitere Befassung mit diesem wichtigen Themenfeld der Wirtschafts-, Technologie-, Verkehrs-, Energie-, Klima- und Umweltpolitik.

Berlin, den 13. März 2013

Der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung

**Ulla Burchardt, MdB**

Ausschussvorsitzende

**Dr. Thomas Feist, MdB**

Berichterstatter

**René Röspel, MdB**

Berichterstatter

**Dr. Martin Neumann, MdB**

Berichterstatter

**Dr. Petra Sitte, MdB**

Berichterstatterin

**Hans-Josef Fell, MdB**

Berichterstatter

## Zusammenfassung

Die Elektromobilität gilt als ein wesentliches Element für eine zukunftsfähige Gestaltung des Personen- und Güterverkehrs. Nach allen Prognosen steigt die weltweite Verkehrsleistung an. In einigen Studien wird von einer Verdopplung des globalen Fahrzeugbestands bis 2030 ausgegangen. Dies geht einher mit einer Verknappung der fossilen Energieträger, insbesondere des Erdöls, und dadurch steigenden Kraftstoffpreisen. Die Notwendigkeit einer Umgestaltung der Verkehrssysteme wird im Hinblick auf ambitionierte Klimaschutzziele durch umfangreiche Studien z. B. des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) oder der International Energy Agency (IEA) unterstrichen. In Deutschland sind – nach den im Rahmen des Energiekonzepts der Bundesregierung formulierten nationalen Zielsetzungen – bis 2050 die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) gegenüber 1990 um 80 Prozent zu senken. Die Endenergienachfrage aus dem Verkehr soll gegenüber 2005 um 40 Prozent reduziert werden; allein mit einer Verbesserung von konventionellen Pkw ist dies nicht zu erreichen. Neben einer ambitionierten Klimapolitik und der Notwendigkeit, den Verbrauch fossiler Energieträger zu reduzieren, ist auch die Senkung lokaler Schadstoff- und Lärmemissionen ein weltweiter Treiber der Elektromobilität. In Deutschland, ebenso wie in anderen Automobilherstellereändern, spielt zudem die Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit der Automobilindustrie eine wichtige Rolle, um bei einer weltweiten Verbreitung von Elektrofahrzeugen Arbeitsplätze und Wirtschaftsleistung zu sichern.

Vor diesem Hintergrund wurde die Elektromobilität im Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität (NEP) der Bundesregierung zu einem wesentlichen Element einer zukunftsfähigen Mobilität erklärt. Als Zielsetzung ist in Abstimmung mit der Industrie ein Bestand von mindestens 1 Million Elektrofahrzeugen bis 2020 und mindestens 6 Millionen bis 2030 in Deutschland festgelegt worden. Unter dem Begriff Elektrofahrzeug werden dabei vierrädrige Fahrzeuge verstanden, die über eine Batterie verfügen, die extern über den Anschluss an das Stromnetz geladen werden kann. Dies sind reine Batteriefahrzeuge (BEV) und Hybridfahrzeuge mit Netzanschluss, sogenannte Plug-in-Hybride (PHEV).

Für politische Entscheidungen ist von zentraler Bedeutung, welche Auswirkungen mit einer Verbreitung der Elektromobilität verbunden sind und wie eine gesellschaftlich wünschenswerte Entwicklung erreicht werden kann. Vor diesem Hintergrund betrachtet der vorliegende Bericht das Thema Elektromobilität ganzheitlich. Dazu werden die ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekte der Elektromobilität für Deutschland für die nächsten 1 bis 2 Dekaden erfasst, bewertet und zusammengeführt, um auf dieser Basis Schlussfolgerungen und Handlungsoptionen abzuleiten. Zur Beantwortung der umfangreichen Fragestellungen wurden ein breites Feld aktueller Studien ausgewertet sowie neue bzw. ergänzende Analysen durchgeführt.

Der Fokus liegt auf vierrädrigen Elektrofahrzeugen (BEV und PHEV), insbesondere Pkw. Leichte Nutzfahrzeuge

(LNF) und Busse sowie elektromobile Kleinstfahrzeuge (wie z. B. Elektrofahrräder) werden nur am Rande betrachtet. Wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) werden in diesem Bericht zum Vergleich und als weitere langfristig realisierbare Alternative mit einbezogen.

## Was sind die technologischen Herausforderungen?

Der Batteriezelle kommt eine Schlüsselrolle bei der technologischen Entwicklung zu, zum einen aufgrund ihres hohen Anteils an den Fahrzeugkosten, zum anderen werden die Reichweiten von Elektrofahrzeugen durch die mit den jeweiligen Batterietechnologien erreichbare Energiedichte bestimmt. Neben einer Kostensenkung und Steigerung der Energiedichte sind eine Erhöhung von Leistungsparametern, Lebensdauer und Sicherheit wesentliche Schwerpunkte der Batterieweiterentwicklung.

Aufgrund der vergleichsweise hohen erzielbaren Energiedichten bieten sich lithiumbasierte Batterietechnologien zum Einsatz in Elektrofahrzeugen an, wobei verschiedene Generationen heutiger und künftiger Batterietypen unterschieden werden. Lithium-Ionen-Batterien der 1. Generation sind in Anwendungen der Konsumelektronik verbreitet, aus Sicherheitsgründen aber für elektromobile Anwendungen nicht geeignet. Während aktuell und in naher Zukunft Fahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterien der 2. Generation (z. B. auf Basis der sicheren Eisenphosphattechnologie) auf den Markt kommen, wird für den Markthochlauf der Elektromobilität erwartet, dass verschiedene Konfigurationen von Lithium-Ionen-Batterien auch der 3. Generation (Hochvolt-, Hochenergieentwicklungen) zum Einsatz kommen. Aufgrund physikalisch-chemischer Grenzen werden Elektrofahrzeuge mit diesen Batteriegenerationen aber bei Weitem nicht an die Reichweiten konventioneller Pkw herankommen. Mit Post-Lithium-Ionen-Batterien der 4. Generation (z. B. Lithium-Schwefel) erscheinen hingegen die Energiedichten deutlich steigerbar und die Reichweite konventioneller Fahrzeuge erreichbar. Mit der Markteinführung solcher Batterien rechnen Experten jedoch erst deutlich nach 2020.

Da BEV somit voraussichtlich längerfristig begrenzte Reichweiten aufweisen werden, gelten PHEV als vielversprechende Alternative. Mit ihnen hofft man, Befürchtungen der Nutzer hinsichtlich eingeschränkter Reichweite entkräften und den Einsatzbereich heutiger Pkw nahezu vollständig abdecken zu können. Die Batterie kann kleiner und damit kostengünstiger ausgelegt werden als in BEV. Um eine breite Markteinführung zu ermöglichen, erscheint jedoch eine Senkung der Batteriekosten auf unter 300 Euro/kWh notwendig.

Für eine erfolgreiche, umfassende Markteinführung von Elektrofahrzeugen ist schließlich auch die Lösung weiterer technischer Herausforderungen eine wichtige Voraussetzung: Elektromotoren sowie die On-board-Leistungselektronik müssen verbessert werden. Die Entwicklung von Ladesystemen, die höhere Ladungsgeschwindigkeiten erlauben, kann zudem dazu beitragen, dass das Hemmnis der limitierten Reichweite von Elektrofahrzeugen weniger ins Gewicht fällt.

### **Kann sich Elektromobilität am Markt durchsetzen?**

Für Elektrofahrzeuge sind aktuell erst wenige Angebote auf dem Markt. Die derzeitigen Verkaufszahlen von Elektrofahrzeugen sind dementsprechend in Deutschland, aber auch weltweit, noch sehr niedrig und bewegen sich im Promillebereich. Viele führende Automobilhersteller haben für die nahe Zukunft konkrete Fahrzeugmodelle für den deutschen Markt angekündigt. Neben dem aktuell begrenzten Angebot stellen aus Nutzersicht die hohen Anschaffungskosten von Elektrofahrzeugen und die begrenzte Reichweite von BEV wesentliche Kaufbarrieren dar.

Unter den aktuellen Rahmenbedingungen und ohne deutliche Kauf- oder andere Anreize scheint das Ziel, bis 2020 1 Million Elektrofahrzeuge in Deutschland auf die Straßen zu bringen, nur schwer erreichbar zu sein. Wichtige Rahmenbedingungen sind allerdings unsicher. Beispielsweise können ein stark steigender Ölpreis oder stark sinkende Batterie- und Fahrzeugkosten zu dynamischen Marktentwicklungen führen. Das Ziel von mindestens 6 Millionen Elektrofahrzeugen bis 2030 erscheint dagegen eher realisierbar, da zu erwarten ist, dass sich die Bedingungen für die Elektromobilität künftig weiter verbessern. Mögliche Entwicklungen der Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren sollten daher kontinuierlich beobachtet und Maßnahmen so ausgestaltet werden, dass flexibel auf Änderungen reagiert werden kann.

Mittelfristig werden PHEV größere Marktanteile zugesprochen als BEV. PHEV könnten sich insbesondere für mittlere Fahrzeuggrößen und bei regelmäßigen täglichen Fahrprofilen als attraktive Option erweisen. BEV sind eher für kleinere Pkw interessant, erfordern aber wegen ihrer limitierten Reichweite und aufgrund notwendiger Ladezeiten entsprechende Nutzungsprofile bzw. die Einbindung in multimodale Mobilitätsangebote. Falls zentrale technologische Fortschritte bei Brennstoffzellen und Wasserstofftanks erreicht werden, dürften FCEV für große Pkw mit hohen täglichen und jährlichen Fahrleistungen interessant werden. In diesem Segment sind PHEV weniger attraktiv, weil bei diesen Fahrprofilen der verbrennungsmotorische Anteil recht hoch ist.

### **Internationale Politikmaßnahmen**

In den letzten 5 Jahren haben zahlreiche Regierungen weltweit damit begonnen, staatliche Förderprogramme auf den Weg zu bringen, um die Verbreitung der Elektromobilität in den kommenden Jahren vorzubereiten. Die meisten Staaten fokussieren dabei auf Marktvorbereitungsmaßnahmen und setzen Anreize durch finanzielle Zuschüsse beim Kauf eines Elektrofahrzeugs, gewähren Steuererleichterungen, z. B. auf Basis der CO<sub>2</sub>-Emissionen, oder wollen Infrastrukturen durch Förderung von privaten und öffentlichen Ladesäulen für Elektrofahrzeuge ausbauen. Nur wenige Länder haben das Potenzial, Leitanbieter und Leitmarkt für Elektromobilität zu werden, und setzen konkret auf eine Förderung von FuE und Produktion der Schlüsselkomponenten für Elektrofahrzeuge.

So haben die Regierungen der USA, Chinas und Südkoreas für die kommenden Jahre milliardenschwere FuE-Programme angekündigt. Schwerpunkt der Förderprogramme der USA ist die schnelle Industrialisierung der Produktion von Batteriezellen und -systemen. Chinas Regierung betont die Förderung der Schlüsselkomponenten Batterie, Antrieb und Leistungselektronik für Elektrofahrzeuge und FCEV. Südkoreas Regierung plant insbesondere mithilfe milliardenschwerer Investitionen in die Batterieindustrie den Auf- und Ausbau der Batterieproduktion in den kommenden 10 Jahren. Japan fördert hingegen bereits seit den 1990er Jahren FuE im Bereich Batterie- sowie Brennstoffzellen für die Elektromobilität. Diese Förderaktivitäten werden systematisch durch weitere Marktvorbereitungsmaßnahmen der nationalen Regierung und lokaler Verwaltungen ergänzt, z. B. durch regionale Infrastrukturausbauten und unterschiedliche Kaufanreizmaßnahmen. Demgegenüber fokussiert Deutschland auf FuE-Kooperationen zwischen Wissenschaft und Industrie. Die Notwendigkeit und Ausgestaltung marktvorbereitender Maßnahmen, insbesondere von Kaufanreizen und eines Ausbaus der Infrastruktur, werden kontrovers diskutiert, und es ist noch nicht endgültig festgelegt, wie die Förderung der Elektromobilität in Deutschland im Zeitraum bis 2020 im Einzelnen ausgestaltet sein sollte.

### **Sind Elektrofahrzeuge umweltfreundlich?**

Bei der Bewertung der ökologischen Auswirkungen von Elektrofahrzeugen ist zwischen lokalen Luftschadstoffen und Treibhausgasen (THG) zu unterscheiden. Eine zentrale Eigenschaft von Elektrofahrzeugen ist, dass sie im lokalen Betrieb quasi emissionsfrei sind. Dagegen verursacht die Herstellung von Elektrofahrzeugen höhere Umweltbelastungen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen. Um eine positive Bilanz zu erreichen, muss dieser „ökologische Rucksack“ aus der Fahrzeugherstellung durch niedrigere Belastungen im Fahrzeugbetrieb ausgeglichen werden.

Bei einer solchen Betrachtung, welche die Umweltwirkungen durch die Gewinnung von Rohstoffen in den jeweiligen Herkunftsländern einbezieht, können Elektrofahrzeugen hinsichtlich lokaler Luftschadstoffemissionen keine eindeutigen Vorteile zugeschrieben werden. In Deutschland fällt die Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen durchaus günstiger aus als die konventioneller Pkw, insbesondere beim Einsatz von erneuerbarer Energie für den Fahrzeugbetrieb. Die Belastung durch lokale Luftschadstoffe wird aber auch für konventionelle Pkw durch zunehmend verschärfte Abgasnormen und technologische Verbesserungen zukünftig weiter abnehmen.

Ein ökologischer Rucksack aus der Herstellung von Elektrofahrzeugen existiert auch bei den THG-Emissionen, ist aber deutlich geringer als im Bereich der lokalen Luftschadstoffe und kann bei Nutzung erneuerbarer Energien bereits bei relativ geringen Jahresfahrleistungen ausgeglichen werden. Eine überwiegende bis ausschließliche Nutzung erneuerbarer Energien erscheint dabei gut möglich in Anbetracht der nachgefragten Strommengen. Diese liegen bei 1 Million Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 deut-

lich unter 2 Prozent des gesamten Angebots an Strom aus erneuerbaren Energien. Mit einer intelligent gesteuerten Ladung, die sich nach der Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien richtet, können Elektrofahrzeuge zudem zu deren Integration beitragen.

Um schließlich möglichen Reboundeffekten aufgrund der Betriebskosten von Elektrofahrzeugen entgegenzuwirken, erscheint der Einsatz von Elektrofahrzeugen in gewerblichen Flotten sowie in Carsharing, Taxibetrieb sowie insbesondere in umfassenden, multimodalen Mobilitätsangeboten, welche verschiedene Verkehrsmittel miteinander verknüpfen, sinnvoll. Die Elektromobilität kann auf diese Weise langfristig ein zentraler Baustein eines nachhaltigen Verkehrssystems werden.

### Lärmreduktion versus Sicherheit

Ein wesentlicher Vorteil von Elektrofahrzeugen wird in der Lärmreduktion gesehen. Die externen Kosten von Lärm durch gesundheitliche Beeinträchtigungen bzw. medizinische Folgekosten sowie reduzierte Immobilienwerte werden europaweit auf 8,2 Mrd. Euro geschätzt. Diese sind vor allem durch Lärmemissionen in Agglomerationsräumen und Nachtstunden bedingt.

Die Lärmreduktion, welche durch Elektrofahrzeuge erreicht werden kann, wird entscheidend durch die Fahrgeschwindigkeit und den Gesamtfahrzeugmix auf den Straßen beeinflusst. Während die erzielbare Lärmreduktion bei Geschwindigkeiten über 40 km/h und hohem Güterverkehrsanteil vernachlässigbar wird, haben Elektrofahrzeuge wesentliche Vorteile in Wohngebieten, insbesondere in Abend- und Nachtstunden, und können hier die Lebensqualität deutlich steigern.

Ferner bieten Elektrofahrzeuge die Möglichkeit, Serviceleistungen in Randstunden zu verlegen, was bisher aufgrund der spezifischen Lärmgrenzwerte nicht möglich ist. Somit stellt ein vermehrter Einsatz von Elektrofahrzeugen im unteren Geschwindigkeitsbereich eine effektive Maßnahme zur Lärmreduktion im Straßenverkehr dar. In diesen Bereichen kommen Vorteile von Elektrofahrzeugen auch dann zum Tragen, wenn sich zukünftig die Lärmemissionen konventioneller Fahrzeuge weiter vermindern.

Gleichzeitig stellt sich jedoch die Frage nach einer Erhöhung der Unfallhäufigkeit mit anderen Verkehrsteilnehmern aufgrund reduzierter Warnsignale, welche ein sich näherndes Fahrzeug ankündigen. Dementsprechend wird kontrovers diskutiert, ob Elektrofahrzeuge mit künstlichen Geräuschen ausgestattet werden sollten. Inwieweit reduzierte Lärmemissionen durch Elektrofahrzeuge ohne weitere Sicherheitsmaßnahmen auch eine höhere Unfallgefahr mit sich bringen, kann angesichts der derzeitigen begrenzten Datenbasis nicht beantwortet werden. Die Entwicklung neuer Sicherheitstechnologien erscheint im Hinblick auf eine künftige generelle Lärmreduktion von Pkw unabdingbar. Die Einführung permanenter künstlicher Geräusche sollte, wenn überhaupt, nur als Übergangslösung in Betracht gezogen werden. Besser geeig-

net wäre die sensorisch gesteuerte, temporäre Erzeugung von (Warn-)Geräuschen für Fußgänger und Radfahrer.

### Volkswirtschaftliche Potenziale

Die deutsche Automobilindustrie nimmt derzeit sowohl wirtschaftlich als auch technologisch eine weltweite Spitzenposition ein. Diese könnte durch Wertschöpfungsverschiebungen aufgrund der erwarteten weltweiten Verbreitung der Elektromobilität zumindest mittelfristig gefährdet sein. Mit einem deutlichen Wachstum von Wertschöpfungspotenzialen ist zukünftig vor allem bei elektromobilitätsrelevanten Komponenten, insbesondere Batterie, Leistungselektronik und Elektromotor zu rechnen, während für konventionelle Komponenten allenfalls ein schwaches Wachstum zu erwarten ist.

Auf die Batterie entfällt der größte Teil der Wertschöpfung bei Elektrofahrzeugen. Die Batteriezellenproduktion wird derzeit von asiatischen Industrie- und Schwellenländern dominiert; deutsche Firmen spielen hier international kaum eine Rolle. Offen ist, ob bzw. wann dieser Vorsprung aufgeholt werden kann. Zur Sicherung der Wertschöpfungsposition der deutschen Automobilindustrie und in der Erwartung, dass sich Elektromobilität mittel- bis langfristig auf dem Pkw-Markt durchsetzen wird, sollte in Erwägung gezogen werden, Entwicklungs- und Produktionskompetenzen für leistungsfähige Batterien auch in Deutschland aufzubauen. Da Deutschland hier jedoch kaum spezifische Kompetenzen auf wissenschaftlicher und industrieller Seite aufweist, müssten diese von Grund auf aufgebaut werden. Mittel- bis langfristig besteht aber für Deutschland durchaus die Chance, diesen Markt über eine bereits sehr gut aufgestellte Chemie- und Materialforschung zu erschließen. Investitionen in die nächsten Batteriegenerationen erscheinen dabei erfolgversprechender als in die heute verwendete Lithium-Ionen-Technologie. Bei der Produktion des Batteriesystems aus einzelnen Batteriezellen kann die deutsche Industrie hingegen beachtliche Kompetenzen aufweisen, sodass in diesem Bereich schon kurzfristig relevante Marktanteile für Deutschland möglich sind; der Hauptanteil der Wertschöpfung entfällt jedoch auf die Batteriezellen.

Nach der Batterie weist die Leistungselektronik ein hohes Wertschöpfungspotenzial auf. Hier hält Deutschland eine sehr starke Wettbewerbsposition. Dieses Zukunftsfeld ist sowohl bedeutsam für den Automobilbau, aber auch für andere Zukunftstechnologien, z. B. in den Bereichen Energieeffizienz und erneuerbare Energien sowie Steuerung der Stromnetze. Die deutsche Position in der Leistungselektronik sollte unbedingt gesichert werden.

Auch im Bereich der Elektromotorenfertigung sind in Deutschland branchenübergreifend technologische Kompetenz und ausgewiesene Innovationspotenziale vorhanden, welche erfolgreich auf die automobilen Anwendung übertragen werden können. Sowohl deutsche Systemlieferanten, spezialisierte Technologielieferanten oder auch Automobilhersteller zeigen Aktivitäten, diese Fähigkeiten für die Entwicklung und Produktion von Elektromotoren für Elektrofahrzeuge nutzbar zu machen und könnten in diesem Gebiet künftig eine zentrale Rolle spielen.

In den nächsten 10 bis 15 Jahren wird es voraussichtlich mehr PHEV als BEV geben. Mit zwei Energiespeichern und Motoren zeichnen sich PHEV durch einen komplexen Systemaufbau aus. Da bei ihnen die Batterie kleiner dimensioniert ist, fällt ihr Wertschöpfungsanteil weniger ins Gewicht. Hierin können Vorteile für die deutsche Automobilindustrie liegen.

Insgesamt wird sich durch die Elektromobilität die Wertschöpfung im Automobilbereich verändern. Bisher antizipieren vor allem die Automobilhersteller sowie die großen Systemlieferanten diese Veränderungen und reagieren aktiv durch angepasste Ausrichtung der FuE-Aktivitäten sowie durch Eingehen neuer Partnerschaften. Auf tieferen Ebenen der Zuliefererpyramide ist das Aktivitätsniveau bzgl. der Herausforderungen der Elektromobilität bis dato noch sehr wenig ausgeprägt. Daher erscheint es notwendig, diese zumeist kleinen und mittelständischen Unternehmen für den anstehenden Wandel und die daraus resultierenden Chancen und Risiken zu sensibilisieren.

Die Analyse der gesamtwirtschaftlichen Effekte ergibt, dass die Marktentwicklung der Elektromobilität bis 2020 noch nicht zu einem nennenswerten Strukturwandel, d. h. zu einer Verschiebung der Wertschöpfung zwischen den untersuchten Wirtschaftssektoren, führen wird. BIP und Beschäftigung werden leicht um 0,2 Prozent gegenüber dem Referenzszenario ohne Elektromobilität gesteigert. Bis 2030 ergibt sich ein BIP-Zuwachs um 0,8 Prozent und ein Beschäftigungswachstum um 0,6 Prozent. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine zukünftige Verbreitung der Elektromobilität in Deutschland gesamtwirtschaftlich nicht zu Mehrkosten führt, sondern einen leicht positiven Effekt auf BIP und Beschäftigung erwarten lässt. Bei den Analysen wird allerdings vereinfachend angenommen, dass das Ziel von 1 Million Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 ohne monetäre Anreize erreicht werden kann.

### **Rohstoffe für die Elektromobilität**

Bei der ökonomischen, ökologischen und sozialen Bewertung von Elektrofahrzeugen spielen auch Kosten- und Versorgungsaspekte sowie Umweltbelastungen durch den Abbau kritischer Rohstoffe sowohl für Fahrzeugbatterien als auch Elektromotoren eine Rolle. Dazu gehören z. B. Lithium, Kupfer, Platin, Neodym und andere Seltene Erden. Bei steigender Nachfrage aus dem Automobilssektor könnten Verknappungen entstehen. Außerdem ist die Gewinnung dieser Ressourcen häufig mit starken Umweltbelastungen verbunden bzw. findet in Regionen statt, in denen nur geringe oder keine Umweltauflagen beachtet werden. Beim Thema kritische Rohstoffe gibt es noch viele Unsicherheiten und großen Forschungsbedarf. Für Lithium und Kupfer zeigen Prognosen des weltweiten Bedarfs, der geologischen Reichweite und der Recyclingfähigkeit, 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 anziehen könnten. Bei einigen der Seltenen Erden sieht die Situation anders

aus – hier könnte es kurz- bzw. mittelfristig zu einer Verknappung bei den Reserven kommen. Generelle quantitative Aussagen beispielsweise zu Verfügbarkeit und Preisentwicklungen können jedoch kaum getroffen werden.

Wichtige Zukunftsthemen im Bereich kritischer Rohstoffe sind die Weiterentwicklung von Recyclingverfahren, „waste“ und „urban mining“, die Entwicklung von Substituten und die Ausarbeitung einer Rohstoffstrategie. Die Auswirkungen und Umweltbilanzen heutiger bzw. zukünftiger Recyclingverfahren sind zwar aufgrund mangelnder Daten und Studien aus heutiger Sicht schwer zu beurteilen. Grundsätzlich erscheint Recycling aber unerlässlich, ebenso wie die Setzung von Standards bei der Gewinnung der Rohstoffe, um negativen Auswirkungen auf THG-Emissionen, Umweltqualität sowie Sozialstandards in den Gewinnungsländern entgegenzusteuern.

### **Aussichtsreiche Erstmärkte und Zielgruppen**

Die bisher vorliegenden Ergebnisse aus Forschungs- und Pilotprojekten zur Akzeptanz potenzieller und tatsächlicher Nutzer von Elektrofahrzeugen sowie ökonomische Analysen der Wirtschaftlichkeit weisen darauf hin, dass es durchaus aussichtsreiche Erstkäufer- bzw. Erstnutzergruppen sowohl im gewerblichen als auch privaten Bereich gibt. Bei deren Diskussion sind die verschiedenen Antriebskonzepte und Fahrzeugtypen sowie mögliche Nutzungsformen bzw. Mobilitätskonzepte zu berücksichtigen.

Relevante Vorteile von Elektrofahrzeugen aus Nutzersicht sind Umweltvorteile, niedrige Lärmemissionen und niedrige Betriebskosten – aber auch Fahrverhalten und -komfort sowie Außenwirkung bzw. das Image von Elektrofahrzeugen. Wesentliche Hemmnisse sind hingegen die hohen Anschaffungskosten und die begrenzte Reichweite.

Angesichts des hohen Anteils gewerblicher Konsumenten an den Pkw-Neuzulassungen (ca. 60 Prozent) sowie an den bisherigen Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen (über 90 Prozent) wird dieser Käufergruppe eine wichtige Rolle auf dem frühen Elektrofahrzeugmarkt zugesprochen. Insbesondere Flotten mit einer höheren Jahresfahrleistung, aber regelmäßigen, planbaren Touren erscheinen aussichtsreich, zumal hier ein wirtschaftlicher Einsatz von Elektrofahrzeugen möglich wäre. Die Nutzung von BEV in den Fahrzeugsegmenten Klein- und Kompaktwagen erscheint z. B. bei mobilen Pflegediensten oder im Rahmen von größeren Carsharingflotten wirtschaftlich realisierbar. Im Bereich der leichten Nutzfahrzeuge stellen die Post- und Paketdienste mit ihren Flotten für die Auslieferung in Städten sowie diverse Handwerksdienstleister vielversprechende Einsatzgebiete für BEV dar. Demgegenüber ermöglichen PHEV, auch längere Distanzen durch den zusätzlichen Verbrennungsmotor zurückzulegen, sodass sie einen breiteren Einsatzbereich bzw. ein größeres Marktpotenzial haben. Spezifische Anreize für Elektrofahrzeuge im Wirtschaftsverkehr, wie z. B. längere Zufahrtszeiten für Innenstädte für geräuscharme und lokale emissionsfreie Fahrzeuge, können diesen wirtschaftlich attraktiven Bereich in den kommenden Jahren erweitern.

Unter den privaten Käufern erscheinen Zielgruppen aus- sichtsreich, welche sich durch Technikaffinität, Interesse an einem besonderen Fahrzeug und nicht zuletzt an um- weltschonendem Fahren auszeichnen. Die tatsächlichen Käufer werden vor allem in ländlichen Gebieten, in klei- nen oder mittleren Städten oder im Umland von Groß- städten erwartet, da hier, auch aufgrund mangelnder oder suboptimaler Alternativen zur Befriedigung der Mobili- tätsbedürfnisse, häufiger ein Auto genutzt wird. Jüngere und/oder umweltorientierte Zielgruppen in Großstädten sind als breite Käufergruppe von Elektrofahrzeugen dage- gen weniger wahrscheinlich. Aufgrund ihrer finanziellen Situation und/oder Wertvorstellungen und Mobilitätsge- wohnheiten erscheinen sie vielmehr als Nutzer von Sharingangeboten bzw. von multimodalen Mobilitätsan- geboten vielversprechend. Gerade bei Sharingkonzepten wird dem Nutzer die Möglichkeit zum Erfahren und Tes- ten der Elektromobilität im Alltag gegeben, ohne dass die noch hohen Anschaffungskosten der Fahrzeuge alleine getragen werden müssen.

Hinsichtlich einer Verbreitung der Elektromobilität bei den beschriebenen Zielgruppen erscheinen einige wich- tige Voraussetzungen wesentlich, damit diese auch zu tat- sächlichen Käufern bzw. Nutzern werden. Dazu gehören: die Reduzierung des Anschaffungspreises, eine größere Auswahl an Modellen mit gängigen Qualitäts- und Kom- fortstandards, ein Angebot an attraktiven Mobilitäts- und Geschäftsmodellen und Testmöglichkeiten. Nicht zuletzt sollte auch im Hinblick auf die Nutzerakzeptanz eine transparente positive Umweltbilanz und die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien für die Elektromobilität sichergestellt werden, da dies von der großen Mehrheit potenzieller Käufer bzw. Nutzer gewünscht wird und ent- sprechende Zweifel für die Akzeptanz fatal sein könnten.

### **Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge im Vergleich**

FCEV wurden im Bericht bei ausgewählten Fragestellun- gen zum Vergleich betrachtet, da sie langfristig eine Al- ternative bzw. Konkurrenz zu Elektrofahrzeugen darstel- len können. FCEV befinden sich derzeit noch im FuE- Stadium. Herausforderungen liegen u. a. in den hohen Anschaffungskosten und der niedrigen Lebensdauer des Brennstoffzellenstacks, sodass eine erfolgreiche Markt- einföhrung von FCEV nur bei entsprechenden technolo- gischen Durchbrüchen möglich erscheint. Bei FCEV ist zudem, im Gegensatz zu Elektrofahrzeugen, der Aufbau der zur Markteinföhrung nötigen Infrastruktur eine große Herausforderung. Eine Konkurrenz zwischen Elektro- fahrzeugen und FCEV wird aber auch bei entsprechenden technologischen und infrastrukturellen Fortschritten nur bedingt gesehen, da zumindest in den nächsten 1 bis 2 Dekaden zum Teil unterschiedliche Pkw-Segmente und Käuferschichten angesprochen werden dürften.

FCEV eignen sich insbesondere für den Langstreckenein- satz besser als Elektrofahrzeuge. Dies ist ein Einsatzbe- reich, der zwar volumenmäßig nicht sehr groß ist, dessen Umwelt- und Ressourcenauswirkungen aber aufgrund der hohen Fahrleistungen durchaus bedeutsam erscheinen. Bei Einsatz erneuerbarer Energien für den Fahrzeugbe-

trieb zeichnen sich FCEV durch deutlich geringere THG- Emissionen als konventionelle Pkw aus. Gegenüber BEV und, je nach verbrennungsmotorischem Anteil, auch PHEV sind sie hinsichtlich Energieeffizienz und THG- Emissionen jedoch z. T. deutlich unterlegen. Ähnlich den BEV und PHEV sind FCEV in der Herstellung energiein- tensiver als konventionelle Pkw, sodass ihr Einsatz nur bei hohen Fahrleistungen ökologisch sinnvoll ist.

### **Optionen zur Förderung der Elektromobilität**

Die derzeitigen Diskussionen hinsichtlich einer Förde- rung von Elektrofahrzeugen in den nächsten Jahren drehen sich vorrangig um einen Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur und finanzielle Kaufanreize. Ein um- fangreicher Ausbau öffentlicher Ladeinfrastruktur er- scheint derzeit nicht notwendig. Die Erfahrungen aus De- monstrationsprojekten zeigen, dass bisherige Nutzer von Elektrofahrzeugen überwiegend zuhause oder am Ar- beitsplatz laden und bereits vorhandene öffentliche Lade- möglichkeiten kaum genutzt werden. Insbesondere in ländlichen Gebieten oder kleinen und mittleren Städten, wo die Mehrheit der frühen Käufergruppen erwartet wird, ist eine hohe Dichte an Garagen bzw. hausnahen Stellplät- zen gegeben, sodass auch die entsprechenden Vorausset- zungen für ein Laden zuhause leicht realisierbar sind. Der Ausbau einer öffentlichen Ladeinfrastruktur sollte sich daher derzeit eher auf gut zugängliche Stellen konzentrie- ren, um Hemmschwellen bzw. Befürchtungen bzgl. einer unzureichenden Reichweite abzubauen und gleichzeitig die Sichtbarkeit der Elektromobilität zu fördern.

Wie empirische Erhebungen zeigen, sind die hohen An- schaffungsausgaben eine wesentliche Kaufhürde. Derzeit sind die Anschaffungspreise für Elektrofahrzeuge noch deutlich höher als für vergleichbare konventionelle Fahr- zeuge; daher dürften die Preise auch noch bei einer Kauf- subventionierung von einigen Tausend Euro pro Fahr- zeug für viele potenzielle Käufer – selbst bei einer gewissen Mehrpreisbereitschaft – zu hoch liegen. In den nächsten Jahren würden daher mit solchen Kaufanreizen vorrangig Einsatzbereiche und Nutzungskonzepte ange- sprochen werden, welche eine hohe Fahrleistung der Fahrzeuge aufweisen. Zu einem späteren Zeitpunkt, wenn die Anschaffungspreise entsprechend gesunken sind, könnte ein Anreiz effektiver sein, um breitere Segmente anzusprechen.

Die Bestimmung der Höhe von möglichen Kaufanreizen für Elektrofahrzeuge kann sich auf verschiedene Ansätze stützen. Ein Ansatz zielt auf die positiven Umweltwir- kungen und eine Abschätzung der vermiedenen externen Kosten ab. Eine weitere Option besteht in der Berechnung der volkswirtschaftlichen Wachstumsimpulse der Elektromobilität. Allerdings sind die gesamtwirtschaftli- chen Auswirkungen solcher Maßnahmen noch nicht aus- reichend untersucht und die Grundlagen zur Bestimmung der Anreizhöhe aus volkswirtschaftlicher Sicht daher noch nicht gegeben. Aufgrund vermiedener externer Kos- ten ließen sich bei Nutzung zusätzlicher erneuerbarer Energiequellen monetäre Anreize in Höhe von 1 800 bis 3 200 Euro rechtfertigen, wobei der ökologische Ruck-

sack aufgrund der Fahrzeugherstellung nicht berücksichtigt ist. Ein Einbezug dieser Umweltauswirkungen reduziert die errechneten Werte um ca. 10 bis 25 Prozent.

Aktuell scheint vor allem die Förderung von FuE-Aktivitäten angezeigt. Eine Schlüsselrolle für die Wertschöpfung bei Elektrofahrzeugen kommt der Batterie zu. Um bei zukünftigen Batterietechnologien relevante Marktanteile erreichen bzw. Batterien aus deutscher Produktion nutzen zu können, sollte eine exzellente Grundlagenforschung im Bereich Batterietechnologien in Deutschland langfristig aufgebaut und etabliert werden. Die bereits gute Position Deutschlands bei weiteren relevanten Komponenten wie Elektromotoren und Leistungselektronik sollte unbedingt gesichert werden.

Neben monetären Anreizen stehen zur Förderung der Elektromobilität auch nichtmonetäre Anreize wie kostenlose oder reservierte Parkplätze für Elektrofahrzeuge und die Freigabe von Busspuren zur Auswahl. Die Praxiserfahrungen sind aber noch sehr begrenzt und somit auch die tatsächlichen Auswirkungen solcher nichtmonetärer Anreize noch nicht absehbar. Wenn sich eine solche Förderung als effektiv erweist, sollte darauf geachtet werden, dass dies nicht zu Konflikten mit dem Umweltverbund, also dem öffentlichen Personennahverkehr sowie dem Fuß- und Radverkehr führt.

Regulierungen und nichtmonetäre Anreize für den Einsatz von Elektrofahrzeugen in gewerblichen Flotten sowie Carsharingflotten und multimodalen Mobilitätskonzepten betreffen z. B. Umweltzonen und Lieferfenster für Elektrofahrzeuge, die Bereitstellung von Stellplätzen für Sharingsysteme, Standards für Buchungs- und Abrechnungssysteme sowie Kompatibilitäten zwischen verschiedenen Mobilitätsdienstleistern.

Aufgrund der entscheidenden Bedeutung erneuerbarer Energien für die Umweltvorteile von Elektrofahrzeugen wie auch für die Nutzerakzeptanz sollte ein transparentes und vertrauenswürdiges System zur Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien sichergestellt werden. Hinsichtlich des bedeutenden Einflusses von Luftschadstoffbelastungen, THG-Emissionen und Energieverbrauch durch die Fahrzeugproduktion bzw. den Abbau von Rohstoffen sind zudem eine nachhaltige, d. h. auf sozialen und ökologischen Ausgleich bedachte Rohstoffpolitik der Industriestaaten sowie möglichst hohe Recyclingquoten zu empfehlen.

Grundsätzlich sollte die Förderung von Elektrofahrzeugen im Rahmen eines technologieoffenen Ansatzes erfolgen. Der Fokus auf Verbesserungen bei konventionellen Pkw ist zudem kurzfristig entscheidender für eine signifikante Reduktion von THG-Emissionen im Verkehrssektor – und sollte auch langfristig nicht vernachlässigt werden.

Insgesamt wird deutlich, dass die Potenziale und Herausforderungen der Elektromobilität nur aus einer umfassenden und langfristigen Perspektive angemessen bewertet werden können. Auf lange Sicht bietet die Elektromobilität bedeutsame ökologische Vorteile wie auch wirtschaftliche Chancen. Für die Realisierung der Potenziale müssen die noch bestehenden Herausforderungen konsequent

angegangen werden, indem Forschung und Entwicklung weiter vorangetrieben und geeignete politische Maßnahmen umgesetzt werden.

## I. Einleitung

Elektromobilität – als elektrisch angetriebener Individualverkehr – ist kein neues Phänomen. Bereits in den 1990er Jahren wurden in Deutschland Flottenversuche mit batteriebetriebenen Pkw durchgeführt, ohne dass es jedoch zu einer breiten Markteinführung gekommen wäre. Aus einer Reihe von Gründen ist die Situation heute anders, und eine breite Einführung der Elektromobilität in den kommenden Jahren erscheint in den Marktsegmenten für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge aussichtsreich. Die wichtigsten Gründe liegen in geänderten Rahmenbedingungen, verbesserten Technologien und einem Wandel der Fahrzeug- und Mobilitätskonzepte. Insbesondere die Fortschritte in der Batterietechnologie durch Lithium-Ionen-Batterien ermöglichen höhere Energiedichten und damit größere Reichweiten.

Ein weiterer Treiber sind steigende Kraftstoffpreise und die Erwartung, dass diese auch zukünftig steigen werden, insbesondere durch ein Nachfragewachstum in den Schwellenländern und weltweit steigende Verkehrsleistungen. In einigen Studien wird von einer Verdopplung des globalen Fahrzeugbestands bis 2030 ausgegangen. Dies geht einher mit einer Verknappung der fossilen Energieträger, insbesondere des Erdöls. Auch in umfangreichen Studien z. B. des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Kahn Ribeiro et al. 2007) oder der International Energy Agency (IEA 2010) wurde die Notwendigkeit einer Umgestaltung der Verkehrssysteme aufgezeigt, um mit einer deutlichen Minderung der durch den Verkehrssektor emittierten Treibhausgase (THG) ambitionierte Klimaschutzziele erreichen zu können. Die EU hat bereits ein THG-Reduktionsziel von 60 Prozent bis 2050 gegenüber 1990 für den Verkehr vorgegeben. Wenn aber das 2-°C-Ziel der Erderwärmung noch erreicht werden soll, müssen die spezifischen THG-Emissionen von Pkw auf rund 20 g/km im Jahr 2050 gesenkt werden. Da dieser Wert mit benzin- und dieselbetriebenen Pkw grundsätzlich technisch nicht erreichbar ist, kam man in entsprechenden Studien (McKinsey 2009; Schade 2011; Skinner et al. 2010) zu dem Schluss, dass der motorisierte Individualverkehr langfristig weitgehend auf Elektrofahrzeuge und/oder FCEV umgestellt werden muss. Auch national gesehen sind die Zielsetzungen des Energiekonzepts 2010 der Bundesregierung (BMWi/BMU 2010), bis 2050 die THG-Emissionen gegenüber 1990 um 80 Prozent und die Endenergienachfrage aus dem Verkehr gegenüber 2005 um 40 Prozent zu senken, mit einer Individualmobilität allein basierend auf einer Verbesserung von konventionellen Pkw nicht zu erreichen. Neben einer ambitionierten Klimapolitik und Bemühungen, den Verbrauch fossiler Energieträger zu reduzieren, ist auch die Senkung lokaler Emissionen ein weltweiter Treiber der Elektromobilität. Daher spricht vieles dafür, dass die Elektromobilität ein wichtiger Bestandteil eines nachhaltigen Verkehrssystems sein wird. Über die bereits genannten Ziele und Hoffnungen hinaus können Elektro-

fahrzeuge durch den von der Politik mit der Energiewende beschlossenen beschleunigten Umbau des Energiesystems hin zu fluktuierenden erneuerbaren Energien möglicherweise eine bedeutsame Rolle bei der Lastverlagerung einnehmen – und unter Umständen langfristig auch bei der Energiespeicherung.

Vor diesem Hintergrund wird die Elektromobilität im Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität (NEP) der Bundesregierung zu einem wesentlichen Element einer zukunftsfähigen Mobilität erklärt (Bundesregierung 2009 u. 2011). Die ausschlaggebenden Motive sind, die Abhängigkeit Deutschlands von Ölimporten zu reduzieren, die Emissionen sowohl global (Treibhausgase [THG]) als auch lokal (Schadstoffe, Lärm) zu minimieren und im internationalen Wettbewerb zum Leitanbieter und Leitmarkt für Elektromobilität zu werden, um so eine Führungsrolle in der Automobil- und Zulieferindustrie sowie im Bereich Forschung und Entwicklung (FuE) zu behalten. Als Ziele auf diesem Weg strebt die Bundesregierung in Kooperation mit der Industrie an, dass bis 2020 mindestens 1 Million und bis 2030 mindestens 6 Millionen Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren (Bundesregierung 2011). Ob und wie die gesetzten Zielwerte erreicht werden können sowie welche wirtschaftlichen Auswirkungen und welche Umweltvorteile damit verbunden sind, ist derzeit Kern von kontroversen Diskussionen.

Der vorliegende Bericht soll vor diesem Hintergrund das Thema Elektromobilität ganzheitlich, d. h. aus ökologischer, ökonomischer und sozialer Perspektive betrachten. Unter Elektromobilität wird dabei elektrisch angetriebener Individualverkehr verstanden. Dabei liegt der Fokus auf vierrädrigen Straßenfahrzeugen wie Pkw oder leichten Nutzfahrzeugen (LNF). Elektromobile Kleinstfahrzeuge, wie z. B. Elektrofahräder, werden nur am Rande betrachtet. Straßenbahnen, Oberleitungsbusse und Züge werden schon seit Langem elektrisch angetrieben, gehören aber nicht zum Individualverkehr und sind damit nicht Gegenstand des vorliegenden Berichts.

Der Untersuchungsgegenstand Elektrofahrzeuge wird gemäß der Abgrenzung der Bundesregierung betrachtet und bezeichnet vierrädrige Fahrzeuge, die über eine Batterie verfügen, welche extern über einen Anschluss an das Stromnetz geladen werden kann. Unter diese Definition fallen reine Batteriefahrzeuge – „battery electric vehicles“ (BEV) – und Hybridfahrzeuge mit Netzanschluss – „plug-in hybrid electric vehicles (PHEV). Letztere sind von Hybridfahrzeugen ohne Netzanschluss – „hybrid electric vehicles“ (HEV) – zu unterscheiden, die nicht im Fokus dieses Berichts stehen. Wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge – „fuel cell electric vehicles“ (FCEV) – werden in diesem Bericht nicht als Elektrofahrzeuge betrachtet, werden jedoch bei ausgewählten Fragestellungen zum Vergleich mit einbezogen. Die englischen Abkürzungen BEV, PHEV, HEV und FCEV sind auch in der deutschsprachigen Literatur üblich und werden daher im Folgenden verwendet.

Die entsprechenden Herausforderungen und Auswirkungen der Elektromobilität für Deutschland für die nächsten 1 bis 2 Dekaden sollen durch den vorliegenden Bericht

analysiert, bewertet und zusammengeführt werden. Daraus sind Schlussfolgerungen und Handlungsoptionen für die Politik abzuleiten. Zur Beantwortung der umfangreichen Fragestellungen wurden ein breites Feld aktueller Studien ausgewertet, neue bzw. ergänzende Analysen durchgeführt und ein Gutachten im Bereich Lebenszyklusanalyse an die Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (Bünger/Weindorf 2011) vergeben. Insbesondere folgende thematische Schwerpunkte werden betrachtet:

- Analyse des Entwicklungsstands von Batterietechnologien, Leistungselektronik und Elektromotoren sowie der zukünftigen Entwicklungen in diesem Bereich.
- Optionen zum Aufbau einer Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge.
- Analyse der Auswirkungen verschiedener Marktpenetrationsszenarien der Elektromobilität bis 2030 für Deutschland hinsichtlich der Bedeutung für den Energieverbrauch und für die Entwicklung der THG-Emissionen.
- Verkehrskonzepte zur Integration von Elektrofahrzeugen.
- Integration der Elektromobilität in die Energiesysteme zur besseren Einbindung von fluktuierenden erneuerbaren Energieträgern.
- Analyse und Vergleich deutscher und internationaler Technologieaktivitäten und Politikmaßnahmen.
- Lebenszyklusanalyse von Elektrofahrzeugen bezüglich der Kriterien Energieeffizienz, THG- und Schadstoffemissionen zur ökologischen Bewertung von Elektrofahrzeugen.
- Lebenszyklusanalyse bezüglich der Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen.
- Identifikation der Chancen und Risiken einer Verschiebung in den automobilen Wertschöpfungsketten durch die Elektromobilität und deren Auswirkung auf den Automobilstandort Deutschland.
- Analyse der direkten und indirekten Arbeitsplatzeffekte der Elektromobilität.
- Identifikation der kritischen Rohstoffe für die Elektromobilität.
- Analyse der Akzeptanz von Elektrofahrzeugen und Mobilitätskonzepten durch die Verkehrsteilnehmer, Identifikation der Zielgruppen für Elektromobilität und Diskussion der zu erwartenden Auswirkungen auf deren Mobilitätsverhalten.
- Analyse der Auswirkungen von Elektrofahrzeugen auf die Lärmemissionen des Straßenverkehrs sowie die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer.
- Diskussion von Handlungsoptionen hinsichtlich einer Markteinführung der Elektromobilität.

Der Bericht gliedert sich in drei Hauptteile. Im Kapitel II werden die Grundlagen und der Referenzrahmen beschrieben, auf deren Basis die späteren Analysen zur Be-

wertung der Elektromobilität erfolgen. Zuerst erfolgt eine Darstellung und Analyse der verschiedenen Technologien und Anwendungen, welche für die Elektromobilität relevant sind (z. B. Batterietechnologien, Leistungselektronik oder Ladeinfrastruktur). Daneben erfolgt eine kurze Betrachtung von Wasserstofftechnologien und Infrastrukturaufbau für FCEV. Die jeweiligen Technologien und Anwendungen werden hinsichtlich ihres Entwicklungsstands dargestellt und anhand ihrer technischen und ökonomischen Parameter charakterisiert. Es folgt die Auswertung der wichtigsten aktuellen Studien zu Marktpenetrationsszenarien für Elektrofahrzeuge und FCEV und die Festlegung eines Marktpenetrationsszenarios für Deutschland, welches den Auswertungen dieses Berichts als Grundlage dient. Es folgt eine Übersicht einer möglichen Integration von Elektrofahrzeugen in Verkehrskonzepte wie beispielsweise Carsharing oder intermodale Ansätze, welche eine verstärkte Verknüpfung von Verkehrsmitteln zum Ziel haben. Da die Art der Energieerzeugung entscheidend für die ökologischen Auswirkungen der Elektromobilität ist, werden anschließend verschiedene Energieszenarien vorgestellt und eines als Referenz für folgende Untersuchungen ausgewählt. Zum Abschluss des ersten Hauptteils werden internationale Technologieaktivitäten und Politikmaßnahmen zur Förderung der Elektromobilität beschrieben. Als eine der zentralen Maßnahmen werden die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte der EU vertieft beschrieben, da diese starke Anreize zur Steigerung der Energieeffizienz konventioneller Pkw, aber auch zur Einführung von Elektrofahrzeugen setzt.

Kapitel III befasst sich mit der Bewertung der Elektromobilität aus unterschiedlichen Perspektiven. Zunächst werden ökologische Aspekte behandelt. Dabei geht es um den möglichen Beitrag der Elektromobilität zur Senkung der Luftverschmutzung, der THG-Emissionen und des Energieverbrauchs. Daran schließt sich die ökonomische Bewertung an. Hier stehen die Wirtschaftlichkeit, die Implikationen auf die automobilen Wertschöpfungskette und Arbeitsplätze sowie das Thema kritische Rohstoffe im Zentrum der Betrachtungen. Schließlich erfolgt die Analyse sozialer Implikationen wie Akzeptanz, Nutzerverhalten, Verkehrslärm und Unfallgeschehen.

Im Kapitel IV erfolgt die Synthese der ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekte aus den vorangegangenen Kapiteln zu einem Gesamtbild. Diese gliedert sich in die Themen der kritischen Aspekte und Potenziale der Elektromobilität sowie in Strategien und Maßnahmen zur Förderung. Abschließend werden Schlussfolgerungen gezogen und Handlungsoptionen aufgezeigt.

## II. Grundlagen und Referenzrahmen

In diesem Teil werden die notwendigen Grundlagen für eine umfassende Bewertung der Elektromobilität dargestellt. Zunächst erfolgt in Kapitel II.1 eine Darstellung und Analyse von Technologien und Anwendungen, wobei Batterietechnologie, Brennstoffzellentechnologie, Leistungselektronik, Elektromotoren und Ladeinfrastruktur die Schwerpunkte bilden. Daneben erfolgt eine kurze Betrachtung von Wasserstofftechnologien und Infrastrukturaufbau für Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV).

Anschließend beschreibt und analysiert Kapitel II.2 die wichtigsten aktuellen Studien zu Marktpenetrationsszenarien für Elektrofahrzeuge und FCEV. Ein Marktpenetrationsszenario für Deutschland wird festgelegt, welches den Auswertungen dieses Berichts als Grundlage dient. Kapitel II.3 stellt Verkehrskonzepte für eine Integration der Elektromobilität in die heutigen Verkehrssysteme dar und betrachtet dabei auch erwartete Auswirkungen auf Kommunen und Städte, einschließlich deren Rolle bei der Einführung der Elektromobilität. Anschließend stellt Kapitel II.4 ausgewählte Energieszenarien vor, von denen eines als Referenz für folgende Untersuchungen festgelegt wird. Kapitel II.5 beschreibt abschließend internationale Technologieaktivitäten und Politikmaßnahmen, welche wichtige Rahmenbedingungen für die Verbreitung der Elektromobilität darstellen.

### 1. Technologien und Anwendungen

Die Vision von vollständig batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen (BEV), welche den technischen Leistungsmerkmalen von mit fossilen Kraftstoffen betriebenen konventionellen Fahrzeugen nahekommen, scheint erst langfristig realisierbar. Als eine marktfähige Zwischenlösung auf diesem Weg gelten Antriebskonzepte mit Hybridantrieb (Integration von Verbrennungsmotor und Elektromotor). Dieser Bereich umfasst eine Vielzahl von Fahrzeugkonzepten. „hybrid electric vehicles“ (HEV) – Microhybride, Mildhybride und Vollhybride – werden nicht zu den Elektrofahrzeugen im Sinne dieses Berichts gezählt, da eine externe Aufladung ihrer Batterie über das Stromnetz nicht vorgesehen ist. Hier ist nur eine Rückgewinnung von Bremsenergie möglich, aber kein vollständiges elektrisches Fahren über längere Distanzen. Hybride Fahrzeugkonzepte können außerdem nach dem Aufbau des Antriebsstranges unterschieden werden in parallele, serielle oder leistungsverzweigte Hybridantriebe (TAB 2012). Ein Fahrzeug mit parallelem Hybridantrieb verfügt über zwei Traktionsmotoren, die beide direkt zum Antrieb des Fahrzeugs verwendet werden können. Bei einem seriellen Hybridantrieb ist nur ein Traktionsmotor vorhanden, der zweite Motor ist vorgelagert und dient nicht zum direkten Antrieb des Fahrzeugs, sondern zum Aufladen der Batterie. Der leistungsverzweigte Hybridantrieb kombiniert beide Funktionen des Verbrennungsmotors, sodass dieser sowohl eine direkte Antriebs- als auch Aufladefunktion erfüllen kann. Diese Möglichkeiten führen bei den hybriden Elektrofahrzeugen dazu, dass zusätzlich zwischen sogenannten Plug-in-Hybridfahrzeugen (PHEV, parallele und leistungsverzweigte Funktion des Verbrennungsmotors) und Range-Extended-Fahrzeugen – („range extended electric vehicle“ [REEV] – serielle Funktion des Verbrennungsmotors) – unterschieden wird. Bei letzteren kann zur Verlängerung der Reichweite ein zusätzlicher Verbrennungsmotor, Range Extender genannt, zum Laden der Batterie genutzt werden (Blesl et al. 2009). Für die Analysen im vorliegenden Bericht ist diese Unterscheidung nicht relevant, sodass bei der weiteren Verwendung der Bezeichnung PHEV in den folgenden Kapiteln auch REEV gemeint sind. Tabelle II.1 gibt

einen Überblick über die unterschiedlichen Antriebskonzepte.

Die Anforderungen an die Schlüsselkomponenten von Fahrzeugen unterscheiden sich je nach Antriebskonzept. Gerade die hybriden Fahrzeugkonzepte sind durch die unterschiedlichen Auslegungsarten und die Notwendigkeit einer Steuerung technisch recht anspruchsvoll. Bei PHEV steht z. B. die Energiespeicherung (d. h. die Energiedichte) im Vordergrund. Bei HEV soll ein Elektromotor als Ergänzung des Verbrennungsmotors kurzfristige Leistungsspitzen ermöglichen, weshalb die Leistungsdichte den relevanten Batterieparameter der HEV darstellt. Auch sind die Anforderungen an die Leistungselektronik, das Energiemanagement bis zur gesamten Systemintegration bei Hybridfahrzeugen deutlich größer als bei rein batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen. Daher ist es für Deutschland mittel- bis langfristig wichtig, das Know-how im Bereich aller relevanten Schlüsseltechnologien und deren Zusammenwirken auf- und auszubauen.

Während die Entwicklung und Produktion von Elektromotoren einen hohen technischen Stand erreicht hat und künftige Herausforderungen in deren weiteren Optimierung für jeweilige Fahrzeugkonzepte liegen, stellt die Bereitstellung der elektrischen Antriebsenergie eines Elektrofahrzeugs eine wesentliche technische und wirtschaftliche Hürde auf dem Weg zur Durchsetzung der Elektromobilität dar. Energiespeicher für Elektrofahrzeuge repräsentieren heute einen maßgeblichen Anteil an der Wertschöpfungsanteile der Batterie am Gesamtfahrzeug liegt beispielsweise bei 30 bis 40 Prozent (NPE 2011a, S. 18).

Nach der Energieversorgung steht hinsichtlich des technischen Aufwands und der Kosten von den Komponenten eines Elektromobils die Leistungselektronik an zweiter Stelle. Sie regelt den Leistungsfluss zwischen dem Energiespeicher und dem Antriebsmotor und nimmt daher eine Schlüsselstellung für die systemische Integration aller elektrischen Komponenten eines Elektrofahrzeugs ein.

Tabelle II.1

**Übersicht unterschiedlicher Antriebskonzepte**

Antriebsart	Beispiel	Technik	Vorteile und Nachteile
konventioneller Pkw	VW Golf	konventionelle Verbrennungsmotoren (Otto- und Dieselmotoren)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– bewährte Technik, vorhandene Infrastruktur</li> <li>– schlechter Wirkungsgrad der Motoren, hohe Emissionen</li> </ul>
Microhybrid	Smart Fortwo mhd	Start-Stopp-Funktion, regeneratives Bremsen mit dem Startermotor Spannung: 12 V elektrische Leistung: 2 kW Batteriekapazität: 0,6–1,2 kWh	<ul style="list-style-type: none"> <li>– kostengünstige Lösung, Rückgewinnung von Bremsenergie, resultierende Verbrauchsreduktion</li> <li>– nur geringes Einsparpotenzial, kaum Einsparung im Langstreckenbetrieb</li> </ul>
Mildhybrid	Mercedes-Benz S 400 HYBRID	Start-Stopp-Funktion, regeneratives Bremsen, Beschleunigungsunterstützung Spannung: 36–150 V elektrische Leistung: 5–20 kW Batteriekapazität: 1 kWh	<ul style="list-style-type: none"> <li>– gutes Aufwand-Nutzen-Verhältnis, spürbare Verbrauchsreduktion</li> <li>– teure Batterien, zusätzliche Komponenten verursachen Mehrgewicht und benötigen Platz</li> </ul>
Vollbybrid	BMW ActiveHybrid X6	Start-Stopp-Funktion, regeneratives Bremsen, Beschleunigungsunterstützung, kurzes elektrisches Fahren Spannung: 200–400 V elektrische Leistung: 30–50 kW Batteriekapazität: 0,6–2 kWh	<ul style="list-style-type: none"> <li>– hohes Einsparpotenzial in der Stadt, lokal emissionsfreies Fahren</li> <li>– hoher technischer und finanzieller Aufwand, Einsparpotenzial auf Langstrecken nur gering, zusätzliches Gewicht</li> </ul>

noch Tabelle II.1

Antriebsart	Beispiel	Technik	Vorteile und Nachteile
Plug-in-Hybrid	Audi e-tron Spyder	Start-Stopp-Funktion, regeneratives Bremsen, längeres elektrisches Fahren Spannung: 200–400 V elektrische Leistung: 30–70 kW Batteriekapazität: 5–15 kWh	– hohe konventionelle Reichweite, begrenztes elektrisches Fahren – elektrische Reichweite geringer als bei reinen Batteriefahrzeugen, Zusatzgewicht durch Batterie
Range Extender	Opel Ampera	regeneratives Bremsen, rein elektrisches Fahren, Stromversorgung über Verbrennungsmotor Spannung: 200–400 V elektrische Leistung: 30–70 kW Batteriekapazität: 10–30 kWh	– ähnliche Reichweite wie konventionelle Fahrzeuge, geringere Batteriekosten – Mehrgewicht durch Hybridkomponenten, zusätzlicher Platzbedarf
reines Batteriefahrzeug	MINI E, Peugeot iOn	regeneratives Bremsen, rein elektrisches Fahren Spannung: 200–400 V elektrische Leistung: 30–70 kW Batteriekapazität: 10–30 kWh	– emissionsfreies Fahren, nur eine Antriebsquelle, hohes CO <sub>2</sub> -Einsparpotenzial bei Stromerzeugung durch regenerative Energien – begrenzte Reichweite, lange Ladezeiten
Brennstoffzellenfahrzeug	Mercedes-Benz B-Klasse F-CELL	regeneratives Bremsen, rein elektrisches Fahren Spannung: 200–400 V elektrische Leistung: 30–70 kW Brennstoffzelle mit zusätzlicher Batterie als Puffer	– emissionsfreies Fahren, große Reichweite – teure Technologie, energieintensive Wasserstoffherstellung, Speicherung im Fahrzeug, fehlende Ladeinfrastruktur

Quelle: TAB 2012

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Technologieentwicklung sowie Perspektiven und Potenziale zukünftiger Entwicklungen in den Bereichen der Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität diskutiert. Hierzu zählen im Wesentlichen die Energiespeicherung (insbesondere die Batterietechnologie bzw. die Brennstoffzellentechnologie), der Antrieb (insbesondere die Elektromotoren) sowie die Fahrzeugelektronik (insbesondere die Leistungselektronik). Netz- bzw. Ladeinfrastrukturen sind schließlich für die Einbindung der Elektrofahrzeuge in den Straßenverkehr von Bedeutung. Ziel ist dabei, nicht nur Einzelparameter der Komponenten nebeneinanderzustellen, sondern diese hinsichtlich ihres Beitrags zur Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems zu betrachten.

### 1.1 Energiespeicher

Zur Verwendung von elektrischer Energie in Fahrzeugen werden grundsätzlich zwei Konzepte diskutiert: die Spei-

cherung von elektrischer Energie in Batterien und die direkte Verstromung von alternativen Brennstoffen wie Wasserstoff oder Methan in sogenannten Brennstoffzellen. In beiden Fällen findet keine Verbrennung wie in herkömmlichen hochentwickelten Verbrennungsmotoren statt, sondern eine direkte elektrochemische Umwandlung gespeicherter chemischer Energie in elektrische Antriebsenergie. Das technische Grundprinzip für diese Umwandlung ist die Wirkungsweise einer galvanischen Zelle.

Eine galvanische Zelle besteht aus zwei Kammern, in denen an je einer Elektrode elektrochemische Reaktionen ablaufen: An der Anode wird ein chemischer Bestandteil (das Reduktionsmittel) oxidiert, d. h. er wird durch Elektronenabgabe an die Anode ionisiert. Bei Brennstoffzellen ist das Reduktionsmittel der Brennstoff, bei Batterien eine in der Batterie vorgehaltene Substanz. In der zweiten Kammer erfolgt an der Kathode eine Reduktion, d. h. eine

Elektronenaufnahme durch einen zweiten Bestandteil (das Oxidationsmittel, z. B. Sauerstoff oder eine zweite in Batterien gespeicherte Substanz). Reduktions- und Oxidationsmittel bilden zusammen das Redoxpaar eines elektrochemischen Systems. Zumeist fungieren die Elektroden als Katalysator für die jeweils an ihnen ablaufende Teilreaktion. Häufig eignen sich Edelmetalle (z. B. Platin) besonders als Katalysatoren. Ziel der Forschung ist jedoch der Übergang zu günstigeren Materialien. Die beiden Kammern einer galvanischen Zelle sind im Allgemeinen durch eine sogenannte „Ionenbrücke“ miteinander verbunden, über welche ein Ionenaustausch zwischen den Elektroden erfolgt. Diese Brücke stellt ein Elektrolyt dar, eine meist flüssige oder gelartige Substanz, wobei auch Feststoffe bei hohen Temperaturen als Elektrolyt fungieren können (z. B. Keramiken). Eine Membran verhindert den direkten Kontakt der Ausgangsstoffe, erlaubt jedoch den Übergang geladener Teilchen zwischen den beiden Kammern. Sobald Kathode und Anode über einen elektrischen Leiter miteinander verbunden werden, läuft die chemische Reaktion ab, die elektrischen Gleichstrom liefert. Die Spannung einer galvanischen Zelle ist nach oben begrenzt durch die elektrochemischen Potenziale der an den Elektroden ablaufenden Reaktionen. Höhere Spannungen, wie sie für den Einsatz dieser Technologie in Elektromobilen notwendig sind, erhält man durch das Hintereinanderschalten mehrerer Zellen. Wichtige Aspekte der FuE bei galvanischen Zellen sind die Auswahl geeigneter Redoxpaare, praktikabler Elektrolyte sowie geeigneter Katalysatoren.

Der in galvanischen Zellen ablaufende elektrochemische Prozess verspricht prinzipiell einen hohen Wirkungsgrad und vermeidet (zumindest lokal) die mit Verbrennungen verbundene Schadstoffemission. Andererseits erfordert die Umstellung von Verbrennungs- auf Elektromobilität einen hohen Forschungs- und Entwicklungsaufwand. Die Hauptschwierigkeit liegt in der – verglichen mit konventionellen Kraftstoffen – begrenzten Speicherkapazität von elektrischer Energie. Im TAB-Arbeitsbericht „Energiespeicher – Stand und Perspektiven“ wurde der technische Stand von Energiespeichern und insbesondere auch von verschiedenen Batteriesystemen und Brennstoffzellen v. a. aus der Perspektive stationärer Speicher beschrieben (TAB 2008). Für mobile Einsatzzwecke gewinnt der Aspekt von Gewicht und Volumen der Energiespeicher erheblich an Bedeutung (TAB 2008, S. 28). Als maßgeblicher technischer Parameter erweist sich somit neben der Menge der gespeicherten Energie und dem Wirkungsgrad der Energiespeicherung insbesondere die Energiedichte. Diese wird in die sogenannte gravimetrische Energiedichte (gespeicherte Energie bezogen auf die Masse des Energiespeichers, gemessen in Wh/kg) sowie die volumetrische Energiedichte (gespeicherte Energie bezogen auf das Volumen des Energiespeichers, gemessen in Wh/l) unterschieden. Für vollelektrische Batteriefahrzeuge ist eine hohe Energiedichte wichtig, für hybridisierte Elektromobile eine hohe Leistungsdichte.

Unter den verschiedenen gängigen Batterietechnologien wie Blei-, Nickel-Metallhydrid-, Natrium-Nickelchlorid- oder Lithium-Ionen-Batterien werden heute sowohl im

Hinblick auf relativ hohe Energiedichten als auch hohe Leistungsdichten (je nach Auslegung) lithiumbasierte Batteriekonzepte favorisiert. Diese haben in leistungsschwächeren Applikationen aus dem Bereich der Konsumelektronik (etwa Mobiltelefone und Notebooks) bereits eine marktbeherrschende Stellung eingenommen. Sie gelten auch im Traktionsbereich, d. h. zur Anwendung als Antriebsbatterien, kurz- und mittelfristig als die vielversprechendste Batterietechnologie.

Aus den typischen Anforderungen an Fahrzeuge ergeben sich weitere technische Parameter zur Charakterisierung der Leistungsfähigkeit von Batterien bzw. Brennstoffzellen: Die Leistungsdichte und die Leistung bei Kaltstart beschreiben die Abrufbarkeit von Leistungsspitzen. Die kalendarische Lebensdauer (unabhängig von der Nutzung) und die maximale Nutzungsdauer bzw. maximale Fahrleistung haben direkte Auswirkungen auf die Kosten von Elektromobilen. Aus wirtschaftlicher Sicht sind die Kosten pro gespeicherter Kilowattstunde wichtig.

### 1.1.1 Batterietechnologien

Die Darstellungen in diesem Kapitel lehnen sich überwiegend an Thielmann et al. (2010) und Jossen/Weydanz (2006) an. Wiederaufladbare Batterien – sogenannte Sekundärzellen oder Akkumulatoren, in denen die elektrochemischen Prozesse reversibel verlaufen – unterscheiden sich voneinander durch die Wahl des chemischen Speichersystems (welches für den jeweiligen Batterietyp namensgebend ist), durch das zum Einsatz kommende Kathoden- und Anodenmaterial, die verwendeten Elektrolyte sowie die Betriebstemperatur. Durch die Kombination dieser Komponenten hat sich eine Vielzahl von Batteriesystemen ergeben. Im Folgenden wird die Entwicklung im Bereich der Lithium-Ionen-Batterien sowie weiterer Batterietechnologien mit Relevanz für den künftigen Einsatz in Elektromobilen dargestellt. Lithium-Ionen-Batterien haben zwar noch nicht den technologischen Reifegrad von herkömmlichen Blei-Säure- oder Nickel-Cadmium-Akkumulatoren erreicht, werden jedoch aufgrund ihrer höheren Energiespeicherdichte als wegweisend für mittelfristig verfügbare Batteriesysteme in Elektromobilen angesehen. Blei-Säure-Batterien können beispielsweise für Schwellenländer wie Indien zwar eine Rolle spielen, um billige Automobile herzustellen, stellen aber für den deutschen bzw. europäischen Raum keine relevante Alternative zum Antrieb von Elektrofahrzeugen dar: Das Konzept der Blei-Säure-Batterien ist technologisch vollkommen ausgereizt, und besonders nachteilig erweist sich die im Vergleich zu allen anderen Batterietechnologien niedrige Energiedichte.

Andere Alternativen wie Nickel-Metallhydrid-Batterien werden primär für HEV ausgelegt und haben für die Automobilindustrie (z. B. für PHEV oder BEV) keine langfristige Zukunft, auch weil Nickel-Metallhydrid-Batterien sehr empfindlich und irreversibel auf falsche Handhabung (Polung, Überladung oder Tiefentladung) reagieren. Daneben sind sie nur in einem eingeschränkten Temperaturbereich voll einsetzbar. Eine andere Batterietechnologie, welche zunehmend erforscht wird, sind Redox-Flow-

Batterien. In diesen liegen zwei flüssige Elektrolyte in verschiedenen Kreisläufen vor. Vorteile sind das schnelle Nachladen bzw. Tanken, und der Wegfall einer aufwendigen Ladeinfrastruktur, da die energiespeichernden Elektrolyte einfach ausgetauscht werden können. Allerdings eignen sich Redox-Flow-Batterien beim aktuellen technischen Stand mehr für große, stationäre Anwendungen, da bei ihnen die Leistungsdichte im Vergleich zu lithiumbasierten Batterien deutlich schlechter ausfällt.

Die Entwicklung lithiumbasierter Batterien folgt zwei Grundmustern: Einerseits wird eine ingenieurtechnische Optimierung bekannter Batteriesysteme im Hinblick auf Energie- und Leistungsdichte angestrebt. Andererseits werden auch vielversprechende neue Batterietechnologien untersucht, die sich teilweise zunehmend von der ursprünglichen Technologie des etablierten Lithium-Ionen-Akkumulators entfernen. Dafür lassen sich aber ganz wesentliche Verbesserungen der Leistungsparameter der Batterien erwarten.

### Lithium-Ionen-Batterien

In der Diskussion von Lithium-Ionen-Batterie-Konzepten werden als die vier maßgeblichen, weil teuersten und für die Leistung am meisten relevanten Komponenten die Anode, die Kathode, der Elektrolyt und der Separator besprochen.

In bereits kommerziell verfügbaren und insbesondere für den Bereich der Konsumelektronik eingesetzten Lithium-Ionen-Akkumulatoren besteht die Anode aus amorphem Kohlenstoff. Durch den Einsatz von Graphit kann die Menge des benötigten Kohlenstoffs reduziert werden. Aktuelle und z. T. kommerziell verfügbare Weiterentwicklungen betreffen modifizierte Graphite oder Soft-Carbon-Graphenschichten. Batterien mit einer Lithium-Titanat-Anode weisen eine hohe Leistungsdichte auf und sind schnellladefähig, die geringe Gefahr der Entflammbarkeit sorgt zusätzlich für größere Sicherheit. Die Zellspannung und Energiedichte fallen dabei aber geringer aus. Alternative Entwicklungsansätze nutzen Lithiumlegierungen: Aktuell wird Silizium, längerfristig dürfte z. B. Aluminium als Anodenmaterial eingesetzt werden.

Durch den Einsatz von nanostrukturierten Kompositmaterialien wie kohlenstoffummantelten Nanopartikeln aus Silizium sollen z. B. die Vorteile der hohen Leitfähigkeit des Kohlenstoffs und der hohen Speicherkapazität des Silizium ausgenutzt werden. Hierdurch ließe sich schließlich auch die gravimetrische Energiedichte und somit die Reichweite von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen weiter erhöhen. Die Kommerzialisierung von Lithium-Ionen-Batteriezellen mit derart verbesserten Anodenlegierungen oder -kompositen wird zwischen 2015 und 2020 erwartet. Anoden aus Lithiummetall in Verbindung mit einer Kathode beliebigen Materials erlauben das Erreichen der maximal möglichen Zellspannung, die sich aus dem elektrochemischen Potenzial des Li/Li<sup>+</sup>-Paares ergibt. Jedoch verringert die dafür notwendige Überdimensionierung der Lithiumelektrode die gravimetrische Energiedichte. Ihre Entwicklungsreife wird ebenfalls bis 2020 erwartet.

Die Elektrolyte der Lithium-Ionen-Batterien bestehen im Allgemeinen aus drei Teilen: einem flüssigen Bestandteil, einem leitfähigen Salz sowie weiteren Zusätzen. Als Flüssigkeitskomponente werden Ethylencarbonat oder Diethylencarbonat eingesetzt und mit Blick auf Viskosität und Temperaturverhalten optimiert. Das Leitsalz enthält die Lithium-Ionen und soll eine hohe ionische Leitfähigkeit aufweisen. Das aus diesem Grund meistverwendete Material ist Lithium-Hexafluorophosphat (LiPF<sub>6</sub>). Zusätze, wie z. B. Vinylencarbonat, sollen technische Eigenschaften wie u. a. die Ionenleitfähigkeit des Elektrolyten verbessern, die Zugabe von Feststoffen wie Siliziumdioxid oder Aluminiumoxid dient der Bindung von Verunreinigungen und Wasser. Elektrolyte stellen aufgrund hoher Produktionsanforderungen und ihrer Empfindlichkeit gegenüber Verunreinigungen einen erheblichen Kostenfaktor bei der Batterieproduktion dar. Aktuelle Entwicklungen im Bereich der Elektrolyte betreffen die Zugabe von Additiven wie dem angesprochenen Vinylencarbonat und die Suche nach LiPF<sub>6</sub>-freien Elektrolyten, Hochvolt-elektrolyten, Gelpolymerelektrolyten sowie weiterer Festelektrolyten (z. B. Polymerelektrolyte).

Auf Basis der verwendeten Kathodenmaterialien können Batterietypen in unterschiedliche Batteriegenerationen eingeteilt werden. Lithium-Ionen-Batterien der 1. Generation verwenden Lithium-Kobaltdioxid (LiCoO<sub>2</sub>, kurz LCO) als Standardmaterial. Sie finden vor allem im Bereich der Konsumelektronik (Laptops, Mobiltelefone) Anwendung. Ihre Eigenschaften und ihr Verhalten gelten als in der Wissenschaft weitgehend erforscht und in der Anwendung gut erprobt. So erlaubt dieses Kathodenmaterial eine hohe mittlere Entladespannung von 3,9 V gegenüber einer Lithium-Metall-Anode. Bei hohen Temperaturen oder bei Ladespannungen von mehr als 4,4 V ist es jedoch instabil gegenüber einer stark exothermen und Sauerstoff freisetzenden Zersetzungsreaktion, was erhöhte Anforderungen an die Betriebssicherheit stellt. Sie kommen für den Einsatz in Elektrofahrzeugen daher aus Sicherheitsgründen nicht infrage.

Lithium-Ionen-Batterien der 2. Generation setzen verbesserte Kathodenmaterialien ein. Sie sind bereits teilweise kommerziell verfügbar und bieten kurz- bis mittelfristig das Potenzial zur breiteren Anwendung im Bereich der Elektromobilität. Mittelfristig (bis 2020) liegen die Forschungsbestrebungen darin, Hochvoltkathoden (bis 5 V) zu realisieren. Dabei wird u. a. auf die im Folgenden genannten Materialklassen zugegriffen. Hochvoltsysteme werden oft als 3. Generation lithiumbasierter Systeme bezeichnet.

Batteriekonzepte der 2. Generation umfassen zum Beispiel Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LiFePO<sub>4</sub>, kurz LFP), welche sehr preisgünstig sind und hohe Energiespeicherdichten versprechen. Im Unterschied zu Oxiden bietet es eine höhere chemische Stabilität. Diese bewirkt eine längere Batterielebensdauer, geringere Abhängigkeit von Umgebungstemperaturen und eine Vermeidung von Sicherheitsproblemen. Die schlechte elektrische und ionische Leitfähigkeit durch die Materialstruktur sowie das – verglichen mit Manganspinellsystemen – schlechtere

Hochstromverhalten sind Gegenstand aktueller Entwicklungsarbeiten. Dabei liegt der Fokus auf dem Übergang zu nanostrukturierten Eisenphosphat-Elektroden, deren größere Oberfläche die Reaktionskinetik beschleunigt.

Lithium-Nickeldioxid ( $\text{LiNiO}_2$ , kurz LNO) bietet eine hohe mittlere Entladespannung, weist eine höhere Energiedichte und ein besseres Verhalten bei hohen Strombelastungen auf. Die mit dem Material verbundene Sicherheitsproblematik ist hingegen als noch kritischer anzusehen als bei Lithium-Kobaltdioxid, zudem ist Nickel als Material relativ teuer.

Als Prototyp liefern sogenannte Manganspinell-Oxide ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ , kurz LMO) eine höhere mittlere Entladespannung. Zudem drohen bei hohen Ladespannungen keine Zersetzungsreaktionen, was die Sicherheit der Batterie bei Überladung erhöht. Die Materialkosten sind gering, jedoch auch die Energiedichte. Außerdem besteht bei hohen Temperaturen die Gefahr der Auflösung der Kathode in Elektrolyte sowie der schnellen Alterung der Kathoden bei häufiger Tiefentladung.

Die Mengenformel  $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z)\text{O}_2$  mit  $x + y + z = 1$  bezeichnet ein ganzes Stoffsystem, wobei statt Mangan (System kurz NMC) auch der Einsatz von Aluminium (System kurz NCA) denkbar ist. Diese Kathodenmaterialien vereinigen mehrere Vorteile anderer Batterietechnologien auf sich: Die hohe Kapazität von Lithium-Kobaltdioxid, die gute Hochstromfähigkeit von Lithium-Nickeldioxid und die Überladestabilität sowie den Preisvorteil von Lithium-Mangandioxid im Fall des NMC-Systems. Es erlaubt außerdem eine hohe mittlere Entladespannung.

Lithium-Ionen-Batterien der 3. Generation setzen u. a. auch weitere Metallphosphate neben den Eisenphosphaten (z. B. Nickel, Kobalt oder Mangan) als Kathodenmaterial ein. Sie befinden sich gegenwärtig in einem frühen Entwicklungsstand und gelten als Batterieoptionen, die mittelfristig Potenzial für Anwendungen im Bereich der Elektromobilität haben.

### Neue Technologiekonzepte

Zu den Post-Lithium-Ionen-Batterien zählen lithiumbasierte Batterien der 4. Generation, wie z. B. Lithium-Schwefel-Batterien (mit Schwefelkathoden), deren Einsatz in Elektromobilen deutlich später als 2020 erwartet wird, oder Lithium-Luft-Batterien, bei welchen noch offen ist, ob diese nach 2030 als wiederaufladbare Systeme für Elektrofahrzeuge realisiert werden können. Zudem könnten in fernerer Zukunft auch weitere nichtlithiumbasierte Batterietechnologien realisiert werden. Diesen neuen Konzepten gemein ist das Ziel, Batterien mit wesentlich höheren Energiedichten zu entwickeln und somit Elektrofahrzeuge zu ermöglichen, welche die Reichweiten heutiger Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren übertreffen würden. Zudem gibt es neben Lithium-Ionen-Batterien weitere Technologien (z. B. mit festen Elektrolyten), welche mittelfristig (ggf. bis 2020) umgesetzt werden könnten und insbesondere die Sicherheit der Batterie

für den Einsatz in Elektrofahrzeugen deutlich erhöhen würden.

Lithium-Polymer-Batterien unterscheiden sich von den üblichen Lithium-Ionen-Zellen durch die Form des Elektrolyten, denn es kommt eine trockene, flexible Polymerfolie zum Einsatz. Weil die Elektrolytfolien eine ausreichende Ionenleitfähigkeit erst bei höheren Temperaturen (ab  $60^\circ\text{C}$ ) erreichen, wird zusätzlich ein Gel eingesetzt. Dieses neue Konzept ermöglicht zwar etwas höhere Energiedichten, konnte sich aber aufgrund gleichzeitig höherer Kosten noch nicht auf breiter Ebene durchsetzen.

Lithium-Feststoff-Batterien (insbesondere unter Verwendung von Keramiken) sind besonders hitzebeständig und können selbst bei Temperaturen um  $100^\circ\text{C}$  arbeiten. Lithium-Polymer- oder Lithium-Ionen-Batterien fangen bei solchen Temperaturen beispielsweise bereits an zu brennen, oder die flüssigen Bestandteile beginnen zu kochen. Somit erspart die Lithium-Feststoff-Batterie nicht nur ein aufwendiges Kühlen und reduziert den Platzbedarf bei gleicher oder höherer Leistung, sondern wird auch dem Anspruch an die für elektromobile Anwendungen besonders wichtige Sicherheit gerecht.

Bei Lithium-Schwefel-Batterien besteht die Anode aus Schwefel oder einer Schwefelverbindung. Aufgrund der geringen Dichte von Schwefel ermöglicht dies prinzipiell eine deutlich höhere Energiedichte (etwa Faktor 3 bis 4) im Vergleich zu den heute verbreiteten Lithium-Ionen-Batterien, die in der Praxis allerdings erst zu ca. einem Drittel erreicht worden ist. Ein weiterer Vorteil liegt im Tieftemperaturverhalten der Batterie. Zahlreiche irreversible Nebenreaktionen von intermediären Polysulfidverbindungen u. a. mit den verwendeten Elektrolyten führen allerdings zu Degradation, d. h. zu Kapazitätsverlust und stark reduzierter Lebensdauer. Sicherheitsbedenken ergeben sich aus der hohen Reaktivität von Schwefel und metallischem Lithium.

In der Lithium-Luft-Batterie wird die Kathode durch porösen, luftdurchlässigen Kohlenstoff realisiert, die Anode besteht aus metallischem Lithium. Weil die Luft aus der Umgebung entnommen werden kann, wird die Kapazität einzig durch die Anodengröße bestimmt. Die für den kommerziell verfügbaren Einsatz erwartete Energiedichte ist sehr hoch (etwa Faktor 7 bis 10 gegenüber heutigen Lithium-Ionen-Batterien). Gegenüber den zuvor beschriebenen Konzepten stellt die Lithium-Luft-Batterie in punkto Energiedichte das Optimum der lithiumbasierten Systeme dar.

Metall-Luft-Batterien unter Verwendung von Zink, Aluminium oder Magnesium stellen weitere nichtlithiumbasierte Batterietechnologien mit Relevanz für die Elektromobilität dar. Metall-Luft-Batterien ermöglichen die höchsten erreichbaren Energiedichten von Batterien, sind aber in der Regel Primärbatterien und daher nicht wiederaufladbar. Ein mechanisches Austauschen der Metalle ähnlich dem Prinzip einer Brennstoffzelle, jedoch mit festem Brennstoff, ist zwar möglich, für den Einsatz in Elektrofahrzeugen sollten die Metall-Luft-Systeme aber elektrisch nachladbar sein. Dabei wird die Zink-Luft-Batterie

in den kommenden 10 Jahren erst als mechanisch nachladbare und schließlich als elektrisch nachladbare Batterie erwartet. Zurzeit ist die Anzahl erreichbarer Ladezyklen noch deutlich zu gering. Aluminium- und Magnesium-Luft-Batterien stehen vor ähnlichen Herausforderungen wie Lithium-Luft-Systeme, und es ist offen, ob sie bis 2030 als elektrisch wiederaufladbare Batterien realisiert werden können.

Die verschiedenen lithiumbasierten sowie nichtlithiumbasierten Batterietechnologien und neuere Konzepte eignen sich in unterschiedlicher Weise für den Einsatz in Elektrofahrzeugen. Hauptkriterien bei der Auswahl des geeignetsten Batteriesystems sind die Energie- und Leistungsdichte, die Ladekapazität sowie die Lebensdauer (gemessen durch die Zahl maximal durchführbarer Lade-Entlade-Zyklen). Von Relevanz sind außerdem Nebenaspekte wie die Spannungsstabilität während des Entladevorgangs, die Dauer eines Ladevorgangs, Degradationseffekte, die zu einer Begrenzung der kalendarischen Lebensdauer führen, sowie die Kosten des Batteriesystems. Die Sicherheit ist ein Schlüsselfaktor und stellt gewissermaßen ein Ausschlusskriterium dar.

Neben der Erfüllung technischer Spezifikationen wird von modernen Batteriesystemen auch die umweltverträgliche Produktion und eine kostengünstige und umweltfreundliche Entsorgung erwartet. Eine frühzeitige

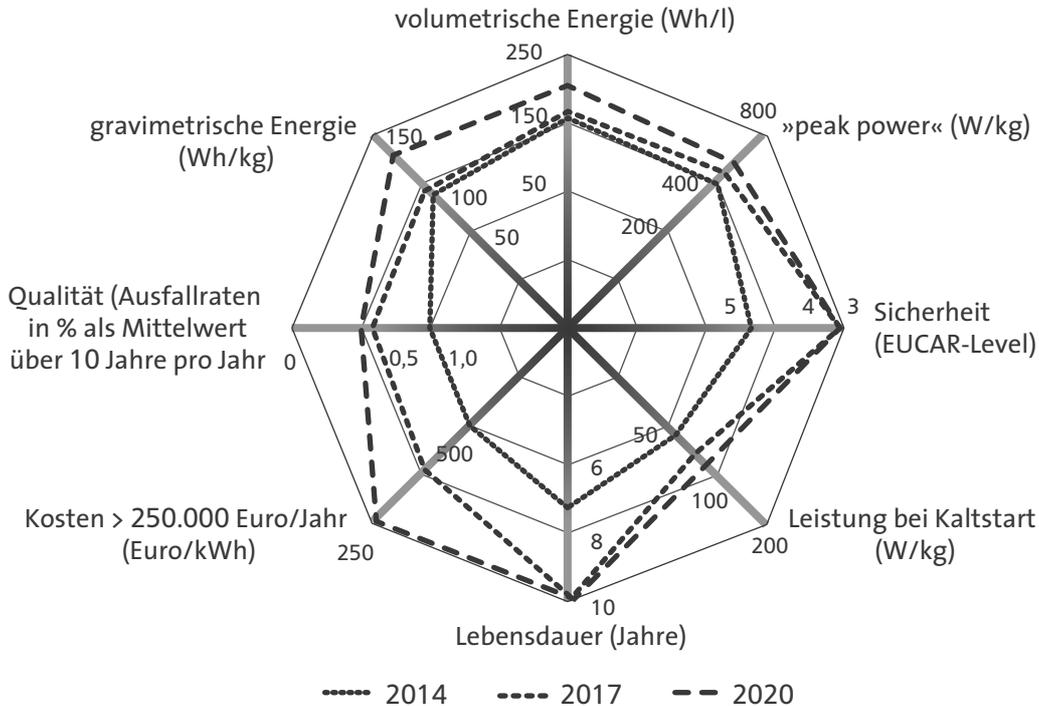
Kopplung der Produktentwicklung und des späteren Batterierecyclings erlaubt den konsequenten Aufbau einer nachhaltigen und ökologischen Batterietechnologie. Zudem ist die Entwicklung von Verfahren zur Rückgewinnung von Lithium und Kobalt von strategischer Bedeutung für die Sicherung von Rohstoffen für die Batterieproduktion in Deutschland.

**Ergänzende Technologiekonzepte**

Elektromobile stellen teilweise auch Leistungsanforderungen an elektrische Energiespeicher, welche nicht in optimaler Weise durch Batterien erbracht werden können. So bieten beispielsweise Hochleistungsdoppelschichtkondensatoren (sogenannte Supercaps) eine hohe, kurzfristig zur Verfügung stehende Leistungsdichte sowohl zur Aufnahme kurzzeitig hoher Ladeleistungen bei plötzlichen Bremsvorgängen als auch zum Decken von Bedarfsspitzen und stellen damit eine gute Ergänzung zu Batterien mit hohen Energiedichten dar. Ihr Einsatz glättet den Leistungseingang bzw. die Leistungsentnahme aus Batterien und erhöht dadurch deren Lebensdauer. Um Supercaps bis zum Einsatz in Elektromobilen weiterzuentwickeln, sind Steigerungen des Wirkungsgrades, eine deutliche Verbesserung der Herstellungsqualität und der Zuverlässigkeit sowie eine erhebliche Senkung der Herstellungskosten unverzichtbar (NPE 2010a).

Abbildung II.1

**Stand und Entwicklungsziele für Batterien**



Quelle: NPE 2010b

Auch hybride Technologiekonzepte (z. B. die Kombination der Lithium- und Brennstoffzellentechnologie) sind zukunftsweisend, da Vorteile der unterschiedlichen Technologien ausgenutzt werden können. Hinsichtlich ihrer Entwicklung und ihres Einsatzes sind natürlich jeweils die erreichbare Wirtschaftlichkeit und notwendige Rahmenbedingungen gegenüber den existierenden technologischen Anwendungen abzuwägen. Abbildung II.1 stellt den derzeitigen Stand und die Entwicklungsziele bis 2020 für Batterien aus Sicht der Experten der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE 2011a) dar. Schwerpunkte der Batterieweiterentwicklung sind Kostensenkung, Steigerung von Energiedichten und Lebensdauer sowie Erhöhung von Leistungsparametern und Sicherheit.

### 1.1.2 Brennstoffzelle

Fahrzeuge können auch durch die direkte Verstromung von Treibstoffen in Brennstoffzellen mit elektrischer Energie versorgt werden. Brennstoffzellen sind galvanische Zellen, in deren Kammern kontinuierlich Brennstoffe und Oxidationsmittel eingeleitet und die Reaktionsprodukte abgeführt werden. Die dabei ablaufenden elektrochemischen Prozesse sind prinzipiell mit denen in Batterien vergleichbar, jedoch stellen im Unterschied zu Batterien Brennstoffzellen keine Energiespeicher dar. Ein mit Brennstoffzellen ausgerüstetes Fahrzeug verlangt somit immer auch einen Kraftstofftank, eine Versorgungsinfrastruktur für die Betankung und eine Kraftstoffproduktion. Zudem nehmen die für die Aufrechterhaltung des Betriebes notwendigen Zusatzgeräte zur Wärmeregulation und Abscheidung der Reaktionsprodukte oftmals einen großen Anteil am Gesamtsystem „Brennstoffzelle“ ein. Im Unterschied zu Batterien werden Brennstoffzellen nicht auf den reversiblen Ablauf der elektrochemischen Reaktionen ausgelegt. Eine direkte Rückumwandlung von Bremsenergie in Brennstoff ist technisch nicht sinnvoll, stattdessen werden in FCEV zusätzlich kleine Batteriesysteme zu diesem Zweck eingesetzt. Für einen aussagekräftigen Vergleich von FCEV und Elektrofahrzeugen muss somit die gesamte Kette der Energiebereitstellung und Energienutzung („well to wheel“) betrachtet werden. Einzeldaten ausschließlich der Brennstoffzelle über den Lebenszyklus hinweg haben für eine Systemanalyse daher nur begrenzte Aussagekraft und dienen primär dem Vergleich von Brennstoffzellentypen untereinander sowie der Optimierung der Technologie. Ähnlich wie Batterien unterscheiden sich Brennstoffzellen voneinander durch die verwendeten Brennstoffe und Oxidationsmittel (meist Wasserstoff und Sauerstoff), das Kathoden- und Anodenmaterial sowie den Elektrolyten (der häufig namensgebend ist). Am weitesten fortgeschritten ist die Forschung zu Wasserstoffbrennstoffzellen, in denen reiner Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser reagieren.

Als technisch ausgereifteste Wasserstoffbrennstoffzelle gilt die „proton exchange membrane fuel cell“ (PEM-FC), auch als „polymer electrolyte fuel cell“ (PEFC) bekannt, in der eine dünne und leichte Membran aus sulfoniertem Teflon die Kathoden- von der Anodenkammer räumlich trennt, jedoch die Passage von H<sup>+</sup>-Ionen (Protonen) ermöglicht. Als Katalysator kommt Platin zum Einsatz.

Weil bei H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Brennstoffzellen die höchsten Wirkungsgrade bei niedrigen Temperaturen erreicht werden, ist es sehr günstig, dass die PEM-FC bereits im Niedrigtemperaturbereich von ca. 80 °C arbeitet. Dadurch reagiert sie allerdings auch empfindlich auf Brenngasverunreinigungen im eingesetzten Wasserstoff, weshalb das Gas vorab intensiv gereinigt werden muss. Damit verringert sich der elektrische Systemwirkungsgrad auf nur 35 Prozent, was in den kommenden Jahren jedoch deutlich ansteigen soll (Wietschel et al. 2010a).

Für technische Anwendungen wird meist eine Vielzahl von PEM-Brennstoffzellen zu einem Brennstoffzellenstack zusammengeschaltet. Für typische Leistungsparameter von 150 V und 50 kW werden ca. 250 Brennstoffzellen benötigt. Diese Stacks haben ein geringes Gewicht und dadurch eine hohe Energiedichte und gestatten kompakte Bauformen. Die PEM-FC startet schnell, zeigt aber im kühlen Zustand nur geringe Leistung. Sie benötigt zudem aufwendiges und schweres Zubehör (Kompressoren, Pumpen), das 30 Prozent der im System erzeugten Energie verbraucht.

Die PEM-FC wird unter den existierenden Brennstoffzellentypen für den Einsatz in Fahrzeugen favorisiert. Sie findet im Rahmen laufender Demonstrationsprojekte Anwendung (z. B. in der B-Klasse F-CELL der Daimler AG). Von den Fahrzeugherstellern werden Lebensdauern von 2 000 Betriebsstunden garantiert, was einer Fahrleistung von ca. 100 000 km entspricht, und es werden Lebensdauern von 5 000 Betriebsstunden in den nächsten Jahren erwartet (Wietschel et al. 2010b). Die Lebensdauer der Brennstoffzellen ist stark abhängig von der Anzahl der On-off-Schaltprozesse, die die Wasserregulation an der Membran erschweren und diese dadurch schädigen. Eine modifizierte Betriebsweise, die Stop-and-go-Vorgänge vermeidet bzw. reduziert, ist geeignet, die Lebensdauer auf bis zu 12 000 Betriebsstunden zu verlängern. Dies wurde z. B. anhand eines Versuchs mit dem Stadtbus „Citaro FuelCELL-Hybrid“ demonstriert (Wietschel et al. 2010b).

Eine technologische Weiterentwicklung der PEM-FC ist die „direct methanol fuel cell“ (DMFC), in der anstelle von Wasserstoff Methanol als Brennstoff verwendet wird. An der Anode wird dazu der flüssige Brennstoff katalytisch in CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> zerlegt. Die Weiterverstromung des so bereitgestellten Wasserstoffs entspricht der PEM-FC. DMFC werden bei ca. 120 °C betrieben und erreichen einen Wirkungsgrad von ca. 40 Prozent. Der direkte Einsatz von flüssigem Methanol erleichtert die Speicherung des Brennstoffs, sodass das Gesamtsystem aus Brennstoffzelle und Speicher eine fünfmal höhere Energiedichte aufweist als Lithium-Ionen-Batterien. Wesentliche Schwierigkeiten liegen in dem aufwendigen Einsatz von Katalysatoren und den Verlusten, die durch die direkte Diffusion von Methanol durch die Membran entstehen (Pehnt 2002; DOE 2006).

Eine Alternative stellen alkalische Brennstoffzellen („alkaline fuel cell – AFC) dar. Der Elektrolyt ist Kalilauge (KOH), in der OH<sup>-</sup>-Ionen den Ladungstransport bewerkstelligen. AFC haben lastabhängig gute Wirkungsgrade

zwischen 45 und 60 Prozent und arbeiten bei niedrigen Betriebstemperaturen zwischen 25 und 70 °C (FuelCells-Today 2006). Betriebsdauern von mehr als 8 000 Stunden konnten wegen begrenzter Materialstabilitäten nicht realisiert werden, trotzdem finden AFC Anwendung in Nischenbereichen wie der Raumfahrt oder in Unterseebooten. Weitere Varianten an Brennstoffzellen sind die Phosphorsäurebrennstoffzelle („phosphoric acid fuel cell“ – PAFC), in der ein phosphorsaures Gel als Elektrolyt eingesetzt wird, die Schmelzkarbonatbrennstoffzelle („molten carbonate fuel cell“ – MCFC), in der diese Rolle geschmolzene Lithium- und Kaliumkarbonate übernehmen, oder die Festoxid-Brennstoffzelle („solid oxide fuel cell“ – SOFC), in der eine Zirkonoxidkeramik den Transport von Sauerstoffionen bewerkstelligt. Aufgrund der hohen Betriebstemperaturen zwischen 200 °C (PAFC) und 750 °C (SOFC) werden diese Brennstoffzellen aber nicht als relevante Kandidaten für Anwendungen im Bereich mobiler Systeme gehandelt.

Eine sinnvolle Beurteilung der Brennstoffzellentechnologie verlangt jedoch die gleichzeitige Analyse der für die Brennstoffe verwendeten Speichersysteme. Während flüssige Brennstoffe wie Methanol oder Ameisensäure technisch ohne größere Schwierigkeiten ähnlich wie Benzin gespeichert werden können, stellt die Speicherung von gasförmigem Wasserstoff eine technisch noch nicht zufriedenstellend gelöste Herausforderung dar. Im Kontext der Mobilität kann Wasserstoff entweder unter hohem Druck, kalteverflüssigt oder auch als gebundenes Metallhydrid gespeichert werden. Letzteres ist aufgrund des großen Gewichts des Metallspeichers noch nicht realisierbar – und auch die Masse von Druck- oder Kältetanks ist relativ zur transportierten Energiemenge groß, was die Reichweite der Fahrzeuge begrenzt (Kaiser et al. 2008).

Favorisiert und in Prototypen eingesetzt werden Drucktanks aus Kompositmaterialien und Kohlenstofffasern, in denen Wasserstoff unter bis zu 700 bar gespeichert werden kann. Weil für die sichere Speicherung des Wasserstoffs aber Drucktanks aus Materialien mit einem sehr hohen Eigengewicht eingesetzt werden, nimmt die tatsächliche Wasserstofffüllung nur wenige Gewichtsprozent ein (Sauer 2006). Trotz der physikalisch hohen Energiedichte von Wasserstoffgas wird daher nur eine niedrige gravimetrische Energiedichte des Gesamtsystems in einem FCEV erzielt. Die damit erzielbaren Reichweiten liegen mit 350 km dennoch über denen gegenwärtiger Batteriefahrzeuge (VDI 2011). Technische und wirtschaftliche Verbesserungen erwartet man durch Verwendung neuer Materialien v. a. im Hinblick auf das Gewicht, die Materialermüdung (bedingt durch wiederholte Druckschwankungen bei Betankungs- und Entnahmevorgängen), die Korrosionsbeständigkeit des Wasserstoffsystems sowie die Kosten.

Alternative Speichertechnologien von Wasserstoff beruhen auf dessen Verflüssigung bei -252 °C und anschließender Speicherung in Tieftemperaturkryostaten. Während flüssiger Wasserstoff eine fast doppelt so hohe Dichte aufweist wie gasförmiger bei 700 bar Druck und

sich somit eine höhere Energiedichte realisieren lässt, ist die Verflüssigung ein energieintensiver Prozess, der den Wirkungsgrad der Wasserstoffspeicherung deutlich verschlechtert. Hinzu kommt die begrenzte Lagerfähigkeit von Wasserstoff in Kryostaten, da der unvermeidliche Wärmeeintrag aus der Umgebung zum Abdampfen von Wasserstoff und damit zu hohen Verlusten von ungefähr 1,5 Prozent pro Tag führt (Jordan 2008). Da entweichender Wasserstoff in bestimmten Mischungsverhältnissen mit Luft explosives Knallgas bildet, ist zudem Flüssigwasserstofffahrzeuge die Nutzung von Tiefgaragen verboten.

Weiterhin werden Speichertechnologien für den mobilen Einsatz in Fahrzeugen diskutiert, die auf Chemisorption basieren, d. h. der Einlagerung von Wasserstoff in die Gitterstruktur von Metallen unter Bildung von Metallhydriden. Der Wasserstoff wird dabei chemisch nur schwach gebunden und kann durch Reduzierung des Umgebungsdruckes sowie eine mäßige Erwärmung des Speichers wieder freigesetzt werden. Die gegenwärtig leistungsfähigsten Metallhydridverbindungen (Ball/Wietschel 2009) sind bezogen auf die volumetrische Speicherdichte  $Mg_2FeH_6$  mit 150 kg Wasserstoff/m<sup>3</sup> (was der doppelten Dichte von flüssigem Wasserstoff entspricht), bzw. bezogen auf die gravimetrische Speicherdichte  $LiBH_4$  mit 18 Gewichts-Prozent Wasserstoff. Neben den Speicherdichten kommt der Reaktionsgeschwindigkeit beim Betanken und Wiederfreisetzen des Wasserstoffs (d. h. bei der Bildung und dem Zerfall des Metallhydrids) und den dafür erforderlichen Umgebungsparametern Druck und Temperatur besondere Bedeutung zu. Die aktuelle Forschung sucht insbesondere nach geeigneten Katalysatoren zur Beschleunigung dieser Reaktionen. Natriumalanat ( $NaAlH_4$ ) gilt derzeit als das Metallhydrid mit dem besten Kompromiss an technisch wünschenswerten Eigenschaften (Schüth et al. 2007). Auch die Nanostrukturierung von Metallhydriden hat zu einer erheblichen Beschleunigung der Reaktionskinetik beigetragen, sodass heutzutage die Betankung von ausgewählten Metallhydridspeichern innerhalb von einigen Minuten möglich ist. Metallhydridspeicher verlangen nach einem leistungsfähigen Wärme-managementsystem, um die beim Betanken freigesetzte Reaktionswärme abzuführen und die Freisetzung von Wasserstoff zu steuern. Die Notwendigkeit einer aktiven Freisetzung des Wasserstoffs durch Erwärmen zeigt sich bei Anwendungen im Fahrzeugbereich als Vorteil, da sie die schlagartige Freisetzung des gesamten Speichervolumens bei Beschädigung des Speichers infolge von Unfällen verhindert. Diskutiert werden ebenfalls Hybridspeicher, womit in diesem Zusammenhang die Speicherung in Metallhydriden unter moderatem Druck verstanden wird.

Beim Einsatz von Brennstoffzellen in Fahrzeugen ergibt sich ein im Vergleich zum elektrischen Systemwirkungsgrad von 35 Prozent auf ca. 20 bis 25 Prozent verringerter Gesamtwirkungsgrad der eingesetzten elektrischen Energie, wobei die anfängliche Elektrolyse des Wassers (Einzelwirkungsgrad ca. 70 bis 80 Prozent), die Speicherung des Wasserstoffs und seine Rückstromung in PEM-Brennstoffzellen (Einzelwirkungsgrad ca. 50 bis 60 Prozent) einfließen. Dieser Gesamtwirkungsgrad liegt deut-

lich unter dem Wirkungsgrad von Batteriesystemen, welche unter Berücksichtigung von Elementen der Ladeinfrastruktur ca. 70 Prozent erreichen.

## 1.2 Leistungselektronik

Nach dem Batteriesystem trägt die Leistungselektronik am meisten zur Wertschöpfung eines Elektromobils bei. Die Wertschöpfungsanteile einzelner Komponenten werden ausführlich in Kapitel III.2.2 betrachtet. Die Leistungselektronik steuert den Leistungsfluss durch das elektrische Antriebssystem, leistet die bedarfsgerechte und effiziente Anpassung von Spannungen, Strömen und Frequenzen zwischen den verschiedenen elektrischen Komponenten und übernimmt Regel- und Steuerungsfunktionen. Ihre Kernstücke sind Halbleiterbauelemente, die auf den Durchsatz hoher Leistungen optimiert werden (Scharf 2007).

Elektromobile stellen hohe Anforderungen an die verwendete Leistungselektronik, die gleichermaßen platzsparend wie gewichtsarm sein soll, temperaturstabil in einem Bereich von  $-40$  bis  $85$  °C, feuchtigkeitsbeständig, robust gegenüber Vibrationen und Stößen und zuverlässig während der gesamten Lebensdauer. Besondere Herausforderungen stellen die häufigen Leistungswechsel beim Beschleunigen und Bremsen des Fahrzeugs dar, die zu Temperatursprüngen in den Bauelementen und zu Materialermüdung an Lötstellen führen und somit die Lebensdauer der Bauteile verkürzen.

Leistungselektronische Systeme umfassen neben Leistungshalbleitern und Kühlung auch Zwischenkreiskondensatoren, Schutzfunktionen und teilweise eingebettete Microcontroller, die eine Programmierung der Elektronik per Software ermöglichen. Bei Niederspannungsanwendungen bis ca. 200 V dominieren Leistungs-Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren (Power-MOSFET), bei höheren Spannungen kommen Bipolartransistoren (IGBT) zum Einsatz (Sirch 2008).

In Elektromobilen besteht die wesentliche Aufgabe der Leistungselektronik darin, die Gleichspannung aus einer Hochspannungsbatterie in Wechselspannung für die Antriebsmotoren umzuwandeln. Diese Funktion übernehmen Pulswechselrichter (AC/DC-Wandler, Antriebsumrichter). Sie werden bidirektional ausgelegt, d. h., ein Leistungsübertrag ist in beide Richtungen möglich, um Bremsenergie zurückzugewinnen. Im Vordergrund stehen ein hoher Wirkungsgrad und eine hohe Leistungsdichte. Andere AC/DC-Wandler bilden die Schnittstelle zwischen dem öffentlichen Stromnetz und dem Elektromobil. Sie transformieren dabei einen eingehenden Wechselstrom von 220 V bzw. Drehstrom von 360 V auf das Spannungsniveau der Batterie. Ein Lademanagementsystem steuert und optimiert den zeitlichen Verlauf von Strom und Spannung während des Ladevorgangs. Sofern sie als On-board-Unit ausgelegt werden, ist das entscheidende Gütekriterium ihre Leistungsdichte, bei Off-board-Anwendungen der Wirkungsgrad. Werden bidirektionale Ladevorrichtungen gewählt, ist eine Abgabe von Batteriestrom in das öffentliche Netz, z. B. als Regelenergie, möglich.

DC/DC-Wandler dienen zur Reduktion der Batteriespannung auf das Niveau des Bordnetzes (14 V). Auch sie werden bidirektional ausgelegt, um im Fall einer leeren Batterie das Fahrzeug mit einem Starthilfekabel starten zu können.

Eine besondere Bedeutung kommt der Erhöhung des Wirkungsgrades der Energiewandler zu, da die aufwendig in Batterien gespeicherte oder in Brennstoffzellen generierte elektrische Energie besonders wertvoll ist. Umwandlungsverluste schlagen sich direkt im Gesamtwirkungsgrad des Elektromobils sowie seiner Reichweite nieder. Die verbleibende Verlustleistung muss mittels erweiterter aktiver Kühlverfahren abgeführt werden, wobei gleichermaßen luft- und wassergekühlte Systeme diskutiert werden (Sirch 2008).

Der Übergang von Silizium zu Galliumnitridhalbleiterbauelementen ist gerade mit Blick auf Anwendungen im Bereich der Elektromobilität erneut in der Diskussion, da Galliumnitridhalbleiterbauelemente bei höheren Temperaturen einsetzbar sind, sodass der Kühlaufwand der Leistungselektronik sinkt. Zudem haben Galliumnitridtransistoren eine höhere Durchbruchfeldstärke, was die Verwendung von Bauteilen kleinerer Abmessungen ermöglicht. Selbstsperrende Galliumnitridtransistoren sind Gegenstand aktueller Entwicklungsarbeit und werden mit Hinblick auf Leckströme und Innenwiderstand optimiert. Entwicklungsaufgaben liegen neben dem Bereich der Materialtechnologien auch bei der Entwicklung neuer Produktionstechnologien und in der Halbleitersimulation.

Bei der Optimierung der verwendeten Materialien und Schaltungen ist eine starke Abhängigkeit von der jeweiligen Leistungsklasse des Elektromobils zu erwarten. Momentan wird eine wirkortnahe Systemintegration der Leistungselektronik favorisiert. Dies reduziert den Verkabelungsaufwand und führt zu kompakteren Abmessungen und niedrigeren Kosten der Komponenten.

## 1.3 Elektromotoren

Elektromotoren haben eine fast 2 Jahrhunderte umfassende Geschichte und entsprechende Entwicklung durchlaufen. Sie wandeln elektrische in mechanische Energie um und werden in Arbeitsmaschinen und Zügen bereits lange genutzt, da sie Vorteile mit sich bringen, wie einen hohen Wirkungsgrad, ein maximales Drehmoment bei niedriger Drehzahl, einen einfachen und kostengünstigen Aufbau sowie geringe Wartung. Elektromotoren können nach der Art ihrer Stromquelle, der Konstruktionsweise, ihrer Anwendung oder der erzeugten Bewegungsart klassifiziert werden. Etwa 96 Prozent der in Europa verkauften Elektromotoren werden mit Wechselstrom betrieben (darunter dominieren die Drehstromasynchronmotoren), der Rest sind Gleichstrommotoren (Plötz/Eichhammer 2011).

Es werden zwei Teile des Motors unterschieden, in welchen magnetische Felder entstehen: ein fester Teil – der Stator (meist außen) – sowie ein rotierender Teil des Motors – der Rotor (meist innen). Eines der Felder oder beide müssen während der Drehung des Motors gedreht

werden, häufig durch Umkehr der Pole. Dadurch wird mithilfe der Lorentzkraft eine Drehbewegung des Rotors bewirkt. Je nach Art des Motors besteht der Stator aus Permanentmagneten oder Elektromagneten (zur Erzeugung eines wechselnden Magnetfeldes). Der Rotor kann aus Permanentmagneten (Synchronmotor), einem umwickelten Eisenkern (Schrittmotor bzw. Reluktanzmotor) oder einer Kurzschlusswicklung (Asynchronmotor) bestehen (Plötz/Eichhammer 2011).

Das bevorzugte elektrische Antriebsaggregat für Elektrofahrzeuge ist der bürstenlose permanentmagnetisch erregte Drehstrom-Synchronmotor. Sein Rotor trägt leistungsfähige Permanentmagnete, die in Pole unterteilt sind. Der Stator ist mit der entsprechenden Anzahl von Kupferwicklungen ausgerüstet, die so geschaltet werden, dass sie den Rotor mit der gewünschten Drehzahl ziehen. Die Regelung von Drehzahl und Drehmoment erfolgt über einen Umrichter. Im Generatorbetrieb, beim Bremsen des Fahrzeugs, induziert das magnetische Feld der Permanentmagnete im Stator eine elektrische Spannung und der erzeugte Strom wird in den Fahrzeugakkumulator eingespeist. Mit den heute verfügbaren Hochleistungspermanentmagneten aus Neodym-Eisen-Bor-Legierungen können solche Motoren 20 bis 30 Prozent kompakter und leichter gebaut werden als die konkurrierenden Asynchron-Käfigläufermotoren und die Reluktanzmotoren. Gewichtseinsparung ist für Elektrofahrzeuge, deren Reichweite auch mit den heute verfügbaren Lithium-Ionen-Akkumulatoren stark eingeschränkt bleibt, ein essenzieller Erfolgsfaktor (Angerer et al. 2010).

Das Motorkonzept des bürstenlosen permanentmagnetisch erregten Synchronmotors wurde aus dem klassischen Dynamoprinzip fortentwickelt. Beim Dynamo rotiert ein Rotor mit elektrisch erregten Spulen in einem Stator aus Permanentmagneten. Die Stromzuführung zum Rotor erfolgt über Kohlebürsten, die auf dem Kollektor schleifen. Bürsten und Kollektor nutzen sich durch den dauernden kraftschlüssigen Kontakt ab und sind Quellen für Motorstörungen und Ausfälle. Mit der Entwicklung der starken Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnete wurde es in den 1990er Jahren möglich, die Magnete im Rotor unterzubringen und die elektrisch erregten Spulen in den Stator zu verlagern. Dieses Motorkonzept benötigt keine Stromzuführung zu beweglichen Motorteilen, und es entsteht ein bürstenloses, robustes und wartungsarmes Motorkonzept. Bürstenlose permanentmagnetische Synchronmotoren werden heute in hohen Stückzahlen für Servomotoren (z. B. Kfz-Fensterheber) produziert und dringen in weitere Applikationen, beispielsweise Haushaltsgeräte, vor. Die Motoren zeichnen sich durch ein hohes Drehmoment und schnelles Ansprechverhalten beim Anfahren und bei der Drehzahlstellung aus. Es gibt verschiedene Hersteller von Synchronmotoren für Elektroautos, wie Continental AG, Daimler AG, Robert Bosch GmbH, Getrag Getriebe- und Zahnradfabrik Hermann Hagenmeyer GmbH & Cie KG, Siemens AG, WITTENSTEIN AG, General Motors Company, BRUSA Elektronik AG oder auch ZF Friedrichshafen AG (Angerer et al. 2010).

Eine Alternative zum Permanentmagnetmotor ist der sogenannte Schritt- bzw. Reluktanzmotor. Auch dessen Rotor enthält keine Kupferwicklungen, sondern besteht aus weichmagnetischen Polen, bevorzugt Eisen. Der Rotor wird durch die Reluktanzkraft (die Anziehungskraft, die ein Elektromagnet auf Eisen ausübt) bewegt. Die Zahl der weichmagnetischen Pole des Rotors ist geringer als die Zahl der elektrisch erregten Statorpole, um eine exakte Nordpol-Südpol-Stellung von Stator und Rotor zu vermeiden, bei der kein Drehmoment auf den Rotor ausgeübt werden kann. Die Statorwicklungen werden geschaltet, um die gewünschte Drehbewegung des Rotors einzustellen. Reluktanzmotoren werden auch als SR-Motoren bezeichnet. Ihr Drehmoment erreicht nicht die Werte von Permanentmagnetmotoren, ihr Wirkungsgrad ist aber vergleichbar (Angerer et al. 2010).

Eine weitere Alternative zum Permanentmagnetmotor ist der Induktions-, Asynchron- oder Käfigläufermotor. Der Rotor des Standardasynchronmotors enthält keine Kupferwicklungen, sondern kurzgeschlossene Aluminiumstäbe, in denen durch das elektrisch erzeugte Magnetfeld des Stators ein Stromfluss induziert wird. Es gibt neuerdings auch Motoren mit Kupferrotoren, die höhere Wirkungsgrade erreichen (Deutsches Kupferinstitut 2011). Die Drehzahl des Motors wird durch die Polpaarzahl der Ständerwicklungen und die Frequenz des elektrischen Drehfelds bestimmt. Drehzahlregelbare Asynchronmotoren benötigen einen Umrichter, der die Frequenz des Drehstromfeldes verändert. Der Drehstromasynchronmotor ist bürstenlos und durch seine Robustheit und Wartungsarmut das gebräuchlichste Antriebsaggregat in der Industrie geworden (Plötz/Eichhammer 2011). Er wird in allen Leistungsklassen in hohen Stückzahlen für stationäre Antriebe von Pumpen, Verdichtern und anderen Aggregaten gebaut (Angerer et al. 2010).

Die Entwicklung effizienter Elektromotoren für Elektrofahrzeuge wird heute von zahlreichen Forschungseinrichtungen und Unternehmen vorangetrieben, weshalb die tatsächlichen Zukunftschancen der einzelnen Motorkonzepte selbst schwer einschätzbar sind. Der permanentmagnetisch erregte bürstenlose Synchronmotor ist zwar ein robustes, kompaktes und leichtes Aggregat. Seine Neodym-Eisen-Bor-Magnete enthalten aber etwa 33 Prozent Neodym und 10 Prozent Dysprosium, beides Metalle der Seltenen Erden. Die zukünftige Versorgung mit diesen Seltenen Erden ist durch die Dominanz Chinas im Rohstoffmarkt – 97 Prozent der Metalle der Seltenen Erden, darunter Neodym, werden heute in China produziert – Risiken unterworfen. Um die Versorgung der eigenen, stark wachsenden Wirtschaft mit Seltenen Erden sicherzustellen, fasst China Exportrestriktionen für diese Rohstoffe ins Auge. Zwar werden gegenwärtig mit Hochdruck Vorkommen außerhalb Chinas erschlossen, darunter in Australien und den USA. Es wird aber noch einige Zeit dauern, bis diese Minen nennenswert zur Versorgung der weltweiten Nachfrage beitragen können. Somit gewinnen die Alternativen zum Permanentmagnetmotor als Rückfallposition dann an Bedeutung, wenn die Versorgung mit Neodym stocken sollte. Der asynchrone Drehstrom-Käfigläufermotor, den Audi in Hybridfahrzeugen nutzt, ist

beispielsweise ein sehr belastbarer Motor. Dessen Baugröße und Gewicht liegt allerdings um 20 bis 30 Prozent über dem des Permanentmagnetmotors (Angerer et al. 2010). Sein Kupferbedarf unterscheidet sich nicht wesentlich vom Permanentmagnetmotor, er benötigt allerdings keine dauermagnetischen Werkstoffe und damit keine Metalle der Seltenen Erden wie Neodym und Dysprosium (Angerer et al. 2010).

Welche Art elektrischer Antriebsmotoren sich zukünftig in Elektrofahrzeugen durchsetzen wird, hängt somit von mehreren Faktoren ab, wie der Entwicklung von Rohstoffpreisen bzw. deren Verfügbarkeit, technischen Leistungsparametern und Möglichkeiten des Designs kompakter Bauformen sowie den Kosten bei Betrachtung über die gesamte Lebensdauer hinweg.

**1.4 Ladeinfrastruktur**

Die Ladung der Batterie kann über unterschiedliche Technologien erfolgen. Welche Möglichkeiten im Einzelnen bestehen und wie diese technisch zu bewerten sind, wird im vorliegenden Kapitel nach einer allgemeinen Vorstellung der Ladetechnologien anhand der folgenden Faktoren diskutiert:

- Ort und Zugang zu Lademöglichkeiten: Wo ist Ladeinfrastruktur aufzubauen?
- Anschlussleistung: Wie schnell lässt sich laden?
- Anwendungsszenarien: Welche Konfigurationen sind in der Praxis sinnvoll?

Die Darstellung im vorliegenden Kapitel folgt direkt Kley (2011).

**1.4.1 Übersicht über Ladekonzepte**

In den meisten Konzepten für die Ladung von Elektrofahrzeugen wird die Batterie direkt im Fahrzeug geladen, indem das Fahrzeug entweder mithilfe eines Kabels oder kabellos an eine externe Ladeinheit angeschlossen wird. Im Fahrzeug muss eine dazu passende Ladetechnik vorhanden sein. Die kabelgebundene Verbindung wird auch als *konduktives* Laden bezeichnet. Die kabellose Ladetechnik überträgt Energie ohne einen physisch bestehenden elektrischen Kontakt. Von den theoretischen Möglichkeiten der kabellosen Energieübertragung stellt jedoch nur die *induktive* Ladung eine praktikable Alternative dar (Schraven et al. 2011). Ein weiteres Konzept sieht vor, die leere Batterie aus dem Fahrzeug zu entnehmen und mit einer vollgeladenen Batterie zu tauschen. In diesem als *Batteriewechsel* bezeichneten Konzept wird anschließend die leere Batterie an einer Station aufgeladen und steht somit für den nächsten Einsatz wieder zur Verfügung.

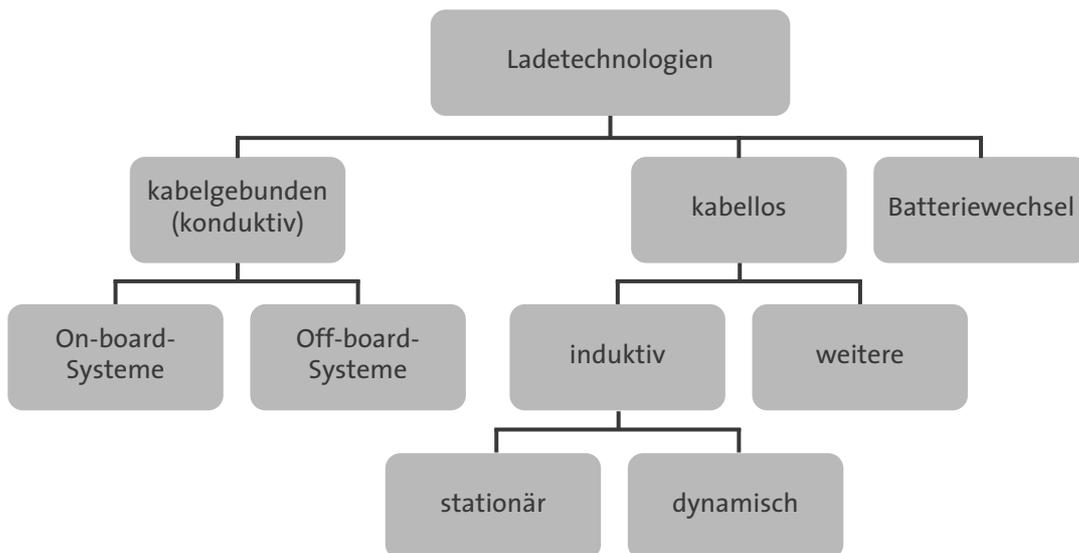
Abbildung II.2 gibt einen Überblick über die verschiedenen Ladetechnologien. Im Folgenden werden die drei genannten Konzepte kurz hinsichtlich ihres Funktionsprinzips und technischen Entwicklungsstands näher betrachtet. Daran anschließend werden ihre Vor- und Nachteile einander zusammenfassend gegenübergestellt.

**Konduktives Laden**

Für konduktives Laden müssen Fahrzeug und Netzanschluss physisch über elektrische Kontakte verbunden sein. Man kann zwei mögliche Systeme für konduktives Laden unterscheiden, die den Ort der Ladeinheit und der Leistungselektronik bestimmen: (i) On-board- vs. (ii) Off-

Abbildung II.2

**Verschiedene Ladekonzepte im Überblick**



Eigene Darstellung nach Kley 2011

board-Systeme. On-board-Systeme benötigen keine spezielle Verbindung zwischen Fahrzeug und Ladeeinheit, sondern können an haushaltsüblichen Wechselstromanschlüssen (in Deutschland 230 V mit einer Absicherung von 16 A) geladen werden. Die Gleichrichtung des Ladestroms erfolgt anschließend im Fahrzeug. Off-board-Systeme bringen die Leistungselektronik in der Ladestation unter und übertragen mit speziell ausgelegten Kabeln Gleichstrom ins Fahrzeug. Für beide Systeme wurden bereits verschiedene Standards vorgeschlagen, die vom Steckerdesign über die zu übertragende Leistung bis hin zu den Kommunikationsprotokollen die Verbindung zwischen Fahrzeug und Ladestation definieren. In Deutschland ist seit Kurzem ein Standard für die Ladesteckvorrichtung auf Basis des Normentwurfs DIN IEC 61851-1 gültig. Innerhalb Europas gibt es noch kein einheitliches Steckerdesign, aber die angestrebten Ladeleistungen sind ähnlich. Im amerikanischen und japanischen Raum werden auch die Möglichkeiten einer Gleichstromladung diskutiert (SAE International 2010). An öffentlichen Ladestationen muss ein offen zugängliches Kabel vor Vandalismus geschützt werden.

### Induktives Laden

Eine Alternative zur konduktiven Ladung ist die kabellose Energieübertragung (Schraven et al. 2011). Für die kabellose Ladung ist insbesondere die Energieübertragung durch elektromagnetische Induktion praktikabel, andere kabellose Energieübertragungstechnologien (z. B. die kapazitative oder optische) erfüllen aufgrund der erforderlichen Fahrzeugmaße, der maximalen Übertragungsstrecke und der möglichen Übertragungsleistung nicht die Anforderungen. In der mobilen Fördertechnik und anderen Bereichen des Maschinenbaus haben sich induktive Systeme seit über 20 Jahren bewährt (Schedler 2009). Auch im Bereich der Elektromobilität werden schon seit einigen Jahren entsprechende Ladekonzepte angewendet. Da für den Pkw-Sektor allerdings wichtige Standards noch nicht geklärt sind, handelt es sich bei entsprechenden Elektrofahrzeugen, welche induktiv geladen werden können, nur um Demonstrationsfahrzeuge zur stationären Ladung (im Gegensatz zur Ladung während der Fahrt). Bei den zurzeit auf dem Markt verfügbaren Fahrzeugen ist eine induktive Ladung nicht vorgesehen.

Die technischen Komponenten eines induktiven Ladesystems könnten im Prinzip unterhalb der Straßenoberfläche verlegt werden, was sowohl Witterungseinflüsse als auch die Gefahr von Vandalismus reduzieren würde. Jedoch ist die maximal übertragbare Leistung eines induktiven Systems typischerweise technisch auf 3,7 kW begrenzt (Schraven et al. 2011). Übliche Sicherheitsanforderungen bzgl. elektromagnetischer Felder sind hierbei einzuhalten (Grenzwerte für elektromagnetische Felder nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz – 26. BImSchV).

Für den Einsatz der induktiven Technik zur Ladung von Elektrofahrzeugen gibt es theoretisch zwei wesentliche Konzepte: (i) stationäres Laden an speziell dafür konstruierten Ladestationen, (ii) dynamische Ladung während der Fahrt. Für beide Konzepte gelten die zuvor genannten

Punkte (geringe Entfernung und niedrige Leistung). Für das stationäre Laden, zum Beispiel auf einem Parkplatz, müssen Fahrzeug und Ladestation sehr nah zusammengebracht und genau aufeinander ausgerichtet werden. Der Übertragungswirkungsgrad reduziert sich bei einem Luftspalt von 10 bis 20 cm auf etwa 95 Prozent und lässt somit den Gesamtladewirkungsgrad auf unter 80 Prozent sinken. Eine Rückspeisung der Energie vom Fahrzeug in das Stromnetz ist nicht möglich, da im Fahrzeug nur eine Empfängerspule, aber kein Sender eingebaut ist. Der Einbau eines Senders würde das Gewicht des Fahrzeugs deutlich erhöhen. Außerdem ist eine Rückspeisung vor dem Hintergrund des im Vergleich zum kabelgebundenen Laden niedrigeren Gesamtwirkungsgrads nicht sinnvoll. Für eine detailliertere Darstellung der technischen Ausgestaltung und Herausforderungen sei auf Kley (2011) verwiesen.

Für die dynamische Ladung während der Fahrt müssten zukünftig lange Linienleiter so in der Fahrbahn verlegt werden, dass darüber fahrende Fahrzeuge geladen werden können. Wegen der geringen übertragbaren Leistungen kann eine ausschließliche Versorgung über die dynamische, induktive Ladung nicht erfolgen, sondern nur als Zusatzsystem eingesetzt werden. Wenn ein solches System den Einsatz von reinen Batteriefahrzeugen für Langstrecken ermöglichen soll, müssten ausreichend Strecken – zumindest die Hauptautobahnen – elektrifiziert werden. Dies ist bisher noch nicht erprobt worden. Doch wären dabei einige technische Herausforderungen zu meistern wie z. B. der Hochspannungsanschluss der Fahrbahnen an das Stromnetz oder die Abschirmung der magnetischen Felder, wenn sich kein Fahrzeug über dem Abschnitt des Linienleiters befindet. Auch die Abrechnung der Kosten ist ein komplexes Thema und wäre zu lösen. Letztendlich wäre eine breite Einführung vergleichsweise teuer zu installieren. Insgesamt ist dieses Ladekonzept daher wenig aussichtsreich.

### Batteriewechsel

Um Zwischenladungen auf längeren Strecken zu ermöglichen, hat die Firma Better Place den Batteriewechsel an öffentlichen Tauschstationen entwickelt ([www.betterplace.com/the-solution-switch-stations](http://www.betterplace.com/the-solution-switch-stations)). Anstatt eine leere Batterie zu laden, wird diese in einer Station gegen eine vollgeladene Batterie ausgetauscht. Dieser Vorgang kann laut Better Place in etwa 3 Minuten erfolgen und würde somit die schnelle Weiterfahrt auf längeren Strecken ermöglichen. In der Praxis gestaltet sich der Batteriewechsel aufgrund der etwa 150 kg schweren Batterie und den vorherrschenden hohen Spannungen jedoch relativ kompliziert. Voraussetzung ist, dass die Batterie einfach zugänglich ist. Als Aufbewahrungsort bietet sich daher der Unterboden des Fahrzeugs an, was u. a. Auswirkungen auf den Fahrzeugaufbau hat. Je nach Fahrzeugtyp (Kleinwagen, Mittelklasse oder Limousine) sind die Batterieaggregate zusätzlich stark unterschiedlich in ihrer Größe und Anordnung im Fahrzeug. Verschiedene Batterietypen und -größen erhöhen jedoch die Anzahl der an der Station insgesamt vorzuhaltenden Batterien und damit die Kapitalbindungskosten (Hatton et al. 2009).

Um den Tausch zu vereinfachen und die Anzahl der benötigten Batterien zu reduzieren, müssten die Batterien deutlich stärker standardisiert werden, was Hatton et al. (2009) als „implizierte Batteriestandardisierung“ bezeichnen. Betrachtet man die Variantenvielfalt in der heutigen Automobilausstattung und den Wunsch der Hersteller nach individuellen Marken und Fahrzeugkonzepten, so ist nicht nur aus technischen Gründen, sondern auch aufgrund von Designfragen nicht damit zu rechnen, dass es wenige Standardbatterieaggregate geben wird. Um die Reichweite von Batteriefahrzeugen mit diesem Konzept tatsächlich für den breiten Einsatz zu erhöhen, ist zudem eine hinreichende Anzahl an Wechselstationen nötig. Des Weiteren ist in einem Batteriewechselkonzept die Nutzung der Batterie vom Besitz einer bestimmten Batterie zu trennen, da an der Station eine fremde Batterie in das Fahrzeug getauscht wird.

**Zusammenfassende Betrachtung der verschiedenen Ladekonzepte**

Die Stärken und Schwächen der einzelnen Ladetechnologien sind einander in Tabelle II.2 gegenübergestellt.

Aus technischen Gesichtspunkten lässt sich demnach die konduktive Ladung besonders einfach realisieren und bietet ein breites Spektrum an möglichen Anschlussleistungen. Induktive Ladekonzepte sind aufgrund niedriger Anschlussleistungen und relativ niedriger Übertragungswirkungsgrade nicht so breit einsetzbar. Die stationäre induktive Ladung ist derzeit in der Demonstrationsphase und könnte sich in verschiedenen Nischen durchsetzen.

Die dynamische induktive Ladung hingegen erscheint aufgrund der komplexen Herausforderung, das heutige Straßennetz mit Linienleitern zu versehen sowie die benötigten Anschlussleistungen zur Verfügung zu stellen und diese abrechnen zu können, technisch und finanziell auch in ferner Zukunft nicht attraktiv. Der Batteriewechsel würde ähnlich wie das Tanken konventioneller Fahrzeuge nur eine kurze Unterbrechung der Fahrt bzw. kurze Standzeiten der Elektrofahrzeuge ermöglichen. Allerdings sind für dieses Konzept Änderungen am Fahrzeugaufbau und eine Standardisierung der Batterie erforderlich. Problematisch erscheinen zudem ein erwarteter höherer Verschleiß der Batterien und das hohe Investitionsrisiko beim Aufbau der Infrastruktur. Eine breite Einführung von Batteriewechselsystemen erscheint daher aus heutiger Sicht deutlich weniger wahrscheinlich als das einfache und kostengünstige Laden per Kabel. Aus diesen Gründen werden im Folgenden nur die konduktive und stationäre induktive Ladetechnik weiter betrachtet.

**1.4.2 Ort und Zugang zu Lademöglichkeiten**

Die technisch praktikablen und derzeit im Aufbau befindlichen Ladetechnologien verfügen über Leistungen im Bereich von einigen Kilowatt. Da die Ladezeit für eine Vollladung einige Stunden beträgt, müssen Fahrzeuge an Orten geladen werden, wo geparkt werden kann. Die Ladung mit sehr hohen Leistungen kann die Ladedauer auf unter 1 Stunde verkürzen, ist aber technisch anspruchsvoll und teuer zu installieren. Daher ist es neben einer Betrachtung der unterschiedlichen Ladetechnologien nötig,

Tabelle II.2

**Übersicht der Stärken und Schwächen der verschiedenen Ladetechnologien**

Technologie	Stärken	Schwächen
konduktiv	einfaches System; hohe Übertragungsleistung; Standards weitestgehend entwickelt; Informationen zur Ladesteuerung über Kabel gut zu übermitteln; private Lademöglichkeiten z. T. schon vorhanden bzw. leicht installierbar	öffentlich zugängliche Ladestationen sind Witterungseinflüssen und Vandalismus ausgesetzt
induktiv	Wegfall des Kabels und damit kein Nutzereingriff erforderlich; geringer Verschleiß, u. a. keine Witterungseinflüsse und Vandalismus; berührungssicher und spannungsfrei	niedrige Anschlussleistungen; relativ niedriger Übertragungswirkungsgrad; Positionierung der Spulen beim Parken kompliziert; Rückspeisung nicht möglich; hohe Investition in Infrastrukturausbau nötig
Batteriewechsel	ermöglicht kurze Stopps und schnelle Weiterfahrt; ermöglicht bei hinreichender Zahl von Wechselstationen breiteren Einsatz von Batteriefahrzeugen durch Erhöhung der Reichweite	Batteriewechsel technisch aufwendig (Gewicht und hohe Spannungen); Änderung des Fahrzeugaufbaus erforderlich, da Batterie nur im Unterboden einsetzbar; verschiedene Batteriegrößen erhöhen die Kapitalbindungskosten (implizite Batteriestandardisierung); hohe Investition in Infrastrukturausbau nötig; höherer Batterieverschleiß bei Nutzung fremder Batterien, bzw. Beschädigungen beim Tausch

Quelle: nach Kley 2011

die Auswirkung von verschiedenen Standorten auf die Gestaltung und Auslegung der Infrastruktur zu untersuchen. Es stellt sich somit die Frage, an welchen Standorten Ladeinfrastrukturen besonders einfach errichtet werden können bzw. an welchen Standorten weiter gehende Vorkehrungen getroffen werden müssen.

Hinsichtlich der Zugangsmöglichkeit lassen sich drei Gruppen von Ladeinfrastrukturen unterscheiden: (i) nur Privatpersonen zugängliche, (ii) halböffentliche (z. B. am Arbeitsplatz oder im Verein befindliche) und (iii) öffentliche, d. h. mit Tankstellen vergleichbare Ladeinfrastrukturen. Die folgende Darstellung basiert auf Wietschel et al. (2009).

### Privater Bereich

Private Lademöglichkeiten erfordern einen Garagenstellplatz oder die Möglichkeit, das Fahrzeug zuhause an den Strom anzuschließen. Diese Option besteht insbesondere auf dem Land oder in Vororten. In geschlossenen städtischen Siedlungsgebieten werden Fahrzeuge hingegen häufig auf der Straße abgestellt, wo in der Regel keine direkte Anschlussmöglichkeit an das Stromnetz besteht. So haben 71 Prozent der Pkw-Halter in ländlichen Bereichen und immerhin 43 Prozent der Nutzer in Großstädten die Möglichkeit, ihr Fahrzeug in einer Garage abzustellen (Biere et al. 2009). Können die Fahrzeuge in einer Garage oder an einem Stellplatz an den privaten Hausanschluss angeschlossen werden, so sind die Ladung und Abrechnung verhältnismäßig einfach zu realisieren.

### Halböffentlicher Raum

Unter einer halböffentlichen Ladeinfrastruktur werden Lademöglichkeiten auf Firmenparkplätzen oder öffentlich zugänglichen Flächen im Privatbesitz (z. B. Supermarktparkplätze oder Parkhäuser) verstanden (NPE 2011a). An diesen Orten sind Stromanschlüsse häufig vorhanden und Parkplätze können vergleichsweise einfach mit Ladevorrichtungen ausgebaut werden. Da das Parken auf diesen Plätzen häufig zugangsbeschränkt ist – es dürfen z. B. nur Arbeitnehmer, Kunden etc. dort parken –, reicht es, die Ladung an der Steckdose zu ermöglichen und einfache, evtl. pauschale Abrechnungen vorzusehen.

### Öffentlicher Raum

Für Personen, die keinen Zugang zu den zuvor genannten Lademöglichkeiten haben, weil sie z. B. in städtischen Wohnstraßen oder Siedlungen wohnen, aber ebenso für Zwischenladungen auf längeren Fahrten, wird der Aufbau von öffentlichen Ladesäulen im Rahmen des geforderten Ladeinfrastrukturausbaus propagiert (Bundesregierung 2009). Solch eine allgemein zugängliche Ladeinfrastruktur muss im öffentlichen Raum erkennbar, stabil gebaut, gegen Missbrauch geschützt und mit einem allgemein zugänglichen Abrechnungssystem ausgestattet sein. In verschiedenen Regionen sind bisher unterschiedliche Zugangssysteme in Betrieb. Dabei sollte die abgerechnete Leistung nicht viel teurer als in den beiden zuvor genann-

ten Varianten sein, da diese Möglichkeit sonst nicht genutzt und somit kaum ausgebaut würde.

### 1.4.3 Anwendungsszenarien

Aus der zuvor erwähnten Einteilung nach Art des Zugangs (privat, halböffentlich, öffentlich) lassen sich verschiedene Anwendungsfälle entwickeln, für die sich eine technisch sinnvolle Infrastruktur beschreiben lässt. Dabei ist zunächst wichtig, den Standort des Fahrzeugs, an dem geladen wird, näher einzuschränken. Für private Ladeinfrastruktur ist der Zugang zu einem Parkplatz oder einem Stellplatz wichtig; im halböffentlichen Bereich, der sich insbesondere durch die Zugangsbeschränktheit auszeichnet, kann am Arbeitsplatz oder aber auch in Parkgaragen geladen werden und für öffentliche Parkplätze sind der städtische Bereich oder Kurzstopps an Schnellstraßen wahrscheinlich.

Bedingt durch die Standortcharakteristika ergeben sich somit unterschiedliche Nutzungszeiten, in denen das Fahrzeug geladen werden kann. Auf dem privaten Stellplatz steht das Fahrzeug am längsten und dabei meistens über Nacht. In den anderen Standorten wird für gewöhnlich nur über Tag geparkt, wobei im halböffentlichen Bereich wesentlich längere und im öffentlichen Raum typischerweise nur kurze Stopps anfallen.

Für die Auslegung einer geeigneten Ladeinfrastruktur spielt zudem der Grund bzw. die Motivation, an diesem Standort zu laden, eine Rolle. Dabei zeigt sich, dass gerade der private und halböffentliche Bereich für reguläre Ladevorgänge geeignet sind, während im öffentlichen Raum eher Zwischenladungen stattfinden, um unter Umständen die Reichweite des Elektrofahrzeugs zu verlängern. Durch die relativ weite Verbreitung von Garagen in Deutschland ist eine flächendeckende Installation von öffentlicher Ladeinfrastruktur aber zumindest für einen Markthochlauf von Elektrofahrzeugen nicht zwingend notwendig.

Aus dem genaueren Verständnis der Standortgegebenheiten, der dort zur Verfügung stehenden Stromanschlüsse sowie dem Anwendungsfall für die Ladung lassen sich die technologischen Optionen für die Ladung eines Elektrofahrzeugs besser spezifizieren. Je nach Standort bieten sich bestimmte Ladetechnologien an, während andere auf Basis der technischen Restriktionen ausgeschlossen werden können. Insbesondere im privaten, aber auch im halböffentlichen Bereich ist zu erwarten, dass aufgrund der besseren Realisierbarkeit und den langen Standzeiten überwiegend induktives Laden vorherrschen wird. Während induktive Systeme in den privaten oder halböffentlichen Standorten relativ aufwendig zu installieren sind, stehen dort häufig bereits normale Haushaltssteckdosen zur Verfügung oder alternativ lassen sich meistens relativ einfach dreiphasige Anschlüsse mit niedriger Anschlussleistung (bis zu 22,2 kW) verlegen. Der Aufwand, das Fahrzeug mit dem Ladekabel an die Infrastruktur anzuschließen, relativiert sich durch die an diesen Standorten langen Ladezeiten. Im öffentlichen Raum sind aufgrund der kurzen Standzeiten höhere Anschlussleistungen gewünscht, die über höher abgesicherte dreiphasige

Wechselstromanschlüsse bereitgestellt werden können. Rein technisch ist es des Weiteren möglich, Gleichstromladesäulen an diesen Standorten aufzubauen, die jedoch deutlich teurer sind und eine stärkere Auswirkung auf die Netzstabilität haben. Alternativ lassen sich induktive Systeme nutzen. Diese stellen jedoch deutlich geringere Anschlussleistungen zur Verfügung und widersprechen daher dem eigentlichen Gedanken, mit kurzen Zwischenladungen die Reichweite des Fahrzeugs zu verlängern. Der Batteriewechsel wird sowohl aufgrund der erwähnten Herausforderungen beim Fahrzeugaufbau, der Batteriestandardisierung, den Wertschöpfungsverschiebungen als auch den Kapitalbindungskosten nicht als sinnvolle technische Lösung für das Laden im öffentlichen Raum erachtet.

Nicht an allen Standorten steht das Fahrzeug für einen längeren Zeitraum. Gerade im öffentlichen Raum wird ggf. nur kurz geparkt. Daher ist die benötigte Ladezeit und damit technisch die an dieser Ladestation zur Verfügung stehende Anschlussleistung wichtig, da sie im Wesentlichen die benötigte Ladezeit beeinflusst. Ein leeres 24-kWh-Batterieaggregat benötigt an einem normalen 3,7-kW-Anschluss etwa 6 Stunden, um wieder aufgeladen zu werden. Betrachtet man jedoch die zurückgelegten Strecken, sind deutlich kürzere Ladezeiten selbst an Anschlüssen mit niedriger Anschlussleistung zu erwarten. So legt der heutige deutsche Durchschnittsfahrer in 80 Prozent der Fälle nur Strecken unter 60 km zurück (Auswertung des Datensatzes „Mobilität in Deutschland“ [MiD], Follmer et al. 2003). Besteht die Möglichkeit, nach den gefahrenen Strecken am Zielort zu laden, können Elektrofahrzeuge mit den heutigen Mobilitätsgewohnheiten in weniger als 3 Stunden an einem 3,7-kW-Anschluss wieder vollgeladen werden. Mit höheren Anschlussleistungen reduziert sich diese Zeit an einem dreiphasigen Hausanschluss auf weniger als 1 Stunde und bei Hochleistungs-ladesystemen auf weniger als 15 Minuten. Volle Ladezyklen dauern jedoch auch bei Anschlussleis-

tungen bis 50 kW zwischen 30 Minuten und bis zu 6,5 Stunden. Lange Standzeiten zwischen den gefahrenen Strecken ermöglichen es jedoch, Elektrofahrzeuge selbst an Anschlüssen mit niedriger Leistung problemlos für die nächste Fahrt zu rüsten, da Pkw durchschnittlich zu mehr als 95 Prozent ihrer Zeit stehen (Follmer et al. 2003).

Je nach Standort muss die konsumierte Energie unterschiedlich abgerechnet werden. Im häuslichen Bereich wird der Strom bereits über den Hausanschluss in Rechnung gestellt und muss daher nicht gesondert erfasst und abgerechnet werden. In einem halböffentlichen Bereich, etwa einem Parkhaus, fallen häufig bereits pauschale oder zeitabhängige Gebühren an, die im Verhältnis zum konsumierten Strom deutlich teurer sind, wodurch eine detaillierte Stromabrechnung nicht nötig wird, sondern pauschal mit den Parkgebühren verrechnet werden kann (bzw. wie im Fall von Betriebsparkplätzen aufgrund des geringen Betrags keine gesonderte Verrechnung stattfindet). Im öffentlichen Bereich muss jedoch generell der Zugang zur Ladeinfrastruktur oder der konsumierte Strom in Rechnung gestellt werden, da sich sonst der Aufbau dieser Infrastruktur finanziell nicht lohnen würde. Ob die Abrechnung pro Ladevorgang, nach Standzeit oder pro Kilowattstunde abgerechnet wird, ist in einem Geschäftsmodell detailliert festzulegen. In jedem Fall ist zumindest zu prüfen, ob das Fahrzeug bzw. der Fahrzeugnutzer berechtigt ist, an dieser Ladesäule zu laden. Eine Zusammenfassung der technisch sinnvollen Ladeinfrastrukturausprägungen ist in Tabelle II.3 zu finden.

Die Ladeinfrastruktureinrichtungen werden je nach regionalen Gegebenheiten und je nach Anwendungsfall unterschiedlich auszugestaltet sein. Insbesondere im öffentlichen Bereich werden z. B. höhere Anforderungen an die Sicherheit und die Wetterbeständigkeit der Komponenten gestellt. Im halböffentlichen und öffentlichen Bereich können Ladesysteme außerdem so gebaut werden, dass verschiedene Komponenten mehrfach benutzt und damit

Tabelle II.3

**Technisch sinnvolle Ladeinfrastrukturausprägungen**

Zugang	Ort	Zeit und Dauer	Grund	Ladetechnologie	Steuerung	Abrechnung
privat	zu Hause Garage oder Stellplatz	über Nacht	reguläres Laden	überwiegend konduktiv Haushaltssteck- dose mit 3,7 kW	gesteuert (auch Rückspeisung)	nein
halb- öffentlich	zugangsbe- schränkt Arbeitsplatz Parkgarage	lang, am Tag		dreiphasiger Anschluss bis 22,2 kW	abhängig vom Anwendungsfall	
öffentlich	städtischer Be- reich an Schnellstra- ßen	kurz, am Tag	Zwischen- ladung Reichweiten- verlängerung	konduktiv AC, ggf. DC induktiv mit 3,7 kW	ungesteuert	ja (evtl. Au- thentifizierung)

Quelle: Kley 2011

das System technisch schlanker und ökonomisch effizienter gestaltet werden kann. So können an Ladesäulen mehrere sogenannte Ladepunkte, also Ansteckmöglichkeiten, geschaffen werden, was Komponenten einspart. Sind an einem Standort mehrere dieser Säulen aufgebaut, lassen sich z. B. auch Abrechnungskomponenten zentralisieren, sodass der Nutzer nur an bestimmten Säulen – ähnlich zu einem heutigen Parkscheinautomat – abrechnen und zahlen kann. Auch die zeitliche Verschiebung von Stromnachfrage (Lastverlagerung) und Stromrückspeisung ins Netz sowie die Einbindung von Elektrofahrzeugen in die heutigen Strom- und Regelleistungsmärkte lässt sich auf Basis mehrerer Fahrzeuge einfacher umsetzen. In speziellen Einzelfällen kann des Weiteren aus technischer Sicht auch der Einsatz anderer Systeme, wie ein Batteriewech-

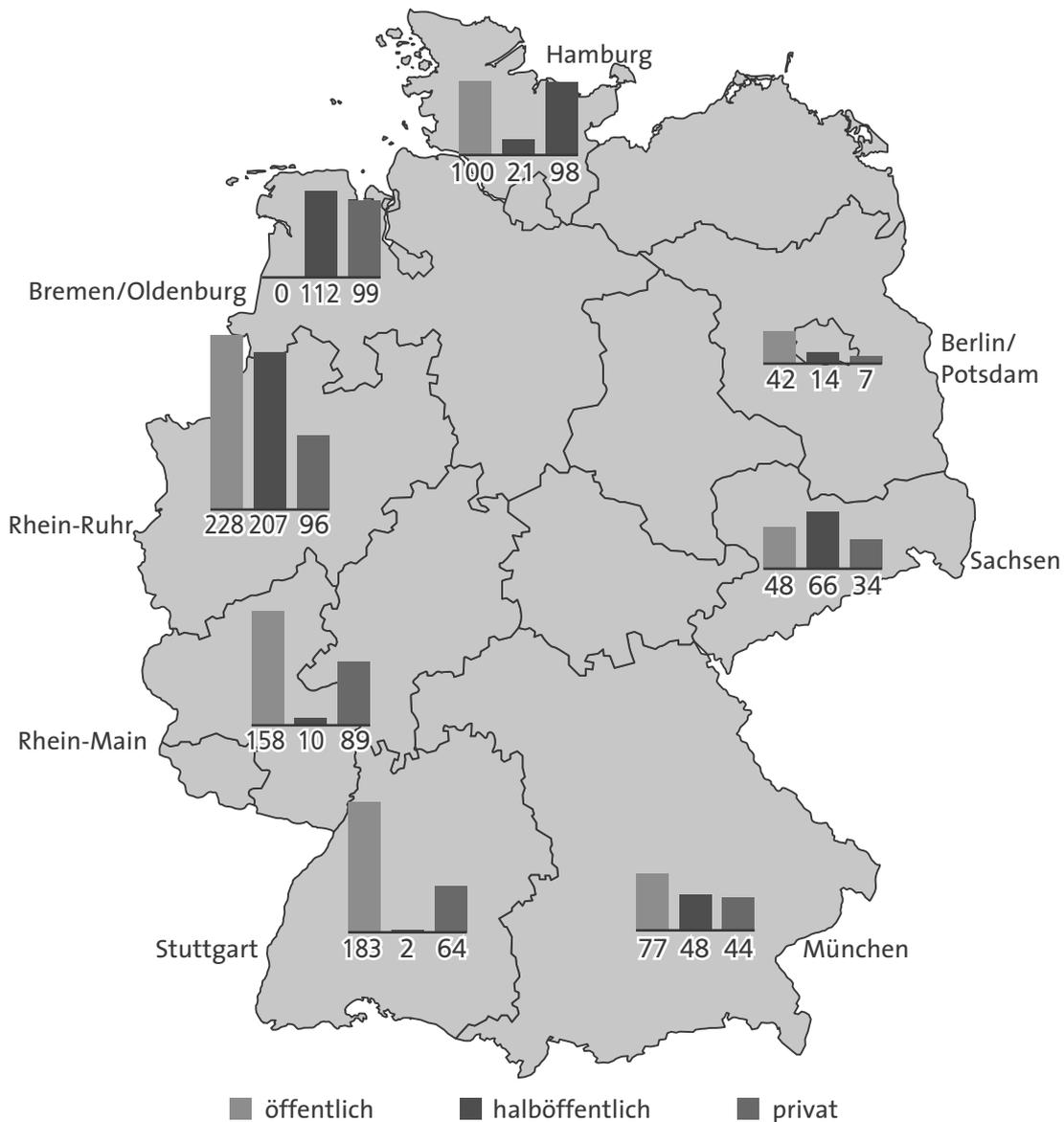
selkonzept für einen lokal begrenzten, bereits hinsichtlich der Fahrzeuge standardisierten und hochausgelasteten Markt, z. B. Taxis, sinnvoll sein.

#### 1.4.4 Derzeitiger Stand der Ladeinfrastruktur

Da in Deutschland ca. 60 Prozent der Nutzer der 40 Millionen privaten Pkw über eine Garage verfügen, sollten ungefähr 24 Millionen Garagen für private Pkw vorhanden sein (Biere et al. 2009). Es lässt sich nicht sagen, welcher Anteil dieser Garagen bereits über eine Steckdose verfügt. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass ein Stromanschluss für das Aufladen eines Elektrofahrzeugs hier leicht und kostengünstig installiert werden könnte.

Abbildung II.3

Ladepunkte in den Modellregionen des BMVBS



Eigene Darstellung nach BMVBS 2011

Im öffentlichen Raum sind derzeit (Stand August 2012) über 2 200 Ladepunkte im Bundesgebiet verfügbar (NPE 2012; eine Übersicht und die Position gibt das Portal [www.lemnet.org](http://www.lemnet.org)). Ein großer Teil dieser öffentlichen Ladensäulen, insgesamt 836 Ladepunkte, ist gemeinsam mit einer großen Anzahl von Elektrofahrzeugen im Rahmen der acht Modellregionen des BMVBS erfasst worden. Abbildung II.3 zeigt die Verteilung der öffentlichen, halb-öffentlichen und privaten Ladepunkte innerhalb dieser Modellregionen (BMVBS 2011).

### 1.5 Energiebereitstellung und Infrastrukturaufbau für FCEV

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über Wasserstofftechnologien und Infrastrukturaufbau für Wasserstoff für mobile Anwendungszwecke gegeben.

Wasserstoff ist auf der Erde in praktisch unbegrenzten Mengen vorhanden. Er kommt allerdings fast ausschließlich in chemischen Verbindungen (z. B. Wasser und Kohlenwasserstoffe) vor. Aus diesem Grunde muss er erst gewonnen werden. Er ist ein kohlenstofffreier Energieträger, vergleichbar mit Strom oder Wärme, aber keine Primärenergie. Das ist zum einen ein Nachteil, weil die Produktion von Wasserstoff immer mit einem Energieaufwand (und damit auch Umweltbelastungen) verbunden ist – vergleichbar mit Strom- oder Wärmezeugung. Zum anderen ist es aber auch ein besonderer Vorteil, da Wasserstoff quasi aus allen Energiequellen hergestellt werden kann. Weitere Vorteile sind seine Umweltfreundlichkeit in der Verwendung, seine Transportfähigkeit, seine Speicherfähigkeit und seine hohe gravimetrische Energiedichte. Insbesondere über die Brennstoffzelle ist Wasserstoff effizient in Nutzenergie umsetzbar und ist bei dieser Umwandlung nahezu emissionsfrei. Allerdings weist Wasserstoff aufgrund seiner geringen volumetrischen Energiedichte auch Nachteile bei der Speicherung gegenüber Flüssigkraftstoffen wie Benzin oder Diesel auf.

#### 1.5.1 Technologieüberblick

Die Wasserstofftechnologien lassen sich in folgende vier Themenkomplexe einordnen (Wietschel et al. 2010a):

- Wasserstoffproduktion aus unterschiedlichen Quellen (Abb. II.4)

- Konditionierung von Wasserstoff zum Transport und zur Lagerung (notwendig aufgrund der geringen volumetrischen Energiedichte). Folgende Varianten stehen zur Verfügung:

- Komprimierung: heutige Speicher- und Transportkonzepte sehen 10 bis 70 MPa vor
- Verflüssigung auf ca.  $-253\text{ °C}$
- Komprimierung bei tiefen Temperaturen (insbesondere überkritisch)
- chemische Bindung (z. B. in Methanol)
- chemische Absorbierung in Feststoffen nahe Umgebungsbedingungen
- Adsorption in porösen Materialien, vorzugsweise bei tiefen Temperaturen
- Transport- und Verteilung von Wasserstoff (gasförmig in Trailern und Pipelines oder flüssig in Trailern) und
- Speicherung von Wasserstoff (geologisch, d. h. unterirdisch in geeigneten Gesteins- oder Salzformationen, Druckwasserstofftanks, Flüssigtanks, in Metallhydriden, chemisch gebunden oder absorbiert und physikalisch adsorbiert).

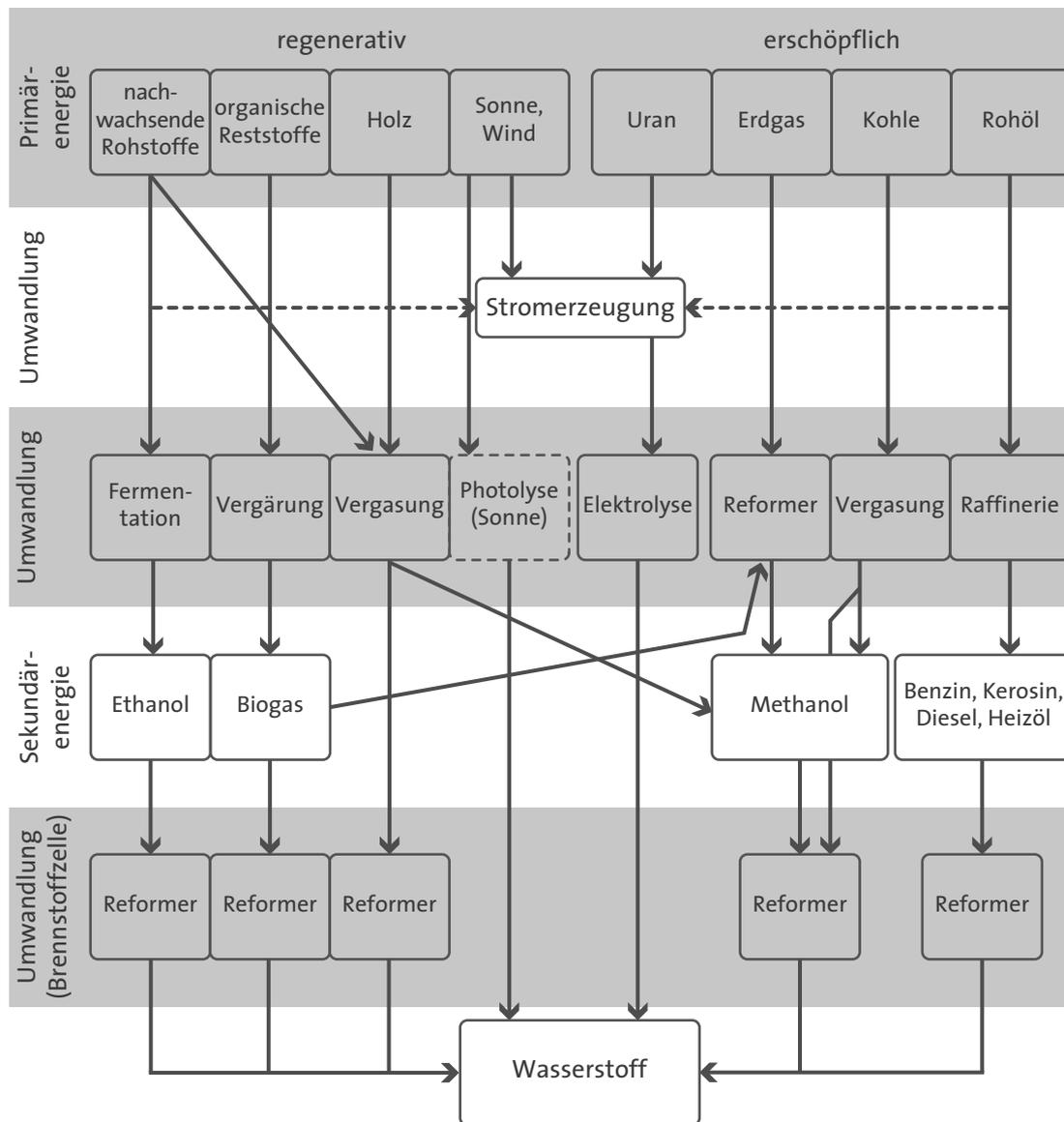
Die fossile Wasserstoffproduktion ist in der Petrochemie bereits seit Jahrzehnten kommerziell im Einsatz. Dies gilt auch für Nischenmärkte wie die Raumfahrt. Der Wasserstoffeinsatz als Energieträger für die stationäre oder mobile Nutzung in öffentlichen Massenmärkten befindet sich allerdings erst in der Demonstrationsphase. Von der technologischen Seite her gesehen gibt es schwerpunktmäßig bei der  $\text{CO}_2$ -freien bzw.  $\text{CO}_2$ -armen Wasserstoffherzeugung, u. a. auf Basis der fluktuierenden erneuerbaren Energieträger, noch relevanten technischen Entwicklungsbedarf bis zur Marktreife sowohl bei Einzeltechnologien wie auch bei Systemlösungen.

Eine ausführliche Beschreibung der verschiedenen Wasserstofftechnologien, ihrem Entwicklungsstand und der verschiedenen Anwendungsfelder findet sich in Ball/Wietschel (2009), IEA (2005) sowie Wietschel et al. (2010a).

Zur Wirtschaftlichkeit, der Energieeffizienz und den Treibhausgasemissionen einzelner Herstellungspfade von Wasserstoff für mobile Anwendungen wird auf das Kapitel III verwiesen. Dort findet sich auch ein Vergleich zu Elektrofahrzeugen und konventionellen Pkw.

Abbildung II.4

## Optionen der Wasserstoffproduktion nach Energieträgern



Quelle: Ball et al. 2009

### 1.5.2 Infrastruktur für Brennstoffzellenfahrzeuge

Wie für Elektrofahrzeuge, welche ihre Antriebsenergie in Batterien speichern, ist auch für FCEV eine Infrastruktur zur Versorgung mit Wasserstoff zu diskutieren. Wasserstoff könnte an Tankstellen wie den heute verbreiteten Tankstellen für konventionelle Kraftstoffe oder Gas an Verbraucher verteilt werden. Dafür müssten entsprechende Wasserstoffzapfsäulen oder Tankstellen errichtet werden. Dies erfordert erhebliche Investitionen und solange wenige Fahrzeuge Wasserstoff tanken, besteht hier wie in vielen anderen Technologiefeldern das Problem, dass diese Anfangsinvestitionen unterausgelastet und mit erheblichem Risiko verbunden sind.

Für den Transport und die Verteilung von Wasserstoff zu den Tankstellen kommen mehrere Varianten infrage (Michaelis et al. 2012; Seydel 2008):

- Transport von Flüssigwasserstoff per Lkw,
- Transport von gasförmigem Wasserstoff per Lkw,
- Transport von gasförmigem Wasserstoff per Pipeline,
- Transport eines Primärenergieträgers mit anschließender Produktion des Wasserstoffs direkt an der Tankstelle.

Für die Überbrückung großer Entfernungen eignen sich Pipelines besonders, für eine regionale Verteilung hingegen der Transport mit Lkw. Durch die geringere volume-

trische Energiedichte und Flüchtigkeit von Wasserstoff ist ein derartiger Transport mit Lkw aber deutlich aufwendiger als der heute weitverbreitete Transport von Benzin und Diesel mit Tanklastzügen.

In der Bundesrepublik gibt es derzeit circa 20 Wasserstofftankstellen, welche z. T. öffentlich zugänglich sind (Michaelis et al. 2012). Für eine breite Versorgung mit Wasserstoff wären mehrere Hundert Wasserstofftankstellen nötig. Ein möglicher Ausbau von Wasserstofftankstellen wird diskutiert in Ball et al. (2009), European Expert Group (2011) und Seydel (2008). Insgesamt lässt sich eine mögliche Infrastruktur für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge als stark dezentral beschreiben, eine Infrastruktur für Wasserstofffahrzeuge wäre hingegen eher sehr zentral organisiert und mit heutigen Tankstellen vergleichbar. Strom ist in Garagen und Haushalten heute bereits verfügbar, Wasserstofftankstellen bzw. -tanks und -zapfsäulen müssten erst in größerer Anzahl errichtet werden.

## 2. Marktpenetrationsszenarien

Dieses Kapitel gibt einen Überblick und Vergleich aktueller Studien, welche sich mit der Marktpenetration von Elektro- und Hybridfahrzeugen beschäftigen. Ziel dieser Darstellung ist, mögliche Entwicklungen der zukünftigen Marktpenetration sowie ihre Einflussfaktoren und deren mögliche Spannbreiten zu identifizieren und auf dieser Basis sowie im Hinblick auf politische Zielsetzungen ein Marktpenetrationsszenario für Deutschland abzuleiten, welches den Analysen dieses Berichts zur Bewertung der Elektromobilität als Grundlage dient. Für einige Analysen (unter anderem zu Effekten auf die automobilen Wertschöpfung in Kap. III.2.2 sowie zu Arbeitsplatzeffekten in Kap. III.2.4) ist zudem die zukünftige weltweite Nachfrage bzw. Verbreitung von Elektrofahrzeugen relevant. Daher wurden für diese Auswertungen weltweite Szenarien herangezogen, welche in den entsprechenden Kapiteln eingeführt werden.

Im vorliegenden Kapitel wird zunächst der aktuelle Fahrzeugmarkt in Deutschland kurz beschrieben. Dies soll die Einordnung von Marktpenetrationsszenarien für Elektrofahrzeuge aus aktuellen Studien, welche im Anschluss mit ihren grundlegenden Annahmen und Ergebnissen vorgestellt und verglichen werden, ermöglichen. Im Hinblick auf das offizielle Ziel der Bundesregierung von 1 Million Elektrofahrzeugen bis 2020 wird die erwartete zeitliche Entwicklung der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE 2011a) zur Erreichung dieses Zieles gesondert betrachtet. Auf Basis dieser verschiedenen Entwicklungsszenarien erfolgt eine kurze Zusammenstellung relevanter Einflussfaktoren. Daran schließt sich ein Ausblick auf den sich schnell entwickelnden Markt für elektrische Zweiräder an und es folgt eine kurze Analyse von Studien zur Marktdurchdringung von FCEV. Im letzten Teil dieses Kapitels wird auf der Basis der vorangegangenen Analysen ein MarkthochlaufszENARIO für die Verbreitung von Elektrofahrzeugen (BEV und PHEV) und FCEV in Deutschland abgeleitet.

### 2.1 Heutiger Fahrzeugmarkt in Deutschland

Die aktuellen Bestandszahlen der Kraftfahrzeuge im deutschen Fahrzeugmarkt und deren historische Entwicklung sind durch das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) statistisch gut erfasst. Die historische Entwicklung (Abb. II.5) stellt sich gemäß den Daten wie folgt dar. Die Zahl der Kraftfahrzeuge in Deutschland ist seit den 1950er Jahren kontinuierlich gewachsen (der Knick im Pkw-Bestand 2008 ist rein statistischer Natur, die Definition „Bestand“ wurde vom KBA geändert). Die größten Zuwachsraten zeigen seit Langem Pkw und Zweiräder. Die Anzahl der anderen Fahrzeuge steigt nur langsam an. Der Pkw-Bestand hat die Anzahl an motorisierten Zweirädern früh übertroffen und stellt seither die größte Gruppe an Kraftfahrzeugen dar. Heute kommt in Deutschland auf zwei Personen ca. ein Pkw.

Die Zusammensetzung des Bestandes an Kraftfahrzeugen in Deutschland zu Beginn des Jahres 2012 stellt Abbildung II.6 dar.

Den Hauptteil der Fahrzeuge bilden Pkw mit 42,5 Millionen Fahrzeugen. Drei Viertel hiervon (30 Millionen Fahrzeuge) werden mit Benzinmotoren angetrieben. Dieselmotoren kommen auf einen Anteil von ca. 11 Millionen Fahrzeugen. Alternative Antriebsarten machen heute im Bereich der Pkw 1,5 Prozent aus. Darunter sind 0,5 Millionen Gasfahrzeuge und knapp 50 000 HEV. Nur ein kleiner Teil von insgesamt 4 500 Fahrzeugen sind BEV. Auch konventionelle Kleinkrafträder haben Potenzial für elektrische Antriebe. In Deutschland betrifft das prinzipiell 3,8 Millionen Krafträder.

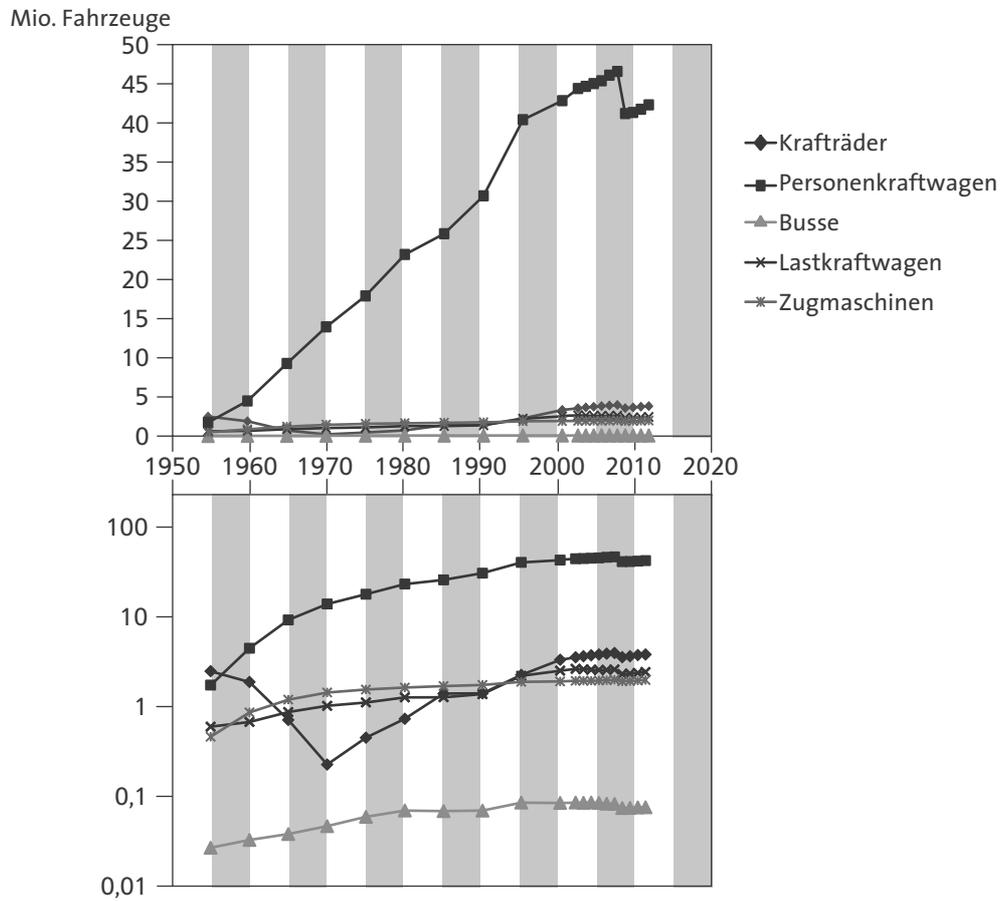
Ausgehend von diesem Bestand und seiner Zusammensetzung werden im Folgenden mehrere Studien vorgestellt, die sich mit der möglichen Entwicklung von Elektrofahrzeugen im deutschen und anderen Märkten beschäftigen.

### 2.2 Aktuelle Marktpenetrationsszenarien

Verschiedene Einrichtungen – dazu gehören Forschungseinrichtungen und große Unternehmensberatungen – untersuchten die mögliche Marktdurchdringung mit Elektrofahrzeugen. In den Studien wurden dabei unterschiedliche Untersuchungsschwerpunkte gelegt: Unternehmensberatungen wie die Boston Consulting Group (BCG), Frost & Sullivan, A. T. Kearney, Roland Berger Strategy Consultants, AMADEE+COMPANY, aber auch die Deutsche Bank Company Research, modellierten Marktszenarien, um die Auswirkungen einer Verbreitung der Elektromobilität auf den Automobilbereich zu analysieren und daraus Handlungsempfehlungen für Automobilhersteller, Kunden und Zulieferer abzuleiten. Tabelle II.4 gibt einen Überblick über vorliegende aktuelle Studien. Die University of California (UC Berkeley 2009) konzentrierte sich in ihrer Studie auf die volkswirtschaftlichen Auswirkungen einer zunehmenden Marktdurchdringung mit Elektrofahrzeugen. Auch in dem „Marktmodell Elektromobilität“ der European School of Management and Technology (ESMT 2011) wurden die volkswirtschaftlichen Auswirkungen der Elektromobilität sowie verschiede-

Abbildung II.5

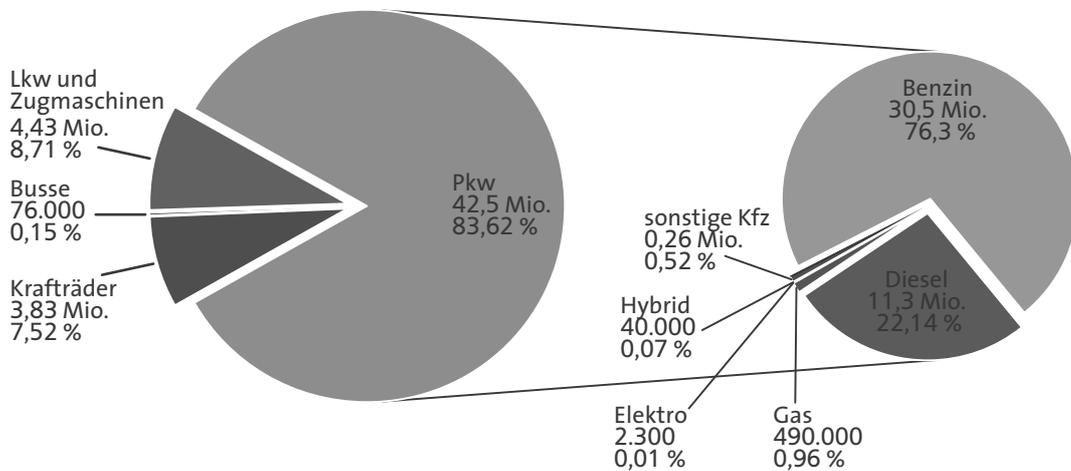
Historische Entwicklung des Kraftfahrzeugbestandes (links in linearer und rechts logarithmischer Auftragung)



Eigene Darstellung nach KBA 2012

Abbildung II.6

Kfz-Bestand in Deutschland im Jahr 2011 nach Antrieben



Eigene Darstellung nach KBA 2012

dene Politikoptionen zu ihrer Förderung untersucht. Forschungseinrichtungen wie das UK Department for Business Enterprise and Regulatory Reform (UK BERR 2008), das Electric Power Research Institute (EPRI 2007) in den USA, die International Energy Agency (IEA 2009) und das Laboratory for Energy and the Environment des Massachusetts Institute of Technology (MIT 2008) betrachteten die Marktentwicklung im Hinblick auf mögliche CO<sub>2</sub>-Einsparungen. McKinsey & Company (2009) untersuchten ebenfalls in ihrer Studie das Potenzial einer CO<sub>2</sub>-Reduktion sowie die Kosten unterschiedlicher Maßnahmen zur Verbreitung der Elektromobilität untersucht. Die Marktpenetrations Szenarien von Shell (2009) wurden im Rahmen einer allgemeinen Studie zur Pkw-Entwicklung erstellt, während das Fraunhofer ISI in seinen Studien (2008, 2011) darauf abzielte, die energiewirtschaftlichen Auswirkungen der Elektromobilität abzuschätzen. Weiterhin lassen sich die Studien hinsichtlich der untersuchten Märkte, Zeithorizonte, Antriebsarten sowie der Betrachtung von Neuzulassungen oder Bestand differenzieren. Tabelle II.4 gibt einen entsprechenden Überblick. Die Modellgrundlagen und Szenarien der Studien werden im Folgenden beschrieben.

UC Berkeley (2009) untersuchte die Marktdurchdringung mit Elektrofahrzeugen im nordamerikanischen Markt bis zum Jahr 2030 und die damit verbundenen Auswirkungen auf die amerikanische Volkswirtschaft (Beschäftigungszahlen, Handelsgleichgewicht, Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen), Gesundheitskosten). Grundlegend beim Modell dieser Studie waren Annahmen zur Verbreitung von Batteriewechselsystemen (Kap. II.1.4.1), zu Kunden mit unterschiedlichen Präferenzen und zu neuen Geschäftsmodellen, die auf die Elektromobilität abgestimmt sind (z. B. Dienstleistungsverträge, welche pro gefahrener Meile bezahlt werden). Weiterhin wurde der Einfluss von drei unterschiedlichen Ölpreisszenarien untersucht.

Frost & Sullivan (2007) veröffentlichten eine Studie, in der eine Marktanalyse von PHEV für die Märkte Nordamerika, Europa und Japan bis 2015 durchgeführt wird. Die Daten der Studie stammten hauptsächlich aus Interviews mit Automobilherstellern und wurden zu zwei Marktszenarien zusammengefasst: ein optimistisches und ein pessimistisches Szenario bezüglich der PHEV.

Tabelle II.4

#### Übersicht Marktstudien und Szenarien zur Elektromobilität

Studie	untersuchter Markt und Zeithorizont	elektrische Antriebsart	Szenarien	Neuzulassungen/ Bestand
A. T. Kearney (2009)	Deutschland, Europa, Amerika, Asien (China, Japan) 2020/2030	BEV, PHEV, HEV	Limited Drive for Change, Moderate Drive for Change, Change Enforcement	Neuzulassungen, Bestand
AMADEE+ COMPANY (2009)	USA, EU, weltweit 2015/2020	BEV, PHEV, HEV		Neuzulassungen
BCG (2009)	Europa, USA, China, Japan 2020	BEV, PHEV, HEV	Slow down, Steady Pace, Acceleration	Neuzulassungen
Deutsche Bank Company Research (2009)	Europa, USA, Japan, China, weltweit 2010/2015/2020	BEV, PHEV, HEV		Neuzulassungen
ESMT (2011)	Deutschland 2020/2030	HEV, BEV, PHEV	Referenzszenario (kein Politikeingriff), verschiedene Szenarien mit Politikeingriff	Neuzulassungen, Bestand
EPRI (2007)	USA 2050	PHEV	Low PHEV Fleet Penetration Rate, Medium PHEV Fleet Penetration Rate, High PHEV Fleet Penetration Rate	Neuzulassungen
Fraunhofer ISI (2008)	Deutschland 2050	BEV, PHEV, HEV	Dominanzszenario (optimistisch), Pluralismus-szenario (pessimistisch)	Neuzulassungen, Bestand

noch Tabelle II.4

Studie	untersuchter Markt und Zeithorizont	elektrische Antriebsart	Szenarien	Neuzulassungen/ Bestand
Fraunhofer ISI (2011)	Europa, Welt 2050	BEV, PHEV, HEV	Dominanzszenario (optimistisch), Pluralismus-szenario (pessimistisch)	Neuzulassungen, Bestand
Frost & Sullivan (2007)	Europa, Nordamerika, Japan 2015	PHEV	optimistisches Szenario, pessimistisches Szenario	Neuzulassungen
IEA (2009)	weltweit, USA, Europa, China, Japan, Indien, Russland, Rest der Welt 2030	BEV, PHEV, HEV		Neuzulassungen
McKinsey (2009)	weltweit 2020/2030	BEV, PHEV, HEV	Optimized ICEs, Mixed Technology, Hybrid and Electric	Neuzulassungen
MIT (2008)	USA 2035	PHEV, HEV	Market Mixed Scenario, Turbocharged ICE Future Scenario, Hybrid Strong Scenario	Neuzulassungen
NPE (2011a)	Deutschland 2020	PHEV, BEV	Hybridszenario, ausgeglichenes Szenario, BEV-Szenario	Neuzulassungen, Bestand
Roland Berger (2008)	Europa, Nordamerika, Japan, 2015/2020	BEV, PHEV	Downsized mobility, The future drives electric	Neuzulassungen
Roland Berger (2009)	China 2015/2020	BEV, PHEV, HEV	Downsized mobility, The future drives electric	Neuzulassungen
Shell (2009)	Deutschland 2030	BEV, HEV	Automobile Anpassung (Trendszenario), Automobilität im Wandel (Alternativszenario)	Neuzulassungen
UC Berkeley (2009)	USA 2015/2030	BEV	EIA Baseline Scenario, EIA High Energy Price Scenario, Operator-Subsidized Scenario	Neuzulassungen, Bestand
UK BERR (2008)	Vereinigtes Königreich 2010/2020/2030	BEV, PHEV	Business as Usual, Mid-Range, High-Range, Extreme-Range	Bestand

Eigene Zusammenstellung

BCG (2009) modellierte ein Marktszenario des gesamten Automobilbereichs für wichtige Automobilländer bis 2020. Die Basis des Modells bildeten die Gesamtlebenskosten („total cost of ownership“ [TCO]) als Hauptkriterium für die Kaufentscheidung. Weiterhin flossen politische Ziele und Maßnahmen der Regierungen mit ein, z. B. bzgl. einer Reduktion von THG-Emissionen. Neben diesem Modell wurden drei Szenarien (Slow Down,

Steady Pace und Acceleration) für den Zeithorizont 2020 entwickelt, die zusätzlich verschiedene Ausprägungen für die Entwicklung der Ölpreise (60, 150 bzw. 300 US-Dollar/Barrel) sowie unterschiedlich starke Anreize der Regierungen durch neue Vorschriften und Subventionen berücksichtigen. Hierdurch werden in der Studie eine weite Spannbreite möglicher Entwicklungen und deren Einfluss auf die Marktpenetration abgebildet.

A. T. Kearney (2009) analysierten die strategischen Unsicherheiten im Automobilbereich und leiteten daraus Strategien für Zulieferer und Hersteller ab. Die Studie umfasste wichtige Automobilländer und hat einen Zeithorizont bis 2020. A. T. Kearney (2009) entwickelten für die Untersuchung der Marktdurchdringung ein analytisches Modell mit mehr als 100 Variablen und drei Szenarien. Die Szenarien unterschieden sich ähnlich wie die Szenarien in der Studie von BCG (2009) durch den zugrundegelegten Ölpreis (68, 128 und 328 US-Dollar/Barrel) sowie Aktivitäten der Regierungen auf dem Gebiet der CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung und -Besteuerung. Außerdem fließt die weltweite Energienachfrage mit ein, die gerade bei konventionellen Kraftstoffen Grenzen setzt.

Shell Deutschland (2009) untersuchte die Entwicklungen im Verkehrsbereich für Deutschland bis 2030. Bezogen auf die Pkw-Motorisierung und die Gesamtfahrleistung ist das Ziel, die langfristigen Trends und Entwicklungen in diesem Bereich zu erforschen. Die Grundlage für die Shell-Szenarien bildete ein sozioökonomisches Leitszenario, in das die Bevölkerungs-, Wirtschafts- und Beschäftigungsentwicklung eingingen. Aufbauend auf diesem Leitszenario wurden zwei alternative Szenarien entwickelt. Das erste Szenario (Automobile Anpassung) legt den Hauptfokus darauf, wie bekannte Antriebstechnologien weiterentwickelt werden können und welche Auswirkungen dies auf die Emissionen der PKW-Flotte hat. Das zweite Szenario (Automobilität im Wandel) geht hingegen von stärkeren politischen Anreizen (z. B. Emissionsgrenzwerten) zur Entwicklung neuer Antriebstechnologien aus, wodurch diese sich in diesem Szenario eher verbreiten.

McKinseys (2009) weltweite Marktpenetrationsszenarien bis 2030 für Pkw waren Teil einer Analyse von CO<sub>2</sub>-Reduktionsmaßnahmen und von mit diesen Maßnahmen verbundenen Kosten in unterschiedlichen Sektoren. Die verschiedenen Marktpenetrationsraten in drei untersuchten Varianten sollen die Reichweite des CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzials veranschaulichen und sind nicht direkt als Prognosen bzw. Szenarien zu werten. Bei den beiden Varianten mit Marktanteilen von Elektrofahrzeugen wurde zum einen ein Mix an Antriebssystemen (Mixed-Technology-Szenario) und zum anderen eine stärkere Dominanz von Elektrofahrzeugen (Hybrid-and-Electric-Szenario) unterstellt.

Im Rahmen der Studie der Deutschen Bank Company Research (2009) wurde eine Kosten-Nutzen-Analyse unterschiedlicher Antriebskonzepte weltweit bis 2020 durchgeführt, die auf einem Vergleich der Payback-Zeiten verschiedener Antriebe im Kleinwagen-Segment mit durchschnittlichem Verbrauch basiert.

Roland Berger (2008) analysierte die Entwicklungen der Automobilbranche bis 2020. Dabei wurden die Entwicklung von Emissionsstandards für Fahrzeuge, die Marktdurchdringung mit BEV und PHEV und die sich daraus ergebenden Veränderungen mit zwei verschiedenen Szenarien für die Branche untersucht. In einer weiteren Studie von Roland Berger (2009) wurde dieselbe Analyse für den chinesischen Markt mit ähnlichen Ergebnissen be-

trachtet. Das erste Szenario geht von einer langsamen Marktdurchdringung mit BEV und PHEV aus. In den nächsten 5 bis 10 Jahren wird dabei zunehmend auf kleine, effiziente konventionelle Antriebe gesetzt. Im zweiten Szenario verläuft die Marktdurchdringung mit BEV und PHEV schneller. Die Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität ist in diesem Szenario besser ausgebaut. Die Ölpreise steigen und die Batteriekosten sinken schnell. Es werden starke politische Anreize für Autos mit geringen Emissionswerten gesetzt und die Autohersteller bieten eine entsprechende Produktpalette an.

Das UK BERR (2008) untersuchte mit vier Szenarien für die Durchdringung des Marktes in Großbritannien mit Elektrofahrzeugen mögliche Auswirkungen auf THG-Emissionen sowie auf andere Bereiche wie z. B. das Stromnetz. Das Business-as-usual-Szenario geht davon aus, dass sich der Markt für Elektrofahrzeuge aufgrund teurer Batterien und geringer Anreize der Regierung kaum entwickelt. Bei einem zweiten Szenario setzt die Politik verstärkte Anreize zum Kauf von Elektrofahrzeugen, wodurch diese ab 2015 preislich konkurrenzfähig sind. In einem dritten Szenario sind BEV und PHEV ebenfalls ab 2015 aus Kostensicht mit konventionellen Fahrzeugen vergleichbar, darüber hinaus ist die Infrastruktur besser ausgebaut und die Elektromobilität setzt sich auch in ländlichen Gebieten durch. Ein viertes und letztes Szenario geht von einer sehr starken Nachfrage nach BEV und PHEV aus, die kurzfristig nur durch das Angebot der Automobilbauer beschränkt ist.

Das EPRI (2007) erstellte in seiner Studie für die USA bis 2050 detaillierte Modelle der elektrischen Energieerzeugung und des Transportbereichs. Die Marktpenetrationszahlen ergaben sich aus einem Modell, das die Wahl der Kunden zwischen den einzelnen Antriebstechnologien berücksichtigte. Die Marktdurchdringung war durch Angebot und Kosten von PHEV beschränkt (BEV wurden nicht betrachtet).

AMADEE+COMPANY (2009) untersuchte weltweit die Elektrifizierung von Pkw bis zum Zeithorizont 2020. Neben dem Automobilmarkt wurden Batteriemarkt und -technologien, Rohstoffnachfrage und Auswirkungen der Elektrifizierung analysiert. Es wurden für die Marktprognosen in den USA und Europa dieselben Zahlen verwendet wie in der Studie der Deutschen Bank Company Research (2009). Für die weltweite Prognose lagen keine Angaben zum Vorgehen vor.

In einem ersten Szenario der Studie des MIT (2008) für die USA, in der die Möglichkeiten der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und des Emissionsausstoßes von Fahrzeugen untersucht wurden, ging man davon aus, dass in den nächsten 3 Jahrzehnten keine Antriebstechnologie dominieren wird. In einem zweiten Szenario dominieren die konventionellen Antriebe die Entwicklung, wobei der Abgasturbolader stark an Bedeutung gewinnt. HEV können sich aufgrund hoher Kosten und einer geringen Weiterentwicklung der Batterien nicht durchsetzen. In einem dritten Szenario haben HEV und PHEV aufgrund sinkender Batteriekosten und einer verbesserten Integration von Motor und Batterie den größten Marktanteil.

Die Resultate der IEA (2009) für eine weltweite Betrachtung stammten aus einem vorab veröffentlichten Auszug aus dem World Energy Outlook 2009. Es wurden in diesem Auszug keine Angaben zu der Vorgehensweise bei den Modellen und zu den Annahmen der Szenarien gemacht.

Eine auf Deutschland begrenzte Studie ist das „Marktmodell Elektromobilität“ vom ESMT (2011). Das dafür verwendete Marktmodell Elektromobilität simulierte die Marktdurchdringung verschiedener Antriebstechnologien (Benzin, Diesel, Gas, HEV, PHEV, BEV und FCEV) für die Personalfahrzeugflotte. Der Fokus lag auf Fahrzeugen mit elektrischer Antriebskomponente. Dabei wurden verschiedene Annahmen bzgl. exogener Rahmenbedingungen wie Treibstoffpreise, Strompreise und Batteriekostenentwicklung getroffen. Mit dem Modell können verschiedene Politikoptionen (Flottengrenzwerte, Kaufprämien etc.) modelliert werden. Die Bewertung der Politikoptionen erfolgte unter einer volkswirtschaftlichen Gesamtberechnung der Kosten und Nutzen in den verschiedenen Szenarien. Im Referenzszenario ohne Politikeingriff wird die Elektrifizierung des Antriebsstrangs vor allem durch Hybridisierung erreicht (HEV, PHEV). Das Politikziel der Bundesregierung von 6 Millionen Fahrzeugen mit Elektroantrieb im Jahr 2030 wird in diesem Szenario erreicht. Allerdings sind gemäß den Simulationsergebnissen bis 2020 ohne Förderung lediglich 460 000 Elektrofahrzeuge im deutschen Fahrzeugbestand. Moderate Änderungen von Ölpreis, Strompreis, Batteriekosten oder anderen Einflussfaktoren können diese Zahl aber auch auf 200 000 reduzieren oder auf 800 000 Fahrzeuge erhöhen. In weiteren Szenarien wurde der Einfluss verschiedener Politikoptionen untersucht.

Vom Fraunhofer ISI (2008) wurden in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) und dem Institut für Hochspannungstechnik (IFHT) der RWTH Aachen in einer Studie zur Untersuchung möglicher Chancen und Risiken der Elektromobilität zwei Marktpenetrationsszenarien für Deutschland entwickelt: Ein Szenario (Dominanzszenario) geht von sehr optimistischen Annahmen für die Marktdurchdringung der Elektromobilität aus. Es prognostiziert eine komplette Substitution des konventionellen Fuhrparks bis 2050 durch Hybrid- und Elektrofahrzeuge. Das Szenario wird damit begründet, dass die Hybridisierung sich weitgehend durchsetzt, technologische Entwicklungsziele bei Elektrofahrzeugen, insbesondere eine Senkung der Batteriekosten und Verlängerung der Batterielebensdauer, schnell erreicht werden und die Rohölpreise deutlich steigen. Dies führt zu einer Dominanz der Elektromobilität beim Individualverkehr. Elektroroller und -fahrräder setzen sich weitgehend durch, PHEV und innerstädtische BEV-Kleinwagen ab Mitte 2015 und ab Mitte 2025 dann auch größere BEV-Pkw. Das zweite Szenario (Pluralismusszenario) prognostiziert eine schwächere Marktpenetration. Als wesentliche Annahme liegt diesem Szenario zugrunde, dass die Elektromobilität eine unter vielen Optionen zur Effizienzsteigerung im Individualverkehr darstellt und eine Diversifikation an Kraftstoffen und An-

triebssystemen stattfindet. Im Gegensatz zum ersten Szenario machen Hybrid- und Elektrofahrzeuge nur einen Teil des gesamten Fahrzeugparks aus. Neben den konventionellen Kraftstoffen haben auch Biokraftstoffe sowie Gasfahrzeuge wesentliche Marktanteile. Die reale Kraftstoffpreissteigerung ist moderat. Durch einen vergleichsweise hohen Batteriepreis bleibt die Anzahl von BEV gering.

Diese beiden Szenarien des Fraunhofer ISI (2011) wurden im Hinblick auf die europa- bzw. weltweite Fahrzeugentwicklung weiterentwickelt, um u. a. einen Vergleich mit anderen internationalen Studien ziehen zu können. Da diese Szenarien bisher nicht veröffentlicht wurden, werden im Folgenden die zugrundeliegenden Annahmen kurz beschrieben. Es wird angenommen, dass die Entwicklung der Elektromobilität in Nordamerika, Japan und China parallel zu der in Europa verläuft. Der restliche Teil der Welt wurde in Bezug auf die Verbreitung der Elektromobilität mit 5 Jahren Verzögerung im Vergleich zu Europa eingerechnet. Die künftige Entwicklung der Gesamtfahrzeugbestände in den einzelnen Weltregionen wurde aus dem IEA-Transport-Spreadsheet-Modell des WBCSD (2004) entnommen. Zur Berechnung der Neuzulassungszahlen wurde eine Lebensdauer von 10 Jahren für alle Fahrzeugtypen angenommen.

### Vergleich der Ergebnisse

In der Regel wurden in den Studien auf Basis unterschiedlicher Annahmen mehrere Szenarien erstellt, um eine große Spannbreite der möglichen Marktdurchdringung mit Elektrofahrzeugen abzudecken und die unterschiedlichen Auswirkungen zu untersuchen. Meist wurde ein Basisszenario aufgenommen, welches keine oder nur eine sehr geringe Durchdringung mit Elektrofahrzeugen beschreibt. Da sich sowohl die Studien als auch die einzelnen Szenarien einer Studie bei den berücksichtigten Einflussgrößen sowie ihrer Entwicklung (z. B. Rohöl oder Batteriepreise), stark unterscheiden, ist dementsprechend die Spannbreite der resultierenden Marktdurchdringung sehr groß.

Die folgende Tabelle II.5 zeigt die Ergebnisse der Studien und Szenarien, die zuvor beschrieben wurden, in einer vergleichenden Gegenüberstellung. Dabei können nur jeweils die Studien sinnvoll miteinander verglichen werden, die denselben regionalen und zeitlichen Bezug haben und welche die Neuzulassungen explizit ausweisen.

Insgesamt zeigt der Vergleich für die jeweiligen Regionen und Zeithorizonte große Unterschiede zwischen den Studien hinsichtlich der resultierenden Anteile von HEV und Elektrofahrzeugen an den gesamten Neuzulassungen. Wenn nur BEV und PHEV betrachtet werden, liegt ihr Anteil im Jahr 2030 zwischen nahezu 0 und ca. 50 Prozent an den gesamten Neuzulassungen der einzelnen Länder. Für HEV wurde in fast allen Studien von relevanten Marktanteilen in der Zukunft ausgegangen, die aber wiederum in ihrer Höhe deutlich voneinander abweichen.

Tabelle II.5

**Vergleich von Marktpentrationsszenarien für Elektrofahrzeuge anhand der Neuzulassungen für verschiedene Jahre und Regionen (in Prozent)**

Anteil von PHEV, BEV und HEV an gesamten Neuzulassungen	weltweit					
	BEV und PHEV			HEV		
	2020	2030	2020	2030	2020	2030
McKinsey Mixed Technology	6	19	10	23		
McKinsey Hybrid and Electric	8	32	18	28		
AMADEE	3	–	27	–		
Fraunhofer-ISI-Pluralismus	2	6	22	28		
Fraunhofer-ISI-Dominanz	7	32	28	31		
IEA	11	35	8	24		
Deutsche-Bank-Studie	11		9			
	Europa					
	BEV und PHEV			HEV		
	2015	2020	2015	2020	2015	2020
Fraunhofer-ISI-Pluralismus	1	2	21	22		
Fraunhofer-ISI-Dominanz	4	8	22	30		
IEA	–	18	–	20		
Deutsche-Bank-Studie	4	20	57	80		
BCG Steady pace	–	6	–	17		
BCG Acceleration	–	19	–	18		
	Deutschland					
	BEV und PHEV			HEV		
	2015	2020	2030	2015	2020	2030
Fraunhofer-ISI-Pluralismus	2	3	11	28	27	46
Fraunhofer-ISI-Dominanz	5	10	48	30	39	52
ESMT-Referenzszenario	–	4	38	–	22	24
SHELL-Studie „Automobile Anpassung“	–	0	3	–	6	20
SHELL-Studie „Automobilität im Wandel“	–	3	10	–	17	50

Eigene Zusammenstellung (Referenzen der Studien finden sich im Text)

Die Ergebnisse spiegeln die große Unsicherheit von Prognosen zur Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen wider, da viele Faktoren Einfluss haben, die ihrerseits in ihrer Entwicklung kaum zuverlässig vorhergesagt werden können. Diese beziehen sich zum einen auf die Entwicklung der für die Elektromobilität benötigten Fahrzeugtechnologien selbst (z. B. der Batterien), zum anderen auf relevante Rahmenbedingungen wie Energiepreisentwick-

lungen, politische Maßnahmen (z. B. Anreize) oder Fortschritte bei Konkurrenztechnologien.

Deshalb wird in den Studien i. d. R. mit Szenarien für die Faktorenentwicklung gearbeitet und eine große Breite an möglichen Ergebnissen aufgespannt. Es sind somit keine Prognosen, die versuchen, den wahrscheinlichsten Eintrittsfall zu skizzieren.

### 2.3 Marktpenetration nach der NPE

Aufbauend auf dem Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität (NEP) (Bundesregierung 2009) wurde auf Einladung der Bundeskanzlerin Anfang 2010 die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) gegründet. In der NPE sollen Vertreter aus Politik, Industrie und Wissenschaft gemeinsam Strategien entwerfen, um die technologische Weiterentwicklung der Elektromobilität zu fördern und in Deutschland einen Leitmarkt für Elektromobilität zu schaffen. Ein markantes Ziel ist hierbei der Betrieb von mindestens 1 Million Elektrofahrzeugen in Deutschland bis zum Jahr 2020 (Bundesregierung 2009). In diesem Kapitel wird dargelegt, wie und mit welchem zeitlichen Verlauf das Ziel gemäß NPE erreicht werden kann. Dabei liegt der Schwerpunkt der NPE nicht auf der Prognose einer tatsächlichen Marktpenetration von BEV oder PHEV, sondern mehr auf den Rahmenbedingungen hinsichtlich Infrastruktur und Förderung.

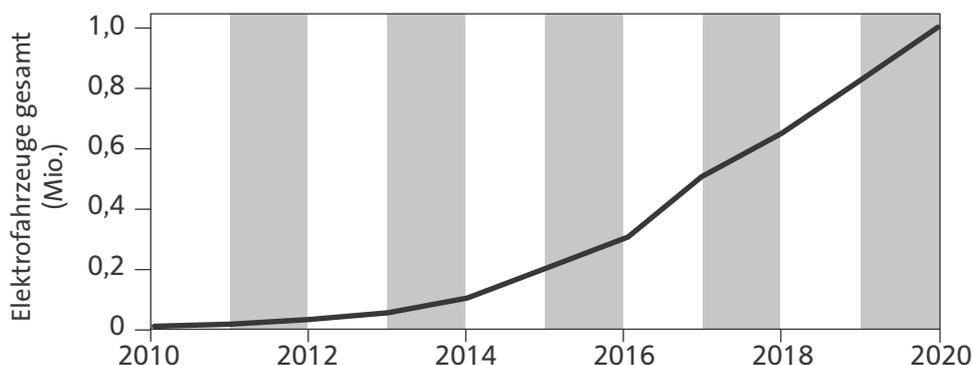
In ihrem zweiten Bericht analysiert die NPE (2011a), welche politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen zur Erreichung der von der Bundesregierung gesetzten Ziele gegeben sein müssen. Hierbei liegt der Schwerpunkt zum einen auf einer Industriepolitik sowie der Koordination von FuE, zum anderen auf der akademischen und beruflichen Bildung. Ein weiterer Schwerpunkt der Studie liegt auf Normung und Standardisierung, um Entwicklungstätigkeiten effizienter gestalten und Skaleneffekte besser nutzen zu können. Der Bericht beschreibt die erwartete Marktentwicklung bis zum Jahr 2020. Während bei fehlenden Anreizen die erwartete Anzahl Elektrofahrzeuge im Jahr 2020 unter 500 000 bleibt, können aus Sicht der NPE bei entsprechenden Maßnahmen im Jahr 2020 1 Million Elektrofahrzeuge erreicht werden. Von diesen sind 45 Prozent BEV und 55 Prozent PHEV (50 Prozent PHEV-Pkw und 5 Prozent PHEV-Nutzfahrzeuge). Die erwartete zeitliche Entwicklung zur Erreichung dieses Zieles ist in Abbildung II.7 dargestellt. Dabei werden drei Phasen unterschieden. Die „Marktvorbereitungsphase“ (bis 2014) stellt die erste Phase dar.

In dieser Phase schneiden die elektrischen Antriebe bzgl. der TCO noch deutlich schlechter als konventionelle Antriebe ab und es ist noch kein entsprechendes Angebot an Elektrofahrzeugen, insbesondere von deutschen Automobilherstellern, auf dem Markt erhältlich. Eine Kombination aus monetären und nichtmonetären Anreizen (z. B. Kfz-Steuersenkung, Sonderregelungen bei der Abschreibung von Elektrofahrzeugen, Nachteilsausgleich bei der Dienstwagenbesteuerung, Prüfung eines öffentlichen Beschaffungsprogramms für Elektrofahrzeuge) wird als notwendig erachtet. Die zweite Phase stellt die „Markthochlaufphase“ (2015 bis 2017) dar, in der das Angebot an Elektrofahrzeugen breiter und die Differenz bzgl. der TCO zwischen Elektro- und konventionellen Fahrzeugen kleiner wird. Die für die erste Phase als notwendig erachteten Anreize könnten in dieser Phase langsam zurückgefahren werden. Die dritte Phase, der „Beginnende Massenmarkt“ (2018 bis 2020), bringt die höchste Zunahme an neuen Elektrofahrzeugen. In dieser Phase liegen die TCO von Elektrofahrzeugen nur noch wenig höher als die konventioneller Fahrzeuge und ein entsprechendes Angebot an Fahrzeugen macht den Elektroantrieb zu einer konkurrenzfähigen Alternative in allen Fahrzeugsegmenten. Bezüglich der als notwendig erachteten Anreize vonseiten der Politik werden Leitlinien für deren Gestaltung formuliert (z. B. Budgetbegrenzung, Erfolgskontrolle und Degression der Fördersummen).

Im dritten Bericht der NPE (2012) werden die bisher ergriffenen Maßnahmen der Politik zur Förderung der Elektromobilität bewertet. Dabei kommt die NPE zu dem Schluss, dass die für 2020 erwartete Zahl Elektrofahrzeuge durch die bisherigen Maßnahmen lediglich um 10 bis 20 Prozent steigt gegenüber der Zahl, welche ohne Anreizmaßnahmen erreicht würde (unter 500 000 Elektrofahrzeuge gemäß NPE 2011a). Um das gesetzte Ziel von 1 Million Elektrofahrzeuge bis 2020 zu erreichen, müssen die Rahmenbedingungen angepasst und geeignet nachgesteuert werden.

Abbildung II.7

#### Marktpenetration im zweiten Bericht der NPE bei entsprechenden Maßnahmen



Quelle: NPE 2011a

**2.4 Einflussfaktoren auf die Marktpenetration**

In einer Reihe aktueller Studien wird davon ausgegangen, dass das deutsche Ziel von mindestens 1 Million Elektrofahrzeugen bis 2020 ohne starke zusätzliche finanzielle Kaufanreize nicht erreicht werden kann (ESMT 2011; NPE 2011a u. 2012). Sowohl die NPE (2011a u. 2012) als auch das Marktmodell Elektromobilität der ESMT (2011) erwarten eher 0,5 Millionen Elektrofahrzeuge bis 2020. Allerdings kann auch bei Verfehlen dieses Zwischenziels das Bestreben für 2030 von 6 Millionen Elektrofahrzeugen (etwa 10 Prozent der erwarteten deutschen Pkw-Flotte im Jahr 2030) oder mehr immer noch erreicht werden. Das Marktmodell Elektromobilität gibt in seinem Referenzszenario an, dass bis 2030 das Ziel der Bundesregierung von 6 Millionen Fahrzeugen mit insgesamt 6 Millionen auch ohne zusätzliche Fördermaßnahmen übertroffen wird (ESMT 2011).

Wenn auch in einigen Studien sich ein eher skeptisches Bild bei der Erreichung des Zieles von 1 Million Elektrofahrzeugen darstellt, so ist zu berücksichtigen, dass eine Reihe möglicher Einflussfaktoren unterstellt und als wichtig erachtet wird. Die wichtigsten sind:

- Entwicklung des Rohölpreises
- Entwicklung der Batterietechnologie und -preise
- technische und wirtschaftliche Entwicklungen bei den konventionellen Antrieben
- umweltpolitische Zielsetzungen und Maßnahmen, insbesondere im Rahmen der Klima- und Energiepolitik
- staatliche Subventionen
- Standardisierung
- Aufbau einer Ladeinfrastruktur
- Nutzerakzeptanz.

Je nach Entwicklung können sich diese Faktoren stark positiv oder stark hemmend auf die Marktpenetration von Elektrofahrzeugen auswirken. Mögliche Entwicklungen

dieser Einflussfaktoren müssen daher kontinuierlich beobachtet werden und Maßnahmen sollten so ausgestaltet sein, dass flexibel auf Änderungen der Einflussfaktoren reagiert werden kann.

**2.5 Elektrische Zweiräder**

Jenseits von Pkw und Nutzfahrzeugen bilden Zweiräder eine interessante Gruppe für Formen der Mobilität, die zum Teil oder ganz elektrisch angetrieben werden. Dabei handelt es sich um Fahrräder mit zusätzlichem Elektromotor und Batterie (sogenannte Pedelecs) oder um elektrisch betriebene Kleinkrafträder (Elektroroller). Elektrische Fahrräder sind in verschiedenen Teilen der Welt zum Teil sehr verbreitet. Laut Schätzungen sind in der Volksrepublik China über 100 Millionen Fahrräder mit zusätzlichem Elektromotor in Betrieb (Goodman 2010; Weinert et al. 2008; Yang 2010).

Marktzahlen der Verkäufe von Elektrofahrzeugen in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010 zeigt Tabelle II.6. Einen Vergleich der Entwicklungen der Marktanteile von Elektrofahrzeugen in Deutschland mit anderen europäischen Ländern von 2004 bis 2010 zeigt Abbildung II.8.

Tabelle II.6

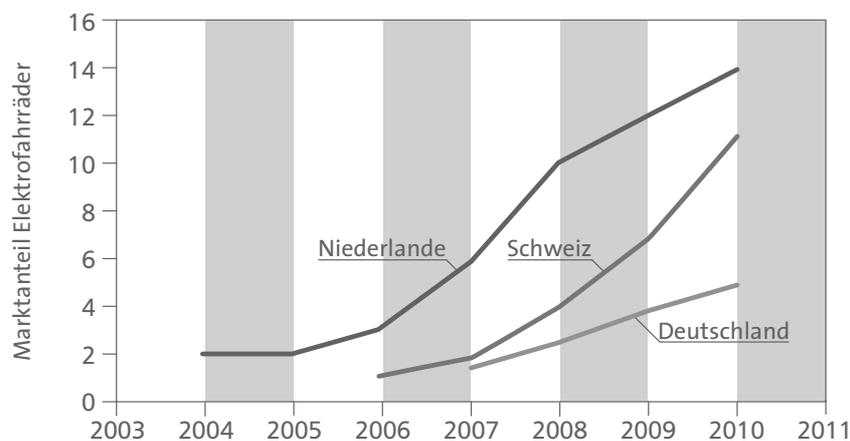
**Verkäufe von Elektrofahrzeugen in Deutschland**

Jahr	verkaufte Elektrofahrzeuge	Zuwachs gegenüber Vorjahr (Prozent)
2007	70.000	–
2008	110.000	57
2009	150.000	36
2010	200.000	33
2011	310.000	55

Eigene Zusammenstellung nach Zweirad-Industrie-Verband 2011

Abbildung II.8

**Marktanteile Elektrofahrzeuge im europäischen Vergleich in Prozent**



Eigene Darstellung nach Zweirad-Industrie-Verband 2011, [www.velosuisse.ch/files/Statistik\\_Velomarkt\\_2010.pdf](http://www.velosuisse.ch/files/Statistik_Velomarkt_2010.pdf), [www.bike-eu.com/facts-figures/market-reports/4920/the-netherlands-2010-e-bike-saves-dutch-bicycle-industry.html](http://www.bike-eu.com/facts-figures/market-reports/4920/the-netherlands-2010-e-bike-saves-dutch-bicycle-industry.html) u. [www.bike-eu.com/facts-figures/market-reports/4267/the-netherlands-2009-e-bike-dictates-dutch-market.html](http://www.bike-eu.com/facts-figures/market-reports/4267/the-netherlands-2009-e-bike-dictates-dutch-market.html) (1. Januar 2012)

## 2.6 Marktpenetrationsszenarien Brennstoffzellenfahrzeuge

Brennstoffzellenfahrzeuge werden in diesem Bericht zum Vergleich herangezogen. Daher folgt hier ein kurzer Überblick zu Marktstudien zu Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV). Zudem existieren derzeit auch deutlich weniger aktuelle Marktstudien zu FCEV im Vergleich zu anderen Formen der Elektromobilität. In den meisten für Verkehr und Energie entwickelten Szenarien spielt Wasserstoff keine oder nur eine sehr geringe Rolle. In den letzten Jahren sind jedoch mehrere spezielle Studien über Wasserstoff als Kraftstoff und Energieträger veröffentlicht worden, die Wasserstoff langfristig eine relevante oder sogar bedeutende Rolle im Verkehrssektor zuweisen. Dazu gehören die Arbeiten der Internationalen Energieagentur (IEA 2005), des im 6. Forschungsrahmenprogramms der Europäischen Union verankerten HyWays-Projekts zur Erarbeitung einer Roadmap für Wasserstoff (EK 2008) und die Studie von McKinsey (2011).

In diesen Studien wird eine große Bandbreite einer möglichen Marktdurchdringung mit FCEV aufgespannt. Unter den für die Entwicklung von Wasserstofffahrzeugen positiven Annahmen stellt sich nach den Analysen der IEA (2005) eine signifikante Marktdurchdringung von Wasserstofffahrzeugen in zwei von vier Szenarien ein. Zu Wasserstofffahrzeugen werden in der Studie neben FCEV auch verbrennungsmotorische Fahrzeuge, die Wasserstoff einsetzen, gezählt. In dem Szenario, in dem eine niedrigere Marktpenetration von Wasserstofffahrzeugen vorausgesehen wird (Scenario B: „Strong new CO<sub>2</sub> policies

in Kyoto countries and rapid technological development“) werden im Jahr 2030 rund 3 Prozent und im Jahr 2050 rund 10 Prozent der Fahrzeuge mit Wasserstoff betrieben. Während in dem Szenario mit den höheren Penetrationsraten (Scenario D: „Strong new CO<sub>2</sub> policies worldwide, with rapid technological development“) rund 12 Prozent im Jahr 2030 weltweit und gut 30 Prozent im Jahr 2050 erreicht werden. Diese beiden Szenarien gehen davon aus, dass zum einen die Preise für die Wasserstoffherzeugung (Reduktion um den Faktor 3 bis 10, je nach Technologie) und die Preise für Brennstoffzellen (Reduktion um den Faktor 10) deutlich fallen. Abhängig von den Preisen für fossile Brennstoffe wird außerdem eine Besteuerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 25 bis 50 US-Dollar/t angenommen.

Von einer noch schnelleren Marktdurchdringung geht das europäische Projekt „HyWays“ in seinen Szenarien aus (EK 2008). Im Fall eines Szenarios mit „sehr geringer politischer Unterstützung und langsamem technologischem Fortschritt“ kommt es zu einer Penetration von rund 2 Prozent im Jahr 2030 und zu einem Anteil von rund 36 Prozent im Jahr 2050 in Europa. In dem bezüglich der Marktpenetration höchsten HyWays-Szenario mit der Annahme einer sehr hohen politischen Unterstützung für Wasserstoff und einer schnellen technologischen Entwicklung sind im Jahr 2030 schon gut 25 Prozent aller Pkw Wasserstofffahrzeuge (FCEV und Verbrenner), im Jahr 2050 sogar über 70 Prozent der Fahrzeuge.

Für die Studie von McKinsey (2011) hatten sich 30 Unternehmen, Regierungs- und Nichtregierungsorganisatio-

Tabelle II.7

### Übersicht Marktstudien und Szenarien zu FCEV

Studie	untersuchter Markt und Zeithorizont	Antriebsart Wasserstoff	Szenarien	Neuzulassungen/Bestand
IEA 2005	weltweit, 2050	FCEV, Verbrenner	Scenario A: Weak CO <sub>2</sub> policies, liberalized markets and market-driven technological development; Scenario B: Strong new CO <sub>2</sub> policies in Kyoto countries and rapid technological development; Scenario C: Strong new CO <sub>2</sub> policies in Kyoto countries, but technological development lags; Scenario D: Strong new CO <sub>2</sub> policies worldwide, with rapid technological development	Bestand
EK 2008	Europa, 2013–2050	FCEV, Verbrenner	Very high policy support, fast learning; High policy support, fast learning; High policy support, modest learning; Modest policy support, modest learning	Bestand
McKinsey 2011	Europa, 2050	PHEV, BEV, FCEV, ICE	A world skewed towards ICE; A world skewed towards electric power-trains; A world skewed towards FCEVs	Bestand

Eigene Zusammenstellung

nen zusammengefasst, um eine fachliche Bewertung der Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit und Leistung von FCEVs, aber auch von BEV, PHEV und ICE entlang der gesamten Wertschöpfungskette bis zum Jahr 2050 zu erarbeiten. Die Unternehmen stellten hierfür firmeninterne Daten zur Verfügung, welche auch die Fahrzeugkosten, Betriebskosten, Treibstoff- und Infrastrukturkosten beinhalten. Betrachtet wurden nur in FuE geprüfte Fahrzeugtechnologien, die für den Scale-up sowie für die kommerzielle Einführung geeignet sind und die dazu beitragen die CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele der EU bis 2050 zu erfüllen. Es wurden drei Szenarien definiert für 2050 (Abb. II.9):

- „World skewed towards ICE“ (mit folgenden Bestandszahlen im Jahr 2050: 5 Prozent FCEV, 10 Prozent BEV, 25 Prozent PHEV, 60 Prozent ICE),
- „World skewed towards electric power-trains“ (25 Prozent FCEV, 35 Prozent BEV, 35 Prozent PHEV, 5 Prozent ICE) und
- „World skewed towards FCEVs“ (50 Prozent FCEV, 25 Prozent BEV, 20 Prozent PHEV, 5 Prozent ICE).

Der Fokus lag dabei auf dem zweiten Szenario, das eine ausgewogene Aufteilung zwischen den vier Antrieben vorsieht. Im Gegensatz zu einigen anderen Studien werden Fahrzeuge verschiedener Segmente mit unterschiedlicher Fahrzeuggröße und jährlicher Fahrleistung einbezogen, um zu untersuchen, für welches Segment welche Antriebsart am geeignetsten ist.

Ähnlich wie bei den Markthochlaufszszenarien für BEV und PHEV gilt auch für FCEV, dass die Spannweite der Marktdurchdringung zwischen den Szenarien der Studien sehr hoch ist. Die Spannweite reicht von keiner nennenswerten Marktdurchdringung bis hin zu 70 Prozent im Jahr 2050 (Pkw-Bestand). Den Studien ist gemein, dass eine Markteinführung von FCEV nur unter der Voraussetzung technologischer Durchbrüche im Bereich der Fahrzeuge

und insbesondere im Bereich der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks erfolgreich sein kann. Wesentliche weitere Treiber für eine schnelle und hohe Marktdurchdringung sind die Erreichung von Kostensenkungszielen beim Antrieb, ambitionierte Klimaschutzziele, politische Unterstützung in der Anfangsphase und hohe Rohölpreise. Eine Konkurrenz zwischen BEV, PHEV und FCEV wird nur bedingt gesehen, weil zumindest mit Blick auf die nächsten 1 bis 2 Dekaden zum Teil unterschiedliche Pkw-Segmente und Käuferschichten angesprochen werden (Kap. III.2.1.3). Erst wenn Batterien der sogenannten 3. und 4. Generation zur Verfügung stehen (Kap. II.1.1), welche das Potenzial für eine deutliche Steigerung der Energiedichte und damit der Reichweite haben und damit der Reichweite konventioneller Fahrzeuge nahe kommen, wird die Konkurrenz um ähnliche Marktsegmente größer werden.

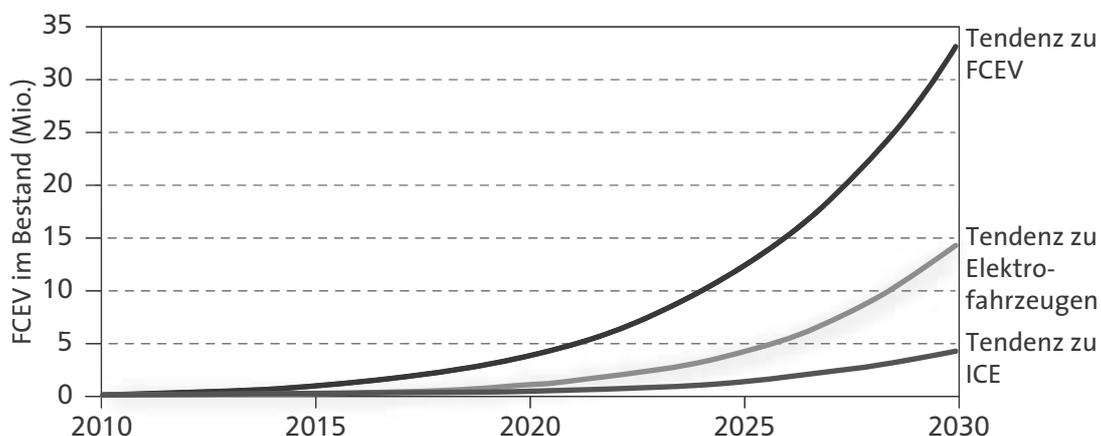
### 2.7 Festlegung des deutschlandweiten Markthochlaufszszenarios

Für den vorliegenden Bericht wird im Folgenden ein Markthochlaufszszenario für die Verbreitung von Elektrofahrzeugen (BEV und PHEV) und FCEV in Deutschland festgelegt. Dieses Szenario wird den eigenen Analysen im Rahmen der ökologischen Bewertung in Kapitel III.1 zugrunde gelegt, welche Stromnachfrage und Laständerung sowie Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Elektrofahrzeuge in Deutschland untersuchen.

Für die Analysen der Effekte auf die automobilen Wertschöpfung (Kap. III.2.2), der gesamtwirtschaftlichen Effekte (Kap. III.2.4) sowie des Bedarfs und der Verfügbarkeit von kritischen Rohstoffen (Kap. III.2.5) ist dagegen die zukünftige weltweite Nachfrage bzw. Verbreitung von Elektrofahrzeugen relevant. Daher wurden für die entsprechenden Analysen Szenarien zur weltweiten Verbreitung von Elektrofahrzeugen herangezogen. Dabei wurden die zugrundegelegten Annahmen möglichst kon-

Abbildung II.9

Drei Markthochlaufszszenarien für FCEV (weltweit)



Eigene Darstellung nach McKinsey 2011

sistent mit jenen für das deutschlandweite Szenario formuliert. Die entsprechenden Szenarien werden zur Erleichterung des Überblicks jeweils in den entsprechenden Kapiteln eingeführt.

Für Deutschland wird die Marktpenetration mit Elektrofahrzeugen bis 2020 und 2030 auf folgender Basis festgelegt.

- Politische Vorgaben der Bundesregierung (2011): Die Bundesregierung visiert für zweispurige Fahrzeuge einen Markthochlauf von mindestens 1 Million Elektrofahrzeugen bis 2020 und mindestens 6 Millionen bis 2030 an. Darunter werden BEV und PHEV gefasst, allerdings keine FCEV.
- Zweiter Bericht der NPE (2011a) zu BEV und PHEV bzw. REEV: Für 2020 werden durchschnittlich 45 Prozent BEV und 55 Prozent PHEV im Bestand an Elektrofahrzeugen erwartet, dabei stellen PHEV-Nutzfahrzeuge 5 Prozent des Bestands dar. Als Zwischenschritte für die Entwicklung bis 2020 werden 2014 100 000 Elektrofahrzeuge und 2017 500 000 Elektrofahrzeuge im Bestand erwartet.

Im vorliegenden Bericht werden für die Aufteilung zwischen BEV und PHEV folgende Werte angenommen: Für 2015 werden ca. 50 Prozent BEV und 50 Prozent PHEV angenommen, für 2020 und 2030 jeweils ca. 40 Prozent BEV und 60 Prozent PHEV. Im Vergleich zu den NPE-Zahlen werden leicht höhere Werte für PHEV unterstellt, weil in neuen Wirtschaftlichkeits- und Akzeptanzstudien vermehrt darauf hingewiesen wird, dass diese einen relevanten Marktanteil gewinnen können (Fraunhofer ISI 2012a; Kley 2011).

Für die Marktpenetration mit FCEV wird das Szenario „world skewed towards electric power-trains“ von McKinsey (2011) zugrunde gelegt. Dieses Szenario wird ausgewählt, weil es neben FCEV auch BEV und PHEV im Markthochlauf berücksichtigt. Je nach Segment werden unterschiedliche Marktanteile erwartet. Somit passt

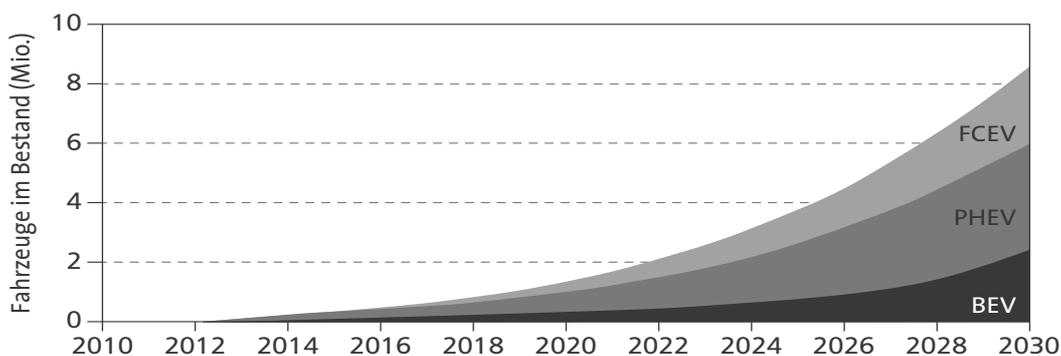
es gut zu der These dieses Berichts, dass sich mehrere Formen der Elektromobilität durchsetzen können.

In Abbildung II.10 und Tabelle II.8 ist das Markthochlaufszenario für Deutschland für BEV, PHEV und FCEV dargestellt, das diesem Bericht für die weiter führenden Auswertungen zugrunde liegt. BEV sind derzeit bereits auf dem Markt, allerdings mit noch recht bescheidenen Verkaufszahlen in Deutschland; das Kraftfahrtbundesamt zählte zu Beginn des Jahres 2012 rund 4 500 BEV. Viele Volumenmodelle von den etablierten Automobilfirmen sind allerdings für 2012 und 2013 für den deutschen Markt angekündigt (Gnann/Plötz 2011). BEV können zeitnah die ersten Elektrofahrzeuge mit nennenswerten Verkaufszahlen werden. Derzeit werden aber auch erste PHEV von Volumenherstellern angeboten und für einige weitere ist in den nächsten Jahren die Markteinführung anvisiert (Gnann/Plötz 2011). Ab 2014/2015 sind erste FCEV-Modelle als kommerzielle Modelle für den Verkauf in Deutschland von Mercedes und Nissan angekündigt (Gnann/Plötz 2011).

Für die weiter führenden Analysen ist es notwendig, die Fahrzeugklassen differenzierter zu betrachten. Auf Basis aktueller Serienfahrzeuge und Ankündigungen (Gnann/Plötz 2011) sowie Wirtschaftlichkeitsanalysen (Kap. III.2.1) ist es möglich abzuschätzen, in welchen Fahrzeuggrößenklassen sich die einzelnen Antriebsarten eher durchsetzen können. FCEV kommen überwiegend für große Pkw mit hohen täglichen und jährlichen Fahrleistungen infrage. In diesem Segment sind die PHEV wirtschaftlich nicht besonders attraktiv, weil bei diesen Fahrprofilen der verbrennungsmotorische Anteil recht hoch ist. BEV können derartige Fahrprofile wegen ihrer noch limitierten Reichweite und aufgrund notwendiger Ladezeiten derzeit nicht abdecken. PHEV zeigen sich insbesondere für mittlere Fahrzeuggrößen und bei regelmäßigen täglichen Fahrprofilen als attraktive Option. BEV sind eher für kleinere Pkw interessant. Für das Segment leichte Nutzfahrzeuge bieten sich FCEV oder PHEV derzeit an.

Abbildung II.10

#### Markthochlaufszenario für Elektrofahrzeuge in Deutschland für den Fahrzeugbestand



Eigene Berechnungen

Tabelle II.8

**Markthochlaufszenario für Deutschland nach  
Antriebsarten und Fahrzeuggröße  
(Fahrzeugbestände in Millionen)**

Antriebsart und Fahrzeuggröße	Zeithorizont	
	2020	2030
BEV		
klein	0,38	1,60
mittel	0,001	0,77
groß	0,00	0,12
Summe	0,38	2,49
PHEV		
klein	0,002	0,04
mittel	0,48	2,33
groß	0,08	0,83
LNF	0,05	0,30
Summe	0,61	3,50
FCEV		
mittel	0,04	0,50
groß	0,28	2,00
LNF	0,03	3,50
Summe	0,35	6,00

Eigene Zusammenstellung

### 3. Verkehrskonzepte

Dieses Kapitel beschreibt aussichtsreiche Verkehrskonzepte für eine Integration der Elektromobilität in die heutigen Verkehrssysteme. Dabei werden auch neue kooperative Formen der Mobilität beleuchtet und die Auswirkungen der Elektromobilität auf die Kommunen und Städte analysiert, einschließlich deren Rolle bei der Einführung der Elektromobilität. Erfahrungen aus Flottenversuchen und Modellregionen in Deutschland und aus dem internationalen Umfeld werden dabei einbezogen.

#### 3.1 Überblick über Konzepte und Nachfrage

Die Restriktionen bezüglich Reichweite und Ladezeiten bei BEV müssen nicht in jedem Fall zu nennenswerten Einschränkungen bei der Befriedigung bestehender Mobilitätsbedürfnisse und -anforderungen im Personenverkehr und Gütertransport führen. So zeigen Follmer et al. (2003) sowie aktuelle Auswertungen des Mobilitätspanels Deutschland (Zumkeller et al. 2011) und der Fahrprofile aus Mobilität in Deutschland (Follmer et al. 2010a

u. 2010b), dass bis ca. 80 Prozent der Privat-Pkw in Deutschland am Tag weniger als 60 km zurücklegen (Kap. II.1.4.3; Biere et al. 2009). Diese Fahrten wären problemlos mit BEV zu bewältigen. Wie in Kapitel II.1 ausgeführt, eignen sich demgegenüber für den Einsatz auf längeren Strecken PHEV, welche lange Fahrstrecken und schnelle Betankungszeiten ermöglichen und gleichzeitig auf kurzen Strecken geringere Verbrauchskosten im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen aufweisen.

Die Betrachtung von Elektrofahrzeugen als simplen Ersatz von konventionellen Pkw wird aber dem Potenzial der Elektromobilität und auch dem Potenzial der verschiedenen Verkehrsmittel für eine nachhaltige Mobilität nicht gerecht. So lassen sich Elektrofahrzeuge bereits mit ihren heutigen Reichweiten und Ladezeiten sinnvoll in Flotten oder multimodale Mobilitätsangebote integrieren, womit deren Stärken und Schwächen durch konventionelle Fahrzeuge oder alternative Mobilitätsdienste ergänzt und ausgeglichen werden können. Diesen Einsatzmöglichkeiten im Rahmen umfassender Mobilitätsangebote kommen aktuelle Trends im Nachfrage- und Mobilitätsverhalten entgegen. So gibt es Anzeichen, dass das Mobilitätsverhalten der Verkehrsteilnehmer, insbesondere in Großstädten, flexibler und multimodaler wird (ifmo 2011). Ein gewisser Trend der Nachfrage hin zum „Nutzen statt besitzen“ und ein Interesse an neuen, integrierten Mobilitätskonzepten lassen sich feststellen. Insbesondere bei jungen Menschen in urbanen Räumen zeigen sich rückläufige Autobesitz- und Nutzungsraten (Bratzel/Lehmann 2010; Follmer et al. 2010a; ifmo 2011).

Je weiter sich dieser flexible Umgang mit Mobilitätsangeboten durchsetzt, desto eher können Elektrofahrzeuge als Bestandteil öffentlich zugänglicher Fahrzeugflotten für kurze und mittlere Distanzen außerhalb der ÖPNV-Kernetze und Bedienzeiten zum Einsatz kommen. Umgekehrt regen Elektrofahrzeuge wegen der beschränkten Reichweite sowie langen Ladezeiten zur Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel an, falls eine grundsätzliche Offenheit der Nutzer gegenüber dem ÖPNV gegeben ist. Damit könnten Elektrofahrzeuge dazu beitragen, einer breiten Kundengruppe für alle Wegstrecken und zu allen Zeiten verfügbare und umweltfreundliche Verkehrsmittel zur Verfügung zu stellen. Gleichzeitig ergänzen sie den öffentlichen Verkehr um flexible und individuell nutzbare Optionen und erlauben es so, Kunden anzusprechen bzw. zu halten, welche nicht dem klassischen Nutzer des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) entsprechen (Canzler/Knie 2011; Follmer et al. 2010a).

In den folgenden Kapiteln werden verschiedene Einsatzbereiche bzw. Mobilitätskonzepte, die sich für Elektrofahrzeuge anbieten, vorgestellt und im Hinblick auf den Status quo sowie die Entwicklungspotenziale umrissen. Diese umfassen die kollektive Nutzung von Pkw- und Zweiradflotten, deren Integration in den städtischen Mobilitätsverbund, Firmenflotten sowie Liefer- und Serviceleistungen mit Elektrofahrzeugen.

## 3.2 Elektrofahrzeuge im Carsharing

### 3.2.1 Bedeutung und Chancen

Eine Nutzung von Elektrofahrzeugen im Carsharing und damit in der Regel in Kombination mit anderen Verkehrsmitteln erscheint vor allem für Nutzer in urbanen Regionen attraktiv und mit einer Reihe von Vorteilen verbunden. Der Kunde zahlt nur noch für die tatsächliche Nutzung des Fahrzeugs, wodurch hohe Anschaffungsinvestitionen und die Wartung entfallen. Der Pool an verschiedenen Fahrzeugen innerhalb des Systems „Carsharing“ bietet darüber hinaus die Option, das für den jeweiligen Fahrzweck angemessene Fahrzeugkonzept zu wählen bzw. auf konventionelle Fahrzeuge auszuweichen, wenn ein Elektrofahrzeug sich nicht eignet bzw. keines einsatzbereit ist.

Der internationale Erfolg von Car- und Bikesharingsystemen, welche eine spontane und flexible Nutzung ermöglichen, zeigt, dass die Integration der Verkehrssysteme und der Übergang zu neuen Konzepten sehr wohl möglich sind und bereits stattfinden. Neue Formen des Carsharing wie das Car2go-Konzept von Daimler bieten den Kunden die spontane Nutzung der Fahrzeuge an, beziehen die Möglichkeiten neuer Medien in die Fahrzeugbuchung und Kommunikation zwischen Kunden und Betreiber ein oder verzichten auf die Bindung von Fahrzeugen an feste Stationen. Die Entwicklungen der letzten Jahre zeigen, dass durch diese Vereinfachungen die Kundenakzeptanz gegenüber dem häufig als „planungintensiv“ betrachteten klassischen Carsharing (mit festen Fahrzeugstandorten und im Voraus zu buchenden Nutzungszeiten) deutlich verbessert werden kann. Eine Motivation zur Förderung batterieelektrischer Fahrzeuge in Carsharingflotten besteht schließlich darin, potenziellen Nutzern die Möglichkeit zu geben, diese zu erleben und auszuprobieren, ohne die hohen Anschaffungsinvestitionen und die mit einer neuen Technologie verbundenen Risiken und Unsicherheiten tragen zu müssen. Das Testen von Elektrofahrzeugen im Alltag führt zu höheren Akzeptanzwerten, wie sich bei den Befragungen in den acht von der Bundesregierung im Rahmen des Konjunkturpakets II geförderten Modellregionen Elektromobilität (Hamburg, Bremen/Oldenburg, Berlin, Rhein-Ruhr, Sachsen, Rhein-Main, Stuttgart und München) gezeigt hat (Schneider et al. 2013).

### 3.2.2 Marktlage und Technologie

Zur Jahresmitte 2012 haben einige Carsharingunternehmen an verschiedenen Standorten weltweit BEV oder PHEV in ihre Flotten aufgenommen oder kündigen dies für die nahe Zukunft an. Dabei sind die klassischen Carsharinganbieter, bei welchen die Fahrzeuge ausschließlich an festen Stationen für eine im Voraus anzugebende Dauer mit anschließender Rückgabe an derselben Station genutzt werden können, eher zurückhaltend beim Einsatz von Elektrofahrzeugen. Die Branchenführer in Deutschland, Flinkster (DB Rent GmbH), die stadtmobil-Gruppe und cambio, boten Ende 2012 50 BEV an. Hiervon stellt Flinkster mit 100 Elektrofahrzeugen (BEV: Citroën e-C1, Citroën C-Zero, Smart ED; PHEV: Toyota Prius Plug-in

Hybrid) im Rahmen der Modellregion Berlin-Brandenburg sowie an den Standorten Frankfurt, Hamburg und Saarbrücken die größte öffentlich zugängliche Flotte von Elektrofahrzeugen. Die stadtmobil-Gruppe betreibt 1 PHEV (Toyota Prius Plug-in Hybrid) und 3 BEV (Fiat 500 E und Renault Fluence) im Raum Karlsruhe. Cambio betreibt teilweise in Kooperation mit Greenpeace Energy 7 BEV in Köln, Hamburg und Aachen.

Demgegenüber kündigen neue Carsharinganbieter, hinter denen in der Regel Automobilkonzerne (Daimler bei car2go oder BMW und Sixt bei DriveNOW) stehen, sehr viel größere Elektrofahrzeugflotten an. Die neuen oder flexiblen Konzepte besitzen keine festen Stationen, sondern erlauben das Ausleihen und Abstellen der Fahrzeuge an einem beliebigen Ort innerhalb einer definierten Zone. Somit sind Einwegfahrten möglich und die Dauer der Nutzung muss nicht bei Fahrtantritt angegeben werden. Die europaweit größte Flotte soll dabei von Autolib mit 3 000 BEV des Typs Bolloré Bluecar bis Ende 2012 in Paris bereitgestellt werden. Außerhalb Europas hat der Daimler-Konzern im Rahmen seines Angebots car2go 300 BEV des Typs Smart Electric Drive (ED) in San Diego (Kalifornien) bereitgestellt, während die übrigen 15 Standorte in USA, Kanada, Deutschland, den Niederlanden und Österreich mit etwa 5 500 konventionell angetriebenen Pkw ausgestattet sind. Das Angebot Multicity von Citroën bietet derzeit 100 BEV der Marke Citroën C-Zero in Berlin an, die Flotte soll jedoch auf 500 Fahrzeuge ausgebaut werden (Tab. II.9).

In seinem Positionspapier stellt der bcs (2012a) grundsätzlich fest, dass Elektrofahrzeuge eine gute Ergänzung für Carsharingflotten darstellen können. Praxistests von cambio in Hamburg weisen auf eine hohe Akzeptanz von E-Fahrzeugen in Carsharingflotten durch Carsharingnutzer hin (cambio 2012). Für den breiten Einsatz von Elektrofahrzeugen in Carsharingflotten müssen allerdings die Kosten für Fahrzeuge und Ladestationen sinken und die Buchungssoftware der Carsharinganbieter an die besonderen Anforderungen von Elektrofahrzeugen angepasst werden (bcs 2012a).

Um das Potenzial von BEV in Carsharingflotten zu testen, wurden im Rahmen der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität (Doll et al. 2011; Fraunhofer ISI et al. 2011) die Buchungs- und Fahrzeugdatensätze von stadtmobil Karlsruhe im Zeitraum Juli 2009 bis Juni 2010 analysiert. Das hierzu aufgebaute Simulationsmodell nimmt je Station von stadtmobil Karlsruhe eine Neuordnung der Kundenreservierungen zu Fahrzeugen vor, sodass die im Rahmen der Simulation sukzessiv in die Station eingefügten BEV bestmöglich ausgelastet werden. Die Zahl der BEV wird für jede Station solange erhöht, bis diese durch zu geringe Auslastung wirtschaftlich schlechter abschneiden als vergleichbare konventionelle Fahrzeuge. Es werden die im Folgenden dargestellten Annahmen getroffen. Diese lehnen sich an die in den Kapiteln III.2.1.1 und III.2.1.2 dargestellten Daten zur Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen an, weichen jedoch in für das Carsharing spezifischen Anforderungen von diesen ab.

Tabelle II.9

## Übersicht Carsharingunternehmen mit Elektrofahrzeugen

Anbieter	Region	angekündigte Gesamtflotte (Stand 1.7.2012)	Anzahl	Elektrofahrzeuge (Stand 30.11.2012)
				Typ/Kommentar
<i>klassische Carsharingangebote</i> (ausschließlich feste Standorte, vorbestimmte Nutzungsdauer)				
Flinkster (DB Rent GmbH)	140 Städte (D, A)	4.500	100	Citroën e-C1, Citroën C-Zero, Smart ED (BEV), Toyota Prius Plug-in Hybrid (PHEV), 50 Fahrzeuge in Berlin
stadtmobil-Gruppe	74 Städte (D)	1.500	14	1 PHEV (Toyota Prius), 3 BEV (Fiat 50, Renault Fluence) in Karlsruhe
cambio-Gruppe	37 Städte (D, B)	1.400	7	Mitsubishi i-MiEV (BEV) in Köln, Hamburg, Aachen
Autolib	Paris	k. A.	250	Bolloré Bluecar (BEV); mittelfristig bis 3.000 Fahrzeuge geplant
<i>flexible Carsharingangebote</i> (Einwegfahrten und offene Nutzungszeiten)				
DriveNOW (BMW i, MINI und Sixt)	5 Städte (D, USA)	800	4	BMW Active-E (BEV) (geplant ab Nov./Dez. 2012)
car2go (Daimler)	17 Städte (D, A, NL, USA, CAN)	5.800	300	San Diego
Zebra Mobil	München	55	k. A.	Angebot von E-Fahrzeugen in Planung
Multicity Carsharing (Citroën)	Berlin	100	100	Citroën C-Zero. Ausweitung auf 500 Fahrzeuge geplant (Berlin)

D: Deutschland, A: Österreich, B: Belgien, NL: Niederlande, CAN: Kanada

Quelle: Auskunft von stadtmobil, cambio und Flinkster; www.cambio-carsharing.de; www.blog.car2go.com; www.green-motors.de; www.stadtmobil.de; www.car2go.com; www.multicity-carsharing.de; www.drive-now.com

- Fahrzeugkategorien: Untersucht wurden BEV mit einer Kapazität von 10 kWh und 24 kWh. Unter der Berücksichtigung von maximalen Entladungstiefen der Batterie von 75 Prozent, einem zusätzlichen Sicherheitspuffer von 10 Prozent für Nebenverbraucher und Batteriealterung und einem Verbrauch von 0,15 kWh/km ergeben sich Reichweiten mit einer Vollladung von 108 km (24-kWh-Batterie) und 45 km (10-kWh-Batterie). Angenommen wurde ferner eine 22-kWh-Schnellladung, die eine maximale Ladezeit von etwa 1 Stunde bei einer 24-kWh-Batterie bedingt.
- Ökonomische Rahmenbedingungen: Diese sind von zentraler Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit von BEV. Ausgehend von heutigen Batteriekosten von 700 Euro/kWh wurden Batteriepreise zwischen 300 und 500 Euro/kWh für 2015 und 200 bis 350 Euro/kWh für 2030 betrachtet. Ferner wurden Subventionen für den Kauf von BEV in Höhe von 0 und 3 000 Euro unterstellt. Die den Simulationen zugrundegelegten Energie- und Kraftstoffpreisprognosen bewegen sich zwischen real konstanten Werten und einem Wachstum bis 2030 um 24 Prozent für Strom, 40 Prozent für Benzin und 50 Prozent für Diesel.
- Wirtschaftlichkeit: Im Carsharingbetrieb kosten kleine Pkw zwischen 11 000 und 13 000 Euro und werden nach 4 Jahren mit einem Wertverlust von zwei Dritteln veräußert. Mit einem Rückgang des Kraftstoffverbrauchs um 23 Prozent bis 2030 ergeben sich für konventionelle Pkw Lebenszykluskosten zwischen 15 400 und 17 700 Euro für 2030 für eine mittlere Jahresfahrleistung von 26 000 km. Für diese Fahrleistung errechnen sich mit obigen Rahmendaten Lebenszykluskosten für BEV mit einer 24-kWh-Batterie zwischen 17 100 und 24 700 Euro für 2015 und 15 200 bis

20 200 Euro für 2030. Im Fall niedriger Batteriekosten und hoher Preise für mineralische Kraftstoffe ergeben sich die in Tabelle II.10 dargestellten minimalen Jahresfahrleistungen, ab welchen die pro Kilometer anfallenden Lebenszykluskosten von BEV, inklusive der nötigen Ladeinfrastruktur und öffentlicher Subventionen, unter den entsprechenden Kosten konventioneller Pkw liegen.

- Buchungssysteme: Für die Analyse der Einsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit von BEV im Carsharing wurden zwei alternative Buchungsmodelle unterschieden. Im Modell Vorausbuchung mit Komplettladung werden die Fahrzeuge zwischen jeder Nutzung voll aufgeladen, unabhängig vom aktuellen Batterieladezustand und der gewünschten Fahrtlänge. Diese Variante entspricht dem Geschäftsmodell der traditionellen Carsharingunternehmen und garantiert dem Kunden höchste Verlässlichkeit. Bei der Spontannutzung mit Teilladung kann das Elektrofahrzeug jederzeit genutzt werden, sofern der Batterieladezustand den Anforderungen der geplanten Fahrt entspricht. Dieses Verfahren spiegelt das Geschäftsmodell der neuen Anbieter wider und bedeutet für den Kunden hohe Flexibilität und für den Betreiber maximale Auslastung der Fahrzeuge.
- Buchungsverhalten der Kunden: Zunächst wird unterstellt, dass Länge und Zeit der Fahrtwünsche der Kunden fix sind und sich nicht nach der Verfügbarkeit von Fahrzeugen richten. Darüber hinaus werden zwei Varianten unterschieden: Im Fall der Stationsbindung wird unterstellt, dass die Kunden zusätzlich an diejenige Carsharingstation gebunden sind, welche im Datensatz 2009/2010 hinterlegt ist. In einer erweiterten Variante wird angenommen, dass sich die Kunden frei

zwischen Stationen in einem Stadtteil entscheiden, womit die hierin liegenden Standorte zu einer großen Stadtteilstation zusammengefasst werden.

Der Buchungsalgorithmus wurde zunächst separat auf jede der 136 Stationen und in einem zweiten Schritt auf Stadtteilebene angewandt. Von den gebuchten Fahrten blieben etwa 50 Prozent unter 100 km und sind somit grundsätzlich für die Durchführung mit Elektrofahrzeugen geeignet. Entscheidend für das berechnete Potenzial für den Einsatz von Elektrofahrzeugen sind jedoch die Annahmen zur Standzeit, die zwischen den Buchungen zum Aufladen der Batterie eingeplant wird.

Neben der prinzipiellen Ersetzbarkeit von Fahrzeugen spielt die Wirtschaftlichkeit gegenüber heutigen Konzepten eine wesentliche Rolle im kommerziellen Flottenbetrieb (Kap. III.2.1.2).

Die Simulationsergebnisse für 2015 und 2030 in Abhängigkeit von Batterieparametern, Subventionen und Buchungsmodellen sind in Tabelle II.10 dargestellt.

Ähnliche Ergebnisse, allerdings für einen kleineren Fahrzeugpool, wurden für die Flotte von stadtmobil Berlin ermittelt. Die Simulationsrechnung zeigt, dass die erzielbaren Marktanteile sehr stark von Buchungssystemen und Annahmen bzgl. der Batterie abhängen:

- Bei Vorausbuchung mit Vollladung und Begrenzung der Fahrzeugauswahl auf bestimmte Stationen werden bis zum Jahr 2030 im besten Fall, d. h. mit niedrigen Batteriepreisen, hohen Kraftstoffpreisen und Subventionen, lediglich 1 Prozent der Fahrzeuge in der Flotte von stadtmobil Karlsruhe und vergleichbaren Unternehmen wirtschaftlich durch E-Fahrzeuge ersetzbar sein.

Tabelle II.10

**Maximal wirtschaftlich einsetzbare BEV nach Batterieparametern, Subventionen und Buchungsmodell in den Jahren 2015 und 2030; günstigster Fall: Batteriepreise niedrig und Kraftstoffpreis hoch**

	günstigster Fall 2015: Batteriepreise 300 Euro/kWh				günstigster Fall 2030: Batteriepreise 200 Euro/kWh			
	0	3.000	10	24	0	3.000	10	24
Subvention (Euro)	0	3.000	10	24	0	3.000	10	24
Batteriegröße (kWh)	24	10	24	10	24	10	24	10
min. Jahresfahr. (km)	27.500	10.800	1.330	4.700	24.750	9.400	5.200	0
<i>A Einzelstationen</i>								
Vorausbuchung	0	3	4	3	0	3	5	3
Spontanteilladung	0	5	12	5	4	5	15	5
<i>B Stadtteilstationen</i>								
Vorausbuchung	3	21	34	25	8	24	35	25
Spontanteilladung	14	25	45	30	25	27	54	30

Quelle: Doll/Kley 2011

- Bei Übergang zu flexiblen Buchungsmodellen mit Teilladung sind jedoch bereits 3 Prozent der Fahrzeuge wirtschaftlich durch BEV ersetzbar.
- Wesentlich höhere Quoten ergeben sich schließlich, wenn eine hohe Flexibilität der Nutzer bezüglich der Stationswahl unterstellt wird, bzw. die Größe der Carsharingstationen zunimmt. Wirtschaftlich einsetzbar ist dann ein Anteil an BEV von 12 Prozent (2015) bzw. 15 Prozent (2030).
- Obwohl das technische Potenzial für Fahrzeuge mit 24-kWh-Batterien deutlich über jenem von Fahrzeugen mit 10-kWh-Batterien liegt, werden letztere ohne Subventionen (angenommene Höhe für Simulation: 3 000 Euro) wesentlich schneller wirtschaftlich einsetzbar sein.

Bei den dargestellten Ergebnissen sind die jeweiligen beschriebenen Annahmen zu berücksichtigen. Bei stärker fallenden Batteriepreisen, stärker steigenden Kosten für mineralische Kraftstoffe oder höheren staatlichen Förderungen von Kauf und Betrieb alternativer Fahrzeuge können diese Anteile deutlich steigen. Andererseits wurde in den hier durchgeführten Simulationen unterstellt, dass die Kunden immer dann ein BEV wählen, wenn dieses verfügbar und für die geplante Fahrt geeignet ist. Präferenzen und Befürchtungen bezüglich der Reichweite und Handhabung von BEV, welche deren Nutzungshäufigkeit und damit die Wirtschaftlichkeit dämpfen könnten, wurden hier nicht einbezogen. Andererseits wurde auch eine gewisse Mehrzahlungsbereitschaft für BEV außer Acht gelassen, welche gemäß Studien zur generellen Nutzerakzeptanz von Elektrofahrzeugen auch für die Nutzung von Elektrofahrzeugen im Rahmen von Carsharing angenommen werden könnte (Kap. III.3.1.2).

Der Bundesverband CarSharing e.V. zeigt sich dementsprechend verhalten bezüglich des Einsatzes von Elektrofahrzeugen. Nach dem Jahresbericht 2011 (bcs 2011) und seinem Positionspapier zur Elektromobilität (bcs 2012a) bestehen wesentliche Hemmnisse in den erheblichen Mehrkosten für Elektrofahrzeuge gegenüber einem hohen Kostenbewusstsein der Kunden, der Zuverlässigkeit und Berechenbarkeit der Reichweite, sowie noch bestehenden Kinderkrankheiten aktueller Modelle. Ferner dürfte beim Carsharing die Erfahrung von Kunden im Umgang mit der variierenden Reichweite ein wesentliches Kriterium bei der Akzeptanz der Fahrzeuge innerhalb der Flotte sein.

Andererseits zeigt die Marktpräsenz der neuen Anbieter wie car2go, Flinkster oder Autolib (Tab. II.9), dass sekundäre Interessen wie Imagebildung und Marktvorbereitung großer Konzerne oder städtische Umweltauflagen weitaus wichtiger sein können als auf den Einzelfall beschränkte betriebswirtschaftliche Erwägungen. Da jedoch beide Formen des Carsharing unterschiedliche Zielgruppen und Mobilitätsbedürfnisse ansprechen, sind die wirtschaftlichen Überlegungen der traditionellen Carsharinganbieter durchaus ernst zu nehmen.

### 3.2.3 Prognose von Elektrofahrzeugen in Carsharingflotten

Zum 1. Januar 2012 betrug die Flottengröße der traditionellen Carsharingunternehmen in Deutschland 5 600 Fahrzeuge bei einer Mitgliederzahl von 125 964 (bcs 2012b). Hinzu kommen die größtenteils 2011 gestarteten neuen carsharingähnlichen Angebote von car2go, DriveNOW, Zebra Mobil und Flinkster (bereits 2009 gestartet) in Hamburg, München, Berlin, Hannover und Ulm/Neu-Ulm mit 1 515 Fahrzeugen und 42 000 eingeschriebenen Nutzern. Während das traditionelle Carsharing weiter mit etwa 20 Prozent oder um 600 Fahrzeuge jährlich wächst, bescherten die neuen Anbieter der Branche 2011 einen Wachstumsschub in ähnlicher Höhe. Eine Einschätzung zukünftiger Marktvolumina beider Angebotsformen ist aus heutiger Perspektive schwierig und mit großen Unsicherheiten hinsichtlich der zugrundeliegenden Annahmen behaftet. Größenordnungen könnten sich wie folgt darstellen.

Für den traditionellen Sektor kann, falls der Trend der Vergangenheit anhält, bis 2020 mindestens mit einer Verdopplung der Fahrzeugzahl auf 10 000 bis 15 000 Pkw gerechnet werden. Unter der Annahme günstiger ökonomischer Rahmenbedingungen (u. a. sinkende Batteriepreise, steigende Kraftstoffpreise) sind hier etwa 1 000 Elektrofahrzeuge vorstellbar. Die neuen Anbieter gehen teilweise mit kompletten Elektrofahrzeugflotten an den Markt. Mit Blick auf die Entwicklungen von car2go in Amsterdam und Autolib in Paris (Tab. II.9) sind hier wesentlich größere Flotten zwischen 3 000 und 5 000 Fahrzeugen für 2020 möglich.

Auf Basis wirtschaftlicher Vorteile von BEV gegenüber vergleichbaren konventionellen Fahrzeugen kann bis 2020 mit etwa 6 000 Elektro-Pkw im deutschen Carsharingbetrieb gerechnet werden. Diese Schätzung nach Doll et al. (2011) berücksichtigt keine PHEV und stellt damit eine untere Grenze der möglichen Entwicklung dar. Wesentliche Abweichungen hiervon sind jedoch möglich, je nach Entwicklung der Rahmenbedingungen, wie Kaufsubventionen, Markteintritt neuer Anbieter und nicht zuletzt der Nutzerakzeptanz (Kap. III.3.1.4). Insbesondere den Strategien der Automobilhersteller kommt hier eine Schlüsselrolle zu. Mit Bezug auf eine Studie von Frost & Sullivan (2011b) mutmaßen DLR et al. (2012), dass ab 2012 jedes dritte Carsharingneufahrzeug in Europa batteriebetrieben sein könnte.

Die Entwicklungspotenziale von Carsharing und vergleichbarer Formen kollektiver Autonutzung und speziell des Angebots von Elektrofahrzeugen in diesen Konzepten können jedoch von zahlreichen Umfeldfaktoren wesentlich beeinflusst werden. Dazu zählen die Unterstützung der Carsharingunternehmen durch die Kommunen, die Subventionierung umweltfreundlicher Fahrzeuge oder die Eingliederung des Carsharing in den städtischen Umweltverbund zusammen mit dem öffentlichen Verkehr und nichtmotorisierten Formen der Mobilität. Die zentrale Rolle der Kommunen besteht in der Ausweisung ausreichend vieler Stellplätze für Carsharingfahrzeuge. In seinem nationalen Entwicklungsplan CarSharing bemängelt

der bcs (2012c), dass es bis dato noch keine bundeseinheitliche Regelung bzw. gesetzliche Grundlage zur Ausweisung von Carsharingstellplätzen und zu deren Schutz vor Falschparkern gibt. Konkret wird vorgeschlagen, dass das BMVBS einen neuen Gesetzentwurf für ein Straßenverkehrsgesetz und eine Straßenverkehrsordnung vorlegt, sodass Carsharingstellplätze zu marktgängigen Gebühren im öffentlichen Raum zur Verfügung gestellt werden können.

### 3.3 Elektromobilität und ÖPNV

#### 3.3.1 Motivation

Elektrofahrzeuge bieten Möglichkeiten zu Umweltentlastungen bei THG und Luftschadstoffen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen (Kap. III.1) und können somit eine individuell nutzbare Alternative (und damit eine Konkurrenz) zu dem in der Regel umweltfreundlichen Mobilitätsangebot des ÖPNV darstellen. Andererseits führen die begrenzte Reichweite von BEV und der nach wie vor vorhandene Parkraumbedarf zu Systemvorteilen des ÖPNV auf langen Distanzen und in Innenstadtbereichen. Um die Potenziale der Elektromobilität für die Entwicklung nachhaltiger Verkehrssysteme zu nutzen und die Kombination und gemeinschaftliche Nutzung von Verkehrsmitteln, auch von Pkw, zu fördern, wird in der öffentlichen Diskussion immer mehr gefordert, Elektromobilität integriert in multimodale Mobilitätsangebote umzusetzen. Mithilfe heutiger Informations- und Kommunikationstechnologien können neue, attraktive und umfassende Mobilitätskonzepte und -angebote entwickelt werden, welche eine einfache Kombination verschiedener Verkehrsmittel je nach Bedürfnissen ermöglichen und die Elektromobilität dabei sinnvoll integrieren können.

#### 3.3.2 Marktstruktur

Auf einer gemeinsamen Tagung des Bundesverbandes CarSharing e.V. (bcs) und des Verbandes deutscher Verkehrsbetriebe (VDV) im Januar 2011 wurde gefordert, „dass das Zusammenspiel von ÖPNV (Freude am Fahrenwerden) und Carsharing einfach als „Plug-and-play“ funktionieren sollte“ ([www.carsharing.de/index.php?option=com\\_content&task=view&id=299&Itemid=169](http://www.carsharing.de/index.php?option=com_content&task=view&id=299&Itemid=169)).

Kernstück kundenfreundlicher Systeme sollen eine einheitliche elektronische Karte für alle Mobilitätsdienste sowie eine gemeinsame monatliche Abrechnung sein, was bei einer Kfz-Jahresfahrleistung ab 10 000 km einen realen Kostenvorteil für den Kunden bringen soll.

Für die Integration von ÖPNV und kollektiver Autonutzung wie dem Carsharing bestehen grundsätzlich mehrere Optionen: das ÖPNV-Unternehmen als Systembetreiber von öffentlichem Verkehr und Carsharing, integrierte Systemangebote beider Dienstleistungen oder eine lose Kooperation zwischen ÖPNV- und Carsharinganbietern. Alle drei Varianten existieren in der Praxis und weisen spezifische Vor- und Nachteile auf. Neue Kommunikationstechnologien und zahlreiche Entwicklungen in der IT-Branche unterstützen die Entwicklung integrierter Angebote, indem sie das Planen von Wegen und das Buchen

von Transportmitteln vereinfachen. Wichtig für die weitere Entwicklung und Verbreitung multimodaler Konzepte ist dabei, dass einfach nutzbare, routinefähige und zuverlässige Angebote bereitgestellt werden (Canzler/Knie 2011).

Mögliche Ausprägungen sowie Vor- und Nachteile der zuvor genannten Optionen wurden 2011 durch persönliche Interviews mit Marketing- und Vertriebsleitern von sechs deutschen Verkehrsunternehmen und Verbänden durch das Fraunhofer ISI (Begon 2011) ermittelt. Es wurden jene ÖPNV-Unternehmen ausgewählt, welche bereits Kooperationen mit Carsharing oder sonstige integrierte Mobilitätskonzepte unterstützen. Dies waren: üstra (Hannover), KVB (Köln), WSW (Wuppertal), OVB (Offenbach), SSB (Stuttgart) und SWU (Ulm/Neu-Ulm).

*Variante 1: Verkehrsunternehmen als Systemdienstleister.* Die Bereitstellung eines multimodalen Angebots durch einen einzigen Dienstleister stellt die am tiefsten integrierte Angebotsform dar. Die Vorzüge liegen in Synergien der Personal- und Werkstattnutzung für alle Fahrzeugtypen, die Kontrolle über das Gesamtangebot und die Nähe zu städtischen Einrichtungen. Insbesondere beim Betrieb von Elektrofahrzeugen und dem Aufbau einer angemessenen Ladeinfrastruktur kann dies vorteilhaft sein. Diesen Vorteilen der Eigenleistung multimodaler Angebote stehen der Investitionsbedarf seitens der überwiegend unterfinanzierten ÖPNV-Unternehmen und der Aufbau neuartiger und ungewohnter Strukturen gegenüber. Entsprechend kann diese Angebotsform nur von großen Verkehrsunternehmen erbracht werden. Beispiele sind das DB-Flinkster Carsharing mit der Mobility-BahnCard 100 sowie die Beteiligung der Brüsseler Verkehrsbetriebe STIB an cambio Brüssel.

*Variante 2: integrierte Angebote unabhängiger Mobilitätsdienstleister.* In diesem Fall erhalten die Mobilitätskunden Zugriff auf verschiedene Verkehrsmittel durch eine einzige Dienstleistung. Hierbei kann es sich um eine einzige Chipkarte zur Benutzung von ÖPNV oder Carsharing oder zum Bezahlen von Taxi oder Mietautos mit Bestpreisermittlung und monatlicher Abrechnung handeln. Vorteile bestehen im abgestimmten Design eines lokalen Mobilitätsangebots bei gleichzeitigem Verbleib der Verantwortlichkeiten bei den jeweiligen Unternehmen. Beim Verkehrsunternehmen werden dabei Neuinvestitionen vermieden und die Mobilitätspartner können durch Know-how-Transfer den Zugang zu relevanten Kundengruppen verbessern. Dabei ist jedoch eine Konsensfindung unter den Partnern, insbesondere bei gemeinsam anvisierten Märkten, notwendig. Erfolgreiche Beispiele gemeinsamer integrierter Mobilitätsangebote sind u. a. „HANNOVERmobil“ vom Verkehrsverbund Hannover (GVH) und stadtmobil, das Projekt „BeMobility“ von DB Flinkster, DB Fuhrpark VBB, BVG und S-Bahn Berlin, das integrierte Angebot „moBiel“ in Bielefeld durch cambio und moBiel oder der „Carsharingaktionsplan Bremen“, initiiert durch die BSAG in Kooperation mit cambio.

*Variante 3: lose Kooperation zwischen Verkehrsunternehmen und Carsharinganbietern.* In dieser flachen Integra-

tion bestehen keine gemeinsam gestalteten Angebote der Mobilitätspartner, jedoch wird angestrebt, die Kundengewinnung und -bindung über gegenseitige Rabattgewährung zu verbessern. Hierdurch wird der Koordinationsaufwand unter den Unternehmen minimiert und deren Kontrolle über die eigenen Geschäftsfelder bleibt in vollem Umfang bestehen. Bei der losen Kooperation handelt es sich um die am weitesten verbreitete Form multimodaler Dienste. Beispiele sind in Mainz, Osnabrück und anderen Städten zu finden.

Tabelle II.11 gibt einen Überblick über die derzeit in Deutschland und Brüssel existierenden Kooperationen zwischen Unternehmen des öffentlichen Personennahverkehrs und Carsharingunternehmen (Stand 1. März 2012). Angegeben sind die finanziellen Anreize in Form reduzierter Anmelde-, Grund- und Nutzungsgebühren von Carsharing bei Vorlage einer Monats- oder Jahreskarte des ÖPNV-Unternehmens. Die ausgewiesene jährliche Gesamtersparnis geht von einer Mitgliedschaft von 5 Jahren, einer Jahresfahrleistung mit Carsharingfahrzeugen von

Tabelle II.11

### Finanzielle Ersparnis für Nutzer von Carsharing und ÖV im Rahmen von Kooperationen zwischen Carsharing und ÖPNV-Unternehmen

Region/Anbieter	reduzierte Anmeldegebühr Euro	reduzierte Grundgebühr Euro/Monat	reduzierte Nutzungsgebühr Anteil in Prozent	Gesamtersparnis Euro/Jahr <sup>2</sup>
Aachen (cambio u. ASEAG)	15,00	0,00	10	203,00
Bonn (cambio u. SWB)	30,00	5,00	5	166,00
Köln (cambio u. KVB)	30,00	5,00	5	166,00
Hannover (stadtmobil u. GVH)	49,00	– <sup>3</sup>	5	101,85
Rhein-Main (stadtmobil u. RMV)	–	4,00	0	48,00
Stuttgart (stadtmobil u. VVS)	0,00	3,00	0	36,00
Brüssel (cambio u. STIB/MTB)	–	2,00	0	24,00
bundesweit (Flinkster u. DB AG)	50,00	–	0	10,00
Bielefeld (cambio u. moBiel)	30,00	–	0	6,00
Bremen/Bremerhaven (cambio u. BSAG)	30,00	–	0	6,00
Hamburg-Metropolregion (cambio u. HVV)	30,00	–	0	6,00
Oldenburg (cambio u. VWG)	30,00	–	0	6,00
Rhein-Neckar (stadtmobil u. VRN)	30,00	–	0	6,00
München (Stadttauto M. u. MVV)	25,00	–	0	5,00
Karlsruhe/Pforzheim (stadtmobil u. KVV)	20,00	–	0	4,00
Berlin (cambio u. BVG)	15,00	–	0	3,00
Hamburg (cambio u. HVV)	15,00	–	0	3,00
Saarbr. (cambio, SaarBahn u. Bus)	15,00	–	0	3,00
Wuppertal (cambio u. WSW mobil)	15,00	–	0	3,00
Durchschnitt	22,58	0,97	1	16,10

<sup>1</sup> absoluter Betrag abhängig vom gewählten Fahrzeugtyp, Zeitraum der Nutzung und sonstigen Tarifbestimmungen;

<sup>2</sup> Annahmen: Amortisation Anmeldegebühr 5 Jahre, Fahrleistung 5 000 km pro Jahr, Nutzungskosten 0,40 Euro/km;

<sup>3</sup> 20 Prozent Nutzungsrabatt auf Taxifahrten

5 000 km und einer durchschnittlichen variablen Nutzungsgebühr von 0,40 Euro/km aus. Die Daten sind den Tarifbestimmungen der Carsharingunternehmen entnommen.

Durch die Etablierung kooperativer Verkehrslösungen profitieren sowohl die Mobilitätsdienstleister als auch die Kommunen und Firmen durch weniger Parkraumbedarf. Durch den Trend hin zu kleineren Fahrzeugen wie Pedelecs oder Elektrorollern, aber auch Kleinst-Pkw, kann zudem Stau vermieden oder im Idealfall sogar Verkehrsflächen zu anderweitigen Nutzungen freigegeben werden. Nach den Ausführungen in Kapitel II.3.2 kann die Elektromobilität mittelfristig eine relevante Rolle in Car- und Bikesharingsystemen spielen. Gelingt es durch gezielte Fördermaßnahmen und Informationskampagnen den Verbund aus ÖPNV und Sharingsystemen zu stärken, kann gleichzeitig das Marktpotenzial der Elektromobilität gefördert werden. Durch die Verknüpfung mit dem öffentlichen Verkehr und durch geringere Lärm- und Schadstoffemissionen kann die Elektromobilität dann in doppelter Hinsicht einen gewichtigen Beitrag zur Steigerung der Lebensqualität in unseren Städten leisten.

### 3.3.3 Perspektiven

Je weiter verbreitet und leichter zugänglich integrierte, multimodale Verkehrssysteme sind, desto größer dürfte das Potenzial für Elektrofahrzeuge für kurze Strecken im Verbund mit konventionellen Fahrzeugen und öffentlichem Verkehr für längere Fahrten ausfallen. Verkehrsträgerübergreifende Auskunft-, Buchungs- und Abrechnungssysteme spielen dabei eine ebenso wichtige Rolle wie die Integration von Rad- und Fußverkehr in den Mobilitätsverbund. Beispielsweise werden bereits jetzt 30 bis 50 Prozent aller städtischen Wege zu Fuß oder mit dem Fahrrad zurückgelegt (Topp 2011). Die Verfügbarkeit von Pedelecs in Verleihsystemen kann diesen Trend unterstützen und den Radius des Radverkehrs deutlich erweitern. Beispielhaft sei hierzu der Verkehrsentwicklungsplan der Stadt Münster genannt, die bereits jetzt mit 28 Prozent ein hohes Fahrradaufkommen hat. Durch die vermehrte Einführung von Pedelecs soll dieses langfristig weiter auf 34 Prozent gesteigert werden (Argus/difu 2010).

Bei der Integration von Elektrofahrzeugen in den ÖPNV liegt es bei einer Kooperation nahe, dass der entsprechende Mobilitätsanbieter (z. B. der Carsharinganbieter) für den Betrieb der Fahrzeuge zuständig ist. Somit wäre dieser auch für die Anschaffung und Wartung zuständig, während für das Bereitstellen der notwendigen Ladeinfrastruktur weitere Kooperationen mit Stadt und Energieversorgern erforderlich wären. Beispielsweise hat der Anbieter cambio in Hamburg ab Februar 2011 zwei Elektrofahrzeuge in seine Flotte integriert, und stellt aufgrund der positiven Bilanz ab März 2012 Elektrofahrzeuge in Köln zur Verfügung. Dies geschieht in Kooperation mit der Energie-Genossenschaft Greenpeace Energy, die an den Ladestationen den Öko-Strom zur Verfügung stellt (cambio 2012).

Geeignete Regulierungen und Anreize für die Integration von Elektrofahrzeugen in den ÖPNV im Rahmen multimodaler Mobilitätsangeboten können die Bereitstellung

von Stellplätzen für Sharingsysteme, Standards für Buchungs- und Abrechnungssysteme sowie Roamingvorschriften zwischen verschiedenen Mobilitätsdienstleistern darstellen.

### 3.4 Elektrische Zweiräder

Großes Potenzial für eine multimodale Mobilität bieten elektrische Zweiräder (Kap. II.2.5), insbesondere auch die mehr und mehr aufkommenden Lasten- bzw. Transporträder (zum Transport großer oder schwerer Lasten mit Pedalantrieb) sowie Kleinstfahrzeuge (z. B. Einsitzer und Doppelsitzer). Dabei lassen sich verschiedene Varianten je nach Art des Antriebs unterscheiden. Für Elektrofahräder mit einem Elektromotor zur Tretunterstützung hat sich der Begriff Pedelec etabliert. Bei normalen Pedelecs ist die Tretunterstützung begrenzt auf Geschwindigkeiten bis zu 25 km/h. Elektrofahräder mit unbegrenzter Tretunterstützung, welche sich für sportlichere Zwecke eignen und zulassungs- und versicherungspflichtig sind, werden auch als S-Pedelec bezeichnet. Elektrofahräder, welche einen tretunabhängigen Zusatzantrieb haben, werden meist als E-Bike bezeichnet. Mittlerweile beschäftigen sich nahezu alle namhaften Fahrradhersteller als auch branchenfremde Firmen mit elektrisch unterstützten Fahrrädern. Auch für den gewerblichen Bereich bieten zahlreiche Hersteller Lösungen in Form von Cargo-Bikes oder Velo-Taxis an (Kohlberg 2011).

Elektrische Fahrräder können den Weanteil des Fahrrades erhöhen und Pkw-, aber auch ÖPNV-Fahrten ersetzen, insbesondere auf längeren Strecken sowie in bergigen Regionen, sowohl bei Arbeits- als auch Freizeitwegen. Entsprechend lag 2010 der Anteil von Trekkingrädern bei 35 Prozent und von Cityrädern bei 25 Prozent der in Deutschland verkauften E-Bikes und Pedelecs. 2010 wurden in Deutschland 200 000 Elektrofahräder verkauft, was 5 Prozent des Fahrradmarktes und einem Wachstum von knapp 30 Prozent gegenüber 2009 entspricht (Ebike Online 2012). Im Zuge des demografischen Wandels und der Alterung unserer Gesellschaft ermöglichen Elektrofahräder oder ähnliche Kleinfahrzeuge zudem eine erhöhte Mobilität älterer Menschen. Im Gegenzug könnte jedoch auch die körperliche Aktivität heutiger Radfahrer zurückgehen. Für konkrete Aussagen zur Gesundheitsbilanz von Elektrofahrädern fehlt jedoch bisher eine verlässliche statistische Grundlage.

In Deutschland werden öffentliche Mietfahrradflotten fast ausschließlich durch das System „Call a Bike“ der DB Rent GmbH betrieben. In der Saison März bis Dezember 2011 waren bereits rund 7 500 „Call-a-Bikes“ von DB und Stadtrad Hamburg in Berlin, Frankfurt am Main, München, Köln, Stuttgart, Karlsruhe und Hamburg sowie an vielen ICE-Bahnhöfen in Deutschland verfügbar und wurden von 410 000 Kunden für etwa 2 Millionen Fahrten genutzt (DB 2011b). Größere Bikesharingsysteme mit festen Stationen werden erfolgreich in Städten wie Lyon, Sevilla, Mailand oder Paris betrieben. Da der Fahrradbesitz in Frankreich, England oder Spanien im Gegensatz zu Deutschland weniger weit verbreitet ist, zeigen Verleihsysteme dort wesentlich dynamischere Wachstumsraten

und tragen zu einer nachhaltigen Veränderung der Stadtbilder der großen Metropolen bei.

Im Rahmen des Projekts E-Aix der BMVBS Modellregionen eröffnete die DB Rent GmbH am 26. September 2011 das Verleihsystem „e-Call a Bike“ in Aachen mit zunächst 15 Pedelecs an drei Stationen (DB 2011a). Mit 44 Stationen und geplanten 100 Pedelecs startete Ende Oktober 2011 „e-Call a Bike“ in Stuttgart. Beide Projekte sind als Demonstrator für E-Bikes und als integraler Bestandteil des ÖPNV konzipiert (Landeshauptstadt Stuttgart 2011).

### 3.5 Elektromobilität im Wirtschaftsverkehr

Neben dem privaten und öffentlichen Personenverkehr ist der Einsatz von Elektrofahrzeugen insbesondere in gewerblichen Fahrzeugflotten interessant. Ähnlich wie im Carsharing lassen sich auch hier die Fahrzeuge gemäß ihren spezifischen Eigenschaften kombinieren. Wegen der ausgereiften Tourenplanung im Wirtschaftsverkehr und bekannter Fahrprofile lässt sich der Anteil von Elektrofahrzeugen am Fuhrpark sehr gezielt bestimmen, um die Batterieauslastung und Jahresfahrleistung zu maximieren. Von Logistikdienstleistern beispielsweise können Elektrofahrzeuge aufgrund spezifischer Fahrprofile wie Back-to-base-Fahrten (d. h. Fahrten mit gleichem Ausgangs- und Endpunkt), fester Einsatzfenster und im Voraus planbarer Touren, die meist weniger als 100 km betragen, trotz ihrer eher geringen Reichweite gut eingesetzt werden. Insbesondere bei stark steigenden Dieselpreisen und bei einer deutlichen Reduzierung des Batteriepreises wird der Einsatz von Elektrofahrzeugen im gewerblichen Bereich wirtschaftlich. Weitere Anreize für den Wirtschaftsverkehr, Elektrofahrzeuge einzuführen, können z. B. Umweltzonen und längere Zufahrtszeiten für Innenstädte sein.

Da in der Regel auf Firmengeländen ohne Weiteres ein fester Stellplatz zum Laden von Elektrofahrzeugen bereitgestellt werden kann, laufen auch im gewerblichen Bereich weltweit bereits etliche Pilotprojekte. So haben beispielsweise Unternehmen wie Fedex, UPS, DHL oder Posta Slovenia damit begonnen, ihre Flotten teilweise mit Elektrofahrzeugen auszustatten und deren Einsatz im innerstädtischen Lieferverkehr zu testen. Weitere gewerbliche Bereiche, in denen Elektrofahrzeuge aufgrund des Fahrprofils einsetzbar und ökonomisch interessant sein können, sind mobile Pflegedienste (Zischler 2011) oder branchenspezifische Kurierdienste (wie bspw. Apothekenbelieferung), Handwerksbetriebe oder Serviceflotten von Post und Telekommunikationsanbietern sowie Taxiunternehmen. Elektrotaxis wären dabei eine gute Möglichkeit, Elektromobilität für viele Personen auf einfache Art und Weise erfahrbar zu machen. Insgesamt sind für den gewerblichen Verkehr mit Elektrofahrzeugen hohe Wachstumsraten zu erwarten, wobei sich PHEV in diesen Segmenten schneller durchsetzen werden als BEV (Kap. III.2.1.2). Quantitative Prognosen zu Marktszenarien für Elektrofahrzeuge im Wirtschaftsverkehr liegen jedoch nicht vor.

### 3.6 Rolle der Kommunen

Eine Verbreitung von Elektrofahrzeugen bietet die Chance, Städte nachhaltig zu verändern, indem die vom Straßenverkehr ausgehenden Lärm-, Umwelt- und Klimawirkungen reduziert und neue Wege in der Mobilität beschritten werden und somit insgesamt die Lebensqualität in den Städten aufgewertet wird. Dabei sind die Kommunen sowohl bei der Bereitstellung der Ladeinfrastruktur als auch bei der Gestaltung von Mobilitätsalternativen in einer zentralen Position (DST/VKU 2010).

Die sozialwissenschaftliche Begleitforschung zu den Modellregionen Elektromobilität der Bundesregierung kam in einer Befragung der beteiligten Kommunen Hamburg, Oldenburg, Berlin, Rhein-Ruhr, Sachsen, Rhein-Main, Region Stuttgart und München zu folgenden Einschätzungen (Ernst 2011): Kommunen und lokale Stadtwerke sind in der Regel für die Einrichtung öffentlicher Ladestationen verantwortlich. Die Definition der Standorte geschieht überwiegend in Abstimmung zwischen Stadtverwaltung, Energieversorgern und den Stadtwerken, wobei bislang noch kein einheitliches Vorgehen im öffentlichen Straßenraum gefunden wurde. Wesentliche Kriterien für die öffentliche Akzeptanz der Elektromobilität werden in der Sichtbarkeit und Beschilderung der Ladestationen sowie in der Gestaltung der zugehörigen Parkraumbewirtschaftung gesehen. Die Kommunen äußern nach dieser Befragung im Wesentlichen Ansichten, welche den Ergebnissen der ökonomischen Analysen aus Kley (2011) und Doll/Kley (2011) entsprechen. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass öffentliche Ladestationen eher psychologische Wirkung haben, d. h. Unsicherheiten vor der Kaufentscheidung reduzieren können und Elektromobilität sowie kommunale Aktivitäten sichtbar machen. Grundsätzlich erscheinen aber private und halböffentliche Stationen für die Elektromobilität von größerer Bedeutung (Kap. III.3.1.2). Aus Sicht der Teilnehmer der Modellregionen Elektromobilität fällt jedoch die derzeitige Verfügbarkeit öffentlicher Ladestationen enttäuschend aus (Fraunhofer ISI 2012a). Das Interesse an öffentlichen Ladestationen könnte aber bei Nutzern, welche über Lademöglichkeiten zuhause und/oder am Arbeitsplatz verfügen, wieder abnehmen, wenn sie Erfahrungen im Umgang mit diesen Lademöglichkeiten und der Reichweite des jeweiligen Elektrofahrzeugs gesammelt haben (Kap. III.3.1.2; Fraunhofer ISI 2012a).

Standorte öffentlicher Ladestationen werden in der Regel an Verkehrsknotenpunkten wie Bahnhöfen, Park&Ride-Stationen oder an Carsharingstandorten errichtet. Den Kommunen kommt dadurch eine wichtige Rolle bei der Verknüpfung der Mobilitätssysteme zu, da sie auch Betreiber oder Hauptanteileseigner der lokalen Verkehrsunternehmen sind (Kiepe 2012). Die teilnehmenden Städte an den Modellregionen Elektromobilität legen insbesondere auf die Verknüpfung mit dem ÖPNV großen Wert, wobei an 7 von 21 Standorten Elektrofahrzeuge in Car- und Bikesharingkonzepten zum Einsatz kommen (Ernst 2011).

Des Weiteren können die Kommunen als Flottenbetreiber den Einsatz von Elektrofahrzeugen selbst vorantreiben. In

den Modellregionen Elektromobilität wurden entsprechend die meisten Elektrofahrzeuge im Rahmen städtischer Flotten eingesetzt, etwa in den Bereichen Personenverkehr und Tourismus (Pkw, Pedelecs, Roller) sowie im Wirtschaftsverkehr für Reinigungs-, Liefer- und Sozialdienste (Ernst 2011).

Die Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung der Modellregionen Elektromobilität legen nahe, dass die Strategien zur Förderung der Elektromobilität, der Parkraumbewirtschaftung, des ÖPNV-Ausbaus und des Mobilitätsmanagements eng aufeinander abzustimmen sind (Ernst 2011). Im Zuge der Modellregionen Elektromobilität wurde dazu in von 18 Städten ein eigenes kommunales Kompetenzzentrum geschaffen, das in Form einer Geschäftsstelle, Abteilung oder anderen Stelle alle koordinierenden Aufgaben bezüglich der Elektromobilität plant und übernimmt. Es empfiehlt sich, diese Einrichtungen durch aktive Öffentlichkeitsarbeit publik zu machen und somit Elektromobilität für den Bürger erlebbar zu gestalten. Schließlich ist die Vernetzung von Kommunen untereinander als auch der Kommunen mit den lokalen Akteuren eine zentrale Aufgabe für den Erfolg der Elektromobilität (Fraunhofer ISI 2012a).

Diese Aufgabenstellung ist jedoch vor dem Hintergrund finanzieller Engpässe der Städte und Gemeinden mit Vorsicht zu betrachten. Im Rahmen der Modellregionen Elektromobilität wurden sowohl städtische Fuhrparks als auch Ladeinfrastrukturen mit Fördergeldern finanziert. Es ist zu vermuten, dass diese Investitionen nach Auslaufen dieser Mittel nur von einigen Kommunen aus eigener Kraft aufrechterhalten werden können. Mit Blick auf sinkende Fahrzeug- und Infrastrukturkosten in der Zukunft kann sich dies jedoch – wie auch im Privatkundensegment – ändern. Kommunen, die frühzeitig Erfahrungen mit Ladeinfrastrukturen, Fahrzeugen und Kooperationen gesammelt haben, könnten dann einen Standortvorteil verbuchen.

Ferner warnt der Deutsche Städtetag vor einer isolierten Einführung von Elektrofahrzeugen und dem Vergrößern der Pkw-Flotte durch zusätzliche Fahrzeuge. Im Rahmen integrierter Konzepte sollten z. B. Carsharingparkplätze mit Ladestationen ausgestattet werden. Städtische Demonstrationsvorhaben sollten europäisch koordiniert und entsprechend durch EU-Mittel finanziert werden (Kiepe 2012).

#### 4. Energieszenarien

Die Umweltauswirkungen der Elektromobilität hängen davon ab, welche Energiequellen und Umwandlungspfade verwendet werden. Im Folgenden werden deshalb verschiedene Energieszenarien vorgestellt und diskutiert. Für weiter führende Analysen zur ökologischen und ökonomischen Bewertung von Elektrofahrzeugen wird ein Energieszenario ausgewählt (Kap. III).

Für die ökologische Bewertung der Elektromobilität sind die Primärenergiequellen und die Art der Energieumwandlung von hoher Relevanz. Um Elektrofahrzeuge u. a. bezüglich Energieeffizienz und THG-Emissionen

bewerten zu können, benötigt man Szenarien über die künftige Entwicklung des Energiesystems in Deutschland. Es existieren bereits zahlreiche Energieszenarien, die von unterschiedlichen Institutionen erstellt wurden. Drei Szenarien aus Studien, die sich durch ihre Aktualität und politische Relevanz auszeichnen, werden hier näher betrachtet:

##### Szenario 1

*Modell Deutschland: Modell Deutschland – Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken (Referenzszenario)*, Auftraggeber: WWF Deutschland, 10/2009, erstellt von: Prognos/Öko-Institut (2009).

Szenariobeschreibung: Referenzszenario ohne CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -speicherung; ambitionierte Fortsetzung heutiger Energie- und Klimaschutzpolitik.

##### Szenario 2

*Energieszenarien 2011: Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung (Szenario Ausstieg – aus der Atomkraft)*, Auftraggeber: BMWi, 07/2011, erstellt von: Prognos et al. (2011).

Szenariobeschreibung: Beschleunigter Ausstieg aus der Kernenergie (bis 2020 bis 2025); THG-Emissionsreduktion um 40 Prozent gegenüber 1990 bis zum Jahr 2020, Steigerung der Energieeffizienz (BIP pro Primärenergie) um 2,3 bis 2,5 Prozent pro Jahr sowie Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch von mindestens 18 Prozent bis 2020.

##### Szenario 3

*Leitstudie 2010: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global (Basisszenario 2010 A, Pfad mäßig)*, Auftraggeber: BMU, 12/2010, erstellt von: DLR et al. (2010).

Szenariobeschreibung (Basisszenario 2010 A): Ziele des Energiekonzepts der Bundesregierung (BMWi/BMU 2010) werden unterstellt (u. a. Reduktion der Treibhausgasemissionen [THG-Emissionen] bis 2020 um 40 Prozent und bis 2050 um mindestens 80 Prozent gegenüber 1990; Minderung des Primärenergieverbrauchs um 20 Prozent bis 2020 und 50 Prozent bis 2050 gegenüber 2008); Verlängerung der Restlaufzeiten der Kernkraftwerke (um 8 bzw. 14 Jahre); Anteil der Elektromobilität an der Verkehrsleistung des Individualverkehrs steigt bis 2050 auf 33 Prozent.

Die drei Szenarien unterscheiden sich bezüglich der Ambitioniertheit der energiepolitischen Ziele, im Wesentlichen gegeben durch Energieeinsparziele und Minderungsvorgaben bezüglich der THG-Emissionen. Dies führt u. a. zu unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich Stromnachfrage (Tab. II.12), Bau neuer Kraftwerke und Stromproduktion aus erneuerbaren Energieträgern (Abb. II.11).

Tabelle II.12

**Endenergieverbrauch Strom und spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionsentwicklung in den analysierten Szenarien**

	Jahr	Modell Deutschland	Energieszenarien 2011	Leitstudie 2010
Endenergieverbrauch Strom in TWh	2010	516	516	516
	2020	492	474	492
	2030	474	456	460
CO <sub>2</sub> -Emissionen Stromerzeugung in g/kWh <sub>el</sub>	2010	563	563	563
	2020	503	520	360
	2030	483	260	180

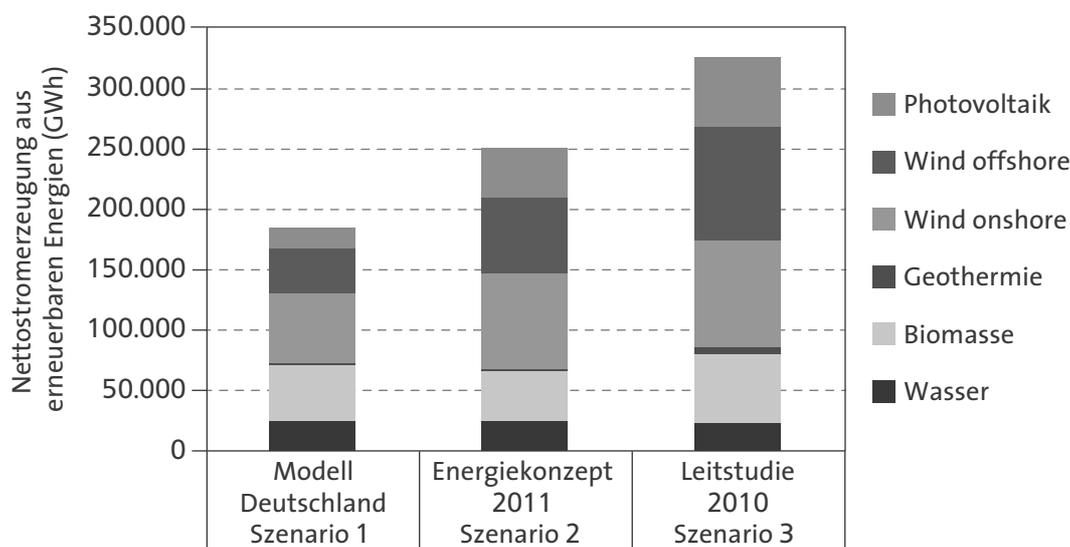
Quelle: Daten aus BMU 2010; BMWi 2011; Statista 2012a; Statista 2012b; WWF 2009, ergänzt um eigene Berechnungen

Neben der unterschiedlichen Verwendung von fossilen Energieträgern und der Kernkraft führen diese Effekte zu deutlichen Unterschieden bei der Entwicklung der absoluten und spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen (Tab. II.12). So sinken die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen zwar in allen drei Szenarien, dabei unterscheiden sich die Werte der Leitstudie 2010 und des Modells Deutschland jedoch um mehr als den Faktor 2. Dies führt während der Nutzung von BEV im Jahr 2030 zu mehr als doppelt so hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen, wenn man für das Laden den Strommix des Modells Deutschland gegenüber demjenigen der Leitstudie 2010 unterstellt.

Für die Berechnungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Kapitel III.1.3 wird das zuvor sowie in Tabelle II.12 und Abbildung II.11 beschriebene Szenario aus der Studie Energieszenarien 2011 (BMWi 2011) zugrunde gelegt. Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2030 liegen zwischen den entsprechenden Werten aus den beiden vorgestellten Szenarien der anderen Studien. Weiterhin liegt dieses Szenario der Energiestrategie der Bundesregierung zugrunde (BMU 2011). Da bei den Marktpenetrationsszenarien für BEV und PHEV ebenfalls die derzeitigen Zielvorgaben der Bundesregierung gewählt wurden (Kap. II.2.7) basieren die weiteren Analysen der Studie somit auf den derzeitigen politischen Annahmen zu Energie- und Marktpenetrationsszenarien.

Abbildung II.11

**Nettostromerzeugung aus erneuerbaren Quellen in Deutschland für 2030 gemäß Szenarien aus aktuellen Studien**



Eigene Darstellung nach BMU 2010; BMWi 2011; WWF 2009

## 5. Internationale Technologieaktivitäten und Politikmaßnahmen

### 5.1 Technologieaktivitäten im Ländervergleich

Patentanmeldungen sind Frühindikatoren für Innovationen und spiegeln Erfindungen wider, welche in den kommenden Jahren bzw. Jahrzehnten zu Produkten und Markterschließungen führen sollen. Eine Analyse und ein Vergleich deutscher Patentanmeldeaktivitäten mit denen anderer Länder, welche im Bereich der Automobilindustrie sowie bei für die Elektromobilität relevanten Schlüsseltechnologien weltweit führend sind, bietet sich deshalb an, um die aktuelle internationale Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands und die spezifischen Stärken und Schwächen hinsichtlich der relevanten Technologien zu bewerten. Dies geschieht mittels der Methode der Indikatorik, d. h. der Analyse aussagekräftiger Indikatoren, welche es erlauben, Deutschlands Position im Vergleich zu anderen Ländern zu untersuchen.

Zu den historisch gesehen sowie aktuell weltweit aktivsten Ländern im Bereich der FuE (z. B. gemessen an Publikationen und Patenten) zählen Japan, Südkorea, China, die USA sowie Deutschland und Frankreich. Diese Länder sollen im Folgenden vergleichend betrachtet werden. Andere Länder wie Indien oder Russland zählen beispielsweise nicht dazu, sind aber aufgrund der Größe ihres Automobilmarktes für den anschließenden internationalen Vergleich von Politikmaßnahmen zur Förderung der Elektromobilität von Bedeutung.

Für die Bewertung wurden zentrale Schlüsseltechnologiefelder im Kontext der Elektromobilität mittels Klassen in der „International Patent Classification“ (IPC) abgegrenzt und Patentrecherchen mit der Datenbank PATSTAT des Europäischen Patentamtes (EPO) durchgeführt. Insbesondere Anmeldungen über das sogenannte PCT-Verfahren („Patent Cooperation Treaty“, ein internationaler Vertrag, wonach Anmelder ein auf mehrere ausländische Patentämter und damit internationale Märkte ausgerichtetes Anmeldeverfahren starten können) ermöglichen einen transnationalen Ländervergleich.

Die mittels Patentanalysen betrachteten Technologiefelder lehnen sich im Wesentlichen an die in Kapitel II.1. dargestellten Hauptkomponenten bzw. Technologien an. Aus methodischen Gründen wurden zum einen einige Komponenten gruppiert bzw. zusammengefasst, zum anderen konzentrieren sich die Analysen auf die hinsichtlich ihres Wertschöpfungspotenzials bedeutendsten Technologiefelder. Die ausgewählten Technologiefelder Batterien, Brennstoffzellen, Leistungselektronik, Antriebsstrang, Elektromotoren, hybride Antriebe und Verbrennungsmotoren decken somit die wesentlichen Teile der Wertschöpfung ab und spiegeln ein gesamtheitliches Bild der Technologieaktivitäten in den betrachteten Ländern im Bereich der Elektromobilität wider. Zum Vergleich werden auch die transnationalen Gesamtpatentanmeldungen der Länder betrachtet, welche sich auf alle Technologieaktivitäten (auch über die Elektromobilität hinaus) beziehen.

Wie in Kapitel II.1 ausgeführt, kommt der Batterie der höchste Anteil an der Wertschöpfung zu. Als Energiespeicher für elektrische Energie in Fahrzeugen werden international Batterien, insbesondere Lithium-Ionen-Batterien, sowie die direkte Verstromung von z. B. Wasserstoff oder Methan in Brennstoffzellen, insbesondere der „proton exchange membrane fuel cell“ (PEM-FC), diskutiert. Daher wird die Brennstoffzellentechnologie, welche mittel- bis langfristig für Fahrzeuge mit großer Reichweite relevant erscheint, vergleichend betrachtet. Nach der Energiespeicherung steht die Leistungselektronik an zweiter Stelle bzgl. des technischen Aufwands und der Kosten der Komponenten eines Elektrofahrzeugs. Sie übernimmt Regel- und Steuerungsfunktionen zwischen Energiespeicher und Antriebsmotor und nimmt eine Schlüsselstellung für die systemische Integration aller elektrischen Komponenten eines Elektrofahrzeugs im gesamten Antriebsstrang ein. Neben dem Antrieb durch Elektromotoren in BEV werden bei hybriden Antrieben in HEV oder PHEV sowohl konventionelle Verbrennungsmotoren als auch elektrische Motoren im Fahrzeug verbaut. Durch den Vergleich auch mit konventionellen Verbrennungsmotoren lassen sich die Länder mit spezifischen Stärken in der traditionellen Automobilindustrie identifizieren.

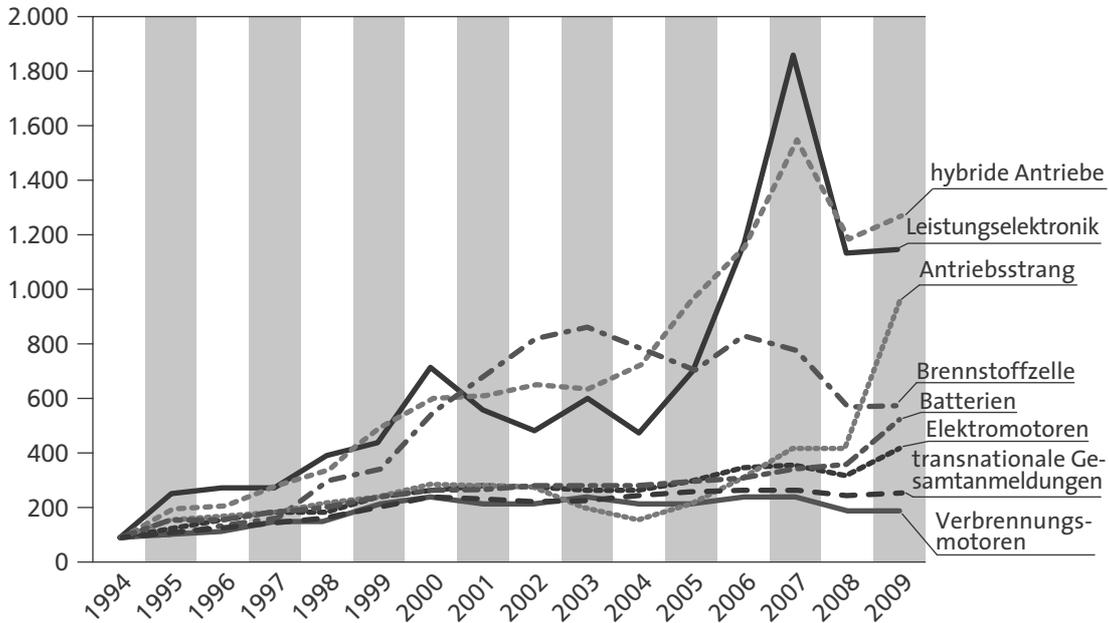
Abbildung II.12 zeigt die Entwicklungsdynamik aller weltweiten, transnationalen Patentanmeldungen in Bezug auf die sieben betrachteten Technologiefelder der Elektromobilität im Zeitraum zwischen 1994 und 2009 (normiert auf 100 im Jahr 1994). Die Technologiefelder lassen sich hinsichtlich ihrer historischen Entwicklungsdynamik grundsätzlich in drei Gruppen einteilen, welche im Folgenden beschrieben werden.

Patentanmeldungen zur ersten Gruppe der konventionellen Verbrennungsmotoren haben sich in den letzten 15 Jahren zwar verdoppelt, diese Entwicklung liegt jedoch unterhalb der Entwicklungsdynamik aller weltweiten Patentanmeldungen und deutet auf die technologische Reife dieses Bereichs hin.

Im Gegensatz hierzu haben sich Patentanmeldungen in der zweiten Gruppe der hybriden Antriebstechnologien und der hierfür benötigten Leistungselektronik ebenso wie zur Brennstoffzellentechnologie zwischen 1994 und 2004 auf das Fünf- bis Achtfache erhöht. Während sich die Brennstoffzellentechnologie für mobile Anwendungen in den letzten 5 Jahren wieder rückläufig verhalten hat, was auf die noch zu großen Herausforderungen für die breite Einführung für Brennstoffzellenfahrzeuge zurückzuführen sein dürfte, haben sich Anmeldungen zu hybriden Antrieben und der Leistungselektronik in dieser Zeit nochmals nahezu verdoppelt. Der Rückgang der Entwicklungsdynamik zwischen 2007 und 2008 ist vermutlich auf die Wirtschaftskrise zurückzuführen und lässt sich bei vielen neuen Technologiefeldern finden. Die Entwicklung zeigt aber, dass sich die Automobilindustrie bereits im letzten Jahrzehnt auf die Einführung der Hybridtechnologie vorbereitet hat. Die mit PHEV und BEV verbundenen Anforderungen an die Leistungselektronik haben zu einem weiteren Anstieg der Patentaktivitäten in diesen beiden Technologiefeldern geführt.

Abbildung II.12

**Entwicklungsdynamik weltweiter Patentanmeldungen in Technologiefeldern der Elektromobilität zwischen 1994 und 2009, normiert auf 100 im Jahr 1994**



Quelle: EPA – PATSTAT; eigene Berechnungen (Stand Februar 2012)

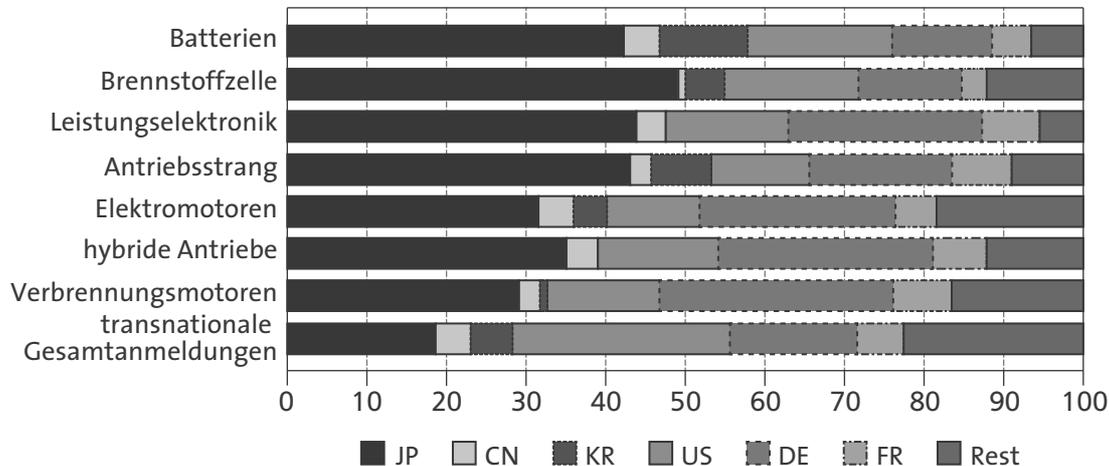
In die dritte Gruppe lassen sich Patentanmeldungen zu Batterieentwicklung, Elektromotoren und Antriebsstrang (ohne Leistungselektronik und Elektromotoren) einordnen, welche sich von 1994 bis 2008 kontinuierlich um den Faktor 4 erhöht haben und 2009 steil anzusteigen beginnen. Obwohl die Entwicklung und Produktion von Elektromotoren heute im Allgemeinen zwar einen hohen technischen Stand erreicht hat, zeigen sich hier die aktuell wachsenden Bemühungen der Industrie, BEV inklusive des Antriebsstrangs weiterzuentwickeln bzw. neu zu konzipieren. Auch in dieser dritten Gruppe zeigt sich somit, dass die Industrien weltweit bereits in den vergangenen Jahren begonnen haben, sich im Bereich der Elektromobilität neu zu positionieren. Die im gleichen Zeitraum begonnenen Fördermaßnahmen weltweiter Regierungen (Kap. II.5.2) können dabei helfen, die Elektromobilität auch breit einzuführen.

In Abbildung II.13 sind die Anteile der weltweit führenden Länder an Patentanmeldungen in den einzelnen Technologiefeldern der Elektromobilität zwischen 2007 und 2009 zu sehen. Obwohl die Länder Japan, China, Korea, USA, Deutschland und Frankreich alleine bereits nahezu 80 Prozent aller weltweiten Patente anmelden, decken sie in einzelnen Technologiefeldern der Elektromobilität mehr als 80 Prozent (z. B. Elektromotoren und Verbrennungsmotoren), rund 90 Prozent (z. B. hybride Antriebe, Antriebsstrang, Brennstoffzelle) bis hin zu fast 95 Prozent (z. B. Batterien, Leistungselektronik) der Anmeldungen ab. Weitere Länder spielen hinsichtlich der Technologieentwicklung in diesem Bereich somit in der Regel eine untergeordnete Rolle.

Insbesondere Japan ist traditionell führend im Bereich der Batterie- (über 40 Prozent der Patentanmeldungen) und Brennstoffzellenentwicklung (rund 50 Prozent der Patentanmeldungen), aber auch in allen weiteren Technologiefeldern. Die Anteile Japans liegen für die verschiedenen Systemkomponenten (von der Brennstoffzellentechnologie mit fast 50 Prozent, der Batterietechnologie mit fast 43 Prozent, der Leistungselektronik mit rund 44 Prozent und dem Antriebsstrang mit rund 43 Prozent bis hin zum Fahrzeugantrieb: hybride Antriebe rund 36 Prozent, Elektromotoren rund 32 Prozent, Verbrennungsmotoren rund 29 Prozent) deutlich über den Anteilen an den gesamten technologieübergreifenden Patentanmeldungen (gemessen am Anteil japanischer Patentanmeldungen an den transnationalen Gesamtanmeldungen) mit etwa 19 Prozent. Deutlich wird, dass sich Japan entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Elektromobilität sehr gut positioniert hat. China und Südkorea hingegen haben in den meisten Technologiefeldern nur geringe Patentanteile aufzuweisen, wobei Korea insbesondere in der Batterietechnologie von Bedeutung ist, China aber im Vergleich zu seinen gesamten transnationalen Patentanteilen von etwa 5 Prozent in keinem der Technologiefelder der Elektromobilität in besonderem Maße aktiv ist. Die Volksrepublik scheint vielmehr zu versuchen, in allen Technologiebereichen aktiv zu sein. Auch die USA liegen trotz deutlicher Anteile an den Weltpatenten in den einzelnen Technologiefeldern (i. d. R. über 10 bis 20 Prozent) unterhalb ihres Anteils an den gesamten technologieübergreifenden Patentanmeldungen von rund 27 Prozent.

Abbildung II.13

**Anteile führender Länder an Patentanmeldungen in Technologiefeldern der Elektromobilität zwischen 2007 und 2009 in Prozent**



Eigene Berechnungen anhand von EPA – PATSTAT (Stand Februar 2012)

Umgekehrt lässt sich in Deutschland (und z. T. auch in Frankreich) ein zunehmender Anteil an den weltweiten Patentaktivitäten mit zunehmender Systemintegration feststellen. Deutschland ist in allen Technologiefeldern der Elektromobilität generell unter den führenden Ländern, im Bereich der Batterie- und Brennstoffzellenentwicklung mit über 10 Prozent der Weltpatentanteile allerdings etwas unterhalb seines Anteils an allen technologieübergreifenden Anmeldungen von 16 Prozent. Zudem sind die Anteile Deutschlands innerhalb der Batterieentwicklung noch geringer, wenn man nur die Patentanmeldungen im Bereich der Lithium-Ionen-Batterien betrachtet. Im Bereich der Leistungselektronik, des Antriebsstrangs, der Elektromotoren und hybrider Antriebe ist Deutschland nach Japan allerdings zweitgrößter Patentanmelder und deutlich aktiver als im Mittel über alle Technologiefelder hinweg. Bei konventionellen Verbrennungsmotoren liegt Deutschland gleichauf mit Japan.

Betrachtet man somit die gesamte Wertschöpfungskette der Elektromobilität, so kann Deutschland im internationalen Vergleich bestehende Schwächen, die sich an geringeren Patentanmeldungen in der Batterie- und Brennstoffzellenentwicklung bemessen, durch Schwerpunktsetzung in der Systemintegration über den Einbezug der Leistungselektronik und Antriebstechnologien bis hin ins Fahrzeug ausgleichen und hat aus Sicht der historischen Patentlage durchaus Chancen, im Bereich der Elektromobilität als Ganzes an die Weltspitze aufzurücken.

Einen weiteren Vergleich der Aktivitäten der betrachteten Länder im Bereich der Technologiefelder der Elektromobilität bietet der sogenannte RPA-Index an. Die inhaltliche Schwerpunktsetzung der Technologieaktivitäten wird dabei durch einen Spezialisierungsindikator abgebildet. Der RPA (relativer Patentanteil) drückt aus, ob sich ein Land oder eine Region im Vergleich zum internationalen

Durchschnitt über- oder unterdurchschnittlich stark in einem Gebiet engagiert. Der RPA wird für jedes Land  $i$  und jedes Technologiefeld  $j$  folgendermaßen berechnet:

$$RPA_{ij} = 100 \tanh \ln \left( \frac{P_{ij} / \sum_i P_{ij}}{\sum_j P_{ij} / \sum_{ij} P_{ij}} \right)$$

wobei  $P_{ij}$  die Anzahl der Patente eines Landes  $i$  in einem Feld  $j$  ist.

Der Wert des Indikators ist 0, wenn die Spezialisierung dem internationalen Durchschnittswert entspricht. Überdurchschnittliche Aktivitäten liegen in Feldern mit positiven Indikatorwerten vor, negative Indikatorwerte bedeuten unterdurchschnittliche Aktivitäten. Der Maximal- bzw. Minimalwert des Indikators liegt bei  $\pm 100$ , Werte größer 20 oder kleiner -20 gelten als signifikant.

Abbildung II.14 stellt die RPA für die sieben definierten Technologiefelder (auf Basis der Patentanmeldungen zwischen 2007 und 2009) der weltweit führenden Länder Japan, China, Südkorea, USA, Deutschland und Frankreich dar, sowie zum Vergleich die Anteile der EU-15-Mitgliedstaaten und der restlichen Länder mit Patentanmeldungen. Im Bereich der Batterietechnologie zeigt sich eindeutig die Spezialisierung Japans und Südkoreas (RPA-Index über 60). China ist in diesem Technologiefeld zwar unterrepräsentiert, jedoch nicht signifikant. Auch aus Sicht der Marktanteile führen die drei asiatischen Länder heute die Produktion von Batterien, insbesondere der Lithium-Ionen-Batterien, an. Weiterhin ist Japan eindeutig und als einziges Land weltweit im Bereich der Brennstoffzellenfahrzeugtechnologie wesentlich spezialisiert.

Im Hinblick auf den internationalen Wettbewerb bei der Fertigung der Leistungselektronik lässt sich sagen, dass

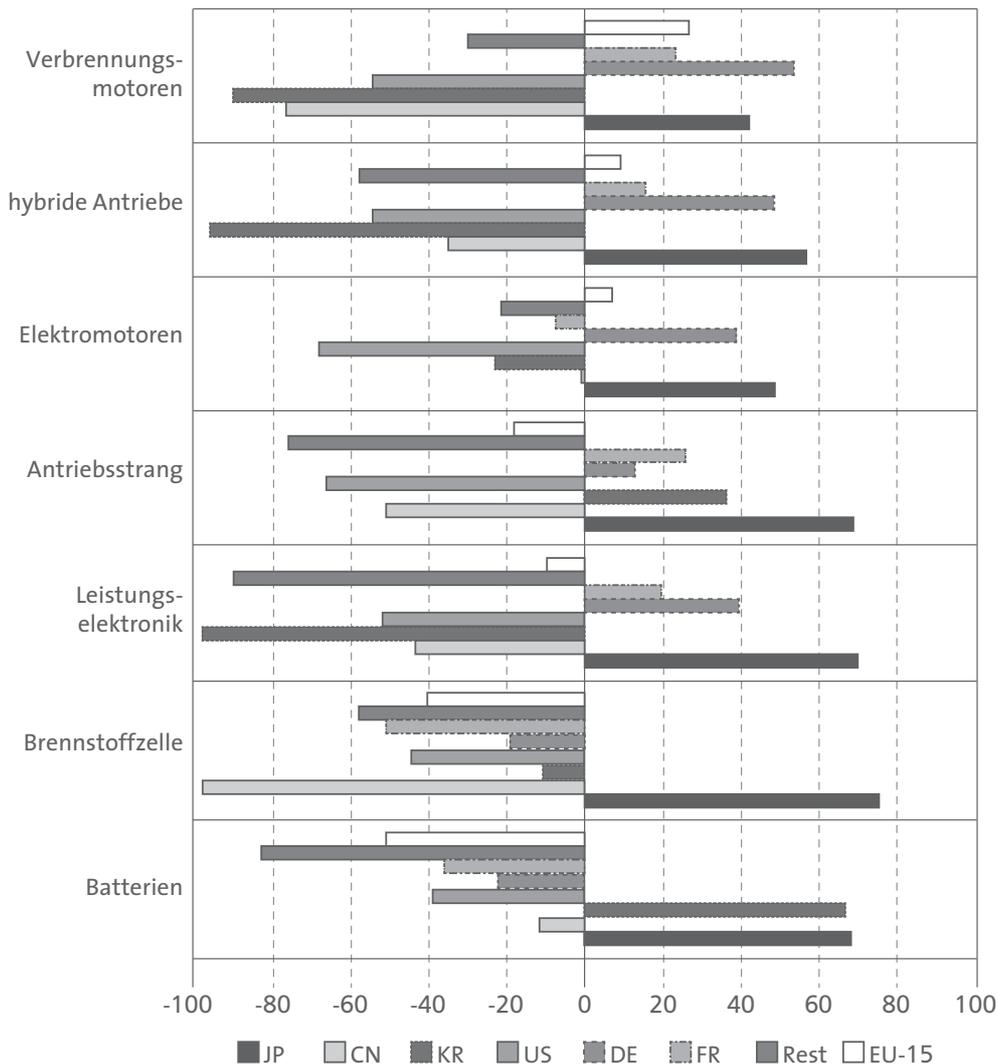
Japan die Systemintegration der Leistungselektronik in Elektrofahrzeugen aufgrund der früher gestarteten Serienanwendung von Elektroantrieben im Auto bereits begonnen hat (NPE 2010b). Neben Japan sind insbesondere Deutschland und zum Teil Frankreich im Bereich der Leistungselektronik spezialisiert. Die Bedeutung des Themas auch über die Elektromobilität hinaus, z. B. für künftige moderne Energienetze und die Einbindung erneuerbarer Energien wie Windkraft oder Solaranlagen in das sogenannte intelligente Stromnetz, wurde in Deutschland in den letzten Jahren erkannt und die Technologie wird derzeit stark vorangetrieben. Im Bereich des Antriebsstrangs weist neben Japan, Deutschland und Frankreich auch Südkorea eine Spezialisierung auf.

Japan und Deutschland sind auch im Bereich der Elektromotoren, hybriden Antriebe und des konventionellen Verbrennungsmotors mit Abstand am stärksten spezialisiert, wobei in Deutschland nach wie vor die traditionelle

Stärke der Automobilindustrie sichtbar ist (vgl. RPA Deutschlands im Bereich Verbrennungsmotor von über 50, RPA Japans über 40 und somit vergleichsweise geringer). Diese starke Spezialisierung zeigt sich schließlich auch in den Marktdaten, z. B. zu Elektromotoren: Heute werden in Deutschland ca. 5 Millionen Elektromotoren produziert, während es in Europa insgesamt 10 bis 12 Millionen sind, 7 bis 8 Millionen in Amerika (hier sind Brasilien und Mexiko vergleichsweise stark), und 15 bis 18 Millionen in Asien (wo der Schwerpunkt in China und Japan liegt). Für China wird das Produktionsvolumen auf 7 bis 9 Millionen Stück geschätzt (NPE 2010b). Japan, Deutschland und Europa als Ganzes weisen in diesem Bereich auch laut RPA-Index eine starke Spezialisierung auf. China und alle restlichen Länder (unter welche auch Brasilien und Mexiko fallen) zeigen relativ zu allen weiteren Technologiefeldern bei den Elektromotoren die geringste negative Spezialisierung.

Abbildung II.14

**Relative Patentanteile (RPA) weltweit führender Länder nach Technologiefeldern im Kontext der Elektromobilität auf Basis der Patentanmeldungen zwischen 2007 und 2009**



Eigene Darstellung

Insgesamt ist Japan deutlich auf alle Bereiche der Elektromobilität spezialisiert, Deutschland weist eine stärkere Spezialisierung mit zunehmender Systemintegration entlang der Wertschöpfungskette eines Elektromobils auf, Korea ist besonders im Bereich der Batterien aktiv und China scheint aufgrund einer relativ breiten Technologieabdeckung in den meisten der betrachteten Teilbereiche der Elektromobilität eher unterspezialisiert zu sein. Dies fällt auch für die USA auf, welche in allen Teilbereichen trotz hoher Patentanteile signifikant unterspezialisiert sind, könnte sich dort aber aufgrund aktueller massiver Förderinvestitionen in naher Zukunft ändern (Kap. II.5.2.4).

## 5.2 Politikmaßnahmen im Ländervergleich

In den letzten Jahren haben zahlreiche Regierungen weltweit nationale Zielwerte für die Markteinführung und -diffusion von Elektrofahrzeugen angekündigt. Sollten diese Ziele erreicht werden, so würden im Jahr 2015 rund 1,5 Millionen und 2020 etwa 7 Millionen Elektrofahrzeuge (PHEV und BEV) weltweit neu zugelassen werden (OECD/IEA 2009 u. 2011). Diese Zielwerte liegen im oberen Bereich der diversen für die nächsten Jahre errechneten Marktpenetrationsszenarien (Kap. II.2.2). Um die oftmals sehr ambitioniert formulierten Ziele zu erreichen, haben viele dieser Regierungen in den vergangenen Jahren (seit etwa 2007 bis 2009) staatliche FuE- und Industrieförderprogramme in die Wege geleitet und begonnen, günstige Rahmenbedingungen für eine Verbreitung der Elektromobilität zu schaffen. Um die Rahmenbedingungen zu verbessern, setzen die meisten Staaten auch auf finanzielle Anreize (durch Zuschüsse oder Steuererleichterungen beim Kauf eines Elektrofahrzeugs) oder auf einen Infrastrukturausbau bei privaten und öffentlichen Ladestationen für Elektrofahrzeuge.

Für den Ländervergleich werden nur die Länder herangezogen, welche eine ausgeprägte Automobilindustrie aufweisen und wesentliche Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität beherrschen oder sich das Know-how in absehbarer Zeit aneignen könnten. Dazu zählen, wie in Kapitel II.5.1. dargelegt, Japan, Südkorea, China, USA sowie innerhalb Europas Deutschland und Frankreich. Weiterhin sind Länder mit einer besonderen Marktgröße von Interesse, wozu insbesondere neben China auch Indien zählt. Diese Länder sollen in den folgenden Kapiteln näher hinsichtlich politischer Maßnahmen ihrer Regierungen untersucht werden.

### 5.2.1 Japan

Die japanische Regierung betrachtet seit den 1970er Jahren die Energiespeichertechnologien als Schlüsseltechnologien im Energie- und Transportbereich. Die ursprüngliche Motivation hierfür war es, die Abhängigkeit vom Erdöl zu verringern. Seit den 1990er Jahren liegt ein zunehmend starker Fokus auf der Elektromobilität. Heute sind das Wirtschaftsministerium „Ministry of Economy, Trade and Industry“ (METI), das Verkehrsministerium „Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism“ (MLIT) und das „Ministry of Education, Culture,

Sports, Science and Technology“ (MEXT) die wichtigsten Förderer der Elektromobilität, d. h. der Batterie- und Brennstoffzellentechnologien, und teilen sich die Förderung kleiner bis großer Fahrzeuge (BEV, HEV, PHEV, FCEV, Hybridbusse) bis hin zum Infrastrukturaufbau.

Die vom METI (2010) veröffentlichte „Next Generation Vehicle Strategy 2010“ visiert einen Systemwechsel in der Mobilität an. Sie umfasst eine Strategie für die Entwicklung und Produktion von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben (BEV, HEV, PHEV, FCEV), eine Strategie zur Förderung der Batterietechnologie, eine Ressourcenstrategie, eine Strategie zum Ladeinfrastrukturaufbau, eine Strategie zur systemischen Umsetzung der Elektromobilität und eine Strategie zur internationalen Standardisierung. Zu jeder Strategie werden oder wurden entsprechende Roadmaps erarbeitet, um die Aktivitäten zu koordinieren (Tanaka 2010). Bis 2020 will Japan es dabei schaffen, 20 Prozent des Fahrzeugbestands durch Elektrofahrzeuge zu ersetzen (OECD/IEA 2011).

Die vom METI ins Leben gerufene halbstaatliche „New Energy and Industrial Technology Development Organization“ (NEDO) ist beispielsweise für die Batteriestrategie zuständig. Die NEDO fördert bereits seit den 1980er Jahren angewandte Forschung im Bereich der Energiespeichertechnologien (Brennstoffzellen und Batterien) und erstellt entsprechende Roadmaps. So werden die FuE-Ziele für die Batterieentwicklung beispielsweise seit 2006 in einer Batterieroadmap beschrieben, die 2008 und 2010 aktualisiert wurde und deren Ziele durch eine enge Zusammenarbeit zwischen Industrie, Regierung und Universitäten erreicht werden sollen (Sato 2011).

Allein die NEDO verfügte 2011 über ein Budget von rund 1,4 Mrd. Euro (151,2 Mrd. Yen), wobei für die reine Batterieforschung FuE-Mittel von rund 74 Mio. Euro (7,7 Mrd. Yen) vorhanden waren (NEDO 2011). Im Rahmen des Förderprogramms „Battery R&D for Next Generation Vehicles“ sind zwei durch die NEDO geförderte Projekte besonders hervorzuheben: Die FuE von Hochleistungsbatterien im Projekt „Lithium ion and Excellent Advanced Battery Development“ (Li-EAD), gefördert mit rund 22,4 Mio. Euro (2,48 Mrd. Yen) pro Jahr von 2007 bis 2011 sowie die FuE von Hochenergiebatterien im Projekt „R&D Initiative for Scientific Innovation on Next-Generation Batteries“ (RISING), gefördert mit rund 27 Mio. Euro (3 Mrd. Yen) pro Jahr von 2009 bis 2015 (Sato 2011).

Neben den von der NEDO geführten kontinuierlichen und langanhaltenden sowie gut abgestimmten Fördermaßnahmen im Bereich der Energieforschung und -entwicklung zielt die Strategie von METI (2010) auf das Vorantreiben der Markteinführung bzw. die schrittweise Kommerzialisierung von BEV und PHEV ab. Dabei spielt die Verbesserung der Ladeinfrastrukturen sowie die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle in „EV/pHV Towns“ (EV steht hier für rein elektrische Fahrzeuge, die im vorliegenden Bericht als BEV bezeichnet werden, pHV steht für Plug-in-Hybride), welche in der Systemstrategie konzipiert wurden, eine entscheidende Rolle.

Unter dem im März 2009 vom METI eingeführten Konzept zum Aufbau von „EV/pHV Towns“ wurden acht von 47 Präfekturen (japanische Regierungsbezirke) – Kanagawa, Aomori, Niigata, Aichi, Fukui, Kyoto, Nagasaki und Tokyo – ausgewählt, nach Art der deutschen Modellregionen Elektrofahrzeuge einzuführen und gleichzeitig eine regionale Industriepolitik zu betreiben. In diesen Präfekturen arbeiten lokale Regierungen, regionale Institutionen und private Unternehmen zusammen, um Demonstrationsprojekte für eine weitgehende Verbreitung von Elektrofahrzeugen zu realisieren. Vier Schwerpunkte prägen die Projekte: die Förderung der Marktnachfrage, die Verbesserung der Ladeinfrastruktur, die Verbesserung der Sichtbarkeit und Information zu Elektrofahrzeugen in einer Art Schaufensterprojekte sowie die Evaluation bzw. Bewertung des Einsatzes von Elektrofahrzeugen, um die Nutzerakzeptanz sicherzustellen. Um die Marktnachfrage zu fördern, übernimmt die japanische Regierung beispielsweise 50 Prozent der Zusatzkosten, die bei der Anschaffung eines Elektroautos im Vergleich zu konventionellen Pkw entstehen. Diese Fördermaßnahme gilt auch für private Anbieter, wenn sie Ladeinfrastruktur einrichten. Dafür hat die japanische Regierung im Jahr 2009 rund 32 Mio. Euro (4,27 Mrd. Yen) und im Jahr 2010 rund 124 Mio. Euro (13,7 Mrd. Yen) bereitgestellt. Darüber hinaus wurden unterschiedlichen Formen von Steuerbefreiungen bzw. -senkungen, z. B. für die Kaufsteuer („automobile acquisition tax“) implementiert. Mit der Anschaffung von Elektrofahrzeugen als öffentliche Dienstwagen demonstrieren die lokalen Regierungen den Willen zur Förderung der Elektromobilität. Zudem fördern sie den Einsatz von Elektrofahrzeugen z. B. als Mietwagen oder Taxis. Um eine große Kundenakzeptanz zu schaffen, veranstalten sie Ausstellungen und Events, um für die Vorteile von Elektrofahrzeugen zu werben (Tanaka 2010).

Als Vorzeigebispiel und besonders aktiv gilt die Präfektur Kanagawa mit Sitz in Yokohama, welche bis 2014 ca. 3 000 Elektroautos auf die Straße bringen will. Die Präfektur verfolgt u. a. das Ziel, FuE-Institute, Batterieproduktion bis hin zur Automobilindustrie vor Ort anzusiedeln, was mit dem Autohersteller Nissan bereits gelungen ist. Weiterhin soll die Bevölkerung durch Testautos zu Demonstrationszwecken an die Elektromobilität herangeführt werden. Durch Kaufanreize mit Subventionen in Form von Steuererleichterungen, reduzierte Parkgebühren, reduzierte Maut sowie weiteren Maßnahmen sollen Mehrkosten gegenüber konventionellen Pkw auf ein Minimum reduziert werden. Gleichzeitig wird in Yokohama auf einen Ausbau von Schnellladestationen gesetzt.

Obleich keine Gesamtzahlen für die Förderung der Elektromobilität in Japan zu finden sind, dürfte eine Hochrechnung der regionalen Investitionen in Infrastrukturen, der regionalen und staatlichen Subventionen und Steuererleichterungen sowie der staatlichen FuE-Förderung einige 100 Mio. Euro pro Jahr ergeben.

Bis heute hat Japan die Entwicklung in der Elektromobilität am weitesten vorangetrieben: In Hinsicht auf die Batterieproduktion nimmt Japan eine weltweit führende

Rolle ein. So beanspruchen z. B. im Bereich der Batteriezellfertigung Panasonic/Sanyo, Sony und Hitachi derzeit rund 50 Prozent des Marktes für sich (Fraunhofer ISI 2012b). Außerdem deckt Japan die gesamte Wertschöpfungskette von der Komponentenherstellung über die Zellfertigung bis hin zur Modul- und Packherstellung im eigenen Land ab. Der Technologievergleich in Kapitel II.5.1 zeigt, dass Japan auch in den weiteren Schlüsseltechnologien wie der Brennstoffzellentechnologie, der Leistungselektronik oder den Elektromotoren spezialisiert ist. Bezüglich des Infrastrukturbaus sind bis heute 1 000 Schnellladestationen im öffentlichen Bereich installiert, bis 2020 sollen 100 Ladestationen auf Autobahnen eingerichtet werden. In Hinblick auf Elektroautos haben beispielsweise die Fahrzeuge Nissan LEAF und Mitsubishi i-MiEV bereits Serienreife erlangt. Für die Standardisierung des Ladesystems wurde das CHAdeMo System bereits 2010 von Nissan Motor, Mitsubishi Motors, Fuji Heavy Industries und Tokyo Electric Power zusammen ins Leben gerufen und in Japan umgesetzt und verbreitet. Als nächsten Schritt versucht Japan, das System international zu verbreiten (Tanaka 2010).

## 5.2.2 China

China unterstützt die Einführung der Elektromobilität bereits seit mehr als 10 Jahren. Das Ziel dabei ist, China von einer „großen Nation“ der Automobile in eine „starke Nation“ der Automobile umzuwandeln (MIIT 2012). Im Bereich der Elektromobilität sieht die chinesische Regierung die Chancen für eine Aufholjagd gegenüber den führenden Automobilherstellern. Während des 10. Fünfjahresplans (2001 bis 2005) investierte das „Ministry of Science and Technology“ (MOST) unter dem Programm „863“ umgerechnet rund 97 Mio. Euro (776 Mio. Renminbi) in FuE für die Elektromobilität als Ganzes und während des 11. Fünfjahresplans (2006 bis 2010) rund 133 Mio. Euro (1,1 Mrd. Renminbi) in die Systemintegration für FCEV, BEV und HEV. Hierbei verfolgt das MOST eine sogenannte Three-vertical-and-three-parallel-Aspects-Strategie. Gemeint ist, dass alle Elektrofahrzeuge, zu denen in China neben HEV und BEV auch FCEV gezählt werden (three verticals), und die Schlüsseltechnologien Batterien, Elektromotoren und Leistungselektronik (three parallels) gezielt gefördert und entwickelt werden (MOST 2012; UN DESA 2011; Zhang 2010). In diesem Zusammenhang werden unter dem 12. Fünfjahresplan (2011 bis 2015) ca. 92 Mio. Euro (730 Mio. Renminbi) in der ersten Phase (2011 bis 2013) des „863 technology and system integration project for EVs“ bereitgestellt, um die Entwicklung der drei genannten Schlüsseltechnologien, die Entwicklung von Basistechnologien wie der Materialforschung und neuer Komponenten sowie schließlich den Infrastrukturaufbau und eine gemeinsame Plattform für technologische Innovationen, strategische Allianzen, die Standardisierung u. Ä. zu unterstützen (MOST 2010).

Neben dem MOST sind weiterhin das „Ministry of Industry and Information Technology“ (MIIT), das „Ministry of Finance“ (MOF) sowie die „National Development and Reform Commission“ (NDRC) wichtige und zentrale Förderer der Elektromobilität, insbesondere im Rahmen

des 2009 ins Leben gerufenen Programms „10 cities – 1 000 vehicles“, das von 2009 bis 2012 läuft. Dabei handelt es sich um ein Demonstrationsprojekt zur Förderung der Technologie und Unterstützung der Industrie, an dem zu Beginn 13 und seit Juli 2011 nunmehr 25 Städte teilnehmen (UN DESA 2011). In 5 der 25 Pilotstädte (Shanghai, Changchun, Shenzhen, Hangzhou, Hefei) wird der private Erwerb (einschließlich Leasing des Elektrofahrzeugs oder der Batterien) von PHEV und BEV zwischen 2010 und 2012 von der Zentralregierung subventioniert. Dabei wird der Erwerb mit ca. 375 Euro (3 000 Renminbi) pro kWh der Batterie gefördert. Jedoch liegt die maximale Subventionssumme für BEV bei 7 500 Euro (60 000 Renminbi), was beispielsweise mit einer 20-kWh-Batterie erreicht wird, und für PHEV bei 6 250 Euro (50 000 Renminbi) (MOF 2010). Die lokalen Regierungen können ihrerseits weitere Zuschüsse oder privaten Kunden unterschiedliche Privilegien gewähren. Beispielsweise subventioniert die Regierung in Shenzhen 7 500 Euro (60 000 Renminbi) für den Kauf eines BYD e6, sodass Zentral- und Lokalregierung gemeinsam 15 000 Euro an Zuschüssen gewähren ([http://english.sz.gov.cn/ln/201110/t20111027\\_1754904.htm](http://english.sz.gov.cn/ln/201110/t20111027_1754904.htm) [31.7.2012]). In Peking werden ab September 2012 die privaten EV-Kunden vom „Lotterieverfahren“ zum Erwerb eines Autokennzeichens entlastet (Energy Trend 2012). Darüber hinaus gelten bei PHEV und BEV im öffentlichen Dienst die gleichen Subventionen wie für den privaten Gebrauch. Die Beschaffung von Hybridbussen wird in diesem Programm staatlich koordiniert (NPE 2010b).

Im April 2012 wurde der „Development plan for energy-efficient and new energy vehicle industry“ (2012 bis 2020) (kurz: Entwicklungsplan) vom MIIT nach mehrmaliger Verschiebung veröffentlicht (MIIT 2012). Unter dem Namen „new energy vehicles“ werden BEV, PHEV und FCEV zusammengefasst. Der Entwicklungsplan zeigt die Regierungspläne zur weiteren Entwicklung der Elektrofahrzeugindustrie in China bis 2020 auf.

Kurz- bis mittelfristig, d. h. im Zeitraum des 12. Fünfjahresplans (2011 bis 2015) werden energieeffiziente Fahrzeuge und HEV als Übergangstechnologien betrachtet und unterstützt, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken, die Effizienz des Kraftstoffverbrauchs zu erhöhen und gleichzeitig das technologische Niveau in der Automobilbranche im Allgemeinen anzuheben. Die Zielvorgaben für den Kraftstoffverbrauch liegen bei max. 6,9 l/100 km bis 2015 und max. 5 l/100 km bis 2020. Zur Unterstützung der „new energy vehicles“ wird auf die Weiterentwicklung kleiner BEV einerseits sowie Elektrobusse als Großfahrzeuge andererseits sowie den Aufbau der Ladeinfrastruktur in Pilotstädten fokussiert, um den breiten Markt für künftige mittelgroße Elektrofahrzeuge vorzubereiten. Hierbei werden bis 2015 400 000 Ladesäulen und 2 000 Lade- und Wechselstationen mit der Investitionssumme von rund 17,5 Mrd. Euro (140 Mrd. Renminbi) eingeplant. Um den Infrastrukturaufbau voranzutreiben, wurde vom MIIT Ende 2011 die Einführung des nationalen Steckersystems GB/T, ähnlich dem IEC 62196-2 Typ II, bekannt gegeben (Realli 2012).

Das langfristige Ziel Chinas ist der Aufbau einer chinesischen „new energy vehicle industry“. Daher ist zu erwarten, dass die Förderung der entsprechenden Fahrzeuge im Fokus des 13. Fünfjahresplans (2016 bis 2020) stehen wird. Nach Plänen der Regierung sollen die chinesischen Automobilhersteller ab 2015 bei kleinen BEV Skaleneffekte erreichen und Fortschritte bei der Entwicklung von Mittel- bis Oberklasse-BEV erzielen. Die konkreten Zielvorgaben sehen ein akkumuliertes Absatzvolumen von 500 000 BEV und PHEV bis 2015 und 5 Millionen BEV und PHEV bis 2020 vor, wobei die Zielvorgaben in dem Entwicklungsplan im Vergleich zum ursprünglichen 12. Fünfjahresplan stark nach unten korrigiert wurden: 500 000 statt 1 Million bis 2015; 5 Millionen statt 10 Millionen bis 2020 (MIIT 2012).

In dem Entwicklungsplan des MIIT wird angekündigt, dass die Regierung zwei bis drei wettbewerbsfähige Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette unterstützt, um gemeinsam ein Elektromobilitätscluster aufzubauen, worin die gegenwärtigen Automobilhersteller eine entscheidende Rolle wahrnehmen sollen. Betrachtet man die Vernetzung zwischen den regierungseigenen („state owned“) Automobilherstellern und den regierungseigenen Batterieherstellern, so wird die Absicht, mit dem Staatskapital auch die Staatsunternehmen in der weitgehenden Entwicklung dieser Branche zu unterstützen, deutlich (MIIT 2012; MOST 2012; Realli 2012).

Die Erfolgchancen für die Entwicklung der Elektromobilität in China werden als gut eingeschätzt, da China bereits heute der größte Hersteller und gleichzeitig der größte Markt von elektrisch betriebenen Zweirädern ist. 25 Millionen Elektrozweiräder, das entspricht etwa 84 Prozent des Weltmarktes, fahren auf den Straßen Chinas (Realli 2012). Dabei fährt der größte Teil der Elektro-räder in China heute noch mit Blei-Säure-Batterien. Die chinesischen Batteriehersteller haben aber durch diesen enormen Binnenmarkt bereits viel Erfahrung in der Produktionstechnologie für die Massenfertigung von Lithium-Ionen-Batterien für Zweiräder sammeln können. Diese Erfahrung begünstigt die Beschleunigung der technologischen Lernkurven in der Produktion von Lithium-Ionen-Batterien für weitere Elektrofahrzeuge. Obwohl die chinesischen Batteriehersteller bei einigen Batterieparametern wie der Lebensdauer, der Energiedichte und der Zuverlässigkeit noch nicht ganz Schritt mit den international führenden Batterieherstellern halten können, sind sie im Hinblick auf die Kosten wettbewerbsfähig. Die Größe des Binnenmarktes, die Kostenvorteile und die damit zwangsläufig forcierte Standardisierung liefern eine breite Grundlage für zukünftige Entwicklungen (NPE 2010b).

### 5.2.3 Südkorea

Im Januar 2009 startete die Regierung in Südkorea wegen der Finanzkrise den sogenannten „Green New Deal“ mit dem Ziel, Arbeitsplätze zu generieren und die Wirtschaft wieder anzukurbeln. Im „Green New Deal“ war hierzu ein Volumen von ca. 30 Mrd. US-Dollar (2009 bis 2012) vorgesehen. Davon sollten 1,8 Mrd. US-Dollar in den Be-

reich „low carbon vehicles“ fließen: energieeffiziente Fahrzeuge und Elektrofahrzeuge. Die politischen Fördermaßnahmen bzw. -programme werden in Südkorea zwar von der Zentralregierung koordiniert und festgelegt, die Industrien beteiligen sich jedoch sehr stark am Entscheidungsprozess bzw. beeinflussen diesen mit. Dies prägt auch die Entwicklung der Elektromobilität des Landes. Fördermittel bzw. Investitionen werden oft in sehr großem Stil getätigt, da die Industrien (Konglomerate) mitfinanzieren (MKE 2010; Schröder/Park 2010). Südkorea ist beispielsweise mit einigen wenigen Batterieunternehmen heute das zweitwichtigste Herstellerland von Lithium-Ionen-Batterien und strebt gemeinsam mit der Automobilindustrie künftig eine Führungsrolle im Bereich der Batteriefertigung für Elektrofahrzeuge an.

Im Bereich der Batteriefertigung für Elektrofahrzeuge haben die südkoreanischen Unternehmen bereits seit den letzten 10 Jahren ihre FuE-Aktivitäten begonnen (z. B. LG Chemical seit 1999, später auch Samsung und SK Energy). Die 2009 ausgebrochene Finanzkrise beschleunigte die politische Entscheidung, die Wettbewerbsfähigkeit Südkoreas in den Branchen „green cars and secondary batteries“ zu unterstützen und zu stärken. Vor allem wird die Batterietechnologie vom „Ministry of Knowledge Economy“ (MKE) als Schlüsseltechnologie für die Entwicklung der Elektromobilität betrachtet und am stärksten gefördert (UNEP 2010; Virtanen/Lee 2010).

Zur Förderung der Batterieforschung stellt die Regierung für den Zeitraum von 2009 bis 2014 Fördermittel in Höhe von etwa 340 Mio. Euro bereit (NPE 2010b; UN DESA 2011). In Hinsicht auf die FuE-Förderung von Energiespeichern stehen Lithium-Ionen-Batterien im Fokus (mit 76 Prozent des gesamten Budgets von 38,53 Mio. Euro Batterieförderung im Jahr 2011), mit dem Schwerpunkt der Förderung bei der Materialforschung an optimierten Elektroden. Nach dem 2010 veröffentlichten Strategieplan des MKE will das „Rechargeable Battery Development Committee“, bestehend aus Regierung, Forschungsinstituten, Universitäten und Unternehmen, die Fördermittel nun gezielt für die Produktion von mittel- bis großformatigen Batterien und die Material- sowie Komponentenentwicklung einsetzen, um die Positionierung Südkoreas als größtem Batteriehersteller weltweit zu erreichen. Durch massive Investitionen der Industrien in Höhe von rund 10 Mrd. Euro (15 Bio. Won) im Rahmen des „Battery 2020 Project“ soll bis 2020 ein Weltmarktanteil von 50 Prozent in der Batterieproduktion erreicht werden. 11 Bio. Won werden dabei in Produktionsanlagen und 4 Bio. Won in die Materialforschung investiert. Der Anteil der in Südkorea hergestellten Materialien und Komponenten für Batterien soll bis dahin auf 75 Prozent ansteigen, wodurch heute noch unerschlossene Wertschöpfungsstufen in der Batteriefertigung weiter erschlossen werden sollen. Hierbei sollen mindestens zehn global wettbewerbsfähige Materialhersteller aus Südkorea hervorgehen (MKE 2010).

Als flankierende Maßnahmen zu dieser Batteriefertigungs- und Materialentwicklungsstrategie werden insbesondere Maßnahmen zum Fachkräfteaufbau, der

Sicherstellung des Zugriffs auf Rohstoffe zur Batterieproduktion und zur internationalen Zusammenarbeit mit Japan und China bei der Festlegung von Normen und Standards ergriffen, um Schwächen Südkoreas wie den Fachkräftemangel, einen kleinen Binnenmarkt und geringe eigene Rohstoffvorkommen auszugleichen (MKE 2010). Daher sind das Ministry of the Environment, das Ministry of Education, Science and Technology und das Ministry of Foreign Affairs and Trade auch in die Durchführung des Strategieplans involviert.

Betrachtet man die Entwicklung der Elektromobilität als Ganzes, so zeigt die südkoreanische Regierung ebenso wie in der Batteriefertigung ihre Ambitionen bzgl. einer künftigen Führungsposition in diesem allgemeinen Bereich. Bis 2015 will Südkorea der viertgrößte Elektrofahrzeugmarkt der Welt werden. Der Fahrzeugbestand soll bis dahin zu 10 Prozent und bis 2020 zu 20 Prozent durch Elektrofahrzeuge ersetzt werden (rd. 1 Million Elektrofahrzeuge bis 2020) (Schröder/Park 2010; Virtanen/Lee 2010). In dem „Green Car Project 2011–2030“ wird die Investitionssumme in Höhe von 1 620 Mio. US-Dollar zur Unterstützung der Elektrofahrzeuge genannt. 500 Mio. US-Dollar sollen im Zeitraum von 2011 bis 2015, 470 Mio. US-Dollar im Zeitraum von 2016 bis 2020 und 650 Mio. US-Dollar im Zeitraum von 2021 bis 2030 investiert werden (Frost & Sullivan 2011a). Neben der Batterietechnologie werden die weitere Entwicklung von Elektromotoren und von Schlüsselkomponenten sowie die Standardisierung der Technologien angestrebt. Ab 2011 will die Regierung auch Maßnahmen zum Ankurbeln der Marktnachfrage durchführen, wie z. B. die Beschaffung von Elektrofahrzeugen seitens des öffentlichen Sektors, die Subventionierung sowie die Steuerbefreiung von privat gekauften Elektrofahrzeugen (Frost & Sullivan 2011a).

Auch die Ladeinfrastruktur soll erweitert werden. Im Auftrag des Ministry of the Environment ist die Korea Environment Corporation (KECO) zuständig für den Bau der Ladeinfrastruktur im ganzen Land. Darüber hinaus übernimmt KECO auch die Verantwortung für die Standardisierung und die Evaluation der öffentlichen Ladestellen. Bis 2010 gab es bereits 16 Ladestationen in 9 koreanischen Metropolen. Weitere 204 Ladeinfrastrukturen sollten bis Ende 2011 aufgebaut werden ([www.enterpriseinnovation.net/content/korea-install-charging-facilities-electric-vehicles-nationwide](http://www.enterpriseinnovation.net/content/korea-install-charging-facilities-electric-vehicles-nationwide)). Weiterhin sollen 3,2 Mrd. Euro bis 2030 für die Ladeinfrastruktur bereitgestellt werden, davon sollen 156 Mio. Euro aus dem öffentlichen Sektor und der Rest aus dem privaten Sektor kommen (Virtanen/Lee 2010). Darüber hinaus führt die Regierung zurzeit mit der Investitionssumme von 150 Mio. Euro (die Investitionssumme aus dem Privatsektor beträgt 107 Mio. Euro und aus dem öffentlichen Sektor 43 Mio. Euro) das Projekt „Jeji Smart Grid test bed“ durch (Jeji/Jeju ist eine kleine Insel südlich der Südkoreanischen Halbinsel, Projektzeitraum: 2009 bis 2013). Mit diesem Projekt wird geplant, optimale Smart-Grid-Geschäftsmodelle zu entwickeln und die Möglichkeit für die Kommerzialisierung und den Export dieser Modelle zu testen (Virtanen/Lee 2010).

Die enormen Investitionen seitens des privaten Sektors lassen sich dadurch erklären, dass es in Südkorea eine sehr enge Zusammenarbeit zwischen der Regierung und den Konglomeraten gibt. Die Industrie ist in allen wichtigen Räten und Gremien für die Abstimmung von Forschungs- und Industriepolitik vertreten und hat einen starken Einfluss auf politische Entscheidungen. Basierend auf der gemeinsamen Entscheidung bzw. des gemeinsam entwickelten Strategieplans sind die Konglomerate bereit, Investitionen in außergewöhnlich großem Stil zu tätigen. Gegenwärtig sind sechs der zehn größten südkoreanischen Konglomerate wie Samsung, LG Chemicals, POSCO, GS und Hanwha im Batteriebereich involviert. Allein Samsung SDI beispielsweise investierte 2010 rund 39 Mio. Euro (ca. 55 Mrd. Won, Samsung SDI 2011) in die Batterie-FuE sowie Produktionsanlagen (Samsung insgesamt verzeichnete im Geschäftsjahr 2010 einen Umsatz von 136 Mrd. US-Dollar, ein Betrag, der ungefähr 14 Prozent des BIP Südkoreas ausmacht). Sollten die involvierten Unternehmen dennoch finanzielle Unterstützung brauchen, würde die Regierung als Koordinator zwischen Bankengruppe und Unternehmen fungieren, damit die Unternehmen die benötigten Kredite erhalten (Lue 2012).

Mit der Verbesserung der Produkte, der Produktionsprozesse und der Schaffung von Skaleneffekten entwickelt sich die südkoreanische Batterieindustrie rasant (Lue 2012). Heute hat Südkorea einen Weltmarktanteil über die Wertschöpfungsstufen der Komponenten und Zellfertigung von 20 bis 30 Prozent. Südkorea zeigt sich selbstbewusst in seiner Rolle als „second mover“ hinter Japan und rechnet damit, in den kommenden Jahren seine Führungsposition in der Batterieproduktion für Elektroautos auf- und auszubauen (Fraunhofer ISI 2012b).

#### 5.2.4 USA

1976 hat der US-Kongress zum ersten Mal ein Gesetz für ein Demonstrationsprojekt verabschiedet, in dem die US-Regierung 7 500 Elektrofahrzeuge einkaufte. Das Gesetz initiierte das FuE-Programm für HEV und Elektrofahrzeuge des Department of Energy (DOE), und von 1978 bis 1980 wurden einige 100 Elektrofahrzeuge zu Demonstrationszwecken von Ford, General Motors und American Motors hergestellt. Allerdings schaffte Präsident Reagan 1981 das Programm ab, da das General Accounting Office (GAO) 1979 in seinem Bericht das Programm kritisierte. Das GAO war der Auffassung, eine Kommerzialisierung der Elektrofahrzeuge bräuhete große Anstrengung zur Verbesserung der Elektrofahrzeugtechnologie, zur Stärkung der entsprechenden Industrie und zum Aufbau eines neuen Marktes und letztendlich zur Einrichtung einer unterstützenden Infrastruktur. Der private Sektor sei bei Weitem nicht reif genug, um das Demonstrationsprojekt weiter durchzuführen. Die politischen Fördermaßnahmen sollten auf die FuE-Tätigkeiten fokussieren. Seither spielt das DOE eine Hauptrolle in der FuE-Förderung im Bereich von Fahrzeugenergiespeichern (CRS 2011).

Unter der Obama-Administration gewann die „Clean Energy Economy“ in den USA in den letzten Jahren wieder an Bedeutung. Präsident Obama legte das Ziel fest, bis 2015 in Amerika 1 Million Elektroautos (PHEV und BEV) auf die Straßen zu bringen. Im Februar 2009 unterzeichnete Präsident Obama das Konjunkturpaket „American Recovery and Reinvestment Act of 2009“ (ARRA), welches sich insgesamt auf 821 Mrd. US-Dollar bis 2019 belaufen soll. Das DOE verfügt mit 41,7 Mrd. US-Dollar über den größten Teil des Budgets des ARRA für Klima- und Energieprogramme. Davon werden 35,2 Mrd. US-Dollar als direkte Zuschüsse verwendet und 6,5 Mrd. US-Dollar als Kredite (Wurzelmann 2011). Als gesetzliche Regulierung wurden die „Corporate Average Fuel Economy Standards“ (CAFE) im Jahr 2010 vom US Department of Transportation (DOT) herausgegeben. Bis 2016 muss der Kraftstoffverbrauch bei Pkw unter 6,6 l/100 km (35,5 mpg) liegen.

Das DOE setzt unter der Obama-Administration die FuE-Tätigkeiten für die Fahrzeugtechnologie, insbesondere für das Vorantreiben der Produktion von Batterien fort. Das Hauptziel ist, eine Marktdurchdringung mit Elektrofahrzeugen zu schaffen. Der Erfolg hinsichtlich dieses Ziels hängt wiederum stark von den Kosten und der Leistung der Batterien ab. Daher beinhalten die Forschungsschwerpunkte klar die Reduzierung der Kosten und Verbesserung der technischen Parameter der Batterien.

Innerhalb des DOE sind drei Abteilungen für die Elektromobilität von Bedeutung. Das „Office of Science/Basic Energy Sciences“ (BES) ist zuständig für Grundlagenforschung z. B. in der Nanotechnologie, in Chemie- und Materialwissenschaften sowie den Schnittstellentechnologien. Die 2007 gegründete „Advanced Research Projects Agency-Energy“ (ARPA-E) mit einem Budget von 387 Mio. US-Dollar (an den 35,2 Mrd. US-Dollar des DOE über 10 Jahren) fördert darüber hinaus neue und revolutionäre Forschungsansätze, welche großes technisches Potenzial und signifikante wirtschaftliche Effekte mit sich bringen könnten, aber auch ein hohes Erfolgswisiko bergen. Hierin wird die Batterieforschung, insbesondere diverser Post-Lithium-Ionen-Batterietechnologien, unter dem Programm „Batteries for Electrical Energy Storage in Transportation“ (BEEST) gefördert. Die mit Fördermitteln unterstützten Organisationen sind sowohl private Unternehmen als auch Universitäten bzw. Forschungsinstitute. Das „Office of Electricity/Energy Efficiency and Renewable Energy“ (EERE) fördert weiterhin FuE-Tätigkeiten zu Batterien, um die Marktdurchdringung mit Elektrofahrzeugen zu ermöglichen. Von Bedeutung innerhalb des EERE ist das „Vehicle Technology Program“ (VTP). Dieses Programm zielt darauf ab, durch Entwicklung von Lithium-Ionen-Batterien der 3. Generation und Verbesserung der Produktionsprozesse die Batteriekosten weiter zu senken (Wurzelmann 2011).

Im Rahmen des Konjunkturpaketes ARRA stellt das DOE insgesamt 2,4 Mrd. US-Dollar zur Förderung der Entwicklung von Elektrofahrzeugen bereit. Es werden 48 Projekte in 20 Bundesstaaten gefördert, um die Ent-

wicklung dieser Branche voranzutreiben. Darunter wurden 1,5 Mrd. US-Dollar für FuE, Produktion und die Entwicklung von Maßnahmen zum Recycling von Batterien bereitgestellt. Die konkreten Ziele sind die Verdoppelung der Energiedichte und eine Kostensenkung um 70 Prozent von Batterien für PHEV und BEV mit hoher Reichweite bis 2015, damit die Zielvorgabe des Präsidenten (1 Million Elektrofahrzeuge bis 2015 in den USA) erreicht werden kann. Die 1,5 Mrd. US-Dollar sind wie folgt entlang wesentlicher Wertschöpfungsstufen aufgeteilt: 28,4 Mio. US-Dollar für den Abbau und die Aufbereitung von Lithium, 259 Mio. US-Dollar für die Komponentenentwicklung, 735 Mio. US-Dollar für die Entwicklung der Batteriezellen, 462 Mio. US-Dollar für Batteriepackaginganlagen, 9,5 Mio. US-Dollar für eine Lithiumrecyclinganlage. Somit wird vor allem die Batterieindustrie, insbesondere der Auf- und Ausbau von Produktionsanlagen, massiv gefördert. Mit weiteren 500 Mio. US-Dollar fördert das DOE die Entwicklung des Antriebsstrangs (Elektromotoren, Leistungselektronik und andere Komponenten), und 400 Mio. US-Dollar werden für die Entwicklung mehrerer Tausend PHEV für Demonstrationszwecke, die Installation von Ladestationen und die Ausbildung von Personal für die Elektromobilität bereitgestellt (CRS 2011; Wurzelmann 2011).

Die USA setzen somit auf den Aufbau einer amerikanischen Wertschöpfungskette für Lithium-Ionen-Batterien und versprechen sich durch direkte und indirekte Effekte über 7 000 neue Jobs durch eine Batterieindustrie für die Elektromobilität (CGGC 2010). Allerdings befindet sich die Elektrofahrzeugindustrie immer noch in der Frühphase der Entwicklung, und es zeigt sich eine große Kluft zwischen dem Regierungsziel und der realen Marktnachfrage, obwohl im Rahmen des „Electric Drive Vehicle Deployment Act“ auch finanzielle Anreize für Konsumenten wie z. B. 7 500 US-Dollar Steuererleichterung für den Neukauf von PHEV/BEV und zusätzliche Kaufanreize bis zu 5 000 US-Dollar auf Ebene der Bundesstaaten angeboten werden (CRS 2011). Darüber hinaus unterstützt die Regierung mit Steuererleichterungen private Installationen von Ladestationen. Bis zu 2 000 US-Dollar für eine Installation in privaten Haushalten und bis zu 50 000 US-Dollar für Geschäfte sind steuerlich absetzbar (Virtanen/Lee 2010). Als nichtmonetäre Maßnahme erlauben viele US-Bundesstaaten weiterhin beispielsweise die Nutzung ausgewiesener Fahrspuren für Elektroautos (World Bank/PRTM 2011).

Im März 2012 kündigte die Obama-Administration das neue EV Everywhere-Vorhaben an und bekannte sich damit erneut zur Förderung der Elektromobilität in den USA. Übergreifendes Ziel soll sein, dass sich die durchschnittliche amerikanische Familie PHEV innerhalb der nächsten 10 Jahre genauso leisten kann wie die heutigen kraftstoffbetriebenen Fahrzeuge, damit Elektrofahrzeuge weithin Verbreitung finden. Strategiepapiere und detaillierte Informationen zu Maßnahmen und der Initiative selbst sind mittlerweile erschienen (DOE 2013).

### 5.2.5 Indien

Im Jahr 2009 wurden ca. 1,7 Millionen Kfz in Indien verkauft.<sup>1</sup> Das Verkaufsvolumen im Jahr 2010 stieg nach Schätzungen auf 1,9 Millionen an, mit weiterhin steigender Tendenz. Indien wird daher künftig ein bedeutender Wachstumsmotor für die internationale Automobilindustrie werden. Zwar präsentierte sich Indiens Automobilsektor während der Delhi Auto Expo 2012 als Vorreiter bei „grüner Mobilität“, jedoch gibt es keine Fördermaßnahmen für FuE von Elektrofahrzeugtechnologien und ebenso keine Technologie-Roadmap seitens der Regierung. Allerdings bietet die Regierung in ihrem Haushaltsplan 2011 bis 2012 unterschiedliche Steuervorteile für Elektrofahrzeuge an: Beispielsweise die komplette Befreiung von Importzöllen und einen niedrigeren Verbrauchssteuersatz für Batterien, die von Elektrofahrzeugherstellern importiert werden, die Senkung des Verbrauchssteuersatzes auf 10 Prozent für Fahrzeuge mit Brennstoffzellentechnologie, die komplette Befreiung von Importzöllen und speziellem CVD („countervailing duty“<sup>2</sup>) für Schlüsselkomponenten von HEV, die Senkung der Verbrauchssteuer für Einrichtungen, die für die Umrüstung von konventionellen Fahrzeugen zu HEV benötigt werden (India Budget 2011 bis 2012). Es liegt nahe, dass die indische Regierung als ersten Schritt bei der Unterstützung der „grünen Mobilität“ auf die Importstrategie von Schlüsselkomponenten für Elektrofahrzeuge fokussiert. Offensichtlich reicht der gegenwärtige technologische Stand in Indien noch nicht, um eigene FuE-Tätigkeiten zu unternehmen.

### 5.2.6 Deutschland

Als Ausgangspunkt für die politische Förderung der Elektromobilität in Deutschland gilt das „Integrierte Energie- und Klimaprogramm“ (IEKP) der Bundesregierung von 2007, in dessen Rahmen der zukünftige Bedarf nach elektrischen Fahrzeugantrieben betont und begründet wurde (BMW/BMU 2007). Der damalige Zeitplan für weitere Maßnahmen visierte als nächsten großen Meilenstein die Entwicklung eines Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität (NEP) bis 2008 an (Bundesregierung 2009). Dieser wurde 2009 veröffentlicht und benennt die Ziele der Bundesregierung, bis 2020 1 Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen zu bringen sowie im internationalen Wettbewerb zum Leitanbieter und Leitmarkt für Elektromobilität zu werden, um die deutsche Stellung im Automobilbau sowie Arbeitsplätze, heimische Wertschöpfung und Exportchancen in diesem Bereich auch zukünftig zu sichern.

Im sogenannten Ressortkreis Elektromobilität, dessen Aufgabe die Fortschreibung und Begleitung der Umsetzung des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität ist, erfolgt eine übergreifende Kooperation und Koordination der vier Bundesministerien, welche im Wesentlichen

<sup>1</sup> Zum Vergleich waren dies in China 10,3 Millionen, in Deutschland 3,8 Millionen und in Südkorea 1 Million (Deloitte 2010).

<sup>2</sup> Der sogenannte „countervailing duty“ ist ein zusätzlicher Importzoll der Welthandelsorganisation zum Ausgleich negativer Übersubventionseffekte.

die Verbreitung der Elektromobilität fördern: das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) sowie das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Daneben gibt es die sogenannte „Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung“ (GGEMO), welche von BMVBS und BMWi Anfang 2010 eingerichtet wurde, um die Aufgaben der Bundesregierung im Bereich Elektromobilität zu bündeln und zu koordinieren (BMWi 2010).

Um die Umsetzung des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität zwischen allen beteiligten Akteuren eng abzustimmen, wurde am 3. Mai 2010 die „Nationale Plattform Elektromobilität“ (NPE) eingerichtet, die aus Vertretern der Politik, Industrie, Wissenschaft, Kommunen sowie der Verbraucher zusammengesetzt ist.

Schon im Zeitraum von 2009 bis 2011 hat die Bundesregierung 500 Mio. Euro aus Mitteln des Konjunkturpaketes II für FuE zur Verfügung gestellt. Sie strebt an, diese Anstrengungen noch wesentlich zu steigern, indem sie bis zum Ende der Legislaturperiode weitere Mittel von bis zu 1 Mrd. Euro bereitstellt (insgesamt 1,5 Mrd. Euro zwischen 2009 und 2013). Mit der Bekanntgabe der Clusterinitiativen Elektromobilität Südwest und M.A.I. Carbon im Januar 2012 und der vier Schaufenster Elektromobilität (Baden-Württemberg, Bayern/Sachsen, Berlin/Brandenburg und Niedersachsen) im April 2012 hat die Bundesregierung zudem zwei zentrale Maßnahmen zur Erreichung des Gesamtziels auf den Weg gebracht. Die Industrie trägt den überwiegenden Anteil dieser enormen Investitionen. Alleine für die Marktvorbereitungsphase empfiehlt die NPE die Investition von bis zu 17 Mrd. Euro in FuE rund um die Elektromobilität (NPE 2012).

Im Bereich von Anreizen und Maßnahmen ist auf die Kfz-Steuerbefreiung hinzuweisen, welche in einem Gesetzesentwurf der Regierung von Mai 2012 vorgesehen ist: Die existierende Befreiung für BEV mit erstmaliger Zulassung bis 31. Dezember 2015 soll von derzeit 5 auf 10 Jahre verlängert, die Befreiung auf BEV aller Fahrzeugklassen erweitert und eine Steuerbefreiung für 5 Jahre bei erstmaliger Zulassung solcher Fahrzeuge in der Zeit vom 1. Januar 2016 bis 31. Dezember 2020 gewährt werden.

Hinsichtlich der Dienstwagenbesteuerung ist im Regierungsentwurf zum Jahressteuergesetz 2013 vorgesehen, die Regelungen für die private Nutzung von betrieblichen BEV, PHEV und HEV so zu ändern, dass bei der Berechnung des steuerlichen Vorteils ein um einen pauschalen Betrag – abhängig von der Leistung der Batterie – niedrigerer Preis als der Listenpreis angesetzt wird. Damit soll erreicht werden, dass der höhere Anschaffungspreis eines BEV, PHEV oder HEV im Vergleich zu einem konventionellen Pkw nicht die Anschaffung als Dienstwagen behindert.

Bevorrechtigungen für Elektrofahrzeuge wie z. B. freies Parken und die Nutzung von Sonderspuren sieht die Bundesregierung als wirksamen Nutzeranreiz für die Elektromobilität. Als Voraussetzung dafür bereitet sie eine Regelung zur Kennzeichnung von Elektrofahrzeugen vor.

Weil die öffentliche Beschaffung als ein wichtiges Instrument gilt, um die Markteinführung von Elektrofahrzeugen zu unterstützen, streben die Bundesministerien ab dem Jahr 2013 an, dass 10 Prozent der insgesamt neu angeschafften oder neu angemieteten Fahrzeuge weniger als 50 g CO<sub>2</sub>/km emittieren. Hierfür werden aktuell die notwendigen Rahmenverträge erarbeitet und gemeinsam mit Vertretern der Länder und Kommunen ein Beschaffungslaufplan entwickelt.

### 5.2.7 Frankreich

Frankreich setzt sehr stark auf regierungsgestützte Marktanzreizprogramme und einen massiv subventionierten Infrastrukturausbau für die Elektromobilität. Die französische Regierung hat am 9. Februar 2009 den „Pacte Automobile“ veröffentlicht, welcher Ziele und konkrete Zahlen zu den geplanten Fördergeldern enthält. Aus einem „fonds démonstrateur“ werden z. B. bis 2012 Kredite in Höhe von 250 Mio. Euro für die Entwicklung „grüner Produkte“ und von 400 Mio. Euro für die Entwicklung von Elektrofahrzeugprototypen und -vorführmodellen finanziert.

Das Ministerium für nachhaltige Entwicklung hat am 1. Oktober 2009 einen nationalen Plan mit 14 konkreten Aktionspunkten erstellt, der die Entwicklung von BEV und PHEV vorantreiben soll (Ambafrance 2011). In Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Atomenergie (CEA) will beispielsweise Renault in Flins eine Batterieproduktionsstätte aufbauen. Die Unternehmen Bolloré, Saft und Dassault streben ebenfalls Projekte an. Weiterhin unterstützt die Regierung im Rahmen eines Bonus-Malus-Systems den Kauf von Elektrofahrzeugen mit einem Bonus von 5 000 Euro. Mit diesem Bonus wird die Anschaffung von Fahrzeugen mit einem CO<sub>2</sub>-Ausstoß von weniger als 60 g CO<sub>2</sub>/km subventioniert. Die Verkaufszahlen aus Frankreich für 2011 von 2 629 Elektrofahrzeugen, davon weniger als 500 an private Käufer, deuten aber darauf hin, dass für eine weitere Verbreitung von Elektrofahrzeugen zusätzliche bzw. intensivere Maßnahmen notwendig sind.

Konkrete Ziele Frankreichs sind die Einführung von 100 000 Elektrofahrzeugen bis 2015 und 2 Millionen Elektrofahrzeugen bis 2020. Das Programm zum Kauf von 10 000 Elektrofahrzeugen durch die französische Post bis 2012 und von weiteren 90 000 Elektrofahrzeugen durch Regierungsorganisationen bis 2015 stellt in diesem Zusammenhang einen erheblichen Marktimpuls dar (NPE 2010b). Ein Schwerpunkt bei der Umsetzung der Ziele bis 2020 liegt bei der Entwicklung einer Norm für Ladesysteme (ein europaweit genormtes Steckersystem wurde durch eine französisch-deutsche Zusammenarbeit hergestellt: „combined charging system“ – CCS) und dem Ausbau der Ladeinfrastruktur, z. B. sind 4 Millionen private Ladestationen geplant (zu Hause oder in Betrieben) sowie ein Angebot von 400 000 Ladestationen im Bereich von

öffentlichen Straßen oder Parkplätzen. Die unterstützende Rolle des Staates und der regionalen Gebietskörperschaften ist ausschlaggebend, damit dies gelingen kann. Die Gesamtveranschlagung zum Ausbau der gesamten nationalen Infrastruktur Frankreichs liegt bei 1,5 Mrd. Euro (Amafrance 2011).

Ende Juli 2012 gab der französische Industrieminister wegen der Krise bei PSA Peugeot-Citroën bekannt, im Rahmen des „Recovery plan“ weitere Fördermaßnahmen durchzuführen. In diesem Zusammenhang soll die Subventionssumme für den privaten Erwerb von Elektrofahrzeugen auf 7 000 Euro und von Hybridfahrzeugen auf 4 000 Euro erhöht werden, die Quote für die öffentliche Beschaffung auf 25 Prozent festgelegt und die Versicherungsgebühren für Elektro- und Hybridfahrzeuge reduziert werden (Deutsche Welle 2012). Weitere Unterstützung wurde für den Bau von Batterieproduktionsstätten angekündigt. Beispielsweise erhält die Bolloré Gruppe 250 Mio. Euro für den Bau einer Lithium-Metall-Polymer-Akku-Fabrik und das Projekt von Renault und LG Chem für die Produktion von Lithium-Ionen-Batterien der nächsten Generation voraussichtlich 15 Mio. Euro/Jahr (Automobilwoche 2012).

### 5.2.8 EU

Die Europäische Kommission fördert die Elektromobilität im Rahmen der „Green-Cars-Initiative“ ([www.green-cars-initiative.eu/public/](http://www.green-cars-initiative.eu/public/)), einer von drei Public Private Partnerships (PPP) des „European Economic Recovery Plan“. Bis 2013 sollen im Rahmen des 7. Forschungsrahmenprogramms der EU (FP7) gemeinsam mit der Industrie 1 Mrd. Euro für FuE bereitgestellt werden. Vorschläge für die konkrete Ausgestaltung der Initiative wurden von einem Ad-hoc-Beratungsgremium, bestehend aus Vertretern der beteiligten Generaldirektionen der Europäischen Kommission und der europäischen Technologieplattformen „European Road Transport Research Advisory Council“ (ERTRAC), „European Technology Platform on Smart Systems Integration“ (EPoSS) und „SmartGrids“, zusammen mit Interessensverbänden der Automobilhersteller und -zulieferer (EUCAR) und der „European Association of Automotive Suppliers“ (CLEPA), erarbeitet.

Über die Maßnahmen der EU hinaus fördern die einzelnen Mitgliedstaaten in ihren nationalen Programmen die FuE der Elektromobilität. Hierbei unternimmt Deutschland die bei Weitem größten Förderanstrengungen (Kap. II.5.2.6). Weitere Länder, wie insbesondere Frankreich, unterstützen jedoch ebenso die FuE neuer Batteriekonzepte und weiterer Schlüsselkomponenten für die Elektromobilität.

Neben FuE-Fördermaßnahmen oder auch Maßnahmen zur Marktvorbereitung (z. B. Ladeinfrastrukturaufbau) und dem Ankurbeln der Nachfrage (z. B. Kaufanreize), welche die Mitgliedstaaten individuell vornehmen, können Regulierungen auf EU-Ebene, wie die europäischen Flottengrenzwerte für CO<sub>2</sub>-Emissionen von neuen Pkw, einen wesentlichen Einfluss auf die Verbreitung der Elektromobilität ausüben. Daher wird im nächsten Kapitel auf

die EU-Regulierung von CO<sub>2</sub>-Grenzwerten für Pkw eingegangen werden.

### 5.3 CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für Pkw in der EU

Durch EU-Verordnung 443/2009 werden Flottengrenzwerte für CO<sub>2</sub>-Emissionen von in der EU neu zugelassenen Pkw festgelegt und für jeden Automobilhersteller, zunächst bis 2020, spezifisch definiert (EU 2009). Die Grundlage für die herstellerspezifischen Grenzwerte bildet dabei ein EU-weiter durchschnittlicher Grenzwert, der mittelfristig mit 130 g CO<sub>2</sub>/km festgeschrieben ist und über eine schrittweise Einführung erstmals im Jahr 2015 für alle in Europa neu zugelassenen Pkw gilt (Tab. II.13). Der herstellerspezifische Grenzwert hängt vom durchschnittlichen Gewicht der Neufahrzeugflotte des jeweiligen Herstellers und dem Durchschnittsgewicht der gesamten europäischen Neuwagenflotte ab. Er ergibt sich nach folgender Formel:

$$\text{herstellerspezifischer CO}_2\text{-Grenzwert} = 130 \text{ g CO}_2/\text{km} + a^* (M - M_0),$$

wobei M das Durchschnittsgewicht der neu zugelassenen Pkw des Herstellers und M<sub>0</sub> das durchschnittliche Gewicht eines in Europa zugelassenen Pkw bezeichnet (2010 lag dies bei 1 372 kg). Der Wert des Parameters a beträgt derzeit 0,0457.

Bei der Erfüllung der spezifischen Grenzwerte besteht für die Hersteller die Möglichkeit, Emissionsgemeinschaften zu bilden, sodass die Zielvorgaben sich nach dem Gruppendurchschnitt der entsprechend verbundenen Hersteller richten (EU 2009). Diese Möglichkeit wird im Folgenden aber nicht weiter betrachtet. Auch die in der EU-Verordnung (EU 2009) genannten „Ökoinnovationen“ und die Ausnahmeregelungen für kleinvolumige Hersteller werden an dieser Stelle aus Gründen der Vollständigkeit genannt, sind aber nicht Teil der Analysen. Werden die spezifischen Grenzwerte von einem Hersteller oder einer Emissionsgemeinschaft nicht eingehalten, sind Strafzahlungen zu entrichten. Im Zeitraum von 2012 bis 2018 sind diese Strafzahlungen abgestuft nach dem Grad der Überschreitung der Grenzwerte: Für das erste g CO<sub>2</sub> sind 5 Euro pro Pkw zu entrichten; das zweite bzw. das dritte g CO<sub>2</sub> führen zusätzlich zu einer Strafzahlung von 15 bzw. 25 Euro pro Pkw; für darüber hinaus gehende Überschreitungen der Grenzwerte sind zusätzlich 95 Euro pro weiterem g CO<sub>2</sub> und Pkw zu entrichten. Ab 2019 betragen die Strafzahlungen generell 95 Euro pro neu zugelassenen Pkw und g CO<sub>2</sub>, um das die spezifischen Zielvorgaben durchschnittlich überschritten werden. Der Betrachtungszeitraum ist das jeweilige Kalenderjahr.

Während die genauen Modalitäten der Grenzwerte und die damit verbundenen Strafzahlungen bis zum Jahr 2019 in der EU-Verordnung EG Nr. 443/2009 detailliert geregelt sind, legt sie für das Jahr 2020 lediglich einen durchschnittlichen, wiederum masseabhängigen Grenzwert in Höhe von 95 g CO<sub>2</sub>/km fest. Die Einzelheiten der zukünftigen Ausgestaltung werden voraussichtlich bis 2013 von der Europäischen Kommission (EK 2009) definiert. Aktuell ist ein Vorschlag der EK (2012) für die weitere Aus-

gestaltung erschienen. Für folgende Betrachtungen wird von der derzeit gültigen Verordnung ausgegangen, d. h., es wird angenommen, dass der genannte Grenzwert von 95 g CO<sub>2</sub>/km ab 2020 für die gesamte europäische Neufahrzeugflotte (ohne eine schrittweise Einführung) gilt und Strafzahlungen bei Überschreitung der Grenzwerte in voller Höhe von 95 Euro/g CO<sub>2</sub> fällig sind. Auf mögliche Änderungen durch den aktuellen Kommissionsvorschlag wird in Kapitel II.5.3.2 eingegangen.

Aufgrund von Ausnahmeregelungen und der schrittweisen Einführung (Tab. II.13) des durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Grenzwertes bis 2015 kann angenommen werden, dass die Einhaltung der spezifischen Grenzwerte bis zum Jahr 2015 für die Mehrheit der Hersteller mit heute verfügbaren, kosteneffektiven Maßnahmen möglich ist (z. B. durch Reduzierung der Widerstände [inkl. Aerodynamik], Downsizing der Motoren, Temperaturmanagement des Motors und Einspritztechnologie) (Schade 2011; VCD 2008a). Daher wird dieser Zeitraum nicht näher diskutiert und aus den Betrachtungen ausgeklammert. Die folgende Diskussion der Emissionsgrenzwerte und möglicher Strafzahlungen basiert auf den beschriebenen Annahmen für das Jahr 2020.

Tabelle II.13

#### Schrittweise Einführung des CO<sub>2</sub>-Grenzwertes gemäß EU-Verordnung 443/2009

Jahr	Grenzwert	Flottenanteil, für den Grenzwert gilt
2012	130 g CO <sub>2</sub> /km	65 %
2013	130 g CO <sub>2</sub> /km	75 %
2014	130 g CO <sub>2</sub> /km	80 %
2015	130 g CO <sub>2</sub> /km	100 %
2020	95 g CO <sub>2</sub> /km	100 %

Quelle: EU 2009

Tabelle II.14

#### Kennzahlen der betrachteten Hersteller

Hersteller	Zahl der Neuzulassungen 2010 in der EU	Umsatz 2011 weltweit (Mio. Euro)	Gewinn 2011 weltweit (Mio. Euro)	Anteil Pkw < 120 g CO <sub>2</sub> /km 2010 (%)	Anteil Pkw > 160 g CO <sub>2</sub> /km 2010 (%)	Ø Emissionen g CO <sub>2</sub> /km 2010
Audi AG	589.855	44.096	4.440	19	38	152
Automobiles Peugeot	974.248	59.912	784	42	6	131
Automobiles Citroën	815.936	–	–	44	8	131
Bayerische Motoren Werke AG	640.021	68.821	4.907	21	28	146

Die Strafzahlungen, welche drohen, wenn die vorgeschriebenen Grenzwerte nicht eingehalten werden, sollen Anreize für die einzelnen Hersteller darstellen, Maßnahmen zur Erreichung der Emissionsgrenzwerte vorzunehmen. Mögliche Maßnahmen sind hierbei einerseits die Effizienzsteigerung konventioneller Fahrzeuge oder andererseits eine Erhöhung des Anteils an Nullemissionsfahrzeugen in der Fahrzeugflotte. Im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ), welcher zur Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Emissionen herangezogen wird, gelten BEV und FCEV als Nullemissionsfahrzeuge, da elektrische Energie als emissionsfrei angenommen wird. Dies gilt auch für elektrische Fahrleistungen von PHEV. Diese Nichtbetrachtung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Energieerzeugung führt zu einer für Elektrofahrzeuge und FCEV sehr günstigen Bewertung. Falls in Realität CO<sub>2</sub>-intensive elektrische Energie verwendet wird, führt dieses Vorgehen zu einer stark verzerrten Bewertung. Daher ist es denkbar, dass die Europäische Kommission die Verfahren zur Emissionsbestimmung in Zukunft ändert.

Die Einführung von Elektrofahrzeugen könnte also eine vielversprechende Möglichkeit für die Hersteller sein, die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte einzuhalten. Dies gilt insbesondere, wenn entsprechende Fahrzeuge in der Berechnung der durchschnittlichen spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Herstellers zusätzlich begünstigt werden. Zum Beispiel werden im Zeitraum bis 2015 Pkw mit spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen von weniger als 50 g CO<sub>2</sub>/km überproportional angerechnet. Im Jahr 2012 gilt ein entsprechender Pkw als 3,5 Fahrzeuge und im Jahr 2015 noch als 1,5 Fahrzeuge. Auch im Zeitraum ab 2020 wird eine solche überproportionale Anrechnung diskutiert (Kap. II.5.3.2). Im Folgenden werden die Zielerreichung der CO<sub>2</sub>-Grenzwerte und deren Auswirkungen für die Hersteller näher betrachtet.

#### 5.3.1 Zielerreichung der CO<sub>2</sub>-Grenzwerte und Auswirkungen für die Hersteller

Die Analyse der Bedeutung der CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für die Automobilhersteller konzentriert sich auf die wichtigsten europäischen Hersteller, welche in Tabelle II.14 mit zentralen Kennzahlen aufgelistet sind.

noch Tabelle II.14

Hersteller	Zahl der Neuzulassungen 2010 in der EU	Umsatz 2011 weltweit (Mio. Euro)	Gewinn 2011 weltweit (Mio. Euro)	Anteil Pkw < 120 g CO <sub>2</sub> /km 2010 (%)	Anteil Pkw > 160 g CO <sub>2</sub> /km 2010 (%)	Ø Emissionen g CO <sub>2</sub> /km 2010
Daimler AG	646.067	106.540	6.029	13	44	160
Fiat Group Automobiles SPA	975.822	59.559	1.651	59	4	125
Ford-Werke GmbH	1.076.887	128.200	20.222	40	12	137
Renault	1.125.141	42.628	2.139	42	13	134
Toyota Motor Europe	564.633	228.427	3.012	55	10	129
Volkswagen	1.469.419	–	–	23	17	140
Volkswagen Group*	2.975.007	159.337	15.799	17	10	143
Volvo	204.926	–	–	31	44	157

\* Nur Pkw-Sparte (Audi, Bentley, Bugatti, Lamborghini, Seat, Skoda, VW), ohne Betrachtung der Mehrheitsanteile an Porsche.

Eigene Berechnungen nach EEA 2010a und [www.finanzen.net/bilanz\\_guv/#NAME\\_Hersteller#](http://www.finanzen.net/bilanz_guv/#NAME_Hersteller#) (21. März 2012)

Aus der Tabelle wird deutlich, dass zum Beispiel die Marken Ford, Fiat und Peugeot großvolumige Hersteller sind, deren Fahrzeugflotten eher geringe Emissionen verursachen. Fiat weist mit durchschnittlichen Emissionen von 125 g CO<sub>2</sub>/km die geringsten Emissionen der dargestellten Hersteller auf. Volkswagen ist in der Betrachtung als Marke wie auch als Konzern vertreten, da Volkswagen als Konzern leichter die Möglichkeit nutzen kann, eine Emissionsgemeinschaft zu bilden.

Anknüpfend an die Darstellung der durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der einzelnen Hersteller verdeutlicht Abbildung II.15 die Gewichtsabhängigkeit der spezifischen Grenzwerte im Jahr 2015 und 2020.

Die Fahrzeuge der Daimler AG weisen die höchsten durchschnittlichen Emissionen der dargestellten Hersteller auf und sind am weitesten von den spezifischen Grenzwerten entfernt. Fiat weist dagegen absolut die geringsten durchschnittlichen Emissionen auf, hat aber nicht den geringsten Abstand zu seinem spezifischen Grenzwert. Die Hersteller Toyota, Citroën und Peugeot, deren durchschnittliche Emissionen um 4 bis 6 g CO<sub>2</sub>/km höher sind als jene von Fiat, liegen absolut gesehen näher an ihren spezifischen Grenzwerten als Fiat. Dadurch muss Fiat prozentual gesehen höhere Anstrengungen zur Emissionsreduktion unternehmen, um die spezifischen Grenzwerte einzuhalten (Abb. II.16). Dies ist bedingt durch die relative Definition der Grenzwerte anhand des durchschnittlichen Fahrzeuggewichts, durch die ein Nutzen der Fahrzeuggröße berücksichtigt werden soll.

Neben der Masse des Fahrzeugs als Parameter zur Berechnung der herstellereigenen Grenzwerte wird auch die Fahrzeugstandfläche (d. h. das Produkt aus Spurweite und Radstand eines Fahrzeugs) als Parameter

für den Nutzwert zur Bestimmung spezifischer Emissionsziele diskutiert. Fahrzeugstandfläche als Parameter kann einige Nachteile des Parameters Masse teilweise vermeiden. So wird bei Verwendung von Masse der Anreiz, CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionen durch eine Verringerung des Fahrzeuggewichts zu erreichen, reduziert bzw. eliminiert.

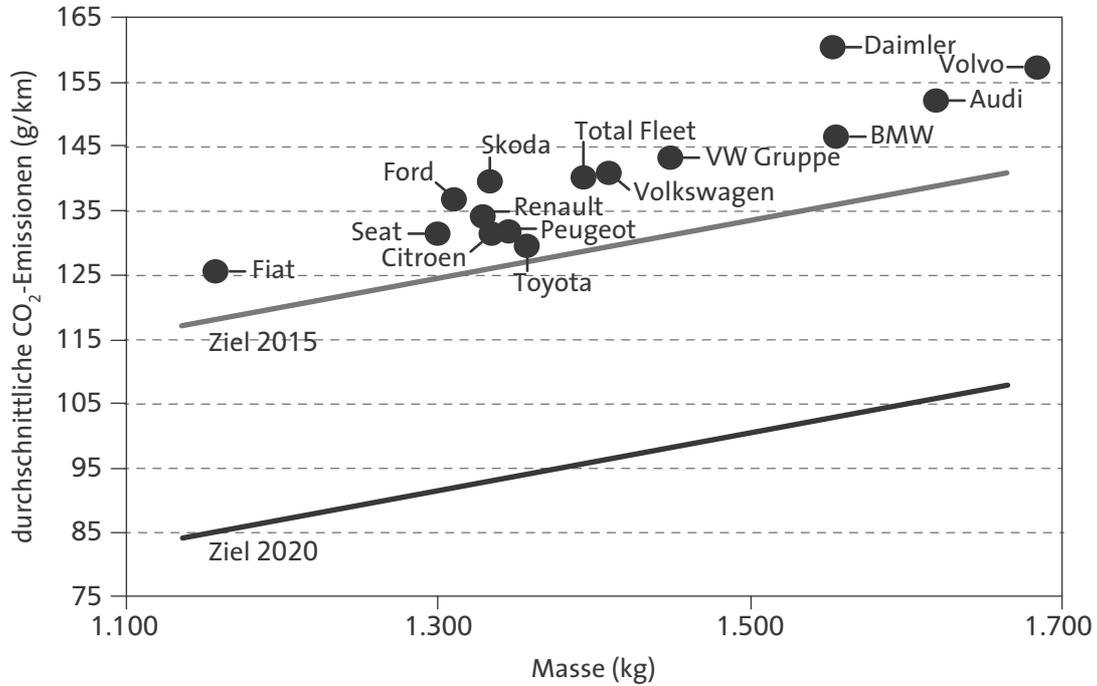
Außerdem erscheint eine Veränderung der Fahrzeugstandfläche, um einen vorteilhafteren spezifischeren Grenzwert zu erreichen, schwieriger, als eine entsprechende Veränderung der Masse. Dadurch erscheint der Parameter Fahrzeugstandfläche weniger manipulierbar vonseiten der Hersteller. Die spezifischen Emissionsziele für die Hersteller würden sich bei Verwendung von Fahrzeugstandfläche jedoch kurzfristig nicht wesentlich von den massebasierten unterscheiden (T&E 2011). Der kürzlich veröffentlichte Vorschlag zur Erweiterung der Verordnung sieht allerdings nach Abwägung verschiedener Alternativen einschließlich der Fahrzeugstandfläche (Smokers et al. 2011) ein Festhalten an der Masse als Nutzwertparameter vor (Kap. II.5.3.2; EK 2012).

Berechnet man, ausgehend von den bisherigen Emissionen der Hersteller und unter Annahme konstanter Fahrzeugmassen, die jährlichen Emissionsreduktionen, die zur Einhaltung der Grenzwerte bis 2020 notwendig wären, zeigt sich, dass die einzelnen Hersteller teilweise deutlich unterschiedliche Anstrengungen unternehmen müssen (Abb. II.16).

Während Toyota mit erforderlichen Emissionsreduktionen von 3,2 Prozent jährlich die geringsten Bemühungen der dargestellten Hersteller zur Erreichung der Grenzwerte durchführen muss, muss die Daimler AG mit 4,4 Prozent pro Jahr die durchschnittlichen Emissionen

Abbildung II.15

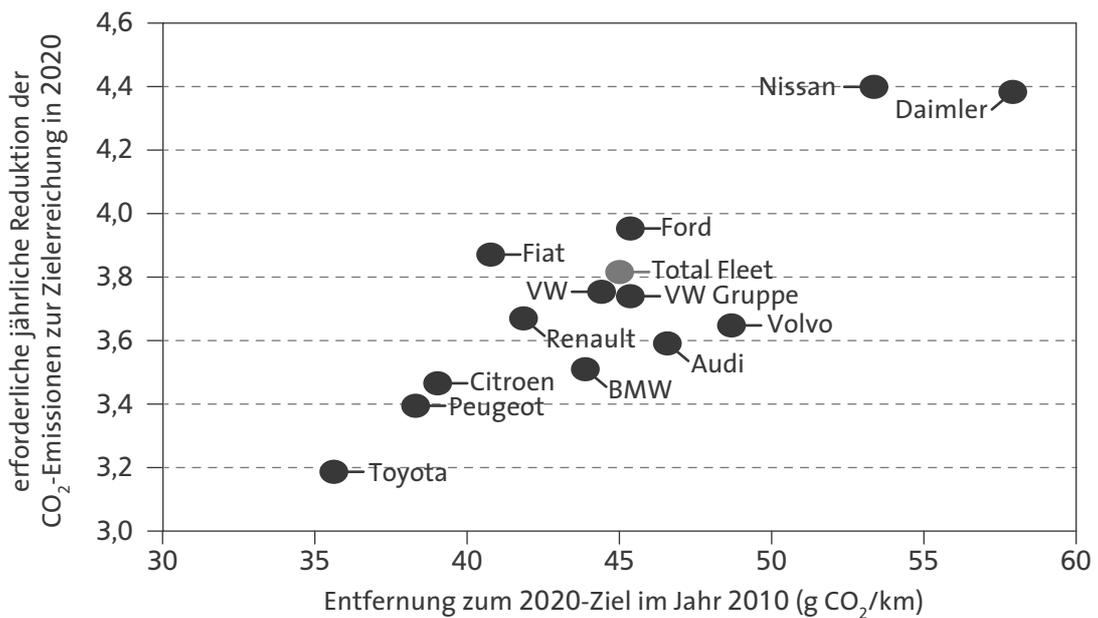
**Durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Emissionen der Hersteller im Jahr 2010 im Vergleich zu ihren spezifischen Grenzwerten 2015 und 2020**



Eigene Darstellung nach EEA 2010a

Abbildung II.16

**Zur Erreichung der Grenzwerte nötige CO<sub>2</sub>-Reduktionen für verschiedene Hersteller (in Prozent)**



Eigene Berechnungen nach EEA 2010a

ihrer Fahrzeuge am stärksten reduzieren. Die ermittelten nötigen Reduktionen pro Jahr liegen für alle Hersteller über den durchschnittlichen Emissionsminderungen von ca. 2,9 Prozent, die von den europäischen Herstellern in den Jahren 2003 bis 2010 erreicht wurden, jedoch unter denen, welche mit 5,5 Prozent pro Jahr seit 2007 erreicht wurden (Dudenhöffer/Pietron 2010). Ein Grund für die Einführung der verpflichtenden Grenzwerte ab 2012 ist, dass die Hersteller die Emissionsziele, die der Verband europäischer Automobilhersteller (ACEA) in einer freiwilligen Selbstverpflichtung 1998 angekündigt hatte, nicht erreicht haben (Heymann/Zähres 2009).

Um in einem nächsten Schritt mögliche Strafzahlungen abzuschätzen, wurden in Abhängigkeit unterschiedlicher jährlicher Reduktionsraten die Differenzen zu den spezifischen CO<sub>2</sub>-Grenzwerten bestimmt, die sich für einzelne Hersteller für das Jahr 2020 ergeben. Abbildung II.17 zeigt das Ergebnis für ausgewählte Hersteller. Schaffen es die Hersteller, ihre durchschnittlichen Emissionen um jeweils 3,5 Prozent pro Jahr zu senken, so würden unter den betrachteten Herstellern nur Peugeot, Citroën (beide nicht dargestellt) und Toyota die geforderten Grenzwerte unterschreiten, BMW (nicht dargestellt) würde die Vorgaben knapp erfüllen.

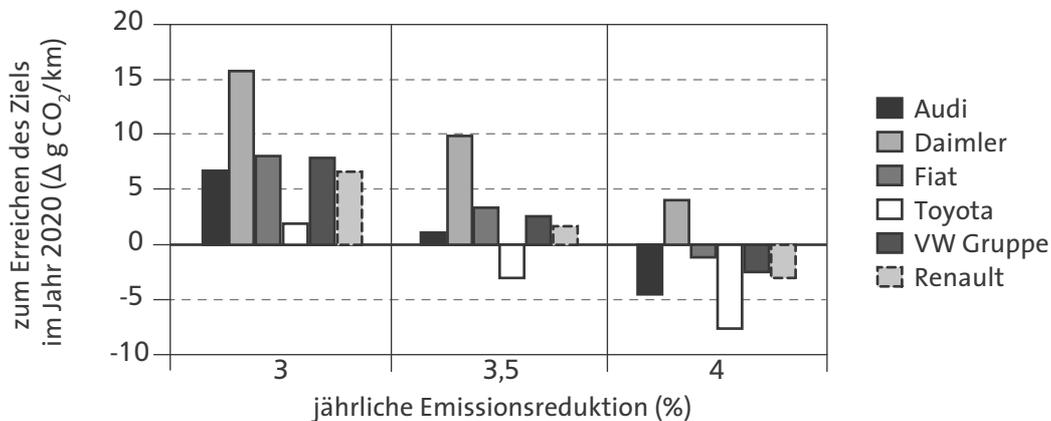
Die übrigen Hersteller würden die Grenzwerte verfehlen, zum Teil mit deutlichen Unterschieden. Für die Hersteller hätte die Höhe der Abweichungen unterschiedliche Implikationen. Obwohl die resultierenden Strafzahlungen pro Fahrzeug für Daimler durchschnittlich ca. 950 Euro betragen und somit deutlich höher liegen als jene für Fiat (ca. 320 Euro), stellen für Fiat die Strafzahlungen einen größeren Anteil des Unternehmensgewinns (Tab. II.14) dar. Dies dürfte auch der Fall sein, wenn man die Strafzahlungen im Vergleich zu den erreichten Gewinnmargen

pro Fahrzeug betrachtet. Verdeutlicht wird dieser Sachverhalt in Abbildung II.18, die die Höhe von Strafzahlungen bei einer angenommenen jährlichen Emissionsreduktion von 3,5 Prozent beispielhaft für ausgewählte Hersteller als Anteil des Gewinns zeigt. Während die resultierenden Strafzahlungen im Jahr 2020 für Toyota, Peugeot (nicht dargestellt) und BMW im Vergleich zum Unternehmensgewinn in 2011 verschwindend bzw. vernachlässigbar wären und für Audi und Ford mit 1,2 bzw. 2,2 Prozent relativ gering ausfallen würden, wären Gewinneinbußen von 4,5 bzw. 8,3 Prozent für den Volkswagenkonzern bzw. Renault nicht unbedeutend. Für Fiat dürften die errechneten Strafzahlungen aufgrund der geringen Gewinnmargen im Kleinwagensegment den höchsten Einschnitt bedeuten. Dieser ist für Fiat demnach nur mit deutlichen Emissionsreduktionen zu vermeiden.

Eine Möglichkeit zur Reduktion der Emissionen der neu zugelassenen Fahrzeuge, die sich den Fahrzeugherstellern neben Emissionsreduktionen bei konventionellen Fahrzeugen bietet, ist der Verkauf von Nullemissionsfahrzeugen. Hinsichtlich des möglichen bzw. notwendigen Beitrags zeigt sich beispielsweise für die Daimler AG, dass bei durchschnittlichen Emissionsreduktionen konventioneller Fahrzeuge in Höhe von 3,5 Prozent pro Jahr im Jahr 2020 knapp 10 Prozent der neu zugelassenen Flotte zusätzlich Nullemissionsfahrzeuge sein müssten, damit Daimler seine spezifischen Emissionsgrenzwerte einhalten kann. Für die anderen betrachteten Hersteller läge dieser Anteil im Bereich von 0 bis 5 Prozent (Abb. II.19). Dies umgerechnet auf die absolute Zahl an Elektrofahrzeugen, die also nötig wäre, um die Emissionsgrenzwerte trotz einer Effizienzsteigerung der Verbrennungsmotoren um 3,5 Prozent pro Jahr zu erreichen, zeigt die Komplexität der Aufgabe, Emissionen von Pkw entsprechend den Klimazielen der EU zu reduzieren.

Abbildung II.17

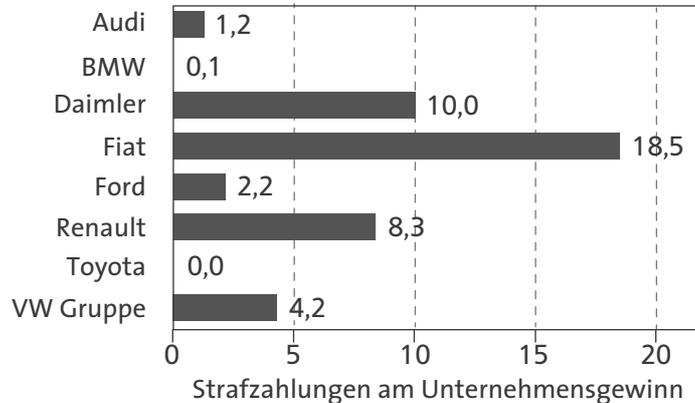
**Differenz zu herstellerspezifischen CO<sub>2</sub>-Grenzwerten für 2020 in Abhängigkeit unterschiedlicher Reduktionsraten**



Eigene Berechnungen nach EEA 2010a

Abbildung II.18

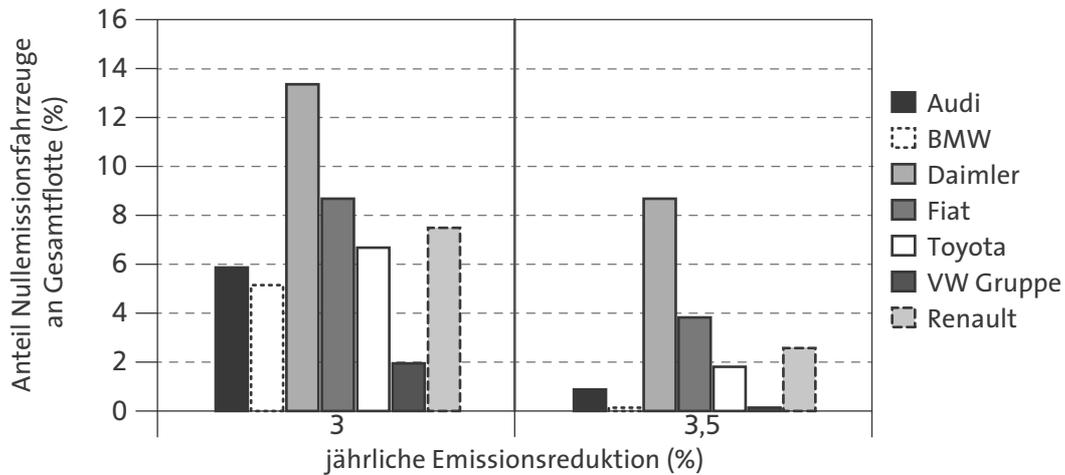
**Anteil der Strafzahlungen in Prozent im Jahr 2020 im Vergleich zum Unternehmensgewinn im Jahr 2011 bei einer Emissionsreduktion von 3,5 Prozent pro Jahr**



Eigene Berechnungen

Abbildung II.19

**Notwendiger Anteil an Nullemissionsfahrzeugen an der Herstellerflotte zur Erreichung der Grenzwerte im Jahr 2020 je nach Emissionsreduktionsrate bei konventionellen Pkw**



Eigene Berechnungen

**5.3.2 Aktueller Vorschlag für eine neue Pkw-Emissionsverordnung**

Am 11. Juli 2012 veröffentlichte die EK (2012) einen Vorschlag für eine Abänderung der EU-Verordnung 443/2009, um die Modalitäten für die Erreichung des Ziels, die CO<sub>2</sub>-Emissionen von neu zugelassenen Pkw zu senken, für 2020 zu definieren. Zu diesem Zweck wurde von der Kommission eine Überprüfung der spezifischen Emissionswerte und ihrer Auswirkungen auf die Autoindustrie durchgeführt. Auf Basis dieser Bewertungen werden für 2020 die im Folgenden dargestellten Vorschläge gegeben.

Die spezifischen Emissionen der einzelnen Hersteller sollen weiterhin in Abhängigkeit der Fahrzeugmasse nach bestehender Formel bestimmt werden:

$$\text{spezifische CO}_2\text{-Emissionen} = 130 \text{ g CO}_2/\text{km} + a^* (M - M_0)$$

Der Parameter a soll jedoch von 0,0457 auf 0,0333 reduziert werden.<sup>3</sup> Dies entspricht einer Abschwächung der Benachteiligung kleinerer Fahrzeuge in der geforderten relativen Verbesserung und ist durch deren geringere

<sup>3</sup> Eine ausführliche Diskussion der Konsequenzen verschiedener Grenzwertdefinitionen findet sich in Smokers et al. 2011.

Emissionen pro Kilometer gerechtfertigt. Dies gilt umso mehr, als dass kleine Fahrzeuge typischerweise weniger km pro Jahr zurücklegen (Plötz et al. 2012a) und damit auch absolut weniger Tonnen CO<sub>2</sub> emittieren. Zusätzlich sind, wie zuvor dargestellt, vergleichbare Strafzahlungen für Hersteller von Kleinwagen aufgrund der geringeren Gewinnmargen und entsprechenden Gesamtgewinnspannen schwerer zu tragen (Abb. II.18).

Ein weiterer Änderungsvorschlag ist die Einführung sogenannter super-credits mit einem Multiplikator von 1,3 für besonders effiziente Fahrzeuge, die weniger als 35 g CO<sub>2</sub>/km ausstoßen, für die Jahre 2020 bis 2023. Diese Fahrzeuge würden somit bei der Berechnung der durchschnittlichen Emissionen eines Fahrzeugherstellers als 1,3 Fahrzeuge angerechnet. Dabei würden solche „super-credits“ für den genannten Zeitraum für maximal 20 000 solcher Fahrzeuge pro Hersteller angerechnet. Des Weiteren wird vorgeschlagen, kleinvolumige Hersteller mit jährlich weniger als 500 neu zugelassenen Fahrzeugen von der Regelung auszunehmen. Für die Höhe der Strafzahlungen wird vorgeschlagen, 95 Euro pro Pkw und g CO<sub>2</sub>, um das die spezifischen Zielvorgaben durchschnittlich überschritten werden, beizubehalten

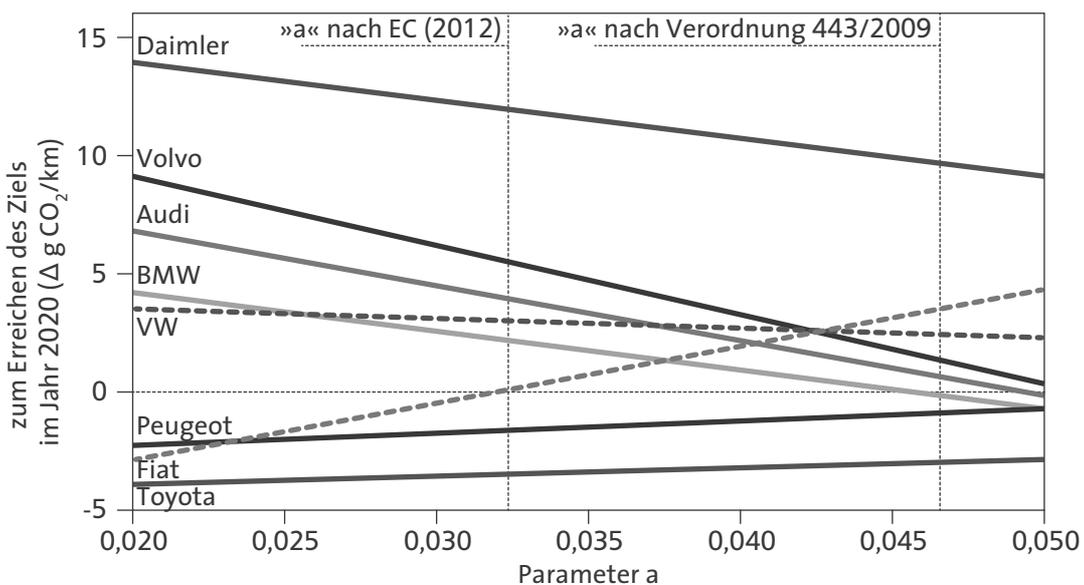
Von den vorgeschlagenen Änderungen hätte besonders die Änderung des Parameters a weitreichende Folgen für die Hersteller. Der Parameter a bestimmt den Einfluss der

Masse für die Grenzwertberechnung. Je größer der Parameter a ist, umso stärker unterscheiden sich die spezifischen Grenzwerte der Hersteller in Abhängigkeit der Masse vom durchschnittlichen Grenzwert. Dies hat starken Einfluss auf die möglichen Strafzahlungen für Unternehmen. Prinzipiell ist ein hoher Wert für a für Hersteller schwerer Fahrzeuge vorteilhaft, da mit höherem Wert von a die herstellereigenen Grenzwerte für diese Hersteller höher ausfallen und daher leichter zu erreichen sind. Analog ist ein niedriger Wert für Hersteller kleinerer Fahrzeuge vorteilhaft, da ihre Grenzwerte bei unterdurchschnittlichem Fahrzeuggewicht weniger stark gesenkt werden. Abbildung II.20 zeigt für verschiedene Hersteller und das Jahr 2020 den Abstand der durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen ihrer neu zugelassenen Fahrzeugflotte von den spezifischen Grenzwerten in Abhängigkeit des Parameters a unter der Annahme konstanter Fahrzeugmassen und einer jährlichen Emissionsreduktion von 3,5 Prozent pro Jahr bis 2020.

Man erkennt, dass der Abstand zum Ziel (bei unterstellter jährlicher Effizienzsteigerung von 3,5 Prozent für alle Hersteller) deutlich vom Einfluss der Masse als Nutzwert abhängt, aber auch dass die Änderung des Parameters a auf manche Hersteller größere Auswirkung hat als auf andere. Von den großen europäischen Herstellern hat eine Änderung von a die größten Auswirkungen auf Volvo, Fiat und Audi.

Abbildung II.20

**Abstand der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen zum Grenzwert für verschiedene Hersteller in Abhängigkeit des Parameters a bei angenommener CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung von 3,5 Prozent pro Jahr**



Eigene Berechnungen

### III. Bewertung

Ziel dieses Teils ist die umfassende Bewertung der zuvor dargestellten Technologien, Anwendungen und Entwicklungsszenarien in ökologischer, ökonomischer und sozialer Hinsicht. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage bei Entscheidungen über Ausrichtung und Einsatz politischer Maßnahmen.

In Kapitel III.1 erfolgt eine ökologische Bewertung der Elektromobilität. Dabei werden Elektrofahrzeuge (BEV und PHEV) mit den Umweltauswirkungen von konventionellen Fahrzeugen sowie von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) verglichen. Betrachtet werden Pkw verschiedener Größenklassen, Lieferwagen und Busse. Dabei werden umweltrelevante Aspekte wie Treibhausgase (THG) und Luftschadstoffe über den gesamten Lebenszyklus der Fahrzeuge und Batterien analysiert. Auch kritische Rohstoffe und Lärmemissionen sind aus ökologischer, aber auch aus ökonomischer und sozialer Perspektive relevante Themen. In diesem Bericht werden kritische Rohstoffe im Rahmen der ökonomischen Bewertung in Kapitel III.2 und Lärmemissionen in Kapitel III.3 zusammen mit möglichen Auswirkungen auf die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer betrachtet.

Die ökonomische Bewertung der Elektromobilität in Kapitel III.2 beinhaltet die Analyse der Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen (BEV und PHEV), d. h. inwiefern und unter welchen Bedingungen Elektrofahrzeuge wirtschaftlich eingesetzt werden können. Dazu werden die Gesamtkosten von BEV und PHEV mit denen konventioneller Fahrzeuge sowie FCEV verglichen. Weiterhin werden Chancen und Risiken von Verschiebungen in den automobilen Wertschöpfungsketten und deren Auswirkungen auf den Automobilstandort Deutschland identifiziert sowie Arbeitsplatzeffekte einer Einführung der Elektromobilität untersucht.

Kapitel III.3 betrachtet die Verbreitung von Elektrofahrzeugen aus sozialer Perspektive. Dazu wird die Akzeptanz der Elektromobilität bei den Verkehrsteilnehmern sowie die zu erwartenden Auswirkungen auf deren Mobilitätsverhalten untersucht. Zudem werden Effekte auf Gesundheit und Lebensqualität durch verringerte Lärmemissionen sowie Auswirkungen auf die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer betrachtet.

## 1. Bewertung ökologischer Aspekte

### 1.1 Einleitung

Nach der Definition des Brundtland-Reports der Vereinten Nationen (UN 1987) soll die ökologische Nachhaltigkeit sicherstellen, dass die gegenwärtigen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Aktivitäten die vorhandenen natürlichen Ressourcen nicht in dem Maße ausbeuten, dass die Entwicklung und Entfaltung zukünftiger Generationen unverhältnismäßig beeinträchtigt wird. Belastungen des Ökosystems stellen dabei die Verschmutzung von Luft, Wasser und Boden, anthropogene Beiträge zur globalen Erwärmung, die Verminderung der Artenvielfalt durch die Nutzung und Zerschneidung natürlicher Lebensräume und die Versiegelung von Bodenflächen dar.

Mit Fokus auf den Verkehrssektor und die Energieerzeugung wurden diese negativen Effekte menschlichen Handelns seit Mitte der 1990er Jahre in zahlreichen Studien untersucht und bewertet. Exemplarisch seien hier genannt: CE Delft et al. (2011), die Methodenkonvention zur Schätzung externer Kosten des Umweltbundesamtes (Maibach et al. 2012), das Handbuch zur Schätzung externer Kosten der Europäischen Kommission (Maibach et al. 2008), der Bericht des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU 2005) oder der Stern-Report (HM Treasury 2006). Daneben liegen mit den Arbeiten des Instituts für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU) (Helms et al. 2011a), der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität (Fraunhofer ISI et al. 2011; Held/Baumann 2011) oder des Öko-Instituts (Zimmer et al. 2011) erstmals detaillierte Ökobilanzen zur ganzheitlichen Bewertung der Elektromobilität im Kontext von Deutschland vor. Die Ziele, methodische Ansätze und der Detaillierungsgrad dieser Studien divergieren zum Teil erheblich, weshalb an dieser Stelle ein Überblick gegeben und in Teilbereichen eine Neubewertung der Ergebnisse vorgenommen wird.

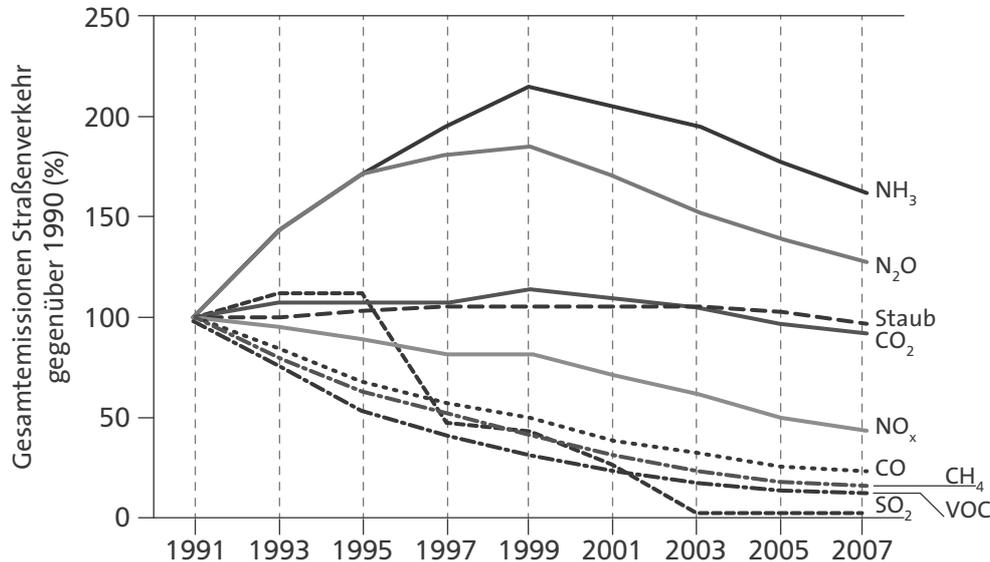
#### 1.1.1 Bewertungsgegenstand

Die Umweltbelastungen durch den Verkehr weisen sehr unterschiedliche zeitliche und räumliche Charakteristika auf, entwickeln sich unterschiedlich dynamisch mit der Verkehrsnachfrage und mit dem technologischen Fortschritt. Während Luftschadstoffe eher kurzfristig und lokal wirken und durch technische Maßnahmen an konventionellen Fahrzeugen oft recht gut gemindert werden können, wirken Treibhausgase (THG) langfristig und global und sind technisch nur unter erheblichem Aufwand zu reduzieren. Abbildung III.1 illustriert die Gesamtemissionen einiger zentraler Schadstoffe durch den Straßenverkehr in Deutschland bezogen auf das Jahr 1991. Einige kritische Schadstoffe wie Stickstoffverbindungen ( $\text{NO}_x$ ), Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) oder flüchtige organische Verbindungen (VOC) konnten durch technische Maßnahmen an Fahrzeugen – gefördert durch Abgas- und Kraftstoffnormen und die Pflicht zum Einbau von Katalysatoren seitens des Gesetzgebers – deutlich gesenkt werden, andere Schadstoffe wie Feinstaub und das THG  $\text{CO}_2$  verharren jedoch auf dem Niveau von 1991. Das klimaschädliche Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) und das toxische Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) stiegen sogar bis Ende der 1990er Jahre drastisch an und gehen erst seither deutlich zurück. Die Zunahme von Ammoniak im Straßenverkehr geht auf die Einführung von Katalysatoren zurück, mit 2 Prozent der Gesamtemissionen spielt der Verkehr gegenüber dem Hauptmittelen Landwirtschaft jedoch nur eine untergeordnete Rolle (LUBW 2008). Ähnliches gilt auch für das klimaschädliche Lachgas, das im Wesentlichen durch den Abbau von mineralischem Dünger im Boden entsteht.

Während THG- und lokale Schadstoffemissionen von der Verkehrsnachfrage, insbesondere ihrer Verteilung auf die verschiedenen Verkehrsmittel und die genutzten Technologien bestimmt werden, sind Bodenversiegelung und die Zerschneidung von Lebensräumen im Wesentlichen auf die Dichte der Infrastrukturnetze zurückzuführen, welche

Abbildung III.1

### Entwicklung der Luftschadstoff- und THG-Emissionen des Straßenverkehrs 1990 bis 2007



Eigene Darstellung mit Daten aus BMBVS 2011

allgemein bei steigender Nachfrage ausgebaut werden. Diese sind durch kurzfristige Interventionen kaum beeinflussbar.

Durch das reine Ersetzen konventioneller Kraftfahrzeuge durch Elektrofahrzeuge werden nur die Emissionen von Luftschadstoffen und THG beeinflusst. Für den ökologischen Vergleich zwischen Elektrofahrzeugen, FCEV und konventionellen Fahrzeugen werden diese Emissionen im Folgenden als Bewertungsgrößen herangezogen. Zudem wird die Energieeffizienz der verschiedenen Fahrzeugtechnologien beleuchtet, da letztendlich die Energieeffizienz eine tragende Säule einer nachhaltigen Verkehrs- und Wirtschaftspolitik darstellt. Die Wirkung der Verkehrsinfrastrukturen auf Siedlungsstrukturen und natürliche Lebensräume werden in diesem Vergleich ausgeblendet. Ebenso wird die grundlegende Diskussion über die Substitution des motorisierten Verkehrs durch nichtmotorisierte Formen wie Rad- oder Fußverkehr in dieser Arbeit nicht geführt (Doll et al. 2013). Die häufig im Rahmen von Umweltbewertungen subsumierten Lärmwirkungen des Verkehrs werden, wie in der Einleitung dieses Kapitels erwähnt, unter den sozialen Aspekten des Verkehrs in Kapitel III.3.3 behandelt.

#### 1.1.2 Methodisches Vorgehen

Grundlage für die Analysen der Umweltbelastungen stellt der Ansatz der Ökobilanzierung (Lebenszyklusanalyse, „life cycle assessment“ – LCA) dar. Über einen ganzheitlichen Ansatz ermittelt diese auf Grundlage der stofflichen Zusammensetzung von Produkten die Umweltwirkung über deren Lebenszyklus von der Fahrzeugproduktion, über die Energieerzeugung und den Fahrzeugeinsatz bis zu dessen Entsorgung. Die Auswertung

erfolgt in sogenannten Wirkungskategorien. Den verschiedenen Emissionen werden dabei bestimmte Wirkungen zugeordnet, wie Eutrophierung (vermehrter Nährstoffeintrag in Böden und Wasser und infolgedessen „Umkippen“ von Gewässern und verstärkte Anfälligkeit von Pflanzen gegenüber Schädlingen), Versauerung (Säurebildung in Böden und Gewässern mit negativen Folgen für die Vegetation), Bildung von Photooxidanzien (Sommersmog, Abbau der Ozonschicht oder globale Erwärmung (Beck et al. 2010)). Weitere Wirkungskategorien, z. T. speziell für den Automobilssektor, werden von Leduc et al. (2010) genannt: Toxizitätspotenzial (für Mensch und Natur), Feinstaub, Ressourcenverbrauch, Primärenergieeinsatz und Abfallstoffe. Allerdings stößt die Lebenszyklusanalyse bei der Analyse komplexer technischer Systeme oft auf erhebliche Datenprobleme, da die genaue Zusammensetzung und Herkunft der in Vorprodukten verarbeiteten Materialien häufig nicht oder nur ungefähr bekannt ist.

Alternativ hierzu beschreibt die Wirkungspfadanalyse („impact pathway approach“) (CE Delft et al. 2011) die Folgen der Emission von Schadstoffen von deren Entstehung über Prozesse der atmosphärischen Umwandlung, des Transports in der Luft und schließlich der Einwirkung auf Mensch und Natur am Immissionsort. Grundlage hierfür sind lokale Klimamodelle und epidemiologische Studien zur Abschätzung von Gesundheitsfolgen von Stoffen oder Stoffkombinationen. Damit stellt die Wirkungspfadanalyse einen viel stärkeren lokalen Bezug zum Ort des Verkehrsgeschehens her als die Lebenszyklusanalyse, berücksichtigt andererseits aber nicht alle Prozessschritte von der Fahrzeugherstellung bis zu dessen Entsorgung.

Für die nachfolgenden Analysen werden beide Ansätze herangezogen, wobei der Schwerpunkt auf der Lebenszyklusanalyse liegt. In Ergänzung zu den betrachteten Studien (Kap. III.1.1) wurde im Rahmen des vorliegenden Berichts ein umfassendes Gutachten zur Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz von Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeugen an die Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (Bünger/Weindorf 2011) in Auftrag gegeben.

### Betrachtete Umwelt- und Klimabelastungen

Umweltbelastungen lassen sich in global und lokal wirksame Effekte trennen. Lokale Emissionen wirken im Wesentlichen am Ort der Entstehung oder in dessen direkter Umgebung. Hierzu zählen insbesondere Lärm und Feinstaub. Klassische Luftschadstoffe wie Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Kohlenmonoxid (CO) oder Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) fallen zwar unter die lokalen Emissionen, können aber durch atmosphärischen Transport über weite Strecken verbreitet werden. Globale Emissionen wirken im Gegensatz hierzu unabhängig vom Ort der Emission weltweit. Hierzu zählen die THG Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (NH<sub>4</sub>) oder die für den Abbau der Ozonschicht verantwortlichen Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW). Im Folgenden werden eher lokale Wirkungen durch die Emission von Luftschadstoffen (Kap. III.1.2) separat von der globalen Wirkung der THG (Kap. III.1.3) diskutiert.

### Lebenszyklusabschnitte

Zur Analyse der Umweltbelastungen durch den Verkehr können verschiedene Abschnitte im Lebenszyklus der Fahrzeuge und der benötigten Kraftstoffe unterschieden werden:

- *Produktion der Fahrzeuge* inklusive der Gewinnung und Verarbeitung der benötigten Rohstoffe
- *Bereitstellung der Energie* für den Fahrzeugbetrieb. Hierzu zählt die Bereitstellung fossiler, biologischer oder synthetischer Kraftstoffe für konventionelle Pkw oder FCEV als auch die Bereitstellung von elektrischem Strom für BEV und PHEV. Dies bezeichnet man auch als Well-to-Tank-Analyse (WTT-Analyse).
- *Fahrzeugbetrieb*: Betrachtet werden die Umweltbelastungen, die während der Nutzung des Fahrzeugs durch den Einsatz des jeweiligen Energieträgers (Benzin, Diesel, Gas, Biokraftstoffe, Strom etc.) entstehen. Man spricht hier auch von Tank-to-Wheel-Analyse (TTW-Analyse).
- *Wartung und Entsorgung* der Fahrzeuge

Die Analyseketten der Umweltbelastungen aus der Herstellung der zum Fahrzeugbetrieb nötigen Energie (WTT) und der Umweltbelastungen während des Fahrzeugbetriebs (TTW) bezeichnet man auch als Well-to-Wheel-Analyse (WTW-Analyse). Diese liefert Ergebnisse (Energieeinsatz, THG- oder Schadstoffemissionen) pro Fahrzeugkilometer (Fzkm). Hingegen treten die mit der Produktion, Wartung und Entsorgung von Fahrzeugen verbundenen Effekte nur einmal oder – falls einzelne Komponenten eine geringere Lebensdauer als die des

Fahrzeugs aufweisen – mehrmals im Fahrzeuglebenszyklus auf. Eine Umrechnung auf gefahrene Kilometer setzt deshalb Annahmen über die Lebensfahrleistung der Fahrzeuge voraus.

Innerhalb der Umweltbelastungen unterscheidet die Analyse entsprechend zwischen der WTW-Kette und den fixen Wirkungen von Fahrzeugproduktion, Wartung und Entsorgung.

### Verwendete Studien

Die in Kapitel III.1.2 für Luftschadstoffe und in Kapitel III.1.3 für THG getroffenen Aussagen basieren auf der Auswertung ausgewählter Studien zum Thema ökologische Bewertung von Elektrofahrzeugen. Im Folgenden wird eine kurze Übersicht zu den betrachteten Studien gegeben, indem Zielsetzung, Methodik und Auftraggeber kurz umrissen werden. Alle Quellen befassten sich mit WTW-Analysen von THG-Emissionen von Elektrofahrzeugen, während lediglich Helms et al. (2011a u. 2011b) und Held/Baumann (2011) auf die Fahrzeugherstellung und weitere Umweltbelastungen eingingen. Neben diesen beiden Quellen fanden sich die THG-Emissionen der Fahrzeugproduktion exemplarisch für Mittelklasse-Pkw in Bünger/Weindorf (2011).

*UMBRéLA Umweltbilanzen Elektromobilität (Helms et al. 2011a u. 2011b)*

Auftraggeber: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

Im Rahmen des Forschungsprojekts UMBRéLA wurde eine ökologische Bewertung der Elektromobilität über alle Lebenszyklusabschnitte vorgenommen. Diese stützte sich neben Literaturdaten auch auf umweltrelevante Ergebnisse aus aktuellen Forschungsprojekten, dabei insbesondere aus zahlreichen Feldversuchen und Forschungsprojekten zur Elektromobilität, welche in den letzten 2 Jahren mit Förderung durch das BMU durchgeführt wurden (Helms et al. 2011b).

Mittels der speziell entwickelten Ökobilanzsoftware eLCAR („Electric Car LCA“) wurden THG-Emissionen, Energieaufwand, Versauerung, Eutrophierung, Sommer-smog und Feinstaubemissionen bis zum Jahr 2030 dokumentiert. Betrachtet wurden konventionelle Fahrzeuge im Vergleich zu BEV, PHEV und FCEV in unterschiedlichen Strommixszenarien. Zentrales Anliegen war die Darstellung der vielfältigen Einflussfaktoren hinsichtlich der ökologischen Vor- und Nachteile der Elektromobilität.

*Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität (FSEM) – Assessment of the Environmental Impact of Electric Vehicle Concepts (Fraunhofer ISI et al. 2011; Held/Baumann 2011)*

Auftraggeber: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Die Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität wurde im Rahmen des Konjunkturprogramms II gefördert. Im Teilprojekt zu gesellschaftspolitischen Fragestellungen wurden Akzeptanz, Umwelt- und Ressourcenfragen un-

tersucht, um die Potenziale und Risiken der Elektromobilität einzugrenzen.

Zur ganzheitlichen Lebenszyklusanalyse wurden Modellrechnungen des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) unter Verwendung des kommerziellen Software- und Datenbankpakets GaBi durchgeführt. Untersucht wurden THG-Emissionen sowie das Versauerungspotenzial von Fahrzeugherstellung und WTW-Zyklus für konventionelle Pkw, PHEV und BEV der Autogrößenklassen Klein und Mittel (= Kompakt) für das Jahr 2020. Weitere Aspekte der Lebenszyklusanalyse wurden aus Gründen der Datenverfügbarkeit nicht betrachtet.

*Well-to-Wheel-Analyse von Elektrofahrzeugen (Bünger/Weindorf 2011)*

Auftraggeber: Deutscher Bundestag

Bünger/Weindorf (2011) schätzten die THG-Emissionen während des Fahrzeuglebenszyklus für 2015 und 2030. Untersucht wurden die Antriebstechnologien konventioneller Verbrennungsmotoren („internal combustion engine vehicle“ – ICEV), BEV, PHEV und FCEV bei unterschiedlichen Strommix- und Wasserstoffproduktions-szenarien. Als Fahrzeugtypen wurden Klein-, Mittel- und Oberklasse-Pkw sowie Lieferwagen und Stadtbusse betrachtet. Die THG-Emissionen und der Energieeinsatz der Fahrzeugproduktion wurden exemplarisch anhand eines Mittelklasse-Pkw mit der jeweiligen Antriebstechnologie aufgeführt. Die Analysen stützten sich auf bestehende Studien.

*OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen – Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft (Hacker et al. 2011; Zimmer et al. 2011)*

Auftraggeber: BMU

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde ein ganzheitlicher Ansatz zur Bilanzierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen verfolgt, der neben der fahrzeugseitigen Betrachtung auch die Interaktionen mit dem Strommarkt berücksichtigt. In der Studie wurden die Faktoren Akzeptanz, Marktpotenziale, Stromnetz, CO<sub>2</sub>-Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Ressourceneffizienz berücksichtigt und die Auswirkungen des Elektroantriebs auf die WTW-THG-Emissionen eines Fahrzeugs bei unterschiedlichen Energieszenarien dargestellt. Dabei wurde auch die Bedeutung der Installation zusätzlicher Quellen erneuerbarer Energie bis zum Jahr 2030 untersucht. Des Weiteren wurden konventionelle Pkw, PHEV und BEV als Klein-, Mittel- und Oberklassenfahrzeuge betrachtet.

## 1.2 Luftschadstoffe

Elektrofahrzeuge und FCEV verursachen lokal keine Luftschadstoffbelastungen. Damit eignen sich diese Fahrzeuge in besonderem Maße für dicht besiedelte Gebiete. Allerdings kann die Gewinnung seltener Metalle wie Lithium, Neodym oder Dysprosium für die Produktion von Batterien, Elektromotoren und der Leistungselektronik nennenswerte Umweltbelastungen verursachen. In

den folgenden Kapiteln werden erhöhte Umweltbelastungen durch die Produktion von Elektrofahrzeugen und FCEV den entsprechenden, durch den Fahrzeugbetrieb erreichten Umweltentlastungen gegenüber gestellt. Die resultierenden Umweltbelastungen werden mit jenen von konventionellen Fahrzeugen verglichen. Das vorliegende Kapitel III.1.2 befasst sich dabei mit lokalen – inklusive der überregional durch atmosphärischen Transport wirksamen – Luftschadstoffemissionen. Die global wirkenden THG-Emissionen werden in Kapitel III.1.3 betrachtet.

### 1.2.1 Wirkung von Luftschadstoffen

Im Straßenverkehr entstehen direkte Luftschadstoffemissionen durch die Verbrennung von Kraftstoffen, Brems- und Reifenabrieb sowie Aufwirbelung von Staub. Außer dem Verkehr tragen noch andere Emissionsquellen von Schadstoffen wie Industrie und Haushalte zur lokalen Luftqualität bei. Da in der Luft chemische Umwandlungsprozesse stattfinden, wird die erzeugte Schadwirkung durch den Mix von Schadstoffen in der Luft und das vorherrschende Klima beeinflusst.

Die Nutzung fossiler Kraftstoffe in Verbrennungsmotoren setzt eine Reihe von Schadstoffen frei. Deren Menge hängt von Fahrprofil und Emissionsstandard des Fahrzeugs ab. Die maximal zulässige Emissionsmenge von Luftschadstoffen im Straßenverkehr wird durch die Euro-Emissionsstandards geregelt. Für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge ist seit September 2009 die Norm Euro 5 bindend (EU 2007). Für Benzin-Pkw gelten Grenzwerte von 1 000 mg/km für CO, von 60 mg/km für NO<sub>x</sub>, von 100 mg/km für VOC und von 4,5 mg/km für Feinstaub (PM<sub>10</sub>). Die Norm Euro-6, gültig ab September 2014, limitiert zusätzlich lediglich die Anzahl der emittierten Partikel auf 6·10<sup>11</sup> mg/km gleichermaßen für Benzin- und Diesel-Pkw. Für Diesel-Pkw gilt ab September 2011 die Abgasnorm 5b mit Grenzwerten von 500 mg/km für CO, von 230 mg/km für VOC und NO<sub>x</sub>, von 180 mg/km für NO<sub>x</sub> und 5 mg/km für Feinstaub. Die ab September 2014 gültige Norm Euro 6 bringt eine weitere Absenkung für VOC und NO<sub>x</sub> auf 170 mg/km, für NO<sub>x</sub> auf 80 mg/km und für Feinstaub auf 4,5 mg/km. Für schwere Nutzfahrzeuge wird die aktuell geltende Norm Euro 5 zum Januar 2013 durch die Norm Euro 6 mit deutlichen Reduktionen von NO<sub>x</sub> (75 Prozent), VOC (55 Prozent) und PM<sub>10</sub> (33 Prozent) abgelöst. Nach dem Willen der EK (2011) soll bis 2030 der Anteil von konventionellen Fahrzeugen in Städten halbiert werden; bis 2050 sollen dort nur noch emissionsfreie Fahrzeuge zum Einsatz kommen.

Obwohl es seit Anfang der 1990er Jahre durch die Einführung und sukzessive Verschärfung der Euro-Abgasnormen gelungen ist, die meisten Luftschadstoffemissionen des Straßenverkehrs drastisch zu senken (Abb. III.1), stellen diese in Ballungsräumen durchaus noch ein Risiko für die menschliche Gesundheit dar. Adverse Gesundheitseffekte entstehen vor allem durch Feinstaub (PM<sub>10</sub>). Dieser erhöht das Lungenkrebsrisiko und verursacht Erkrankungen der Atemwege und Blutgefäße (Maibach et al. 2012). Seit 2005 wird die EG Luftqualitätsrahmenrichtlinie in der 22. Bundesimmissionsschutzverordnung

(BImSchV) umgesetzt. Diese schreibt für PM<sub>10</sub> einen Immissionsjahresgrenzwert von 40 µg/m<sup>3</sup> und einen Tagesgrenzwert von 50 µg/m<sup>3</sup> zum Schutz der Gesundheit vor. Verkehrsnahe Messungen haben jedoch gezeigt, dass die Tagesgrenzwerte häufig überschritten werden (UBA 2009).

Die als Lungenreizgase eingestuften Stickoxide (NO<sub>x</sub>) können die Infektionsanfälligkeit steigern und Lungenfunktionsstörungen auslösen. Außerdem gehört NO<sub>x</sub> gemeinsam mit den flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC) zu den Vorläufersubstanzen für bodennahes Ozon, und bildet damit einen wesentlichen Baustein der Wirkungskategorie Sommersmog in der Lebenszyklusanalyse. Ozon ist ein sehr starkes Reizgas, das selbst in geringen Konzentrationen die Schleimhäute der Augen und den gesamten Atemtrakt angreift. Zum Schutz der menschlichen Gesundheit schreibt die 22. BImSchV seit 2010 auch für NO<sub>2</sub>-Immissionen einen zulässigen Grenzwert von 40 µg/m<sup>3</sup> im Jahresmittel vor. Die Einhaltung dieses Grenzwertes scheint aber schwierig zu erreichen. Die europäische Umweltagentur (EEA 2012) stellt fest, dass zwölf EU-Mitgliedstaaten, darunter Deutschland, die genannten Grenzwerte überschreiten. Der Beitrag des Straßenverkehrs zu den NO<sub>2</sub>-Immissionen liegt dabei bei etwa 40 Prozent.

Beim Einsatz von Elektrofahrzeugen entstehen geringe Mengen an Feinstaub durch Reifen- und Bremsabrieb; weitere Luftschadstoffe werden durch den Fahrbetrieb

nicht emittiert. Aber auch bei konventionellen Fahrzeugen ist damit zu rechnen, dass die Emissionen von Luftschadstoffen mit weiteren Verschärfungen der Abgasnormen und restriktiveren Bestimmungen für die Einfahrt älterer Benzin- und Dieselfahrzeuge in städtische Umweltzonen, welche z. T. bereits verabschiedet sind, mittelfristig weiter deutlich sinken. Damit vermindert sich auch die relative Bedeutung des lokal schadstofffreien Betriebs von Elektrofahrzeugen gegenüber konventionellen Fahrzeugen.

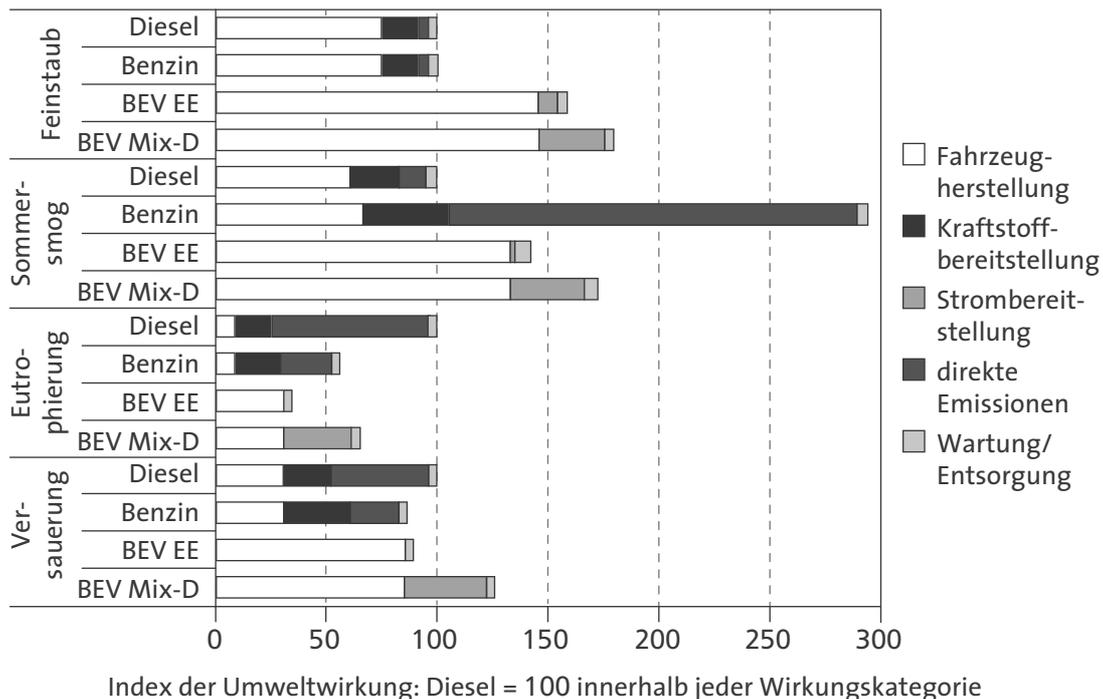
**1.2.2 Lebenszyklusanalyse**

Die bislang umfangreichste Lebenszyklusanalyse von konventionellen Fahrzeugen, Elektrofahrzeugen und FCEV wurde im Rahmen des Projekts UMBReLA durchgeführt. Neben THG-Emissionen und Primärenergieeinsatz untersuchten Helms et al. (2011b) die vier Wirkungskategorien Versauerung, Eutrophierung, Sommersmog und Partikelemissionen.

Abbildung III.2 stellt die Ergebnisse der UMBReLA-Studie für einen Mittelklasse-Pkw mit einer Lebensfahrleistung von 150 000 km nach Wirkungskategorien für das Jahr 2010 dar. Die Ergebnisse spiegeln entsprechend den Stand der Technik und die möglichen Potenziale der Elektromobilität in den nächsten Jahrzehnten wider. Es wird jedoch zwischen den Varianten des heutigen Strommix (Mix-D) und einem Szenario aus 100 Prozent erneuerbaren Energien zur Beladung der Elektrofahrzeuge un-

Abbildung III.2

**Lebenszyklusanalyse ausgewählter Wirkungskategorien eines Mittelklasse-Pkw 2010**



Eigene Darstellung mit Werten aus Helms et al. 2011b

terschieden. Brennstoffzellen- und Hybridfahrzeuge wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit von der Betrachtung in Abbildung III.2 ausgeschlossen.

Die betrachteten Wirkungen können je nach Schadstoff sowohl lokal als auch global sein, d. h. neben lokalen Schadstoffemissionen in Deutschland werden Versauerung und Eutrophierung durch den Abbau von Rohstoffen in den jeweiligen Herkunftsländern berücksichtigt. Die räumliche Dimension wird durch die Fahrzeugnutzung sowie die Produktions- und Rohstoffbeschaffungsverfahren der Fahrzeug- und Kraftstoffhersteller bestimmt. Da die einzelnen Wirkungskategorien der Lebenszyklusanalyse nicht direkt miteinander vergleichbar sind, wurde ein Index von 100 jeweils für das Dieselfahrzeug jeder Wirkungskategorie gewählt. Nach Wirkungskategorie ergibt sich folgendes Bild.

*Versauerung* (Maßgröße  $\text{SO}_2$ -Äquivalent [Äq.]): Die Ergebnisse zeigen, dass trotz eines drastischen Rückgangs der direkten  $\text{SO}_2$ -Emissionen des Straßenverkehrs die Fahrzeug- und Kraftstoffproduktion den überwiegenden Anteil des Versauerungspotenzials herkömmlicher Pkw ausmachen. Dieser Teil der Umweltbelastung entsteht in den Herkunftsländern der verwendeten Rohstoffe aufgrund z. T. geringer Umweltstandards sowie an den Orten der Fahrzeugproduktion. Durch die Emission von Stickstoffverbindungen und deren Umwandlung in der Atmosphäre bleibt jedoch auch die Versauerungswirkung durch den Fahrzeugbetrieb auch nach der Eliminierung von  $\text{SO}_2$  aus dem Abgasstrom weiterhin relevant. Die erheblichen Umweltbelastungen durch die Batterieproduktion und die Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2010 (Mix-D) lassen BEV hiermit jedoch deutlich schlechter abschneiden als konventionelle Fahrzeuge. Beim Einsatz erneuerbarer Energien (EE) ist das Versauerungspotenzial von BEV dem von Benzinfahrzeugen vergleichbar.

*Eutrophierung* (Maßgröße  $\text{PO}_4$ -Äq. – Phosphat): Im Beispiel zuvor finden sich die höchsten Belastungen für Diesel-Pkw und die niedrigsten Belastungen für BEV unter Verwendung erneuerbarer Energien (EE). Bei Nutzung des deutschen Strommix im Jahr 2010 (Mix-D) ist das Eutrophierungspotenzial für BEV vergleichbar mit dem von Benzinfahrzeugen. Hauptanteil hat bei BEV die Fahrzeugproduktion, während diese bei konventionellen Pkw nur wenig beiträgt.

*Sommersmog* (Photooxidantienbildungspotenzial) (Maßgröße  $\text{CO}_2\text{H}_4$ -Äq. – Ethan): Im dargestellten Beispiel weisen Benzin-Pkw mit weitem Abstand das größte Sommersmogpotenzial auf, wofür die Kraftstoffverbrennung verantwortlich ist. Doch auch die Ladung von BEV mit dem deutschen Strommix im Jahr 2010 weist ein deutliches Sommersmog-Potenzial auf.

*Feinstaub* wird allgemein ab einem Partikeldurchmesser unter  $10\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) gemessen. Gesundheitsschädlicher sind jedoch kleinere Partikel mit einem Durchmesser unter  $2,5$  ( $\text{PM}_{2,5}$ )  $\mu\text{m}$  oder sogar unter  $0,1$  ( $\text{PM}_{0,1}$ )  $\mu\text{m}$ . Diese können in die feinen Lungenkapillaren eindringen und sind krebserregend. Allgemein werden Dieselselbstgase für die Feinstaubbelastung verantwortlich gemacht, während

die lokal emissionsfreien Elektrofahrzeuge als Beitrag zur Einhaltung der Feinstaubgrenzwerte angesehen werden. Ab der Emissionsnorm Euro-5 unterscheiden sich die Partikelemissionen von Diesel-Pkw ( $5\ \text{mg}/\text{km}$ ) kaum von Benzin-Pkw ( $4,5\ \text{mg}/\text{km}$ ); ab der Norm Euro 6 haben beide Antriebsarten den gleichen Grenzwert von  $4,5\ \text{mg}/\text{km}$ . Die Ökobilanzergebnisse aus Abbildung III.2 widersprechen dieser Hoffnung, da durch die Produktion der Fahrzeuge – unabhängig vom Strommix – wesentlich mehr Feinstaub erzeugt wird als konventionelle Fahrzeuge über ihren gesamten Lebenszyklus emittieren. Durch die globale Arbeitsteilung in der Fahrzeugproduktion und dem Abbau der dafür benötigten Rohstoffe sind auch deren Emissionen weltweit auf eine große Zahl von Zulieferstandorten und Fördergebieten mit möglicherweise geringen Umweltauflagen verteilt. Für die Beurteilung der Schadenswirkung von Luftschadstoffen ist ferner entscheidend, in welcher Entfernung von Siedlungen diese emittiert werden. Die Nachverfolgung dieser Informationen für ein zu bewertendes Fahrzeug stößt auf erhebliche methodische Probleme. In der Lebenszyklusanalyse können deshalb nur Näherungswerte für die globalen Auswirkungen der Fahrzeug- und Kraftstoffherstellung getroffen werden.

Im Szenario 2030 der UMBReLA-Studie stehen Verbesserungen bei konventionellen Fahrzeugen durch weiter verschärfte Emissionsnormen (Euro 6 und folgende) technischen Verbesserungen bei der Batterieherstellung und einem erhöhten Anteil erneuerbarer Energien für den Betrieb von Elektrofahrzeugen gegenüber (Helms et al. 2011a u. 2011b). 2030 sind Elektrofahrzeuge bezüglich der Versauerung etwa vergleichbar mit konventionellen Fahrzeugen; der Nachteil des Diesel-Pkw bei der Eutrophierung wird ausgeglichen. Bei Sommersmog und Feinstaub liegen BEV nur noch geringfügig über konventionellen Pkw. Bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus fällt die Ökobilanz (ohne THG) von Elektrofahrzeugen demnach auch 2030 nicht besser aus als für vergleichbare konventionelle Pkw.

Bezogen auf die Umweltbelastungen durch Schadstoffe in Deutschland fällt die Bilanz von Elektrofahrzeugen jedoch günstiger aus als die von konventionellen Fahrzeugen. Vernachlässigt man die globalen Umweltwirkungen durch den Abbau von Rohstoffen und die Produktion der Fahrzeuge konzentriert sich der Vergleich auf die direkten Emissionen und die Folgen der Stromerzeugung und Kraftstoffbereitstellung.

Die für den Menschen relevanteste Wirkung der Umweltverschmutzung ist die Toxizität (oder Giftigkeit). Sie beschreibt die Wirkung von Stoffen und Stoffgemischen auf die menschliche Gesundheit durch Auswirkungen auf Zellen, Nervensystem oder Organe. Art und Stärke der Wirkung hängt von der Art der Stoffe, deren Konzentration in der Atmosphäre, den Umgebungsbedingungen (z. B. Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind) und der Anzahl betroffener Menschen (Exposition) ab. Zwar liegen nach der Methode des Wirkungspfadansatzes Schätzungen über die Effekte einzelner Stoffe vor (CE Delft et al. 2011; Maibach et al. 2012), diese fanden aber bislang

noch keinen Eingang in die Lebenszyklusanalyse des Straßenverkehrs. Grund hierfür sind die komplexen atmosphärischen Umwandlungsprozesse, welche die Betrachtung aller für die menschliche Gesundheit relevanten Stoffe erfordern. Durch die Abnahme von Versauerung und Eutrophierung wird jedoch die Umgebungsbelastung mit Schadstoffen generell vermindert, was auch die toxische Wirkung des Verkehrs reduziert.

### 1.2.3 Fahrzeugherstellung

Konventionelle Fahrzeuge und Elektrofahrzeuge verfügen über teilweise gleiche aber auch sehr unterschiedliche Komponenten, welche durch ihre spezifischen Herstellungsverfahren unterschiedliche Schadstoffintensitäten aufweisen. Die Fahrzeughülle, also Karosserie, Fahrgestell und Innenraum, ist vor allem durch die Fahrzeuggröße und weniger durch die Antriebstechnologie bestimmt. Konventionelle Fahrzeuge weisen darüber hinaus einen Verbrennungsmotor, einen Generator zur Stromerzeugung (Lichtmaschine) sowie einen Kraftstofftank auf. BEV besitzen stattdessen eine (oder im Lebenszyklus des Fahrzeugs mehrere) Batterien, einen oder mehrere Elektromotoren und zugehörige Leistungselektronik (Kap. II.1). PHEV besitzen die Komponenten beider Technologiekonzepte in jeweils kleinerer Dimensionierung.

Die bei der Produktion der Fahrzeuge anfallenden Schadstoffemissionen und deren Wirkung hängen von mehreren Faktoren ab. Bei Elektrofahrzeugen sind die Dimensionierung der Komponenten, insbesondere der Batterie, die Batterielebensdauer, die eingesetzten Materialien, der Produktionsstandard und -ort entscheidend. Insbesondere die freiwerdenden Schwefeloxide und Schadstoffe bei der Gewinnung von Lithium für Batterien und Seltenen Erden wie Neodym für Permanentmagnete in Elektromotoren spielen für die Ökobilanz eine ausschlaggebende

Rolle. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird hier nur das Versauerungspotenzial dargestellt (für andere Kategorien der Lebenszyklusanalyse Abb. III.2).

Neben der UMBReLA-Studie (Helms et al. 2011b) lieferte die Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität (Held/Baumann 2011) detaillierte Ergebnisse zum Versauerungspotenzial unter Berücksichtigung der Herstellung der einzelnen Fahrzeugkomponenten. Zur Illustration der Bedeutung der einzelnen Komponenten werden die Ergebnisse im Folgenden kurz diskutiert; die Befunde aus der UMBReLA-Studie unterscheiden sich hiervon nicht wesentlich.

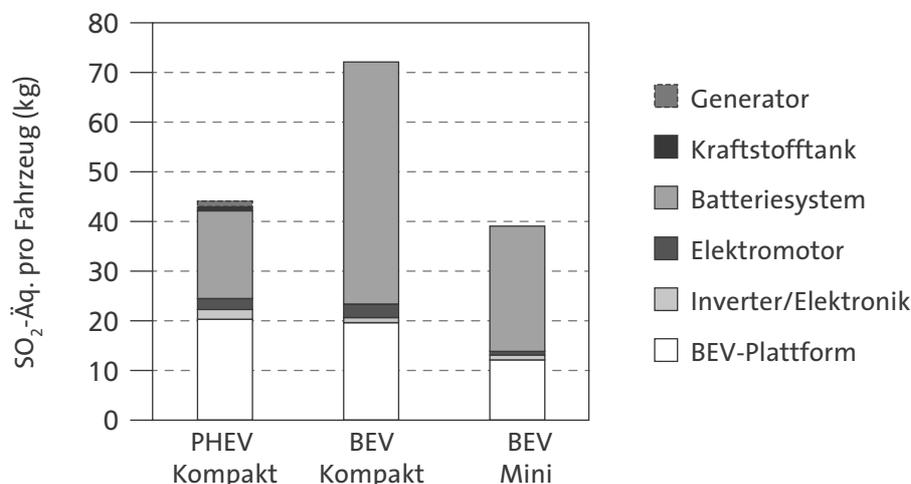
Die in Abbildung III.3 dargestellten Werte beziehen sich auf den Lebenszyklus von drei Fahrzeugen der Größenklassen Klein (BEV Mini) und Mittel (BEV Kompakt und PHEV Kompakt), jeweils für den Strommix und die Fahrzeuggenerationen des Jahres 2020, mit einer Lebenserwartung von 12 Jahren, einer Lebensfahrleistung von 143 000 km und einem elektrischen Fahranteil von PHEV von 70 Prozent. Unterstellt werden Batteriegrößen von 20 kWh für BEV-Mini, 40 kWh für BEV-Kompakt und 14 kWh für PHEV-Kompakt.

Für 2020 wird angenommen, dass die Batterielebensdauer ebenfalls 12 Jahre beträgt, womit keine Ersatzbatterie berücksichtigt werden muss. Dies ist eine entscheidende Annahme, da für alle Fahrzeugmodelle die Batterie das größte Versauerungspotenzial aufweist, gefolgt von der Fahrzeughülle. Von einer Zweitnutzung oder einem Recycling der Batterie am Ende der Fahrzeuglebensdauer, was die dem Fahrzeug anzulastenden Emissionen rechnerisch mindern würde, wird nicht ausgegangen.

Die Lebenszyklusanalyse wurde im Rahmen der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität mittels des Software- und Datenbanksystems GaBi durchgeführt

Abbildung III.3

#### Versauerungspotenzial bei der Fahrzeugherstellung



Eigene Darstellung mit Werten aus Held/Baumann 2011

(Held/Baumann 2011). Datengrundlagen für die eingesetzten Stoffmengen in der Produktion der genannten Fahrzeuge und Komponenten stellen Produktblätter von Fahrzeugherstellern dar. Diese sind jedoch nur für konventionelle Fahrzeuge verfügbar und sind sehr ungenau. Die fehlenden Informationen und spezifische Angaben für Elektrofahrzeuge, insbesondere für Seltene Erden wie Lithium, Neodym oder Dysprosium, welche für Batterien, Steuerelektronik oder Elektromotoren Verwendung finden, wurden aus Standard-Datenbanken zur Lebenszyklusanalyse ergänzt (Held/Baumann 2011). Neben der Datenungenauigkeit stellt sich die in der Regel unbekannte Herkunft der Seltenen Erden als Herausforderung dar, da diese über die lokalen Abbaubedingungen und Produktionsstandards einen entscheidenden Einfluss auf die Umweltwirkungen haben. Schließlich wurden nur diejenigen Baugruppen bilanziert, welche sich zwischen den betrachteten Fahrzeugen unterscheiden. Dies sind beispielsweise Verbrennungsmotor, Kraftstofftank und Getriebe bei konventionellen Fahrzeugen (Abb. III.2), Batterie, Leistungselektronik und Elektromotoren bei BEV und entsprechend alle Komponenten bei PHEV.

### 1.3 Treibhauseffekt

Der Klimarat der Vereinten Nationen (Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC) stellt in seinem 4. Zwischenbericht („Fourth Assessment Report“, IPCC 2007) die große Wahrscheinlichkeit menschlich verursachter CO<sub>2</sub>-Emissionen für die globale Erwärmung heraus. Etwa 30 Prozent hiervon gehen auf das Konto des Verkehrs. Um die Erderwärmung in diesem Jahrhundert gegenüber der Durchschnittstemperatur von 1980 bis 1999 nicht über 2 °C ansteigen zu lassen, ist eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in allen Sektoren um 50 bis 85 Prozent bis 2050 gegenüber dem Emissionsstand im Jahr 2000 nötig. Im Verkehrsbereich peilt die EU eine Reduktion der THG-Emissionen von 60 Prozent bis 2050 an (EK 2011).

Zum Thema THG-Emissionen der Elektromobilität stehen zahlreiche Arbeiten zur Verfügung, welche unter den Stichworten „Carbon Footprint“, „Ökobilanzierung“ oder „Lebenszyklusanalyse“ („life cycle assessment“) die Emissionen in verschiedenen Stadien der Fahrzeugherstellung, der Strom- und Kraftstoffbereitstellung sowie der Kraftstoffnutzung analysieren (Kap. III.1.1). In der Mehrheit der vorliegenden Studien wurden Well-to-Wheel-Analysen (WTW-Analysen) durchgeführt, welche die entstehenden THG-Emissionen von der Bereitstellung von Kraftstoffen und der Stromerzeugung bis zu deren Nutzung im Fahrzeug betrachten. Speziell bei der Stromerzeugung ist hier eine enorme Bandbreite unterschiedlicher Kraftwerke zu berücksichtigen, die von traditionellen Kohle- und Gaskraftwerken bis zur CO<sub>2</sub>-armen Erzeugung erneuerbarer Energien reicht. Für eine vollständige Abbildung der Emissionen während des gesamten Lebenszyklus der motorisierten Individualmobilität wurden in einigen Studien zusätzlich die Herstellung, die Wartung und die Entsorgung der Fahrzeuge betrachtet. Die Ergebnisse der verschiedenen Analysen werden

im Folgenden dargestellt und zueinander in Relation gesetzt.

#### 1.3.1 WTW-Analysen der THG-Emissionen

Die WTW-Analysen in Bünger/Weindorf (2011) unterscheiden 5 Fahrzeugklassen: Mini (A/B-Klasse), Mittel (C-Klasse), Stadtbusse sowie Lieferwagen. Verglichen wurden konventionelle benzin- und dieselbetriebene Fahrzeuge mit BEV (Mini und Lieferwagen), PHEV<sup>4</sup> (Mittel), PHEV (Kompakt, Lieferwagen) und FCEV (Stadtbus). Eine ergänzende Untersuchung zu Rollern wurde durch Kley/Wietschel (2010) vorgenommen.

Um gleichzeitig kurz- und langfristige Potenziale der Elektromobilität bzgl. THG-Emissionsreduktionen abschätzen zu können, werden die Referenzjahre 2015 und 2030 analysiert. Dabei werden die THG-Emissionen in Form von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2</sub>-Äq.) betrachtet. Diese beschreiben die Treibhauswirkung der Nicht-CO<sub>2</sub>-Klimagase im Verhältnis zu CO<sub>2</sub> unter Berücksichtigung ihrer Erwärmungswirkung und ihrer Verweildauer in der Atmosphäre. Die CO<sub>2</sub>-Äq. liegen beispielsweise nach dem Kyoto-Protokoll bei 21 für Methan (CH<sub>4</sub>) und 310 für Lachgas (N<sub>2</sub>O). Die relative Klimawirkung von Nicht-CO<sub>2</sub>-THG-Emissionen gegenüber CO<sub>2</sub>-Emissionen liegt zwischen 0,3 Prozent für Lieferfahrzeuge und 1,2 Prozent für Pkw.

Für Elektrofahrzeuge und FCEV wurde der deutsche Strommix (Mix-D) in den Jahren 2015 und 2030 gemäß dem Energiekonzept der Bundesregierung 2010 (Kap. II.4; BMWi 2011) mit dem ausschließlichen Einsatz zusätzlich installierter Kapazitäten erneuerbarer Energien (EE) aus Wind- und Solarkraft verglichen. Die Annahme zusätzlich installierter EE-Kapazitäten impliziert, dass keine Konkurrenz der Nutzung erneuerbarer Energien zwischen Verkehr und anderen Wirtschaftsbereichen besteht. Diesen Energiequellen wurden keine THG-Emissionen zugeordnet; d. h. die sogenannten grauen Emissionen bei der Herstellung der Anlage wurden vernachlässigt (wie auch im Fall des Strommix für Deutschland, bei dem den konventionellen Kraftwerken auch keine grauen Emissionen zugerechnet wurden). Die grauen Emissionen sind in der Gesamtbilanz allerdings auch nicht sehr relevant.

Für Roller, Pkw der Klassen Mini und Kompakt, Stadtbusse und Lieferwagen die THG-Emissionen pro Fahrzeugkilometer für die Jahre 2015 und 2030 dargestellt, während für 2015 die Emissionen der Energieerzeugung (Strom und Verbrennungskraftstoff) und der Kraftstoffnutzung getrennt ausgewiesen werden, sind die Ergebnisse für 2030 aus Gründen der Übersichtlichkeit nur insgesamt angegeben (Tab. III.1).

Die Ergebnisse der WTW-Analyse zeigen, dass BEV und PHEV selbst bei Ladung mit dem allgemeinen Strommix in Deutschland bereits im Szenario 2015 deutlich klima-

<sup>4</sup> Klassifizierung in der Originalquelle als REEV (Bünger/Weindorf 2011)

freundlicher als konventionelle Fahrzeuge sind. Da nur der elektrische Fahrleistungsanteil der PHEV von einem klimafreundlicheren Strommix profitiert, fällt die Minderung des THG-Ausstoßes gegenüber Dieselfahrzeugen beim deutschen Strommix 2015 für BEV der Miniklasse mit 26 Prozent deutlicher aus als für PHEV der Kompaktklasse mit 17 Prozent.

Während der Unterschied zwischen Diesel und BEV der Mini-Klasse 2015 ca. 28 g CO<sub>2</sub>-Äq. beträgt, steht zu erwarten, dass die Differenz 2030 trotz effizienterer Dieselaggregate auf 52 g CO<sub>2</sub>/km anwächst. Grund hierfür ist der steigende Anteil erneuerbarer Energien im deutschen Strommix über die Jahre. Bezüglich konventioneller Fahrzeuge wird unterstellt, dass Benzinantriebe bis 2030 ein wesentlich höheres Einsparpotenzial aufweisen als Dieselfahrzeuge (Bünger/Weindorf 2011). Damit wird bis 2030 die Klimabilanz von Benzin-Pkw besser als die von Diesel-Pkw.

Eine deutliche Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Pkw-Verkehrs durch Elektromobilität lässt sich folglich nur durch den Einsatz erneuerbarer Energien erzielen. Die Bundesregierung hat beschlossen, den zusätzlichen Bedarf an elektrischer Energie durch die Elektromobilität aus erneuerbaren Energien zu decken (Bundesregierung 2011). Sie fordert auch, dass dafür vorrangig anderweitig nicht nutzbarer Strom aus fluktuierenden erneuerbaren Energien im Rahmen des Lastmanagements durch Elektromobilität genutzt werden sollte. Somit wird eingefordert, dass es sich überwiegend um zusätzliche Kapazitäten handelt, um keine Nutzungskonkurrenz zwischen Verkehr und anderen Wirtschaftsbereichen entstehen zu lassen. Die Gewährleistung der spezifischen Installation erneuerbarer Stromquellen für die Elektromobilität stellt dabei eine Herausforderung für die Energiepolitik dar. Nach Helms et al. (2011a) werden erneuerbare Energiequellen in Ländern mit Einspeisevergütung oder anderen Förderpolitiken ohnehin ausgebaut. Damit dürfen der

Tabelle III.1

**WTW-Analyse der THG-Emissionen für konventionelle Fahrzeuge und Elektrofahrzeuge 2015 und 2030**

Fahrzeugklasse	Energieträger	WTW-THG-Emissionen g CO <sub>2</sub> -Äq./Fzkm				
		2015			2030	
		Strom	Kraftst.	Nutzung	gesamt	gesamt
Roller	Benzin	–	10,5	61,1	71,6	47,1
	Elektro Mix-D	12,5	–	0,0	12,5	5,8
	Elektro EE	0,0	–	0,0	0,0	0,0
Pkw-Mini	Benzin	–	18,0	106,0	124,0	81,6
	Diesel	–	17,4	91,3	108,7	89,7
	BEV Mix-D	80,1	–	0,0	80,1	37,3
	BEV EE	0,0	–	0,0	0,0	0,0
Pkw-Kompakt	Benzin	–	28,3	166,1	194,4	130,1
	Diesel	–	25,8	134,7	160,5	132,4
	PHEV Mix-D	103,7	1,8	28,3	133,8	71,8
	PHEV EE	0,0	1,8	28,3	30,1	24,9
Stadtbus	Diesel	–	225,3	1.161,6	1.386,9	1.248,2
	FCEV Mix-D	3.563,7	–	0,0	3.563,7	1.435,8
	FCEV EE	0,0	–	0,0	0,0	0,0
Lieferwagen	Benzin	–	54,7	320,7	375,5	246,6
	Diesel	–	41,6	216,3	257,9	212,5
	BEV Mix-D	163,7	–	0,0	163,7	78,5
	BEV EE	0,0	–	0,0	0,0	0,0

Eigene Zusammenstellung mit Daten aus Bünger/Weindorf 2011 und Kley/Wietschel 2010

Elektromobilität nur zusätzlich zu den bestehenden gesetzlichen Regelungen errichtete erneuerbare Kraftwerkskapazitäten angerechnet werden.

Durch intelligente Stromnetze und „smart meters“ können Probleme aufgrund fluktuierender erneuerbarer Energiequellen entschärft werden; über die Verwendung des Batteriespeichers im Fahrzeug kann die Elektromobilität sogar zur besseren Auslastung bestehender Kapazitäten erneuerbarer Energien beitragen (Dallinger et al. 2011; Helms et al. 2011a). Eine überwiegende Ladung von Elektrofahrzeugen zu Spitzenlastzeiten, z. B. abends direkt nach der Heimkehr, liefert hingegen keinen Beitrag zur Emissionsminderung durch die Elektromobilität, da zu diesen Zeiten CO<sub>2</sub>-intensive Spitzenlastkraftwerke am Netz sind (Hacker et al. 2011; Helms et al. 2011a; Zimmer et al. 2011).

Für den Vergleich der Klimabilanz zwischen Verkehrsmitteln sind die durchschnittlichen Besetzungsgrade der Fahrzeugtypen zu berücksichtigen. Die in Abbildung III.4 dargestellten THG-Emissionen pro Pkm im Jahr 2030 gehen von Besetzungsgraden von 1,1 Personen für Roller (CE Delft et al. 2011), 1,5 für Pkw (BMVBS 2005) und 14 für Busse (VDV 2010) aus. Gerade im öffentlichen Verkehr sind Annahmen zu Besetzungsgraden entscheidend für die durchschnittlichen Kosten und Umweltbelastungen pro Fahrgast. Auf stark frequentierten Linien sowie im Berufsverkehr können sich die Ergebnisse aufgrund höherer Besetzungsgrade um das Zweibis Dreifache reduzieren. Dies ist jedoch unabhängig vom jeweiligen Antriebstyp.

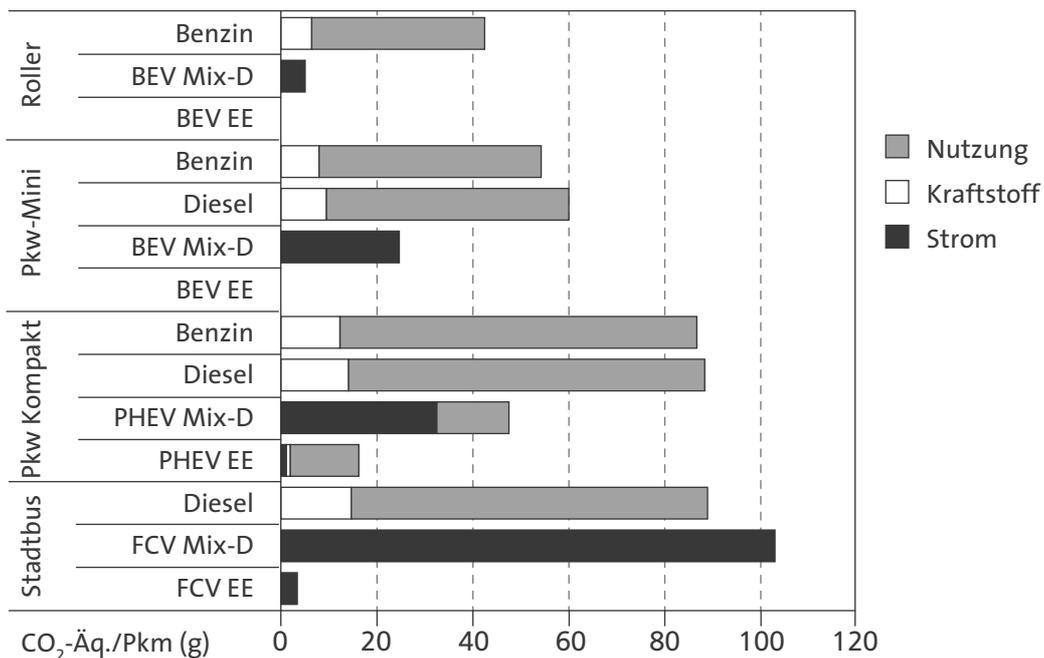
In der gewählten Betrachtungsweise pro Pkw fallen die THG-Emissionen der Fahrzeugtypen in ähnlichen Größenordnungen aus. Auffällig bei den dargestellten Ergebnissen ist die deutlich negative Klimabilanz von FCEV-Bussen bei der energieintensiven Erzeugung des Wasserstoffs durch Elektrolyse mittels des deutschen Strommix 2030. Dagegen trägt die Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien bei FCEV zu einer im Vergleich mit konventionellen Fahrzeugen deutlich positiveren Klimabilanz bei. Diese ist jedoch nicht vollständig Null, da unterstellt wird, dass ein Teil des Wasserstoffs aus Erdgas erzeugt wird, was geringe Mengen an THG-Emissionen verursacht.

**1.3.2 Gesamtszenarien der THG-Emissionen**

Von Interesse ist nicht nur der Vergleich zwischen den einzelnen Fahrzeugtypen, sondern auch der Gesamteffekt der THG-Einsparungen durch die Elektromobilität. Im Folgenden werden die gesamthaften Auswirkungen auf die THG-Emissionen berechnet, welche resultieren, wenn als HochlaufszENARIO 1 Million Elektrofahrzeuge im Jahr 2020 bzw. 6 Millionen Elektrofahrzeuge im Jahr 2030 (Kap. II.2.7) sowie das Energieszenario, welches dem derzeitigen Energiekonzept der Bundesregierung (BMW/BMU 2010) zugrunde liegt (Kap. II.4), unterstellt werden. Hierzu werden die WTW-THG-Emissionen von BEV und PHEV betrachtet, in denen alle Emissionen von der Energiegewinnung bis zum Antriebsrad enthalten sind (nicht enthalten sind die Emissionen der Fahrzeugherstellung und Entsorgung). In Tabelle III.1 sind die

Abbildung III.4

**Spezifische WTW-THG-Emissionen pro Pkw 2030**



Eigene Darstellung mit Daten aus Bünger/Weindorf 2011 und Kley/Wietschel 2010

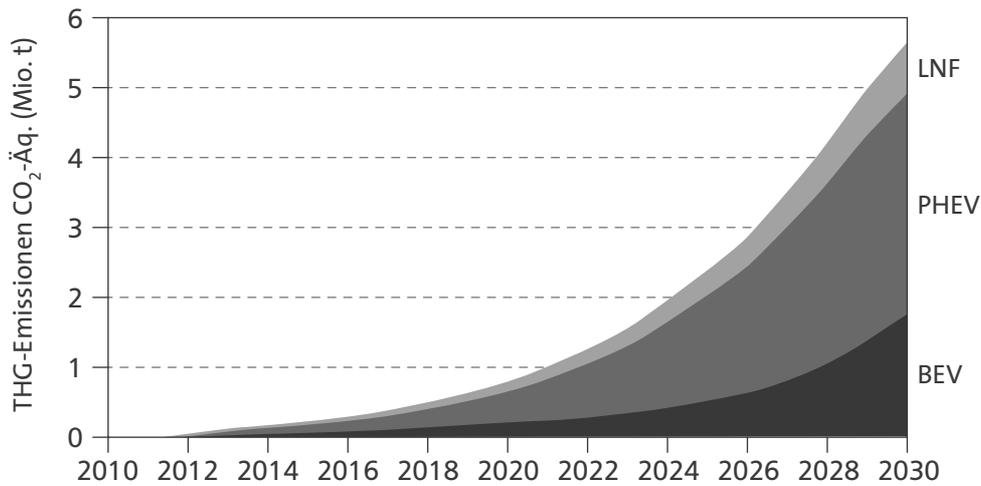
fahrzeugspezifischen THG-Emissionen, die der Berechnung zugrunde liegen, angeführt.

Entsprechend den Analysen lassen sich mit diesen Annahmen (zu fahrzeugspezifischen Emissionen, Marktpenetration und Energieszenario) im Jahr 2020 0,8 Mio. t

und 2030 5,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. pro Jahr einsparen (Abb. III.5). Bei der ausschließlichen Verwendung von regenerativem Strom sind es mit 1,9 Mio. t und 2030 9,6 Mio. t im Jahr 2020 deutlich mehr (Abb. III.6). Die THG-Senkung ist dabei im Wesentlichen auf eine Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zurückzuführen.

Abbildung III.5

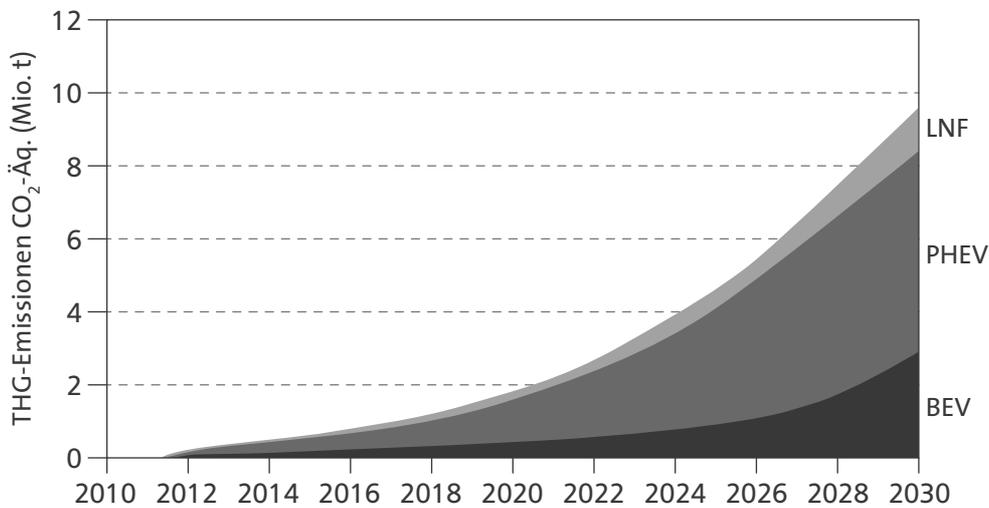
**Gesamteinsparungen an THG-Emissionen durch die Nutzung von Elektrofahrzeugen mit dem deutschen Strommix (WTW-Analyse)**



Eigene Berechnungen mit Daten aus Bünger/Weindorf 2011 und Kley/Wietschel 2010

Abbildung III.6

**Gesamteinsparungen an THG-Emissionen durch die Nutzung von Elektrofahrzeugen mit Strom aus erneuerbaren Energien (WTW-Analyse)**



Eigene Berechnungen mit Daten aus Bünger/Weindorf 2011 und Kley/Wietschel 2010

Die PHEV tragen zu dieser Reduktion am meisten bei, da sie unter den getroffenen Annahmen einen größeren Anteil an der Marktdurchdringung haben als BEV (Kap. II.2.7). Weiter ersetzen sie mehr mittlere und größere konventionelle Pkw mit höherer jährlicher Fahrleistung (Tab. III.3; Bünger/Weindorf 2011). Der Unterschied zwischen der jeweiligen Rechnung mit deutschem Strommix respektive mit Strom ausschließlich aus erneuerbaren Energien wirkt sich im Jahr 2020 (2,5-mal höhere Einsparung durch erneuerbarer Energien gegenüber dem deutschen Strommix) deutlicher aus als 2030 (1,7-mal höhere Einsparung). Dies hängt damit zusammen, dass durch den steigenden Anteil von Strom aus erneuerbaren Energien am deutschen Strommix dessen THG-Intensität sinkt (Kap. II.4) – ein Effekt, der sich auf den gesamten Fahrzeugbestand an Elektrofahrzeugen positiv auswirkt.

Dieser Effekt ist auch vor dem Hintergrund der kontrovers geführten Diskussion relevant, ob Elektrofahrzeuge unter Annahme des deutschen Strommix kurzfristig einen positiven Effekt auf die THG-Emissionen haben oder nicht. Wenn auch ein Elektrofahrzeug 2015 nur einen geringen Vorteil hierbei hat, so fährt dieses Fahrzeug doch durchschnittlich 12 Jahre und hat im weiteren Lebenszyklus eine von Jahr zu Jahr deutlich bessere THG-Bilanz – es „profitiert“ davon, dass der Strommix immer „grüner“ wird. Im Unterschied dazu weist ein vergleichbares konventionelles Fahrzeug über die Jahre immer dieselben THG-Emissionen auf bzw. bei Betrachtung der Vorkette sogar eher noch schlechtere, weil zunehmend unkonventionelles Erdöl eingesetzt wird, welches eine 2,5-fache schlechtere THG-Bilanz aufweist als die Verwendung von konventionellem Erdöl. Ein im Jahr 2015 zugelassenes Elektrofahrzeug hat somit über seine Lebensdauer eine deutlich bessere THG-Bilanz als ein im Jahr 2015 zugelassener konventioneller Pkw.

Die zuvor ausgeführten Berechnungen mittels deutschem Strommix bzw. einer Nutzung von rein erneuerbaren Energien können wie folgt hinterfragt werden. Zum einen stellt sich die Frage, in welchem Umfang die CO<sub>2</sub>-Emissionen überhaupt durch zusätzlich erzeugten Strom für Elektrofahrzeuge betroffen sind. Für alle Sektoren, die dem CO<sub>2</sub>-EU-Emissionshandel unterstehen, einschließlich des Kraftwerkssektors, wurden bis 2020 europaweit CO<sub>2</sub>-Emissionsmengen verbindlich festgelegt. Da derzeit auf politischer Ebene keine Ansätze erkennbar sind, diese neu zu verhandeln – auch der beschlossene Atomausstieg in Deutschland führte bisher nicht zu einer Nachverhandlung – wird sich der Anstieg der Stromnachfrage durch Elektromobilität nicht auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Summe auswirken. Unter diesem Blickwinkel lässt sich argumentieren, dass zumindest bis 2020 keine zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Elektrofahrzeuge anfallen, unabhängig davon, ob ausschließlich erneuerbare Energien verwendet werden oder nicht. Nach 2020 sind, das Gelingen der Energiewende vorausgesetzt, die THG-Emissionen durch Elektrofahrzeuge auch unter Annahme des deutschen Strommix deutlich niedriger verglichen mit konventionellen Pkw, wie die obigen Berechnungen zeigen. Allerdings sind Preiseffekte auf die Strompreise und den CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis wahrscheinlich, die daher resul-

tieren, dass bei einem Anstieg der Stromnachfrage andere zusätzliche Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Minderung ergriffen werden müssen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die zusätzlichen Strommengen für Elektromobilität – wie in Kapitel III.1.4.2 aufgezeigt – vergleichsweise gering sind. Aus diesem Blickwinkel ist der Beitrag der Elektromobilität zum Klimaschutz von Anfang an sehr hoch.

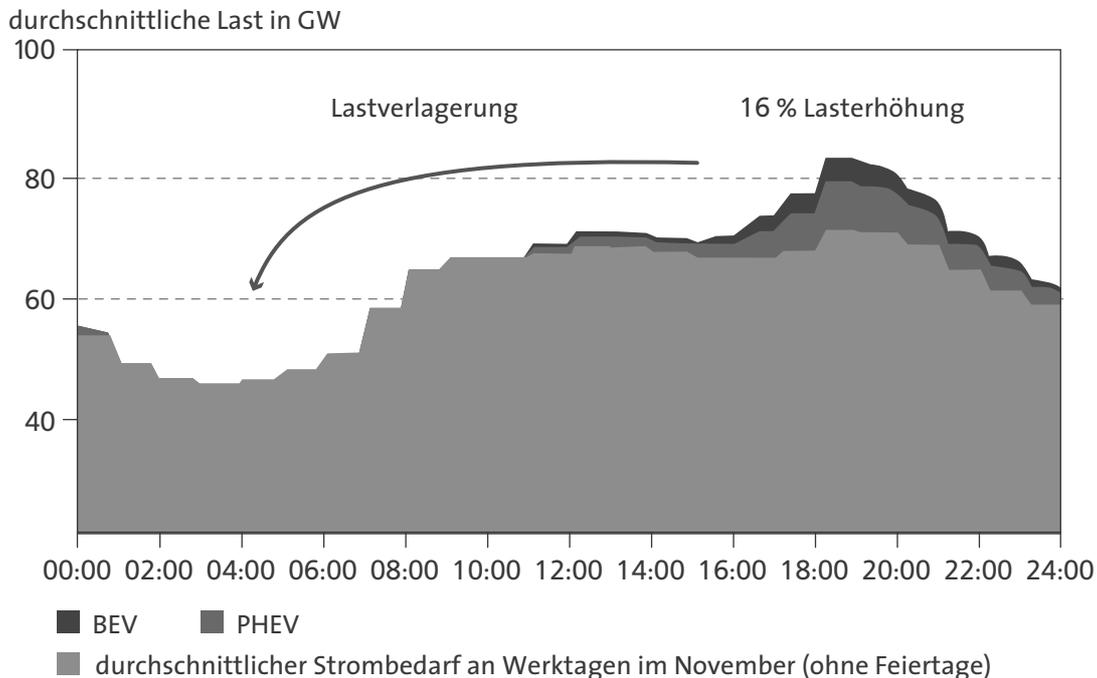
Eine andere Sichtweise ergibt sich daraus, dass nicht Durchschnittsemissionen zugrunde gelegt werden, sondern die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Kraftwerkspark, der zur Deckung der realen Lastganglinie für Elektrofahrzeuge tatsächlich genutzt wird, ermittelt werden. Ein hierfür üblicher Ansatz, um CO<sub>2</sub>-Emissionen pro kWh zu berechnen, ist die Betrachtung des sogenannten Grenzkostenkraftwerkes. Grenzkosten beziehen sich auf die variablen Kosten der Stromerzeugung, welche z. B. durch das Aufschalten eines Kraftwerkes auf das Netz entstehen und sich zwischen verschiedenen Kraftwerken deutlich unterscheiden. Beginnend mit Kraftwerken mit niedrigeren Grenzkosten werden Kraftwerke mit höheren Grenzkosten zugeschaltet, bis die Nachfrage gedeckt ist. Das Grenzkostenkraftwerk ist das letzte Kraftwerk, das jeweils zur Deckung der Nachfrage eingesetzt wird. Welcher Art dieses Grenzkostenkraftwerk ist, richtet sich nach der Stromnachfrage, die tages- und jahreszeitabhängig ist. Zur Spitzenlastzeit sind es beispielsweise eher Gasturbinen oder Pumpspeicherkraftwerke. Zuzeiten sehr schwacher Last, beispielsweise in Sommernächten, sind es Grundlastkraftwerke wie Braunkohle- oder Laufwasserkraftwerke. Um zu bestimmen, welches Kraftwerk als Grenzkostenkraftwerk betrieben werden muss, muss die Lastkurve, welche durch das Laden von Elektrofahrzeugen erwartet wird, betrachtet werden.

Ein mögliches Szenario ist, dass Elektrofahrzeuge unmittelbar nach ihrem letzten Weg, also beispielsweise abends nach der Heimkehr der Nutzer, aufgeladen werden. Dies ist deshalb plausibel, weil aufgrund ökonomischer Bedingungen das Laden zuhause am günstigsten ist. Abbildung III.7 zeigt eine solche Ladekurve für eine Marktpenetration mit 12 Millionen Elektrofahrzeugen. Die Abbildung zeigt, dass zu Abendstunden eine Nachfragespitze entsteht. Unterstellt man eine solche Ladekurve und berechnet die CO<sub>2</sub>-Emissionen des spezifischen Grenzkraftwerkes, so ergibt sich hierdurch beim in Deutschland gegebenen Kraftwerkspark in den nächsten Jahren keine bedeutende Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgrund der Substitution von konventionellen Fahrzeugen durch Elektrofahrzeuge (Dallinger et al. 2011; Pehnt et al. 2011). Dies liegt daran, dass vergleichsweise viele konventionelle Kraftwerke zur Deckung dieser Lastkurve zum Einsatz kommen. Im unterstellten Szenario steigt die Spitzenlast um 16 Prozent (6,2 GW). Neben der ökologischen Diskussion ist hier noch zu erwähnen, dass die Deckung dieser Spitzenlast durch teure Spitzenlastkraftwerke vorgenommen werden muss.

Ein anderes Szenario zur Ladung geht davon aus, dass ein Anreiz zur Verlagerung der Ladezeiten von Elektrofahrzeugen gegeben wird. Privat-Pkw in Deutschland stehen im Schnitt zu 95 Prozent ihrer Zeit. Somit könnte die La-

Abbildung III.7

## Auswirkungen auf die Lastganglinie durch die Marktpenetration mit Elektrofahrzeugen



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

Quelle: Wietschel et al. 2011

dung dieser Elektrofahrzeuge prinzipiell – bei Einwilligung durch die Nutzer bzw. Fahrzeughalter – flexibel gesteuert werden, wenn die Ladesysteme entsprechend ausgelegt werden. Der angenommene Anreiz zur Verlagerung orientiert sich dabei an den Börsenpreisen für Strom. Die Börsenpreise werden maßgeblich durch die prognostizierte Windstromeinspeisung und die vorhergesagte Last festgelegt. Durch einen entsprechenden Lastmanagementanreiz werden Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen eher zeitlich ausgeglichen und verlagert in Zeiten, in denen das Windenergieangebot besonders hoch und die Stromnachfrage gering ist. Ein derartiges Szenario reduziert den Anstieg der Spitzenlast. Zuzeiten mit Stromdefizit kann eine Ladung unterbrochen werden. Obwohl die durch das Laden von Elektrofahrzeugen bedingte Last nur über wenige Stunden verlagert werden kann, wird ein Beitrag für die bessere Integration von erneuerbaren Energien erreicht. Nach Berechnungen von Peht et al. (2011) können bei 12 Millionen Elektrofahrzeugen im Jahr 2030 rund 3,5 Prozent des Überschussstroms aus erneuerbaren Energien, welcher sonst nicht genutzt werden kann, verwendet werden. Die sich tatsächlich ergebende Lastverlagerung ist dabei von der Bereitschaft der Nutzer zu einer entsprechenden Anpassung der Ladezeiten ihrer Fahrzeuge abhängig. Bezüglich dieser Bereitschaft herrschen aufgrund fehlender Erfahrungen noch große Unsicherheiten.

Neben der Möglichkeit einer Lastverlagerung zur besseren Integration erneuerbarer Energien wird auch die Option diskutiert, dass Fahrzeugbatterien bei Stromknappheit ins Netz zurückspeisen. Voraussetzung für die Nutzung dieser Option ist allerdings, dass die Energierückspeisung nicht zulasten der Batterielebensdauer geht, da sonst die Wirtschaftlichkeit i. d. R. nicht gegeben ist (Genoese/Wietschel 2011). Der Effekt ist wegen der in Fahrzeugbatterien speicherbaren Energiemenge, welche verglichen mit anderen chemischen Stromspeichern recht gering ist, begrenzt. Bei einer angenommenen nutzbaren Batteriekapazität von 10 kWh/Pkw können 6 Millionen Elektrofahrzeuge (politische Zielmarke für 2030) 0,06 TWh speichern (Dallinger/Wietschel 2012; Wietschel 2012). Dies ist zum Ausgleich von kurzfristigen Schwankungen auf Tagesbasis zwar eine relevante Größenordnung (zum Vergleich beträgt die speicherbare Energiemenge in den bestehenden deutschen Pumpspeicherkraftwerken 0,04 TWh). Auch ist die speicherbare Energiemenge bereits von einigen wenigen Elektrofahrzeugen für das jeweilige örtliche Verteilnetz von Bedeutung. Hier beträgt der künftige Speicherbedarf je nach Studie zwischen 10 bis 1000 kWh.<sup>5</sup> Für die Speicherung von größeren Strommengen über mehrere Tage, beispiels-

<sup>5</sup> Siehe zu dem Speicherbedarf auf Verteilnetzebene Fenn/Metz 2009 und Lödl et al. 2010.

weise aufgrund von Starkwindzeiten oder Windflauten von mehreren Tagen, reicht dies allerdings schon heute bei Weitem nicht aus. Hinsichtlich des künftigen Speicherbedarfs aufgrund der eingeleiteten Energiewende wurde in einigen Studien (z. B. BMU 2010) von mehreren 10 TWh ausgegangen.

In der Summe lässt sich bilanzieren, dass die Elektromobilität bei einer intelligent gesteuerten Ladung zur besseren Integration der erneuerbaren Energien beitragen kann. Allerdings wird auch damit alleine keine signifikante CO<sub>2</sub>-Einsparung in den nächsten Jahren erreicht. Diese ergibt sich beim Ansatz des Grenzkostenkraftwerkes erst dann, wenn sowohl eine intelligent gesteuerte Ladung als auch eine Deckung des Fahrstromes aus zusätzlichen erneuerbaren Energien sichergestellt werden.

Wie die verschiedenen Ansätze zur Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Elektromobilität gezeigt haben, ergibt sich in Abhängigkeit des gewählten Ansatzes eine stark unterschiedliche Bewertung der kurzfristigen Auswirkungen der Elektromobilität auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen in den nächsten Jahren. Dabei unterstützen die Ergebnisse aller Ansätze die Forderung nach Deckung des Fahrstromes rein aus zusätzlichen erneuerbaren Energien zur Reduktion der THG-Emissionen. Wenn die geplante Energiewende in Richtung erneuerbare Energien gelingt, dann wirkt sich die Elektromobilität unabhängig vom gewählten Bewertungsansatz nach 2020 auf alle Fälle positiv auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus. Dabei ist der Effekt von Bedeutung, dass anders als konventionelle Fahrzeuge Elektrofahrzeuge im Bestand durch die Änderungen in der Stromversorgung unmittelbar profitieren.

Die hohe Bedeutung der Elektromobilität für CO<sub>2</sub>-Einsparungen und Erreichung langfristiger ambitionierter Klimaschutzziele wird auch in internationalen Studien gesehen (Kap. II.2; IEA 2010). Auch in den Berechnungen für das deutsche Energiekonzept der jetzigen Bundesregierung (BMW/BMU 2010)) spielt die Elektromobilität zur Erreichung der deutschen Klimaschutzziele (bis 2050 Senkung der THG-Emissionen um mindestens 80 Prozent) eine entscheidende Rolle (Prognos et al. 2010).

### 1.3.3 THG-Emissionen aus Herstellung und Entsorgung

In den im vorherigen Kapitel dargestellten WTW-Analysen verschiedener Antriebstechnologien und Fahrzeugtypen werden die THG-Emissionen von der Bereitstellung von Kraftstoffen und der Stromerzeugung bis zu deren Nutzung im Fahrzeug betrachtet. Dabei werden die Produktion und Entsorgung von Fahrzeugen außer Acht gelassen. Im Folgenden werden daher diese Prozesse bzgl. der entstehenden THG-Emissionen betrachtet. Deren Höhe hängt von Art und Menge der eingesetzten Energie, der Effizienz des Produktionsprozesses sowie von der THG-Bilanz der eingesetzten Vorprodukte ab. Im Rahmen dieses Berichts wurden die grundlegenden Prozessschritte für Mittelklasse-Pkw (C-Klasse) auf Grundlage von Gauch et al. (2009) und Sørensen (2004) durch Bünger/Weindorf (2011) zusammengestellt (Tab. III.2).

Da in dieser Größenklasse BEV bis 2030 mit heutigen Batterietechnologien (Lithium-Ionen) nicht wirtschaftlich einsetzbar sind und daher als mengenmäßig nicht relevant eingestuft werden, beschränkt sich der Vergleich auf PHEV gegenüber konventionellen Fahrzeugen. Die Berechnung kilometrischer THG-Emissionen beruht auf einer Jahresfahrleistung von 15 000 km und einer Nutzungsdauer von 12 Jahren. Die Darstellung beschränkt sich auf den Zeithorizont 2030.

Die Daten für die Fahrzeughülle aller Fahrzeuge sowie für den Antrieb konventioneller Fahrzeuge wurde Gauch et al. (2009) entnommen. Die gleiche Quelle liefert einen Richtwert von 5,6 kg CO<sub>2</sub>-Äq./kg Batteriemasse, welcher mit Energiedichten von 0,088 kg/kWh (PHEV) und 0,075 kg/kWh (HEV) und Batteriekapazitäten von 10 kWh (PHEV) und 1,6 kWh (HEV) zur Ermittlung der Emissionen herangezogen wurde. Die gesamten THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung und -entsorgung liegen nach Bünger/Weindorf (2011) bei PHEV um etwa 40 Prozent höher als bei konventionellen Fahrzeugen, wobei die größte Differenz im Bereich des Antriebs durch den Energiebedarf bei der Batterieherstellung besteht. Bei den hier betrachteten PHEV spielt die relativ kleine 10-kWh-Batterie nur eine untergeordnete Rolle.

Tabelle III.2

### THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung und -entsorgung Perspektive 2030

Pkw Mittel- klasse	kg CO <sub>2</sub> -Äq. pro Fahrzeug				gesamt	g CO <sub>2</sub> -Äq./ Fzkm
	Pkw ohne Motor und Antrieb	Motor und An- trieb	Batterie und Leistungs- elektronik			
Benzin/ Diesel	3.737	1.461	0		5.198	28,9
HEV*	3.737	2.843	119		6.699	37,0
PHEV**	3.737	2.843	634		7.214	41,0

\* klassischer Dieselhybrid ohne Direktaufladung, 1,6-kWh-Batterie;

\*\* Klassifizierung in der Originalquelle als REEV mit 10-kWh-Batterie

Quelle: nach Bünger/Weindorf 2011

Nach dem UMBReLa-Projekt (Helms et al. 2011b) liegen die THG-Emissionen aus Herstellung und Entsorgung sowohl für konventionelle Fahrzeuge (etwa 4 000 kg CO<sub>2</sub>-Äq.) als auch für PHEV mit einer 12,5-kWh-Batterie (5 500 kg CO<sub>2</sub>-Äq.) deutlich niedriger als die von Bün-ger/Weindorf (2011) ermittelten Emissionen. Helms et al. (2011a u. 2011b) betrachten auch BEV (25-kWh-Batterie) der Mittelklasse, welche mit 7 000 kg CO<sub>2</sub>-Äq. deutlich höhere THG-Emissionen aus Herstellung und Entsorgung aufweisen (Kap. III.1.3.4). Dies ist durch ihre größere Batterie bedingt. Für BEV der Miniklasse reichen jedoch auch kleinere 10-kWh-Batterien aus, deren THG-Emissionen aus Produktion und Entsorgung unter der An-nahme, dass die Batterie nicht gewechselt werden muss, weniger ins Gewicht fallen.

### 1.3.4 Lebenszyklusanalysen

Ein Vergleich von BEV und PHEV mit konventionellen Fahrzeugen bezüglich der THG-Emissionen über den Le-benszyklus, d. h. aus der Fahrzeugherstellung, der Bereit-stellung von Kraftstoffen und Strom sowie der Fahrzeug-nutzung, ist in Abbildung III.8 dargestellt. Betrachtet wurden die bereits in Kapitel III.1.1 eingeführten Studien, deren Annahmen zu Nutzungsdauer, Jahresfahrleistun-gen, Batteriegrößen und elektrischem Fahranteil von PHEV im Folgenden beschrieben werden:

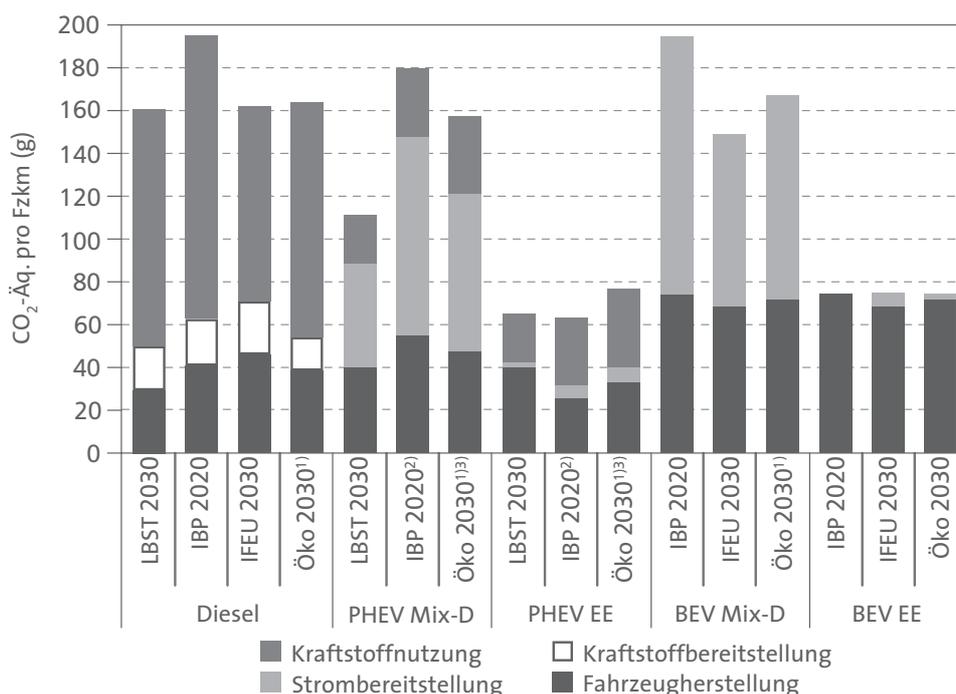
- Bün-ger/Weindorf (2011) (LBST): Bün-ger/Weindorf (2011) schätzten die THG-Emissionen während des Fahrzeuglebenszyklus für 2030 mit einer Jahresfahr-leistung von 12 500 km und 12 Jahren Nutzungsdauer bzw. einer Lebensfahrleistung von 150 000 km. Für PHEV wurde ein elektrischer Fahranteil von

80 Prozent unterstellt. BEV wurden in der Analyse nicht betrachtet, da sie bis 2030 in der Fahrzeugklasse Mittel mit heutigen Batterietechnologien (Lithium-Ionen) als nicht wirtschaftlich einsetzbar und somit als mengenmäßig nicht relevant eingestuft werden.

- OPTUM-Projekt (Hacker et al. 2011; Zimmer et al. 2011) (Öko/ISOE): Das Projekt OPTUM lieferte Schätzungen für 2030 für BEV, PHEV und HEV. Die betrachtete Jahresfahrleistung liegt bei 13 672 km bzw. die Gesamtfahrleistung über eine Nutzungsdauer von 12 Jahren bei 164 000 km. Mit 67 Prozent elektri-schen Fahranteils von PHEV wurden diese eher kon-servativ betrachtet.
- UMBReLA-Projekt (Helms et al. 2011a u. 2011b) (IFEU): Das Projekt UMBReLA lieferte Schätzungen für 2030. Untersucht wurden verschiedene Fahrzyklen und Nutzungsarten im privaten und kommerziellen Bereich für BEV und PHEV. Hier wurden eine Le-bensfahrleistung von 150 000 km und ein elektrischer Fahranteil von PHEV von 70 Prozent dargestellt.
- FSEM (Fraunhofer ISI et al. 2011; Held/Baumann 2011) (IBP): Die Analysen im Rahmen von FSEM lie-ferten Schätzungen für 2020. Angenommen wurden eine Lebensdauer von 8 Jahren für die Batterie und von 12 Jahren für alle übrigen Komponenten mit einer Lebensfahrleistung von 171 600 km. Für PHEV wurde ein elektrischer Fahranteil von 80 Prozent un-terstellt. Mit dem deutlich kürzeren Zeithorizont und den konservativen Annahmen zur Batterielebensdauer waren die Ergebnisse der Studie nur bedingt mit den übrigen Quellen vergleichbar.

Abbildung III.8

### Vergleich aktueller Studien zu Lebenszyklus-THG-Emissionen von Pkw der Mittelklasse für den Zeitraum 2020 bis 2030



Eigene Darstellung mit Daten aus Bün-ger/Weindorf 2011; Held/Baumann 2011; Helms et al. 2011b und Zimmer et al. 2011

Der Vergleich bezieht sich auf Fahrzeuge der Größenklasse Mittel. Während Bünger/Weindorf (2011) BEV in dieser Größenklasse nicht betrachteten, da sie mit den heute verwendeten Batterietechnologien wahrscheinlich nicht wirtschaftlich einsetzbar sind, wurden THG-Emissionen für BEV der Größenklasse Mittel aus den drei anderen Studien geschätzt. Da hier neue Batterietechnologien wie Lithium-Schwefel-, Lithium-Luft- oder Metall-Luft-Batterien der 4. Generation (Kap. II.1.1.1) zum Einsatz kommen müssen, hierfür aber derzeit keine Daten zur Lebenszyklusanalyse vorliegen, sind die Ergebnisse lediglich als Tendenzangabe zu interpretieren. Insgesamt ergeben sich die höchsten THG-Emissionen in Held/Baumann (2011), wobei sich diese auf 2020 beziehen und entsprechend ein weiterer technologischer Fortschritt bis 2030 unterstellt werden darf. Der Vergleich veranschaulicht jedoch die Sensitivität der ökologischen Bewertung bezüglich der unterstellten Entwicklung von Batterie-Lebensdauern und Energiespeicherdichten. Insofern kann das Szenario 2020 durch Held/Baumann (2011) als konservative Schätzung der Entwicklung der Klimabilanz im motorisierten Individualverkehr betrachtet werden.

Der Vergleich zeigt, dass selbst bei den bis 2030 anzunehmenden technologischen Entwicklungen die Klimabilanz von BEV bei Ladung mit dem deutschen Strommix nicht unbedingt günstiger ausfällt als diejenige von Diesel-Pkw. Hierbei ist zu beachten, dass durch die EU-Flottengrenzwerte von 95 g CO<sub>2</sub>/km bis 2020 auch die konventionellen Fahrzeuge deutlich sparsamer werden. Interessant ist auch die große Diskrepanz innerhalb der Segmente, welche insbesondere für PHEV eine Abweichung der THG-Emissionen der Strom- und Kraftstoffherstellung um mehr als 100 Prozent zwischen den entsprechenden Ergebnissen für 2030 aus dem von Bünger/Weindorf (2011) angefertigten Gutachten und den FSEM-Ergebnissen für 2020 (Held/Baumann 2011) zeigen. Dies lässt sich durch den höheren Anteil erneuerbarer Energien im Strommix 2030, welcher in Bünger/Weindorf (2011) angenommen wurde, gegenüber dem in Held/Baumann (2011) angenommenen Strommix 2020 sowie durch Annahmen zum Fahrzyklus (Stadt/außerorts) und zum elektrischen Fahranteil erklären. Nach dem Energieszenario 2011 des BMWi (2011) soll die THG-Intensität des Stroms pro kWh zwischen 2015 und 2030 von 563 g/kWh auf 260 g/kWh fast halbiert werden. Insgesamt stellt sich die THG-Bilanz von PHEV jedoch ähnlich dar wie diejenige von BEV. Wenn erneuerbare Energien genutzt werden, können PHEV aufgrund ihrer prinzipiell unlimitierten Reichweite somit eine interessante Übergangstechnologie mit Vorteilen bei der THG-Bilanz im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen darstellen (Kap. III.2.1).

Wie in den Unterschieden zwischen den Studien bereits deutlich wird, sind die Ergebnisse für die THG-Bilanz von Elektro- und konventionellen Fahrzeugen von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Neben Jahresfahrleistung und Strommix haben Fahrzyklus (Stadt/außerorts), elektrischer Fahranteil (bei PHEV), Batterie-Lebensdauer sowie Produktion und Entsorgung einen Einfluss. Die Ef-

fekte dieser Faktoren werden im Folgenden kurz beschrieben (Helms et al. 2011b):

- *Fahrleistung und Fahrzyklus:* je höher die Jahresfahrleistung, desto geringer fallen die fixen THG-Emissionen aus der Fahrzeugherstellung ins Gewicht. Bei PHEV erhöht sich jedoch auch die mit dem Verbrennungsantrieb erbrachte Fahrleistung, sodass ihre Lebenszyklusemissionen insgesamt steigen. Neben der Jahreskilometerleistung werden die Emissionen entscheidend vom Fahrzyklus, d. h. vom Geschwindigkeitsprofil geprägt. Durch den großen Anteil von Start- und Stopp-Vorgängen haben BEV innerstädtisch selbst beim aktuellen Strommix einen Vorteil bei den THG-Emissionen, während konventionelle Fahrzeuge auf langen Strecken vergleichsweise effizient betrieben werden können. Die höheren THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung und Entsorgung werden dabei bei Nutzung erneuerbarer Energien bereits bei relativ geringen Fahrleistungen kompensiert: 2015 liegen die entsprechenden Mindestfahrleistungen für BEV bei Ladung mit Strom aus erneuerbaren Energien bei etwa 3 000 km und um 10 000 km bei Ladung mit dem allgemeinen Strommix (Abb. III.9). Die durchschnittliche städtische Pkw-Fahrleistung liegt mit knapp unter 5 000 km zwischen diesen Werten, womit nur bei Nutzung erneuerbarer Energien ein rein städtischer Betrieb von BEV (mit durchschnittlichen Jahresfahrleistungen) aus Klimagründen sinnvoll erscheint. Eine Ausnahme stellt der städtische Wirtschaftsverkehr etwa durch Lieferdienste oder Taxiunternehmen dar, bei dem wesentlich höhere Fahrleistungen anfallen (Helms et al. 2011b).
- *Strommix:* Die Bedeutung des Strommix für den Betrieb von Elektrofahrzeugen sowie deren Produktion wurde bereits in Kapitel III.1.3.4 diskutiert. Der dargestellte Vergleich in den Abbildungen III.8 und III.9 verdeutlicht den entscheidenden Effekt des gewählten Ladestroms für die Klimabilanz von PHEV und BEV.
- *Batterie-Lebensdauer sowie Produktion und Entsorgung der Batterie:* Unterschreitet die Lebensdauer der Batterie die Fahrzeugnutzungsdauer, muss die Batterie ersetzt werden. Neben zusätzlichen Kosten für den Fahrzeugbetreiber bedeutet dies, dass die Effekte auf Klima und Umwelt während des Fahrzeuglebenszyklus um die anteilige Nutzungsdauer der Austauschbatterie zunehmen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bis 2020 die Zyklenfestigkeit der Batterien eine Nutzung über die gesamte Fahrzeuglebensspanne ermöglicht (Fraunhofer ISI et al. 2011). Dabei spielen für den Einfluss der Batterie auf die Luftschadstoff- und THG-Bilanz von Elektrofahrzeugen Produktion und Entsorgung eine wesentliche Rolle. Dazu gehören Förder- und Abbauverfahren in den Herkunftsländern der Rohstoffe, Produktionsverfahren sowie Optionen des Recycling. Die Bilanzierung sowohl der Produktions- als auch der Entsorgungsprozesse ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass in den kommenden Jahrzehnten effizientere Produktions-

verfahren sowohl den Materialeinsatz als auch dessen Verarbeitung und Recyclingquoten positiv beeinflussen werden und damit die fixen Emissionen aus Fahrzeugherstellung und Entsorgung sinken werden.

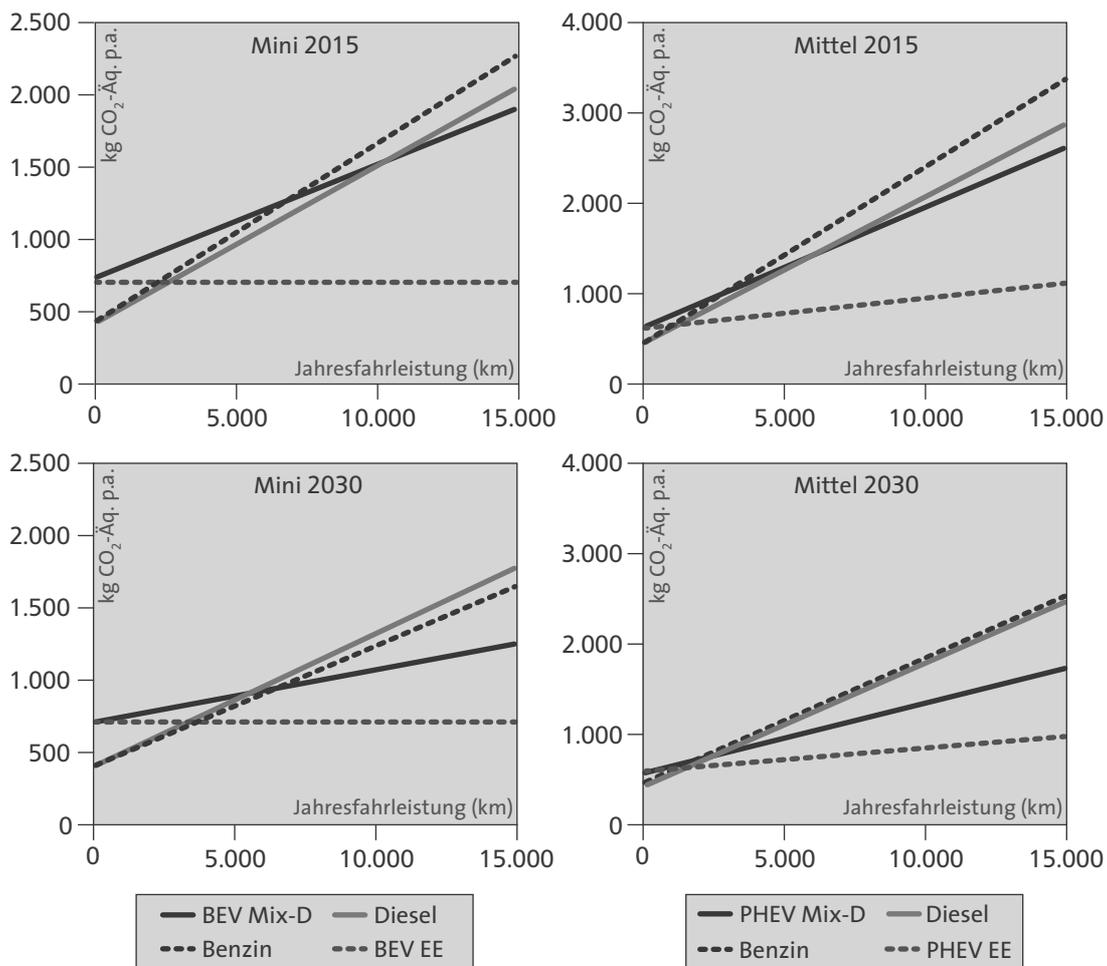
Aufgrund der zusätzlichen THG-Emissionen aus Herstellung und Entsorgung, welche Elektrofahrzeuge mitbringen, stellt sich die Frage, bei welcher Fahrleistung sich eine positive THG-Bilanz einstellt. Nach Bünger/Weindorf (2011) ist sowohl im Referenzjahr 2015 wie auch 2030 für PHEV bei einer Nutzungsdauer von 12 Jahren und bei Ladung mit erneuerbaren Energien (EE) eine minimale Jahresfahrleistung von unter 2 500 km nötig, damit die gegenüber konventionellen Pkw höheren Emissionen von etwa 2 t CO<sub>2</sub>-Äq. aus Herstellung und Entsorgung ausgeglichen werden und PHEV

eine bessere THG-Bilanz aufzuweisen beginnen als konventionelle Fahrzeuge (Abb. III.9).

BEV bringen einen etwas größeren ökologischen Rucksack an THG-Emissionen als PHEV mit sich. Trotzdem weisen auch BEV bei Ladung mit erneuerbaren Energien bereits bei geringen Jahresfahrleistungen von deutlich unter 5 000 km eine positive THG-Bilanz auf. Diese Werte liegen deutlich unter der durchschnittlichen Pkw-Jahresfahrleistung von etwa 15 000 km (BMVBS 2011). Im Referenzjahr 2030 zeigen sich selbst bei Verwendung des deutschen Strommix positive THG-Bilanzen von BEV und PHEV. Demnach ist die Jahresfahrleistung also keine nennenswerte Voraussetzung für eine positive THG-Bilanz von Elektrofahrzeugen, insbesondere wenn eine Nutzung von erneuerbaren Energien sichergestellt wird.

Abbildung III.9

**THG-Emissionen pro Jahr von PHEV, BEV und konventionellen Pkw 2015 und 2030 in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung (Fahrzeugherstellung/-entsorgung und WTW-Kette)**



Eigene Darstellung mit Daten aus Bünger/Weindorf 2011

**1.3.5 Exkurs: Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV)**

FCEV werden häufig als Alternative zu Elektrofahrzeugen (BEV und PHEV) betrachtet. Im öffentlichen Nahverkehr werden FCEV-Busse bereits seit vielen Jahren getestet, u. a. im Rahmen des HyFLEET:CUTE-Projekts (Kentzler 2009) auf europäischer Ebene. Obwohl das Projekt die Funktionsfähigkeit der Technologie nachweisen konnte, stellen Kosten, Komplexität und die Zuverlässigkeit noch erhebliche Herausforderungen dar.

Bünger/Weindorf (2011) verglichen THG-, Energie- und Kostenbilanz über den Lebenszyklus (inklusive Fahrzeug- und Kraftstoffproduktion) von FCEV mit denen von PHEV und konventionellen Fahrzeugen. Dabei wurden für FCEV verschiedene Technologien der Wasserstoffherzeugung berücksichtigt. Wasserstoff lässt sich mittels Elektrolyse zentral oder in Tankstellen erzeugen und unter Hochdruck oder langsam in das Fahrzeug einleiten. Er kann aber auch in Tankstellen aus Erdgas gewonnen werden. Da die THG-Bilanzen der verschiedenen Elektrolyseverfahren relativ ähnlich sind, werden diese im Folgenden per Mittelwert zusammengefasst und der Reformierung aus Erdgas gegenüber gestellt.

Die Schätzungen in Abbildung III.10 gelten für Fahrzeuge der Mittelklasse mit einer Jahresfahrleistung von 15 000 km, einer Lebensdauer von 12 Jahren und einem elektrischen Fahranteil der PHEV von 80 Prozent. Für die Wasserstoffbereitstellung werden die THG-Emissionen der Herstellung durch Elektrolyse (zentral oder vor Ort) oder durch Erdgas und dessen Transport, Komprimierung

und Speicherung berücksichtigt. Die spezifischen THG-Emissionen je kg Wasserstoff wurden in Bünger/Weindorf (2011) aus Angaben der Industrie abgeleitet.

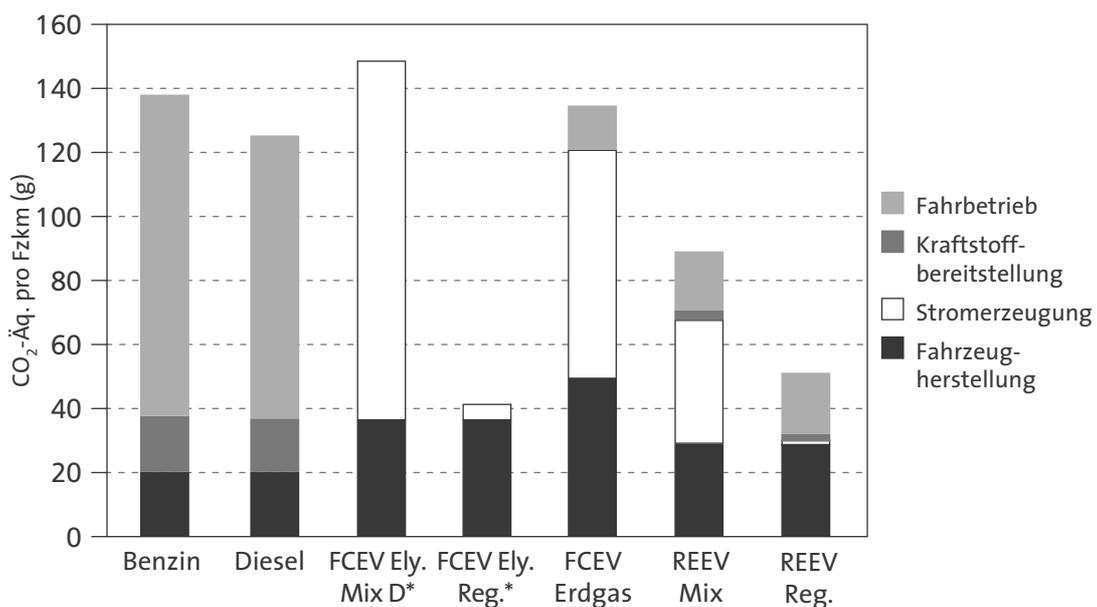
Die Ergebnisse für das Jahr 2030 zeigen, dass der Betrieb von FCEV mit Wasserstoff, welcher entweder mittels des deutschen Strommix durch Elektrolyse erzeugt oder durch Erdgas reformiert wurde, auch 2030 keine Vorteile bei den THG-Emissionen über den Lebenszyklus im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen aufweist. In ersterem Fall liegen die Emissionen i sogar über denen von Benzinfahrzeugen. Durch die ausschließliche Verwendung zusätzlicher erneuerbarer Energiequellen zur Wasserstoffproduktion können die THG-Emissionen von FCEV jedoch auf das Niveau von BEV und deutlich unter die Emissionen von PHEV gesenkt werden. Unter der Maßgabe, dass BEV im mittleren und oberen Fahrzeugsegment nicht wirtschaftlich sind, bieten FCEV somit eine diskutabile Alternative.

**1.4 Energieverbrauch**

In Zeiten knapper werdender fossiler Energiereserven spielt der Primärenergiebedarf des Verkehrs aus ökonomischer wie ökologischer Sicht eine wichtige Rolle. Es ist davon auszugehen, dass die Umweltbelastung durch die Förderung schwer zugänglicher fossiler Energiereserven wie das Auswaschen von Ölsanden oder Tiefseebohrungen in den kommenden Jahrzehnten zu erheblichen Umweltbelastungen und steigenden Rohölkosten führen wird. Indizien hierfür sind die Havarie der Tiefsee-Bohrinsel Deepwater Horizon im Golf von Mexico im April

Abbildung III.10

**Vergleich THG-Emissionen konventioneller Fahrzeuge, PHEV und FCEV 2030**



\* Mittelwert über alternative Varianten der Elektrolyse

Eigene Darstellung mit Daten aus Bünger/Weindorf 2011

2010 oder die Ölpest im Nigerdelta im Mai 2010. Weiterhin sind auch die ökologischen Folgen der Stromherstellung, insbesondere über fossile Energieträger, beispielsweise in Form undichter Gaspipelines, dem Tagebau von Kohle, regelmäßiger Minenunfälle weltweit und die Risiken der nuklearen Stromerzeugung kritisch zu betrachten. Schließlich müssen bei der Berücksichtigung erneuerbarer Energien auch Umweltbelastungen durch einen raschen Ausbau erneuerbarer Energien berücksichtigt werden, wie z. B. eine Konkurrenz in der Flächennutzung beim Anbau von Energiepflanzen, ökologische Folgen beim Abbau von Rohstoffen für die Produktion von Solarzellen, die Lärmwirkung von Onshorewindkraftanlagen oder der Flächenbedarf neuer Stromfernübertragungsleitungen.

**1.4.1 Spezifischer Energieverbrauch**

Abbildung III.11 zeigt für die Pkw-Klassen Mini (Benzin, Diesel und BEV) sowie Mittel (Benzin, Diesel, PHEV und FCEV) die THG-Emissionen der Bereitstellung und der Nutzung elektrischer und fossiler Energie (WTW). Die Emissionen wurden über den Primärenergiebedarf und die spezifischen THG-Emissionen der Energieträger für das Energieszenario 2011 der Bundesregierung für das Jahr 2030 (Kap. II.4; Tab. II.12) für das Szenario Mix-D ermittelt. Im Szenario Erneuerbare Energien (EE) wurden keine THG-Emissionen der Stromerzeugung unterstellt. Der Energiebedarf und die spezifischen THG-Emissionen für Produktion, Kompression/Verflüssigung, Transport und Lagerung von Wasserstoff für FCEV wurden den Pfadanalysen in Bünger/Weindorf (2011) entnommen. Es werden folgende Varianten der Wasserstoffbereitstellung betrachtet:

- *Elektrolyse*: zentral und Lieferung zu Tankstellen oder direkt vor Ort. Bei der zentralen Elektrolyse kann der Wasserstoff entweder als komprimiertes Gas oder verflüssigt per Tanklastzug, oder als Gas per Pipeline zu den Tankstellen geliefert werden. Da die WTW-THG-Bilanzen dieser Verfahren innerhalb der betrachteten Energieszenarien relativ ähnlich ausfallen, werden diese in Abbildung III.11 zusammengefasst.
- *Gas*: Erzeugung von Wasserstoff aus Erdgas (deutscher Gasmix), Kompression und Transport an die Tankstellen per Lkw.

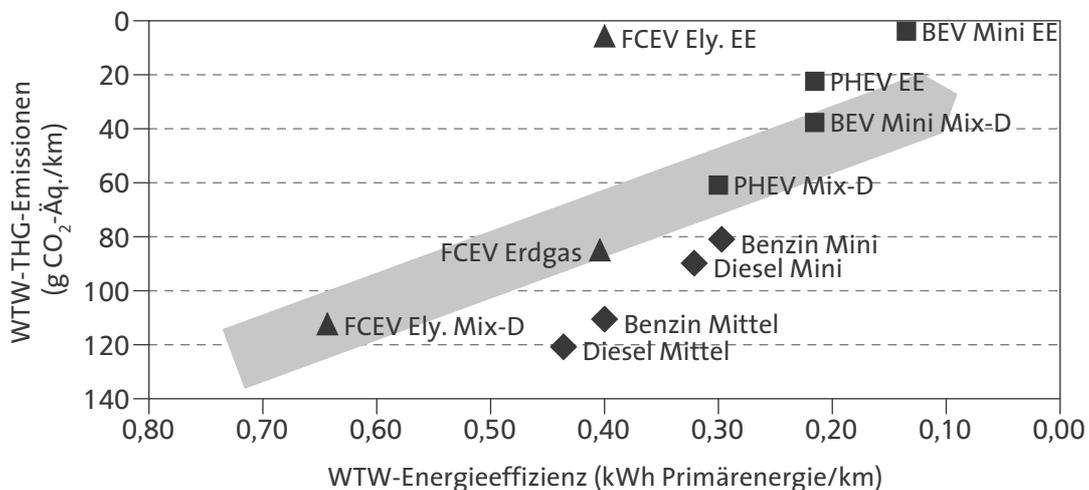
Die absteigende Achsenskalierung wurde so gewählt, dass Energie- und Klimaeffizienz ansteigend dargestellt werden und sich die favorisierten Varianten also im rechten oberen Diagrammbereich befinden.

In der Darstellung korrelieren die Klima- und die Primärenergieeffizienz über alle Fahrzeugkonzepte recht eng. Aus der Perspektive 2030 schneidet die Gruppe der Elektrofahrzeuge sowohl bezüglich der THG-Emissionen als auch der Energieeffizienz am günstigsten ab. Dies gilt ohne Berücksichtigung der Emissionen von Herstellung und Entsorgung für die Ladung mit dem deutschen Strommix 2030 (Mix-D). Innerhalb der Energieszenarien sind dabei jeweils die BEV in beiden Belangen den PHEV überlegen. Im Einzelfall entscheidet jedoch, wie bei der Wirtschaftlichkeit, den CO<sub>2</sub>- und Schadstoffemissionen, die Jahresfahrleistung, der Fahrzyklus und der elektrische Fahranteil bei PHEV über die energetische Vorteilhaftigkeit der Fahrzeugkonzepte (Kap. III.1.3.4; Helms et al. 2011b).

Durch die energieintensive Herstellung, Verteilung und Speicherung von Wasserstoff liegt die Primärenergieeffizienz der FCEV generell unter der Effizienz von BEV

Abbildung III.11

**Energie- und Klimaeffizienz alternativer Antriebstechnologien, WTW-Analyse 2030 für Pkw-Klassen Mini und Mittel**



Eigene Darstellung mit Daten aus Bünger/Weindorf 2011

und PHEV und übersteigt die Effizienz von konventionellen Fahrzeugen nur bei Elektrolyse des Wasserstoffs mit erneuerbaren Energien (FCEV Ely. EE) geringfügig. Auch die Klimabilanz von FCEV ist nur in diesem Fall besser als bei konventionellen Fahrzeugen. Die Brennstoffzellentechnik erscheint entsprechend innerhalb des gewählten Zeithorizonts nur in solchen Anwendungsfeldern sinnvoll, in denen große Reichweiten und eine schnelle Betankung notwendig sind.

Unter den konventionellen Fahrzeugen fallen Benzinfahrzeuge 2030 hinsichtlich ihrer Energie- und Klimateffizienz besser aus als Dieselfahrzeuge. Dies ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch umgekehrt und ändert sich entsprechend den Analysen in Bünger/Weindorf (2011), da ein größeres Verbrauchssenkungspotenzial für Ottomotoren (34 Prozent zwischen 2015 und 2030) gegenüber Dieselmotoren (17 Prozent im gleichen Zeitraum) unterstellt wird.

#### 1.4.2 Gesamtenergiebedarf

Interessant ist weiterhin die Frage, wie sich die Elektromobilität auf die Stromnachfrage in Deutschland auswirkt. Die Analysen beschränken sich auf BEV und PHEV, da für Wasserstoff u. a. die verschiedenen Herkunftspfade der Erzeugung festgelegt werden müssten, was den Rahmen dieses Berichts sprengen würde.

Das MarkthochlaufszENARIO aus Kapitel II.2.7 und das gewählte Referenzenergieszenario aus Kapitel II.4 bieten – wie für die Analysen der THG-Emissionen der Elektromobilität in Gesamtszenarien für Deutschland (Kap. III.1.3.2) – die Grundlage für die Analyse von energiewirtschaftlichen Aspekten. Dabei sind neben dem Markthochlauf für die Fahrzeuge in den unterschiedlichen Segmenten (Kap. II.2.7, Tab. II.8) Annahmen zu den Fahrzeugverbräuchen und den jährlichen Fahrleistungen zu treffen (Kap. III.1.3.4; Bünger/Weindorf 2011). Die wichtigsten Annahmen für diese Berechnung sind in Tabelle III.3 dargestellt.

Die Ergebnisse sind in Abbildung III.12 dargestellt. 2020 beträgt die durch die Elektromobilität bedingte zusätzliche Stromnachfrage 2 TWh und 2030 13,7 TWh. Verglichen mit der Endstromnachfrage aus den Energieszenarien 2011 sind dies 2020 0,4 Prozent und 2030 3 Prozent der gesamten Stromnachfrage. Die Elektromobilität hat somit bis 2030 einen sehr geringen Effekt auf die Stromnachfrage in Deutschland, wenn man das politische Ziel von 6 Millionen Elektrofahrzeugen bis dahin unterstellt.

Die Relevanz der Elektromobilität für die Erreichung der Energieeinsparziele im Verkehrsbereich in Deutschland, die nach dem Energiekonzept der jetzigen Bundesregierung (BMWi/BMU 2010) bei einer Reduzierung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor bis 2050 bei rund 40 Prozent liegt, wird von Prognos et al. (2010) aufgezeigt.

Aus dem Ersatz von konventionellen Antrieben durch Elektrofahrzeuge (BEV und PHEV) ergeben sich neben einer zusätzlichen Nachfrage nach elektrischer Energie auch Einsparungen bei Diesel und Benz in, sowie den dafür notwendigen Rohölmengen. Die Energieeinsparungen (Verbrauch der konventionellen Fahrzeuge, die durch Elektrofahrzeuge ersetzt werden, abzüglich des Verbrauchs der Elektrofahrzeuge) belaufen sich unter Annahme des Markthochlaufszenarios auf etwa 163 000 t Rohöl im Jahr 2015, 439 000 t Rohöl im Jahr 2020 und 2,1 Mio. t Rohöl im Jahr 2030. Abbildung III.13 zeigt die entsprechenden Einsparungen, welche sich im Zeitraum von 2015 bis 2030 durch den Ersatz von konventionellen Antrieben durch Elektrofahrzeuge ergeben.

Erklärtes Ziel der Bundesregierung (2011) ist es, den zusätzlichen Bedarf an elektrischer Energie durch die Elektromobilität aus erneuerbaren Energien zu decken. Vorrangig soll 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 2010 bereits 104 TWh erneuerbarer Elektrizität pro-

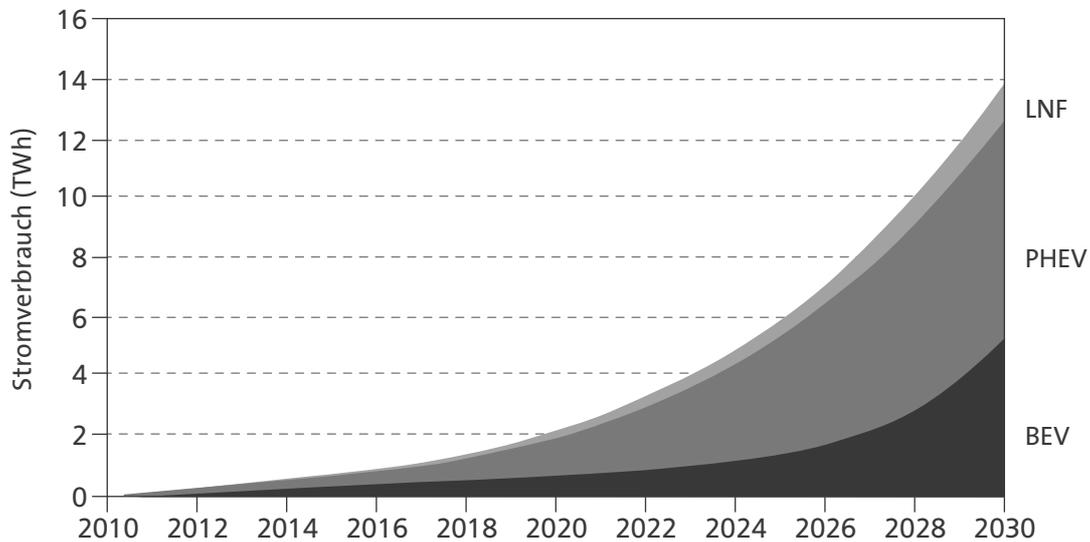
Tabelle III.3

#### Wichtigste fahrzeugspezifische Daten zur Ermittlung des Gesamtenergiebedarfs bis 2030

Fahrzeugtyp	Fahrleistung (km)		Verbrauch kWh/km bei elektrischem Betrieb		elektrischer Fahranteil (Prozent)
		pro Jahr	2015	2030	2015/2030
BEV	klein	12.000	0,146	0,125	100
	mittel	15.000	0,187	0,160	100
PHEV	mittel	15.000	0,187	0,160	80
	groß	25.000	0,230	0,196	70
PHEV	LNF	22.500	0,299	0,263	70

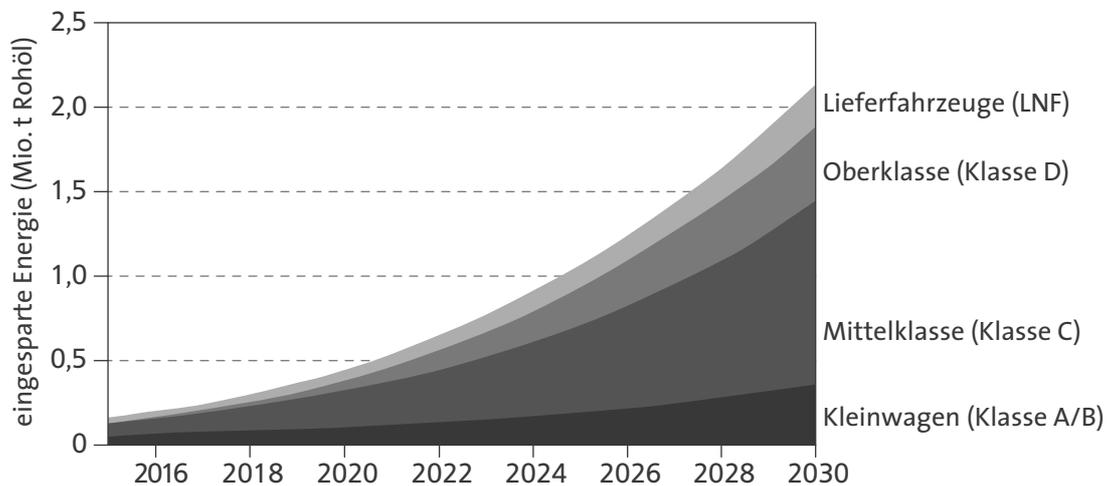
Quelle: Bünger/Weindorf 2011; ergänzt um eigene Annahmen

Abbildung III.12

**Gesamter Stromverbrauch durch BEV und PHEV bis 2030 (WTW-Analyse)**

Eigene Berechnung

Abbildung III.13

**Energieeinsparungen durch Elektrofahrzeuge bis 2030 in t Rohöl  
(exklusive Energieverbrauch der Elektrofahrzeuge)**

Eigene Berechnung

duziert und 2011 122 TWh (BMU 2012). Mit der gerade beschlossenen konsolidierten Fassung des Gesetzes für den Vorrang erneuerbarer Energien wird in Deutschland ein Anteil von mindestens 35 Prozent an erneuerbaren Energien an der Stromversorgung bis spätestens 2020 und 80 Prozent spätestens bis 2050 angestrebt (Bundesregierung 2012). Diese Zahlen zusammen mit dem Stromverbrauch von 1 Million Elektrofahrzeugen (2 TWh) weisen darauf hin, dass 2020 zusätzliche Mengen an erneuerbarem Strom durch Elektromobilität von deutlich unter

2 Prozent nachgefragt werden. Dabei wird der etwas höhere Anteil an erneuerbarem Strom im Energiemix die Strompreise wahrscheinlich etwas weiter nach oben treiben, wobei die tatsächliche Preiserhöhung von der Entwicklung der Rahmenbedingungen – etwa der Preisentwicklung der fossilen Energieträger und der Kostendegression der erneuerbaren Energien – abhängt.

Die Forderung, den Fahrstrom aus erneuerbaren Quellen bereitzustellen – zumindest bilanzmäßig –, erscheint so-

mit gut erfüllbar. Vergleicht man weiterhin den Kosteneinfluss erneuerbarer Energien aus Windkraft anstelle des Strommix, so sind die zusätzlichen Kosten im Vergleich zu den Gesamtkosten für die Mobilität gering. Pro Kilometer macht dies bei heutigen deutschen Verhältnissen im Energiesystem und einem Mittelklassefahrzeug lediglich eine Preisdifferenz von ca. 0,004 Euro/km aus, bei Gesamtkosten von ca. 0,30 Euro/km für Elektrofahrzeuge (Bünger/Weindorf 2011). Zu beachten ist weiterhin, dass auch die derzeitigen Kunden und Kaufinteressierten den ökologischen Nutzen der Elektrofahrzeuge, der in sehr hohem Maß auf der Nutzung von erneuerbarem Strom beruht, in ihrer Kaufentscheidung sehr hoch gewichten (Kap. III.3.1)

## 1.5 Externe Kosten

Die Wirkung des Verkehrs auf Mensch und Umwelt lässt sich neben den bisher beschriebenen physikalischen Effekten durch verschiedene Bewertungsverfahren monetarisieren, d. h. in Geldeinheiten ausdrücken. In der Regel bestehen die Bewertungsverfahren aus einer Verbindung aus direkten Schadensermittlungen, der Bestimmung von Zahlungsbereitschaften für bessere Lebensverhältnisse oder der Schätzung von Vermeidungskosten zur Erreichung bestimmter Zielwerte. Die Höhe der externen Kosten wird von den betrachteten Belastungen bzw. Effekten, die sich je nach Fahrzeug- und Antriebstechnologie unterscheiden, und von der Verkehrssituation bestimmt. So sind die externen Kosten von Luftverschmutzung und Lärm direkt proportional zur exponierten Bevölkerung, wobei im Fall von Lärm die Kosten pro betroffenen Einwohner nachts deutlich höher sind als am Tag.

Informationen zu externen Kosten bestimmter Fahrzeug- und Antriebsarten können dazu dienen, fiskale Steuerungselemente der Verkehrspolitik zu justieren, um externe Kosten zu internalisieren. Dies dient dazu, dass externe Kosten bei individuellen Entscheidungen zu Fahrzeug- und Verkehrsmittelwahl von den Nutzern besser berücksichtigt werden. Beispielsweise können aufgrund räumlich differenzierter externer Kosten lokale Mautgebühren aus Nachhaltigkeitssicht gerechtfertigt werden. Weist eine alternative Fahrzeug- und Antriebsart ein Potenzial zur Reduktion externer Kosten auf, lässt sich die durch die entsprechend geringeren sozialen und ökologischen Belastungen gerechtfertigte Reduktion der Kfz-Steuer oder die Höhe direkter Kaufanreize bestimmen. Dazu müssen die externen Kosten entsprechend über 1 Jahr oder über die Lebensdauer der Fahrzeuge aggregiert werden.

Im Folgenden werden die möglichen Einsparungen externer Kosten durch den Übergang von konventionellen Pkw zu Elektrofahrzeugen über die Lebensdauer der Fahrzeuge dargestellt. Dabei werden die externen Kosten aus der Nutzung der Fahrzeuge und der Bereitstellung von Kraftstoff und Energie (WTW-Betrachtung) einbezogen. Die im Folgenden dargestellten Analysen vernachlässigen den „ökologischen Rucksack“ durch Produktion des Fahrzeugs und insbesondere des Batteriesystems. Die Be-

deutung dieses „ökologischen Rucksacks“ wird in Kapitel III.1.5.3 separat abgeschätzt und diskutiert.

Die wichtigsten Kategorien externer Kosten des motorisierten Individualverkehrs sind Klimafolgen, Luftverschmutzung, Verkehrssicherheit, Lärm und Staueffekte. Entsprechend der Darstellung in Kapitel III.3.3 heben sich dabei aus jetziger Sicht die positiven Effekte leiserer Fahrzeuge und die damit möglicherweise verbundenen höheren Folgekosten durch Unfälle auf. Daher werden die Unfall- und Lärmkosten im Folgenden nicht weiter betrachtet, obwohl die Unfallkosten die externen Kosten des Pkw-Verkehrs dominieren. Ebenso werden die externen Staukosten im Folgenden nicht berücksichtigt, da sie durch die Art des Fahrzeugantriebs kaum beeinflusst werden.

### 1.5.1 Kosten von Klimafolgen

Klimafolgekosten entstehen durch die Emission von THG bei der Bereitstellung der Kraftstoffe bzw. Energie während der Nutzungsphase der Fahrzeuge sowie der Fahrzeugherstellung und -entsorgung. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um CO<sub>2</sub>-Emissionen. Fahrzeugherstellung und -entsorgung werden in der hier durchgeführten WTW-Analyse der externen Kosten nicht betrachtet. Die THG-Emissionen wirken global, womit für die Folgewirkungen der Ort und die Tageszeit der Emissionen irrelevant sind. Bei der Bewertung der Folgekosten sind somit globale Schäden zu berücksichtigen. Wegen der langen Verweildauer von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre sind diese zudem über einen sehr langen Zeitraum zu betrachten. Ausreichend belastbare Informationen für derartige Schadensschätzungen liegen jedoch nicht vor, weshalb in der Regel auf den Ansatz der Vermeidungskosten zurückgegriffen wird. Zur Quantifizierung dieses Ansatzes wird eine bestimmte Minderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes auf der Grundlage internationaler Vereinbarungen angenommen, um daraus die wirtschaftlichen Kosten, welche zur Erreichung der politischen Ziele anfallen würden, abzuschätzen.

Die Methodenkonvention des Umweltbundesamtes zur Schätzung externer Kosten in den Sektoren Verkehr und Energie (Maibach et al. 2012) leitet einen Wert von 80 Euro/t CO<sub>2</sub>-Äq. ab. Dieser Wert wird sich in Zukunft erhöhen, je weiter die Volkswirtschaften von einem Pfad abweichen, der zu einer Stabilisierung der THG-Konzentration in der Atmosphäre führt, und je mehr kostengünstige Maßnahmen zur Emissionsminderung durchgeführt werden. Den folgenden Analysen liegen insbesondere die in Tabelle III.1 dargestellten Werte der WTW-Emissionen zugrunde. Dabei werden mittels der Referenzjahre 2015 bzw. 2030 sowohl ein kurzfristiger als auch ein langfristiger Zeitrahmen betrachtet. Entsprechend Tabelle III.1 werden zwei Fahrzeugklassen betrachtet, Pkw-Mini und Pkw-Kompakt. Der Vergleich von BEV mit konventionellen Pkw erfolgt für die kleinere Fahrzeugklasse, während in der größeren Fahrzeugklasse der Fokus auf PHEV liegt. Den Berechnungen liegt die Annahme einer jährlichen Fahrleistung von 12 500 km bzw. 15 000 km für

Pkw-Mini bzw. Pkw-Kompakt über eine Nutzungsdauer von 12 Jahren zugrunde.

Für das Referenzjahr 2015 ergibt sich in der Klasse Mini für einen Benzin-Pkw eine Emission über die gesamte Nutzungsdauer von 18,6 t CO<sub>2</sub> oder 1 487 Euro an Klimakosten. Aufgrund ihrer 2015 höheren Effizienz ergeben sich mit 1 304 Euro für Diesel-Pkw geringere Klimakosten. Bei vollständigem Einsatz CO<sub>2</sub>-neutralen Stroms für die Antriebsenergie ließen sich diese Kosten mit BEV vollständig einsparen. Die Verwendung von CO<sub>2</sub>-neutralem Strom führt auch zu einer Reduktion der THG-Emissionen durch Herstellung und Entsorgung der Fahrzeuge; dies kann jedoch wegen der weltweit verteilten Produktionsprozesse nicht vollständig gelingen. Bei Nutzung des deutschen Strommix 2015 betragen die Klimakosten eines BEV dagegen 961 Euro, womit auf dieser Basis lediglich Klimakosten von 526 Euro gegenüber Benzin, und sogar nur 343 Euro gegenüber vergleichbaren Dieselfahrzeugen eingespart werden können.

In der Klasse Kompakt ergeben sich für konventionelle Antriebe zunächst signifikant höhere Klimakosten von 2 800 Euro für Benzin und 2 311 Euro für Diesel-Pkw. Für die in dieser Fahrzeugklasse betrachteten PHEV wird ein elektrischer Fahranteil von 80 Prozent angenommen. Durch den restlichen Fahranteil mit konventionellen Kraftstoffen ergeben sich für PHEV auch bei Ladung mit vollständig erneuerbarer Energie Klimakosten in Höhe von 477 Euro. Im Vergleich zu konventionellen Antrieben können damit Klimakosten von 2 323 bzw. 1 834 Euro gegenüber Benzin- bzw. Diesel-Pkw eingespart werden. Bei Nutzung des deutschen Strommix 2015 ergeben sich für PHEV insgesamt Klimakosten von 1 927 Euro. Die Einsparungen gegenüber konventionellen Antrieben reduzieren sich auf 873 bzw. 384 Euro gegenüber Benzin- bzw. Diesel-Pkw. Diese Einsparungen von Klimakosten durch PHEV liegen damit höher als jene durch BEV in der Fahrzeugklasse Pkw-Mini.

Im Jahr 2030 muss, verglichen mit 2015, von etwa doppelt so hohen Vermeidungskosten je t CO<sub>2</sub>-Äq. ausgegangen werden (Maibach et al. 2012). Andererseits werden konventionelle Fahrzeuge, wie auch Elektrofahrzeuge, voraussichtlich erheblich sparsamer (Tab. III.1). Sowohl in der Mini- als auch in der Kompaktklasse wird unterstellt, dass die WTW-Emissionen von THG zwischen 2015 und 2030 bei Benzin-Pkw um 34 Prozent und bei Diesel-Pkw um 17 Prozent zurückgehen. Im Ergebnis steigen für konventionelle Antriebe die externen Kosten von Klimafolgen. In der Fahrzeugklasse Mini betragen diese 1 787 Euro für Benzin-Pkw und 1 965 Euro für Diesel-Pkw. Wiederum ließen sich mit BEV diese Kosten bei vollständigem Einsatz CO<sub>2</sub>-neutralen Stroms für die Antriebsenergie vollständig einsparen. Bei Verwendung des deutschen Strommix 2030 ergeben sich für BEV gegenüber 2015 um 15 Prozent reduzierte Klimakosten von 817 Euro, was zu Einsparungen von 970 bzw. 1 148 Euro gegenüber Benzin- bzw. Diesel-Pkw führt.

In der Fahrzeugklasse Kompakt wurden für konventionelle Antriebe externe Kosten von Klimafolgen von 3 418 Euro für Benzin-Pkw und 3 479 Euro für Diesel-

Pkw ermittelt. Für PHEV und unter Verwendung von vollständig erneuerbarer Energie werden Klimakosten durch die 20 Prozent Fahranteil mit konventionellen Kraftstoffen verursacht. Entsprechend werden mit 655 Euro Klimakosten ermittelt, welche ca. 40 Prozent höher ausfallen als 2015. Unter Verwendung des deutschen Strommix 2030 werden hingegen mit 1 886 Euro nahezu gleiche Klimakosten wie 2015 ermittelt. Dies ist auf die deutlich niedrigere CO<sub>2</sub>-Intensität des Strommix 2030 zurückzuführen, welche die in 2030 nahezu verdoppelten Vermeidungskosten kompensiert. Unter Verwendung des Strommix 2030 führen PHEV entsprechend zu Einsparungen von 1 533 bzw. 1 594 Euro gegenüber Benzin- bzw. Diesel-Pkw. Mit vollständig erneuerbarer Energie resultieren deutlich höhere Einsparungen von 2 763 bzw. 2 824 Euro gegenüber Benzin- bzw. Diesel-Pkw. Diese Ergebnisse für das Referenzjahr 2030 liegen deutlich über der Differenz der Klimakosten von konventionellen Pkw und Elektrofahrzeugen im Jahr 2015.

### 1.5.2 Kosten der Luftverschmutzung

Die Quantifizierung der Folgekosten der Emission von Luftschadstoffen geht von einem Durchschnittswert für Pkw im deutschen Flottenmix von 0,62 Euro/100 km für Benzinfahrzeuge und 1,26 Euro/100 km für Dieselfahrzeuge aus (CE Delft et al. 2011). Leitschadstoffe sind dabei Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und Partikelemissionen (Feinstaub). Diese werden nach Maibach et al. (2012) mit 21,30 Euro/kg NO<sub>x</sub> und zwischen 19 und 203 Euro/kg Feinstaub für die Jahre 2015 wie auch 2030 bewertet. Mittels der HBEFA-Datenbank lassen sich damit Emissionskosten nach Fahrzeuggrößen und Flottenmix bestimmen.

Wie bei den THG lassen sich direkte Emissionen während des Fahrbetriebs und indirekte Emissionen bei Produktion, Transport und Bereitstellung der Antriebsenergie (WTW) unterscheiden, wobei auch in dieser Untersuchung Herstellung und Entsorgung von Fahrzeugen ausgeklammert wird. Dieser Aspekt der Fahrzeugherstellung wird in Kapitel III.1.5.3 diskutiert. Elektrofahrzeuge werden im lokalen Betrieb als emissionsfrei betrachtet. Die direkten Emissionen von konventionellen Pkw werden in beiden Referenzjahren, 2015 und 2030, anhand der Grenzwerte der Abgasnorm Euro-6 bestimmt. Dies stellt eine sehr konservative Annahme dar, da damit impliziert wird, dass bis 2030 keine weitere Verschärfung der Abgasnormen stattfindet.

Die indirekten Emissionen spielen insbesondere bei den Umweltwirkungen der Stromproduktion eine wichtige Rolle und werden entscheidend durch den angenommenen Strommix bestimmt. Mit 25 Euro/MWh liegen die externen Kosten von Braunkohle- und Erdölkraftwerken am höchsten, gefolgt von Steinkohle- (20 Euro/MWh) und Erd- und Grubengaskraftwerken (7 Euro/MWh). Für alternative Energien wie Wind, Photovoltaik, Wasserkraft und Geothermie fallen keine Luftschadstoffe an. Für die Kernenergie werden ebenso keine Umweltkosten im engeren Sinne angesetzt; gleichwohl sind hier jedoch die Gefahr nuklearer Unfälle und die ungeklärten Risiken der

Entsorgung atomarer Abfälle zu berücksichtigen. Im Strommix 2015 ergibt sich im Mittel ein Wert der Luftverschmutzungskosten von 12 Euro/MWh, welcher bis 2030 durch den erhöhten Anteil erneuerbarer Energieträger auf 7 Euro/MWh sinken wird. Die Berechnung der indirekten Emissionen für konventionelle Fahrzeuge stützt sich auf die Emissionsfaktoren der Energiebereitstellungskette für Kraftstoffe aus IFEU (2011). Dabei ergibt sich für die betrachteten konventionellen Pkw, dass die Kosten der indirekten Luftschadstoffemissionen jene der direkten deutlich übertreffen.

Für das Referenzjahr 2015 ergeben sich in der Fahrzeugklasse Mini und unter Annahme der Verwendung vollständig erneuerbarer Energie durch den Einsatz von BEV reduzierte externe Kosten von Luftschadstoffen von 406 Euro gegenüber Benzin-Pkw und 374 Euro gegenüber Diesel-Pkw. Bei Verwendung des deutschen Strommix 2015 vermindern sich diese Werte um 255 Euro und es resultieren noch Einsparungen von 150 bzw. 119 Euro gegenüber Benzin- bzw. Diesel-Pkw.

In der Fahrzeugklasse Pkw-Kompakt wird die durch Einsatz von PHEV erreichbare Reduktion der externen Kosten von Luftschadstoffen untersucht. Durch den teilweise verbrennungsmotorischen Fahranteil von PHEV entstehen, im Gegensatz zu BEV, auch im direkten Betrieb Luftschadstoffemissionen. Aufgrund der höheren angenommenen jährlichen Fahrleistung in dieser Fahrzeugklasse liegen die externen Kosten von Benzin- und Diesel-Pkw über den Werten der Fahrzeugklasse Mini. Durch den Einsatz von PHEV und unter Verwendung von erneuerbarem Strom lassen sich Einsparungen von 523 bzw. 417 Euro gegenüber Benzin- bzw. Diesel-Pkw realisieren. Diese Einsparungen reduzieren sich bei Verwendung des deutschen Strommix 2015 auf 131 bzw. 25 Euro gegenüber Benzin- bzw. Diesel-Pkw.

Für das Referenzjahr 2030 ergeben sich beim Ersatz von konventionellen Fahrzeugen der Klasse Mini durch BEV und bei Nutzung rein erneuerbarer Energie geschätzt Einsparungen von externen Kosten von 328 Euro (im Vergleich mit Benzin-Pkw) und 347 Euro (im Vergleich mit Diesel-Pkw). Bei Verwendung des deutschen Strommix 2030 vermindern sich diese Werte um 131 Euro und es resultieren noch Einsparungen von 197 bzw. 217 Euro gegenüber Benzin- bzw. Diesel-Pkw. In der Fahrzeugklasse Kompakt und bei Verwendung von erneuerbarer Energie führen PHEV zu reduzierten externen Kosten von Luftschadstoffen von 397 bzw. 385 Euro gegenüber Benzin- bzw. Diesel-Pkw. Diese Werte reduzieren sich unter der Annahme des deutschen Strommix 2030 auf 196 bzw. 185 Euro gegenüber Benzin- bzw. Diesel-Pkw.

Klar ersichtlich wird, dass die im Bereich der Luftschadstoffe durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen erreichbaren Einsparungen externer Kosten deutlich unter jenen im Bereich der THG-Emissionen liegen. In den hier dargestellten Werten sind die Emissionen der Herstellung und Entsorgung des Fahrzeugs und der Batterie nicht berücksichtigt. Eine Diskussion dieser Emissionen wird in Kapitel III.1.5.3 gegeben.

### 1.5.3 Gesamthöhe externer Kosten

In diesem Kapitel wird eine Gesamtdarstellung der Reduktion externer Kosten von Klimafolgen und Luftschadstoffen gegeben, welche durch einen Ersatz von konventionellen Pkw durch Elektrofahrzeuge erreichbar sind. Dazu werden Benzin- und Diesel-Pkw entsprechend deren Fahrleistungsanteil in den Jahren 2015 und 2030 gemittelt, indem der jeweils in diesen Jahren vorherrschende Flottenmix zugrunde gelegt wird. Die Differenzierung nach Fahrzeuggrößen und Strommixszenarien wird beibehalten. Die Ergebnisse für die beiden Referenzjahre 2015 und 2030 sind in Tabelle III.4 dargestellt.

Die hier hergeleiteten Einsparungen externer Kosten können als Rechtfertigung und zur Bestimmung der Höhe umweltbedingter Subventionen interpretiert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass sich im Fall des ausschließlichen Einsatzes erneuerbarer Energien auf Basis der gesamthaft eingesparten externen Kosten (d. h. aufgrund von Klimafolgen und Luftschadstoffen) Subventionen von Elektrofahrzeugen zwischen 1 800 und 3 200 Euro für 2015 und 2030 ergeben. Bei Ladung mit dem deutschen Strommix ergeben sich Subventionen, welche etwa 70 Prozent (2015) bis 40 Prozent (2030) niedriger ausfallen. Die Einsparungen von externen Kosten von Klimafolgen sind bei der Berechnung dieser Subventionshöhen deutlich entscheidend. Die in Tabelle III.4 dargestellten Ergebnisse zeigen höhere Einsparungen externer Kosten durch PHEV als durch BEV. Dies lässt sich jedoch insbesondere auch damit erklären, dass der Einsatz von PHEV in einer größeren Fahrzeugklasse untersucht wurde.

Die Gesamthöhe der errechneten Einsparungen und entsprechend begründeten Subventionen wird entscheidend durch die Annahmen zu fahrzeugspezifischen Fahrleistungen allgemein und den Umweltstandards konventioneller Pkw bestimmt. Die hier angenommenen Fahrleistungen sind für BEV vor dem Hintergrund noch begrenzter Speicherkapazitäten der Batterien eher optimistisch, sodass die errechneten Einsparungen von externen Kosten für dieses Segment, zumindest für das Jahr 2015, tendenziell nach unten zu korrigieren wären. Andererseits wird in den Berechnungen auch für konventionelle Fahrzeuge ähnlich optimistisch von einem deutlichen Rückgang der CO<sub>2</sub>-Intensität im Segment kleiner Fahrzeuge ausgegangen. Sollte diese Reduktion des Kraftstoffverbrauchs bei gleichzeitiger Einhaltung zukünftiger Umweltnormen bei konventionellen Fahrzeugen nicht im hier angenommenen Maß gelingen, wäre der ökologische Vorteil von Elektrofahrzeugen und damit mögliche umweltmotivierte Subventionen deutlich höher als hier ermittelt.

Wie bereits erwähnt, vernachlässigen die Analysen die Fahrzeugproduktion und Entsorgung. Tendenziell ist der „ökologische Rucksack“ aufgrund der Herstellung bei BEV höher als bei konventionellen Fahrzeugen (Kap. III.1.2 und III.1.3). Gegenüber konventionellen Fahrzeugen verursachen BEV etwa 3 500 kg und PHEV etwa um 2 000 kg CO<sub>2</sub>-Äq. höhere Emissionen bei der Fahrzeugproduktion. Mit einem Kostensatz von 80 Euro/t

vermindert sich hiermit der Umweltvorteil bezogen auf das Jahr 2015 von BEV (Fahrzeugklasse Mini) um 279 Euro und von PHEV (Fahrzeugklasse Kompakt) um 161 Euro. Bei Bewertung der Schadstoffe  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , VOC und Partikel mit den Kostensätzen für ländliche Räume nach Maibach et al. (2012) vermindert sich der Umweltvorteil von BEV um 189 Euro und von PHEV um 151 Euro (Schubert 2011). Durch den Einbezug der Fahrzeugproduktion verringert sich somit der Abstand der externen Kosten von konventionellen Fahrzeugen zu BEV um 468 Euro und zu PHEV um 312 Euro.

Beim Einsatz erneuerbarer Energie korrigieren sich damit in einer die Fahrzeugherstellung einbeziehenden Betrachtung die umweltbedingt gerechtfertigten Subventionen aus Tabelle III.4 auf 1 317 Euro (-26 Prozent) für BEV der Klasse Mini und zu 2 237 Euro (-12 Prozent) für PHEV der Klasse Kompakt. Durch die Vielzahl positiver wie negativer Einflussfaktoren auf die hier monetarisierten Umweltvorteile der Elektromobilität wird angenommen, dass die angegebene Größenordnung realistisch ist.

Die Fahrzeugherstellung macht einen nennenswerten Anteil an den externen Kosten von Elektrofahrzeugen aus und vermindert somit deren Umweltvorteil spürbar. Die Unsicherheiten bei deren Bewertung sind jedoch hoch. Zur Rechtfertigung von Kaufsubventionen aus ressourcenökonomischer Sicht empfehlen sich tiefer gehende Forschungsarbeiten auf dem Gebiet von Umweltstandards der globalen Rohstoffgewinnung und internationaler Produktionsketten. Ferner könnte eine Verminderung der Umweltbelastung bei der Fahrzeug- und Kraftstoffproduktion durch nachhaltige Rohstoff- und Produktionsstandards die Umweltvorteile von Elektrofahrzeugen verbessern.

## 2. Bewertung ökonomischer Aspekte

In diesem Kapitel erfolgt eine Bewertung der Elektromobilität aus ökonomischer Perspektive. Dazu wird zunächst die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen für private Nutzer (Kap. III.2.1.1) sowie für gewerbliche Nutzer (Kap. III.2.1.2) untersucht. Kapitel III.2.2 analysiert Implikationen einer zukünftigen Verbreitung von Elektrofahrzeugen auf die automobilen Wertschöpfungskette. Kapitel III.2.3 diskutiert Strategien für die Automobilhersteller zur Positionierung im Markt für Elektrofahrzeuge. Kapitel III.2.4 untersucht volkswirtschaftliche Effekte der Elektromobilität, insbesondere Auswirkungen auf Beschäftigung und BIP-Wachstum. Schließlich wird in Kapitel III.2.5 die Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe im Hinblick auf die künftige Entwicklung betrachtet.

Da Pkw den mit Abstand größten potenziellen Markt für Elektrofahrzeuge bilden (Kap. II.2.7) und aufgrund ihrer Fahrleistungen und dem damit verbundenen Energieverbrauch anders als Elektrofahrräder und -roller auch energiewirtschaftlich relevant sind (Kap. II.4), stehen sie bei den folgenden Wirtschaftlichkeitsanalysen im Mittelpunkt.

### 2.1 Wirtschaftlichkeit für die Nutzer

Elektrofahrzeuge sind heute und mittelfristig noch deutlich teurer in der Anschaffung als konventionelle Fahrzeuge vergleichbarer Größe und Ausstattung. In verschiedenen Studien wurde darauf hingewiesen, dass diese Kosten neben der beschränkten Reichweite eine wesentliche Hürde für potenzielle Käufer von Elektrofahrzeugen darstellen (Kap. III.3.1; BMVBS 2011; Götz et al. 2011; Wietschel et al. 2012). Aber auch die Betriebskosten, welche zu den Gesamtkosten eines Fahrzeugs gehören, haben einen gewissen Einfluss auf die Kaufentscheidung.

Tabelle III.4

#### Einsparungen externer Umwelt- und Klimakosten der WTW-Kette durch den Ersatz konventioneller Pkw mit BEV und PHEV

Jahr	Segment	Strommix	Klimafolgen Euro/Fz.	Luftverschmutzung Euro/Fz.	gesamt Euro/Fz.
2015	Mini BEV	Mix-D	435	135	570
		EE	1.396	390	1.786
	Kompakt PHEV	Mix-D	628	78	706
		EE	2.078	470	2.548
2030	Mini BEV	Mix-D	1.059	207	1.266
		EE	1.876	338	2.214
	Kompakt PHEV	Mix-D	1.563	190	1.753
		EE	2.794	391	3.185

Eigene Berechnungen

Darauf weisen auch Verbreitung bzw. Nutzung von Dieselfahrzeugen, welche im Vergleich zu Benzinfahrzeugen teurer in der Anschaffung, aber günstiger im Verbrauch sind, hin: Dieselfahrzeuge werden dementsprechend eher in Segmenten mit höherer Fahrleistung (im Mittel 22 300 km/Jahr) verglichen mit Benzinfahrzeugen (im Mittel 11 800 km/Jahr) genutzt (Follmer et al. 2010a).

Die Gesamtkosten eines Fahrzeugs werden auch als „total cost of ownership“ (TCO) bezeichnet. Sie setzen sich zusammen aus Anschaffungsausgaben und laufenden Kosten (Kley 2011; Wietschel et al. 2012). Die laufenden Kosten beinhalten wiederum das Produkt von Kraftstoffverbrauch und -kosten sowie die Kosten für Steuern, Wartung und Versicherung. Eine Betrachtung der Gesamtkosten erlaubt bei Fahrzeugen mit alternativen Antrieben, welche in den Anschaffungskosten teurer sind als konventionelle Fahrzeuge, die Berücksichtigung einer Amortisation durch die Fahrleistung über einen gewissen Nutzungszeitraum. Je nach Fahrleistung und Preisdifferenzen können sich bei alternativen Antrieben höhere Anschaffungskosten so durch niedrigere Betriebskosten wieder ausgleichen.

Im Vergleich zu konventionellen Pkw sind Elektrofahrzeuge in der Anschaffung deutlich teurer und bei den laufenden Kosten wiederum deutlich günstiger. Eine Betrachtung der Gesamtkosten ist also notwendig, um zu bestimmen, ob und ggf. bei welchen Nutzungs- bzw. Fahrprofilen Elektrofahrzeuge wirtschaftlich sein können und welche Käufersegmente aus wirtschaftlicher Sicht Erstkäufer sein könnten.

TCO von Fahrzeugen sind dementsprechend ein gängiger Bestandteil von Modellen für die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen (Kap. II.2.2; Bünger/Weindorf 2011; ESMT 2011; Kley 2011; McKinsey 2011; NPE 2011a, 2011b; Plötz et al. 2012a, Wietschel et al. 2009 u. 2011). Im Rahmen solcher Modelle werden für den betrachteten Zeitraum die jeweiligen Gesamtkosten der betrachteten Fahrzeuge bzw. Antriebsarten für Pkw-Halter mit verschiedenen Nutzungs- bzw. Fahrprofilen berechnet und den Pkw-Haltern wird der jeweils günstigste Pkw-Antriebstyp zugewiesen. Dabei werden Szenarioannahmen, beispielsweise zur Öl- und Strompreisentwicklung und für Elektrofahrzeuge zur Entwicklung von Batteriepreisen und Batterielebensdauern, zugrunde gelegt. Zusätzliche Sensitivitätsanalysen erlauben es, den Einfluss einzelner Parameter genauer zu untersuchen (Kley 2011; Wietschel et al. 2012).

Beim Markt für Elektrofahrzeuge muss aufgrund unterschiedlicher Fahrprofile und Rahmenbedingungen zwischen privaten und gewerblichen Haltern unterschieden werden – die meisten bestehenden Potenzialanalysen decken jedoch häufig nur den Privatverkehr ab (Biere et al. 2009; Smith et al. 2011; Universität Karlsruhe 2008). Betrachtet man die jährlichen Neuzulassungen in Deutschland, so haben gewerbliche Fahrzeuge allerdings einen relevanten Anteil mit mehr als der Hälfte der Neuzulassungen (im Jahr 2010 etwa 57 Prozent gemäß Daten des KBA 2011a)<sup>6</sup>. In absoluten Zahlen sind dies etwa

1,7 Millionen Fahrzeuge, die ein erhebliches Potenzial für Elektromobile darstellen, gerade wenn es um die relevante Gruppe von Erstkäufern geht. Der Anteil von gewerblichen Fahrzeugen am Gesamtfahrzeugbestand in Deutschland beläuft sich demgegenüber nur auf knapp 10 Prozent (KBA 2011b). Der Unterschied zwischen dem hohen Anteil gewerblicher Fahrzeuge an den Neuzulassungen und dem geringen Anteil am Bestand entsteht durch die kürzere Haltedauer von gewerblichen Fahrzeugen von 3 bis 4 Jahren im Vergleich zu durchschnittlich 6 Jahren bei privat gehaltenen Fahrzeugen (DAT 2011; VCD 2008b).

Im vorliegenden Kapitel werden Ergebnisse von TCO-Analysen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Fahrprofilen differenziert nach Privatverkehr (Kap. III.2.1.1) und Wirtschaftsverkehr (Kap. III.2.1.2) diskutiert. Um eine bessere Einordnung der dargestellten Ergebnisse zu ermöglichen, werden als Grundlage zunächst die zugrundeliegenden Daten kurz beschrieben, die zum Teil mit großen Unsicherheiten behaftet sind.

### Eingangsdaten von TCO-Analysen

Bei TCO-Analysen spielen vor allem Preise für Strom und Kraftstoffe sowie Fahrzeuge und Batterien eine wichtige Rolle. Die gegenwärtigen Preise lassen sich im Rahmen gewisser Fluktuationen gut angeben. Ihre Entwicklung bis und nach 2020 ist jedoch kaum zuverlässig vorhersagbar. Annahmen zur weiteren Technologieentwicklung, insbesondere hinsichtlich Effizienzverbesserungen sowohl bei alternativen Antrieben als auch bei konventionellen Fahrzeugen beinhalten ähnliche Unsicherheiten.

Für das Ergebnis von TCO-Analysen ist weiterhin der zugrundegelegte Amortisationszeitraum relevant, d. h. Annahmen innerhalb welcher Frist und zu welchem Zinssatz sich die höheren Anschaffungsausgaben eines Elektrofahrzeugs durch die niedrigeren laufenden Kosten amortisieren müssen, um für einen potenziellen Nutzer noch als wirtschaftlich sinnvoll zu gelten. Für den entsprechenden Zeitraum kommen zunächst die durchschnittliche Haltedauer (ca. 4 Jahre in Deutschland) oder auch die durchschnittliche Lebensdauer eines Fahrzeugs (ca. 12 bis 13 Jahre) infrage. Um zu berücksichtigen, dass die Nutzer häufig nur die ersten Jahre des Fahrzeugbesitzes bzw. der Lebensdauer eines Fahrzeugs betrachten, wurde in verschiedenen Studien von einem Amortisierungszeitraum zwischen 3 und 4 Jahren ausgegangen (Haan et al. 2007). Aus ökonomischer Sicht ist aber die Lebensdauer eines Fahrzeugs durchaus ein angemessener Zeitraum (Kley 2011), denn die höheren Anschaffungsausgaben sollten auch zu einem hohen Wiederverkaufswert führen, falls das Fahrzeug vom Erstkäufer nicht über die komplette Lebensdauer besessen wird. Zu Wiederverkaufswerten von Elektrofahrzeugen liegen aber noch keine umfangreichen empirischen Daten vor. Es gibt nur erste Hinweise auf einen vergleichsweise hohen Restwert (Bundesverband eMobilität e.V. 2012).

Des Weiteren sind Daten zu Fahrprofilen von Pkw-Nutzern notwendig, da niedrigere Betriebskosten bei einer

<sup>6</sup> Da ein Teil davon Kurzzulassungen von Händlern sind, dürfte der tatsächliche gewerblich genutzte Anteil etwas tiefer liegen.

hinreichenden Fahrleistung, wie zuvor dargestellt, unter Umständen höhere Anschaffungskosten kompensieren können. Zur Nutzung von Pkw liegen umfangreiche empirische Daten vor. Dies sind unter anderem Fahrprofile von mehreren Tausend Privatpersonen aus großen Verkehrserhebungen (Mobilitätspanel Deutschland [MoP] 1994–2008, Universität Karlsruhe 2008; Mobilität in Deutschland [MiD] 2008, Follmer et al. 2010a u. 2010b; Kraftverkehr in Deutschland [KiD] 2002). Durch diese Verkehrserhebungen lässt sich die Nutzung von Fahrzeugen in Deutschland vergleichsweise gut ableiten, wenngleich die Beobachtungszeiträume häufig relativ kurz sind (1 oder nur wenige Tage). Daneben sind Bestand und Neuzulassungen von Pkw bei privaten und gewerblichen Nutzergruppen durch die Statistiken des Kraftfahrt-Bundesamtes relativ gut erfasst.

Aufgrund der dargestellten hohen Unsicherheiten in den Eingangsdaten wurde in vielen Studien mit Sensitivitätsanalysen gearbeitet, um aufzuzeigen wie groß der Einfluss einzelner Parametervariationen ist. So kann sich beispielsweise innerhalb eines Modells bei gleichzeitiger Variation von Verbrauchs- und Batteriekosten sowie Batteriegrößen – innerhalb realistischer Grenzen – für 2020 ein möglicher Bestand von Elektrofahrzeugen zwischen 0 und 2 Millionen Pkw ergeben (Plötz et al. 2012b). Diese Unsicherheit spiegelte sich bereits in der Auswertung der verschiedenen Studien zur Marktpenetration von Elektrofahrzeugen in Kapitel II.2 wider. Trotz der großen Unsicherheiten bei Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen lassen sich für die aktuelle Situation und mithilfe von Szenarien auch für die zukünftige Entwicklung verschiedene Aussagen festhalten, die im Folgenden aufgezeigt werden.

### 2.1.1 Privatverkehr

Die Abbildungen III.14 und III.15 zeigen einen Vergleich der Kosten pro km für ein BEV und einen vergleichbaren konventionellen Pkw als Kleinwagen für 2015 mit und ohne Steuern für eine jährliche Fahrleistung von

14 000 km. Gezeigt ist auch eine ungefähre Spannweite in den möglichen Kosten (min./max). Die angenommene Jahresfahrleistung entspricht ungefähr dem deutschen Durchschnitt (Follmer et al. 2010b; Plötz et al. 2012a).

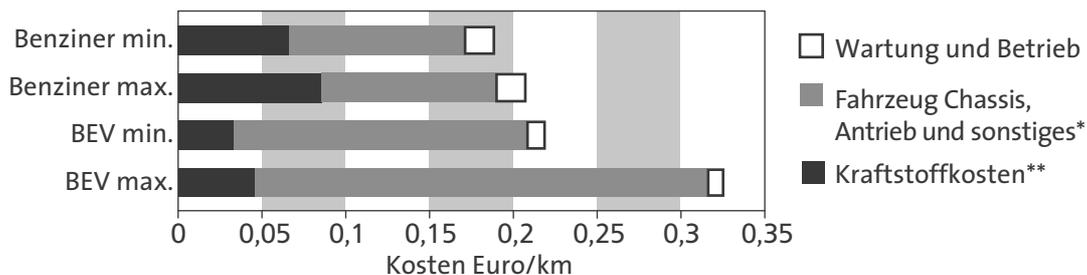
Deutlich wird, dass ein BEV für einen durchschnittlichen Nutzer, d. h. mit durchschnittlicher Jahresfahrleistung von 14 000 km, teurer wäre als ein konventionelles Fahrzeug. Dabei dominieren die Anschaffungskosten die Gesamtkosten der Fahrzeuge. Die hohen Anschaffungsausgaben für Elektrofahrzeuge werden im Wesentlichen durch die Batteriepreise bestimmt. Diese liegen heute noch bei rund 600 bis 800 Euro/kWh und müssen auf unter 300 Euro/kWh sinken, damit diese Fahrzeuge für eine breitere Nutzergruppe wirtschaftlich werden (siehe zu Marktgrößen in Abhängigkeit des Batteriepreises auch Abb. III.16). Ein Wert, der gemäß Einschätzung von Experten der Nationalen Plattform Elektromobilität 2020 erreichbar ist (NPE 2011a).

Auch die Analysen in Kley (2011) auf Basis von realen Fahrprofilen von einer Vielzahl von Fahrzeugnutzern zeigen, dass Elektrofahrzeuge in Abhängigkeit von Fahrprofil und Batteriepreisen unter 400 Euro/kWh für gewisse Nutzergruppen wirtschaftlich attraktiv sein könnten (Abb. III.16; Kley 2011; Wietschel et al. 2012), die Erschließung breiterer Käuferschichten allerdings noch niedrigere Batteriepreise erfordert.

Den Einfluss des derzeitigen Steuersystems sieht man im Vergleich der beiden Abbildungen III.14 und III.15. Die derzeitigen Steuern begünstigen tendenziell Elektrofahrzeuge. Positiv wirkt sich insbesondere aus, dass auf Strom für Elektrofahrzeuge keine Mineralölsteuer anfällt, wie es für fossile Kraftstoffe der Fall ist. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten von Elektrofahrzeugen wirkt sich allerdings die Mehrwertsteuer deutlich negativ aus, sodass in der Summe der beiden Effekte nur ein geringer Steuervorteil für Elektrofahrzeuge besteht. Für die Frage, wie die künftige Besteuerung bei Elektrofahrzeugen ausfallen sollte, erscheinen auch gesamtwirtschaftliche Effekte relevant. Eine niedrigere Besteuerung ließe sich

Abbildung III.14

#### Vergleich der Kosten pro km für einen Kleinwagen als BEV und als konventionelles Fahrzeug mit einer jährlichen Fahrleistung von 14 000 km im Jahr 2015, Betrachtung mit Steuern



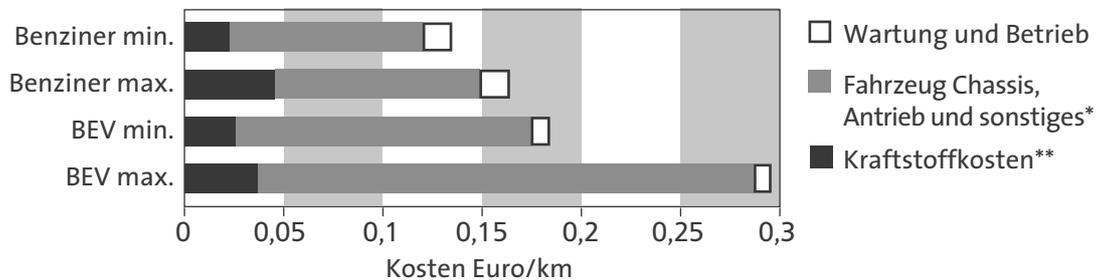
\* min. Batteriekosten 250 Euro/kWh, max. Batteriekosten 400 Euro/kWh und Batteriewechsel

\*\* min. 80 US-Dollar/Barrel bzw. Strommix, max. 160 US-Dollar/Barrel bzw. Windstrom

Quelle: Büniger/Weindorf 2011; Wietschel et al. 2012

Abbildung III.15

**Vergleich der Kosten pro km für einen Kleinwagen als BEV und als konventionelles Fahrzeug mit einer jährlichen Fahrleistung von 14 000 km im Jahr 2015, Betrachtung ohne Steuern**

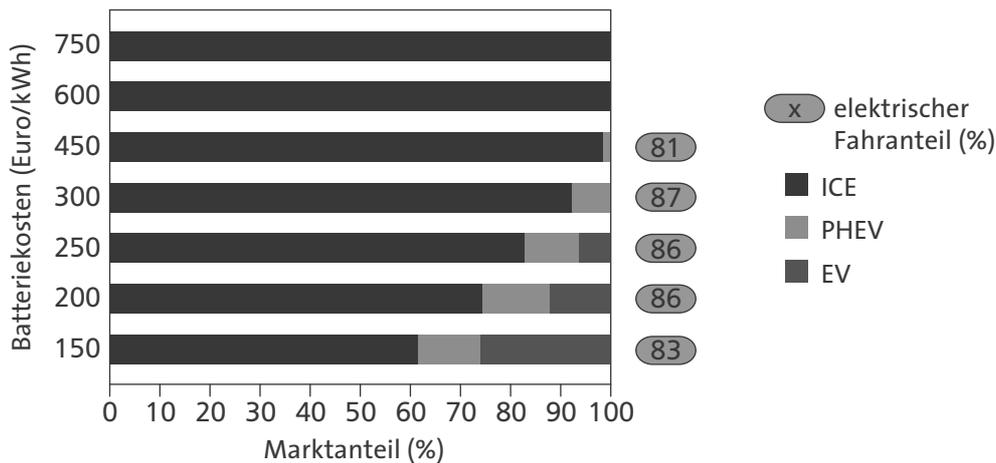


\* min. Batteriekosten 250 Euro/kWh, max. Batteriekosten 400 Euro/kWh und Batteriewechsel  
 \*\* min. 80 US-Dollar/Barrel bzw. Strommix, max. 160 US-Dollar/Barrel bzw. Windstrom

Quelle: Bünger/Weindorf 2011; Wietschel et al. 2012

Abbildung III.16

**Wahl der Antriebsart in Abhängigkeit der Batteriekosten bei ausschließlichem Laden zuhause**



ICE = konventionelles Fahrzeug, EV = BEV

Quelle: Kley 2011; Wietschel et al. 2012

evtl. damit begründen, dass hierdurch Importe von Rohöl reduziert werden können und die substituierende Strombereitstellung überwiegend aus heimischer Produktion mit entsprechender heimischer Wertschöpfung kommt. Allerdings ist die Berechnung der volkswirtschaftlichen Aspekte sehr komplex, weil beispielsweise ein Teil der Ausgaben für Rohöl durch die rohölfördernden Staaten wieder in Deutschland investiert wird.

Insgesamt zeigt sich, dass Nutzer von Elektrofahrzeugen große Jahresfahrleistungen zurücklegen müssen, damit sich die auch in Zukunft noch höheren Anschaffungskosten durch die niedrigen Verbrauchskosten amortisieren können. Die große Mehrheit der Jahresfahrleistungen privater Fahrzeuge liegt allerdings unter 20 000 km/Jahr (Abb. III.18; Wietschel et al. 2012). Für Käufer, die vergleichsweise hohe Jahresfahrleistungen zurücklegen,

könnten Elektrofahrzeuge in naher Zukunft durchaus wirtschaftlich interessant sein. Bei BEV kommt jedoch einschränkend hinzu, dass lange Einzelfahrten aufgrund der begrenzten Reichweite nur schwer möglich sind.

PHEV haben diese Reichweitenbeschränkung nicht, da längere Strecken mithilfe des Verbrennungsmotors zurückgelegt werden können. Simulationen einer Vielzahl realistischer deutscher Fahrprofile zeigen, dass bei optimalen Batteriegrößen für Plug-in-Hybride (kostenoptimiert im Bereich von 1 bis 24 kWh) elektrische Fahranteile von 80 bis 85 Prozent erreicht werden können (Abb. III.16; Kley 2011; Wietschel et al. 2012). Damit erreichen Plug-in-Hybride hohe elektrische Fahranteile (mit niedrigen Verbrauchskosten) und erlauben zusätzlich (je nach technischer Auslegung) Reichweiten, die mit denen heutiger konventioneller Fahrzeuge vergleichbar sind

(Wietschel et al. 2012). Die Batterie kann kleiner als in reinen Batteriefahrzeugen ausgelegt werden und ist damit günstiger. PHEV können daher für bestimmte Nutzergruppen eher wirtschaftlich werden als reine Batteriefahrzeuge und lassen sich breiter einsetzen (Wietschel et al. 2012). Allerdings sind auch PHEV derzeit noch teurer als konventionelle Fahrzeuge, der Aufpreis ist jedoch geringer als bei BEV (Wietschel et al. 2012). Insgesamt könnten somit gerade PHEV einen wirtschaftlich sinnvollen Einstieg in den Massenmarkt für Elektrofahrzeuge bilden.

Sensitivitätsanalysen zeigen, dass gerade die Entwicklung des Kraftstoffpreises (d. h. der Benzin- und Dieselpreise) einen entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Elektromobilität hat. Die in Abbildung III.16 vorgestellten Analysen basieren auf einem Benzinpreis von 1,40 Euro/l. Bei sonst gleichen Annahmen (u. a. recht niedriger Batteriepreise von 250 Euro/kWh, heutiger Stromkosten und einer kalendarischen Batterielebensdauer von 12 Jahren) erhöht ein Benzinpreis von 2 Euro/l das aus wirtschaftlicher Sicht mögliche Marktpotenzial von BEV und PHEV auf über 60 Prozent (Kley 2011). Weitere wichtige Größen sind die Batteriepreise (Abb. III.16), die Stromkosten und die Batterielebensdauer. Die heute oft angegebene Lebensdauer von derzeitigen Lithium-Ionen-Batterien von 6 bis 8 Jahren (NPE 2011a) reduziert das Marktpotenzial von BEV und PHEV deutlich. Eine Zweitnutzung der Batterien für stationäre Anwendungen kann das Marktpotenzial verbessern, allerdings ist die Zweitnutzung noch hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Machbarkeit weiter zu untersuchen.

Da die Wirtschaftlichkeit eines Elektrofahrzeugs auch von der Nutzung abhängt, lassen sich umgekehrt potenzielle Erstnutzer anhand eines geeigneten Nutzungsverhaltens identifizieren. Eine entsprechende Auswertung der Fahrleistungen einzelner Bevölkerungsgruppen zeigt, dass bei Analysen des ökonomischen „break-even points“

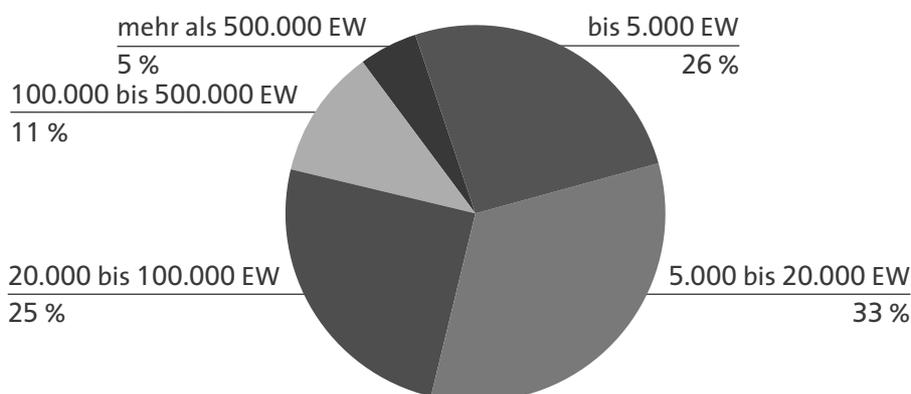
(an dem die Kosten für Elektrofahrzeuge und konventionelle Fahrzeuge gleich sind) Vollzeitbeschäftigte in Städten unter 100 000 Einwohnern eine interessante Gruppe potenzieller Erstnutzer von BEV sind (Biere et al. 2009; Wietschel et al. 2012). Ein ähnliches Bild ergibt sich für PHEV, auch wenn bei diesen zusätzlich der mögliche elektrische Fahranteil der zurückgelegten Strecken zu berücksichtigen ist. Trotzdem sind auch die aus ökonomischer Sicht potenziellen Erstnutzer für PHEV Vollzeitbeschäftigte aus Gemeinden mit unter 100 000 Einwohnern (Biere et al. 2009; Wietschel et al. 2012).

Die Einwohner großer oder sehr großer Städte werden häufig als potenzielle Erstnutzer für Elektrofahrzeuge angesehen. Betrachtet man kleinere BEV und prüft für welche Nutzer ein derartiges Fahrzeug wirtschaftlich sinnvoll sein könnte, zeigt sich, dass die Einwohner großer Städte in Deutschland zumindest aus wirtschaftlicher Sicht keine relevante Gruppe sind (Abb. III.17; Biere et al. 2009; Wietschel et al. 2012). Über die Hälfte der potenziellen Erstnutzer kommen aus Gemeinden mit weniger als 20 000 Einwohnern, nur 16 Prozent wohnen in Gemeinden mit mehr als 100 000 Einwohnern. Der Grund dafür ist, dass die Einwohner von Großstädten im Mittel zu geringe Jahresfahrleistungen aufweisen und sich ein Elektrofahrzeug daher nicht schnell genug amortisieren kann (Wietschel et al. 2012). Auch derzeitige Käufer von Elektrofahrzeugen oder Kaufinteressierte wohnen überwiegend in Vororten oder kleinen Städten (Kap. III.3.1.5; Wietschel et al. 2012).

Einschränkend muss angemerkt werden, dass die Wirtschaftlichkeit eines Fahrzeugs nur einen Teil der Kaufentscheidungen erklären kann. Zum Beispiel sind Gasfahrzeuge deutlich weniger verbreitet, als man aufgrund ihrer Wirtschaftlichkeit erwarten würde. Berechnungen auf der Basis von Fahrdaten aus dem „Mobilitätspanel Deutschland“ hatten ergeben, dass ca. 65 Prozent der benzinbe-

Abbildung III.17

**Verteilung der Pkw-Nutzer, für die ein kleines BEV im Jahr 2015 ökonomisch sinnvoll ist, nach Größe des Wohnorts**



EW: Einwohner

Quelle: Biere et al. 2009; Wietschel et al. 2012

triebenen Pkw durch monovalente Erdgas-Pkw und ca. 60 Prozent durch LPG-Fahrzeuge kostensparend ersetzbar sind (Plötz et al. 2012b). Zusätzlich wurde in Studien darauf hingewiesen, dass Autokäufern in der Regel auch das Wissen für eine detaillierte Berechnung der Einsparungen durch ein effizienteres Fahrzeug im Rahmen der Haltedauer und somit für dessen Wirtschaftlichkeit fehlt (Turrentine/Kurani 2007). Befragungen von Elektrofahrzeugnutzern belegten ebenfalls, dass neben der Wirtschaftlichkeit auch andere Kriterien die Antriebswahl mitbestimmen (BMVBS 2011; Wietschel et al. 2012).

**2.1.2 Wirtschaftsverkehr**

Unter den gewerblich zugelassenen Fahrzeugen wird ein Teil als sogenannte Dienstwagen auch privat genutzt, die restlichen Fahrzeuge werden rein gewerblich verwendet, beispielsweise in Pflegediensten, in Taxibetrieben oder bei Handwerksbetrieben. Die genaue Zahl der Dienstwagen ist nicht bekannt; Schätzungen gehen von ungefähr einem Drittel der Neuwagen in Deutschland aus (Fifo 2011; NPE 2011a).

Interessanterweise entfielen über 90 Prozent der Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen 2011 auf gewerbliche Halter (Wietschel et al. 2012). Auch die NPE (2011a) geht davon aus, dass gewerbliche Halter einen wichtigen Anteil der Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen ausmachen werden, mit 60 Prozent im Jahr 2014, wovon die Hälfte auf rein gewerblich genutzte Fahrzeuge und die andere Hälfte auf Dienstwagen entfallen werde, welche auch privat genutzt werden.

Im Falle der Dienstwagen liegt die Vermutung nahe, dass die Erstnutzer große Übereinstimmung mit privaten Erstnutzern zeigen. Allerdings dürften hier gewisse Entscheidungskriterien (zum Beispiel Status und Fahrzeuggröße) noch einmal eine andere bzw. wichtigere Rolle spielen (Wietschel et al. 2012). Weitere Aussagen über Dienstwa-

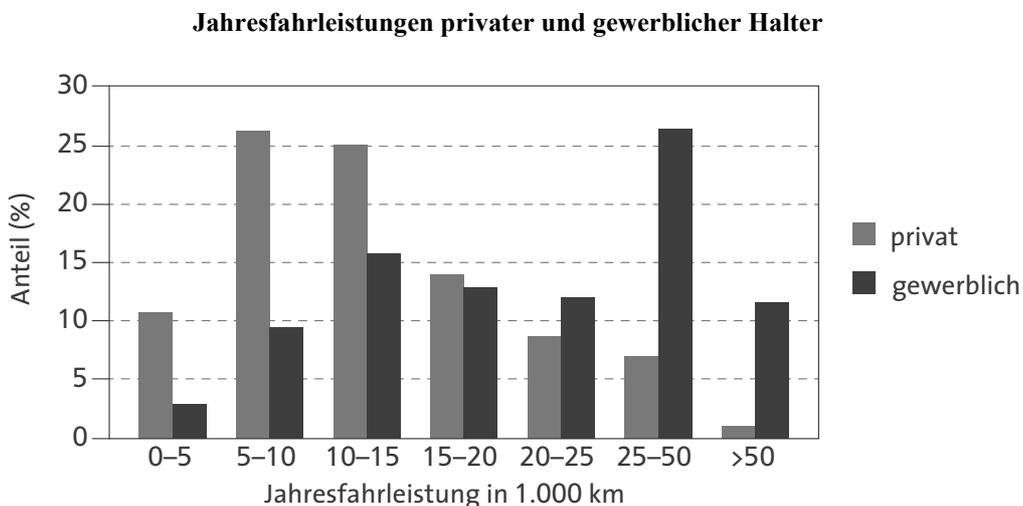
gen sind derzeit aber nicht möglich, da diese nicht gesondert statistisch erfasst werden (das Kraftfahrt-Bundesamt trennt nur zwischen gewerblichen und privaten Haltern).

Für gewerbliche Pkw im Allgemeinen (Dienstwagen und rein gewerblich genutzte Pkw) könnten Elektrofahrzeuge aufgrund der geringen Betriebskosten eine wirtschaftlich interessante Alternative sein. Statistische Analysen des Mobilitätsverhaltens im gewerblichen Pkw-Verkehr zeigen, dass gewerblich gehaltene Pkw teilweise deutlich höhere Jahresfahrleistungen aufweisen als private Pkw (Abb. III.18; Wietschel et al. 2012). Falls wirtschaftliche Analysen in der Kaufentscheidung von gewerblichen Nutzern eine größere Rolle spielen als für private Käufer, wäre eine Anschaffung von Elektrofahrzeugen durch gewerbliche Halter sogar noch wahrscheinlicher. Für eine derartige Betrachtung müssen verschiedene Wirtschaftszweige mit ihren Fahrprofilen und Anforderungen an Fahrzeugeigenschaften, wie zum Beispiel Ladevolumen und Ladegewicht, detailliert untersucht werden. Die Heterogenität des Wirtschaftsverkehrs verbietet hier pauschale Aussagen (Gnann et al. 2012b; Wietschel et al. 2012).

Im Güterverkehr über 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht werden optimierte Dieselfahrzeuge wahrscheinlich noch auf längere Sicht nicht durch Elektrofahrzeuge ersetzt werden (Wietschel et al. 2012). Aber im Pkw-Bereich könnte es in einigen Wirtschaftszweigen ökonomische Potenziale geben (Gnann et al. 2012b). Kleine BEV können in Bereichen mit regelmäßigen Touren wirtschaftlich attraktiv sein, zum Beispiel für ambulante Pflegedienste (Wietschel et al. 2012; Zischler 2011).

Für weitere Wirtschaftssegmente mit sehr hohen Jahresfahrleistungen wie Taxi-Unternehmen oder auch das verarbeitende Gewerbe erscheinen zukünftig PHEV ökonomisch interessant (Wietschel et al. 2012; Zischler 2011), allerdings konkurrieren sie hier stark mit Dieselfahrzeu-

Abbildung III.18



Eigene Darstellung nach Follmer et al. (2010b)

gen und eine genaue Abschätzung des Potenzials ist aufgrund der eingangs beschriebenen Unsicherheiten schwierig (Gnann et al. 2012b). Insgesamt scheinen die Potenziale für PHEV im Wirtschaftsverkehr in den nächsten Jahren deutlich größer als für BEV.

Neben ökonomischen Vorteilen können aber auch für den gewerblichen Bereich weitere Motive, wie z. B. ökologische Motive oder das mit Elektrofahrzeugen einhergehende Image, und nichtmonetäre Anreize, wie z. B. längere Zufahrtszeiten für Innenstädte für geräuscharme und lokale emissionsfreie Fahrzeuge, für den gewerblichen Bereich, z. B. für Kurier- und Paketdienste interessante Anreize für den Einsatz von Elektrofahrzeugen darstellen (Wietschel et al. 2012).

### 2.1.3 Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV)

In aktuellen Studien wurde sich detailliert mit der Wirtschaftlichkeit von BEV und PHEV im Vergleich zu FCEV auseinandergesetzt (Bünger/Weindorf 2011; IEA 2010; McKinsey 2011). Demnach schneiden FCEV in den nächsten Jahren schlechter ab, u. a. aufgrund hoher Anschaffungsausgaben für den Brennstoffzellenstack und den Wasserstofftank sowie hohe Kosten durch den notwendigen Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur. Längerfristig haben allerdings auch FCEV das Potenzial, die Wirtschaftlichkeit von BEV bzw. PHEV und schließlich auch konventionellen Fahrzeugen zu erreichen (Bünger/Weindorf 2011; IEA 2010; McKinsey 2011). Dazu müssen jedoch die Brennstoffzellensystemkosten auf unter 100 Euro/kW reduziert werden, damit diese Fahrzeuge wirtschaftlich werden (als langfristige Zielgröße dienen häufig die Kosten moderner Dieselmotoren, welche bei ca. 60 Euro/kW liegen). Daneben sind weitere technische Zielsetzungen, z. B. höhere Stacklebensdauern, entscheidend.

Insbesondere haben FCEV Potenzial in großen Fahrzeugklassen, bei denen sich aufgrund generell hoher Fahrleistungen der Vorteil geringerer Verbrauchskosten gegenüber konventionellen Fahrzeugen bemerkbar macht. Gegenüber BEV haben FCEV den Vorteil, dass die Fahrzeuge über eine deutlich höhere Reichweite verfügen und in wenigen Minuten betankt werden können. Gegenüber PHEV sind sie bei häufigen Langstrecken im Vorteil, da solche Fahrten einen hohen verbrennungsmotorischen Anteil beinhalten. Bei häufigen langen Strecken und dem Transport großer Massen, zum Beispiel im Güterverkehr über 3,5 t, werden aber wahrscheinlich optimierte Dieselfahrzeuge noch längerfristig dominieren.

Die Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge wird am Anfang günstig auszubauen sein, da für Markteinführung und Markthochlauf vor allem private und halböffentliche Ladestationen von Bedeutung sind. Bei Wasserstoff hingegen besteht die Herausforderung darin, bereits in der Marktvorbereitungsphase in eine stark unterausgelastete kapitalintensive Infrastruktur investieren zu müssen (Kap. II.1.5). Der Tankstellenbetrieb ist dabei das defizitärste Element, gefolgt von den Verteilsystemen (Lkw oder Pipeline). Bei höherer Marktpenetration von FCEV

spielen die Infrastrukturkosten keine wichtige Rolle mehr (Bünger/Weindorf 2011; European Expert Group 2011; McKinsey 2011).

## 2.2 Automobile Wertschöpfung

Durch den absehbaren Bedeutungszuwachs von alternativen Antriebskonzepten sind erhebliche Implikationen auf die Wertschöpfung im Automobilbau zu erwarten. In zukünftigen Fahrzeuggenerationen werden möglicherweise konventionelle Komponenten, wie Verbrennungsmotor, Abgasanlage oder Getriebe, teilweise oder sogar ganz entfallen beziehungsweise durch neu hinzukommende Komponenten, wie z. B. Elektromotor, Leistungselektronik oder Hochvoltbatterie, ersetzt. Entsprechend geht mit diesen technischen Veränderungen auch eine Änderung der Wertanteile bestimmter Komponenten am Gesamtfahrzeug einher.

Um die Wirkungen solcher Veränderungen einordnen zu können, ist zunächst festzuhalten, dass die Herstellung eines Kraftfahrzeugs arbeitsteilig entlang der einzelnen Wertschöpfungsschritte erfolgt. Während die Automobilhersteller in den letzten Jahren ihren Wertschöpfungsanteil kontinuierlich verringert haben, tragen Automobilzulieferer mittlerweile rund drei Viertel der Wertschöpfung eines durchschnittlichen Pkw bei (Freitag/Student 2009; Mercer Management Consulting et al. 2004). Schätzungen gehen davon aus, dass rund 1 Million Mitarbeiter in der deutschen Automobilzulieferindustrie beschäftigt sind (Kinkel/Zanker 2007).

Betrachtet man die deutsche Automobilzulieferindustrie genauer, zeigt sich, dass das Gros der Zulieferer sich jeweils auf die Herstellung eines technologisch eng umrissenen Ausschnitts an Produkten konzentriert, entsprechend hohe technologische Spezialisierungsmuster aufweist und eher mittelständisch geprägt ist (Stahlecker et al. 2011).

Im Zusammenhang der Zukunftserwartungen und der aktuellen Strukturen der Automobilzulieferindustrie muss die Zukunftsfähigkeit manch eines Zulieferunternehmens oder gar des Großteils der Zulieferbranche neu bewertet werden. So könnten möglicherweise Komponenten für konventionelle Antriebstechnologien zukünftig weniger nachgefragt werden, was sich entsprechend auf die wirtschaftliche Situation einzelner Zulieferer auswirken könnte. Im Gegenzug können Hersteller elektromobilitätsrelevanter Teile hingegen unter Umständen mit größeren Absatzpotenzialen rechnen.

Vor dem Hintergrund der skizzierten Entwicklungen stehen folgende Fragen im Zentrum der Analysen: Welche strukturelle Wirkung hat die zunehmende Marktverbreitung von Elektrofahrzeugen auf die automobilen Wertschöpfung? Welche Effekte sind durch neu hinzukommende, modifizierte oder wegfallende Komponenten zu erwarten?

Die Abschätzung der zukünftigen Wertschöpfungspotenziale bezieht sich dabei auf die direkte Bruttowertschöpfung und ist auf einen mittelfristigen Zeithorizont bis 2020 und auf einen längerfristigen Zeithorizont bis 2030

angelegt. Dabei erfolgt eine Detailbetrachtung der Wertschöpfungspotenziale der Traktionsbatterie, da davon auszugehen ist, dass der Energiespeicher eine sehr wertvolle Komponente darstellt (NPE 2010b). Daran anknüpfend erfolgt eine Diskussion der Implikationen für die automobilen Wertschöpfung vor dem Hintergrund der Technologieaktivitäten der deutschen Industrie, welche in Kapitel II.5.1 dargestellt werden.

### 2.2.1 Modellbeschreibung

Die nachfolgenden Analysen beruhen auf dem Wertschöpfungsmodell von Stahlecker et al. (2011), welches im Rahmen des vorliegenden Berichts um neue Daten ergänzt und erweitert wurde. Das Modell erlaubt es, die zukünftig zu erwartenden Veränderungen der direkten Bruttowertschöpfung in der Automobilindustrie abzuschätzen. Dazu werden belastbare Abschätzungen für die Wertschöpfungsumfänge zukünftiger Fahrzeuggenerationen und die zukünftig zu erwartende Nachfrage nach Fahrzeugen, differenziert nach unterschiedlichen Antriebstechnologien, miteinander verknüpft.

Die vorliegende Untersuchung fokussiert auf Pkw. Leichtkrafträder oder Nutzfahrzeuge mit (teil)elektrischem Antrieb bleiben aufgrund der untergeordneten wirtschaftlichen Relevanz für die deutsche Industrie bzw. der schwierigen Anwendbarkeit elektrischer Antriebslösungen im Falle von Nutzfahrzeugen bei der Betrachtung außen vor. Als Antriebstechnologien werden HEV, Elektrofahrzeuge (BEV und PHEV) und FCEV betrachtet und mit konventionellen Fahrzeugen verglichen (sogenannte Internal Combustion Engine Vehicles, ICEV).

Des Weiteren erfolgt eine Einteilung in vier unterschiedliche Fahrzeugsegmente, beginnend mit dem Kleinst- und Kleinwagensegment (A-Segment) über das Kompaktfahrzeugsegment (B-Segment) und das Mittelklassesegment (C-Segment) bis hin zum Oberklassesegment (D-/E-Segment). Aus Tabelle III.5 ist ersichtlich, dass nicht jede Technologie in jedem Fahrzeugsegment eingesetzt wird, sondern aufgrund technischer und auch ökonomischer Restriktionen nur bestimmte Kombinationen möglich oder sinnvoll sind. So ist beispielsweise davon auszugehen, dass Fahrzeuge des Kleinwagensegments nicht mit Plug-in-Technologie ausgestattet werden, da mit Kleinwagen in der Regel verhältnismäßig kurze Distanzen zurückgelegt werden und somit ein integrierter Verbrennungsmotor zur Verlängerung der Reichweite nicht sinnvoll erscheint.

Die Differenzierung nach Fahrzeugtechnologie und Fahrzeugsegment ist zur Ermittlung zukünftiger Komponentenkosten von hoher Bedeutung. Beispielsweise können sich die Kosten für Batterien stark unterscheiden. Während für Hybridfahrzeuge im Kleinwagensegment eine Batteriekapazität von 1,6 kWh als ausreichend erachtet wird, so liegt bei einem Mittelklasse-PHEV der Kapazitätsbedarf bei rund 40 kWh. Darüber hinaus gibt es weitere technologische Unterschiede. In HEV kommen Hochleistungsbatterien zum Einsatz, in BEV oder PHEV deutlich kostengünstigere Hochenergiebatterien. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass sich die technische und

auch wertbezogene Bedeutung des Verbrennungsmotors in Abhängigkeit von der Technologie deutlich unterscheidet. In Fahrzeugen mit klassischem Verbrennungsmotor wird dieser sicherlich größer dimensioniert werden müssen als beispielsweise in PHEV, in denen der Verbrennungsmotor lediglich eine zum elektrischen Antrieb ergänzende Funktion einnimmt.

Tabelle III.5

#### Zuordnung von Antriebstechnologien zu Fahrzeugsegmenten

	Antriebstechnologie				
	ICEV	HEV	PHEV	BEV	FCEV
A-Segment	x	x	–	x	–
B-Segment	x	x	x	x	x
C-Segment	x	x	x	–	x
D-/E-Segment	x	x	x	–	x

x: Kombination; –: keine Kombination  
Eigene Zusammenstellung

Bei der Entwicklung von Elektrofahrzeugen können grundsätzlich zwei verschiedene Pfade eingeschlagen werden. Im sogenannten Conversion Design werden in erster Linie bei konventionellen Fahrzeugen bewährte Fahrzeugstrukturen weiterentwickelt und so angepasst, dass ein elektrischer Antriebsstrang eingebaut werden kann. Betroffen von Änderungen sind vor allem Antriebsstrang und Elektronik. Einen radikaleren Entwicklungsansatz stellt das „Purpose Design“ dar, bei dem die gesamte Fahrzeugstruktur vollständig neu für den Einbau eines elektrischen Antriebsstrangs zugeschnitten wird und Fahrzeugkomponenten grundlegend neu angeordnet werden. Im Wertschöpfungsmodell ist die Schnittmenge an Komponenten integriert, die bei den jeweils betrachteten Fahrzeugen sowohl bei „Conversion Design“ als auch bei „Purpose Design“ radikalen Veränderungen unterliegen bzw. welche zusätzlich oder gar nicht mehr erforderlich sind (Stahlecker et al. 2011). Komponenten, welche eher inkrementelle Innovationen darstellen oder gar keine Veränderungen erfahren, wie beispielsweise Karosseriestrukturen aus Verbundwerkstoffen, bleiben in den weiteren Analysen außen vor (Stahlecker et al. 2011). In Tabelle III.6 sind die betrachteten Komponenten sowie die jeweils zu erwartenden Änderungsgrade zusammengefasst.

Für die aus der Kombination der zukünftigen Antriebstechnologien und Fahrzeugsegmente resultierenden 16 generischen Fahrzeugtypen wurden jeweils die erforderlichen Komponenten systematisch entlang den Hauptmodulen eines Automobils technisch analysiert und auf Basis eines Prognosemodells für die Jahre 2010, 2020 und 2030 monetär bewertet. Dabei wurden in das Modell im Zeitverlauf eintretende Kostendegressionseffekte integriert, die aufgrund des technologischen Fortschritts und

aufgrund von Skalen- und Produktivitätseffekten erwartet werden. Solche Effekte sind insbesondere bei den neuen Technologien von hoher Relevanz. Des Weiteren wurden für die Kosten der einzelnen Komponenten keine deterministischen Annahmen, sondern unterschiedliche Erwartungswerte in Form von Bandbreiten angenommen. Dies ist insofern von Bedeutung, als dass beispielsweise nach heutigem Stand die Erwartungswerte für die Batteriekosten eine größere Bandbreite aufweisen und die jeweiligen Kosten einen maßgeblichen Einfluss auf die Diffusion der alternativen Antriebskonzepte haben und umgekehrt.

Die zweite zentrale Eingangsgröße in das Modell ist die Entwicklung der weltweiten Nachfrage nach Pkw. In der nahen Vergangenheit wurden zahlreiche Marktprognosen zur Diffusion von Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten veröffentlicht, die sich hinsichtlich ihrer Ausprägungen teilweise signifikant unterscheiden (Kap. II.2.2). Für die Analyse der Wertschöpfung in diesem Kapitel sowie für die Analysen von Arbeitsplatzeffekten in Deutschland durch die weltweite Verbreitung von Elektrofahrzeugen (Kap. III.2.4) wurde auf das im Rahmen des TAB-Innovationsreports „Zukunft der Automobilindustrie“ (TAB 2012) entwickelte Marktentwicklungsszenario „Technologiebruch“ zurückgegriffen. Dieses Szenario wird im folgenden Kapitel beschrieben, bevor anschließend die Ergebnisse der Analysen anhand des Wertschöpfungsmodells auf Basis dieses Szenarios dargestellt werden (Kap. III.2.2.3).

## 2.2.2 Szenario für den weltweiten Markthochlauf zur Analyse von Wertschöpfung und Arbeitsplatzeffekten

Wie erwähnt, wird als zentrale Eingangsgröße für das Wertschöpfungsmodell – sowie für die Analyse von Arbeitsplatzeffekten in Kapitel III.2.4 – die weltweite Marktpenetration mit Elektrofahrzeugen bis 2030 entsprechend dem Szenario „Technologiebruch“ des TAB-Innovationsreports „Zukunft der Automobilindustrie“ (TAB 2012) herangezogen.

Dieses Szenario ist eines von drei Zukunftsszenarien und beschreibt eine moderate Diffusion von Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten. Die zentrale Annahme ist, dass sich die Nutzerakzeptanz von alternativen Antrieben in Zukunft deutlich erhöht und Vorurteile gegenüber neuen Technologien durch umfassende Informationen in Form von staatlichen Leuchtturm- und Schaufensterprojekten abgebaut werden. Gleichzeitig werden technologische Verbesserungen, insbesondere bei den Batterien erzielt. Insgesamt wird durch verschiedene Maßnahmen wie z. B. Kaufprämien und Infrastrukturaufbau eine deutliche Attraktivitätssteigerung alternativer Antriebe erreicht.

Die entsprechenden Entwicklungen sind in Abbildung III.19 in aggregierter Form dargestellt. Das herangezogene Szenario bietet die Vorteile, dass sowohl nach Fahrzeugsegmenten und Technologien als auch nach unterschiedlichen Absatzregionen differenziert wird.

Tabelle III.6

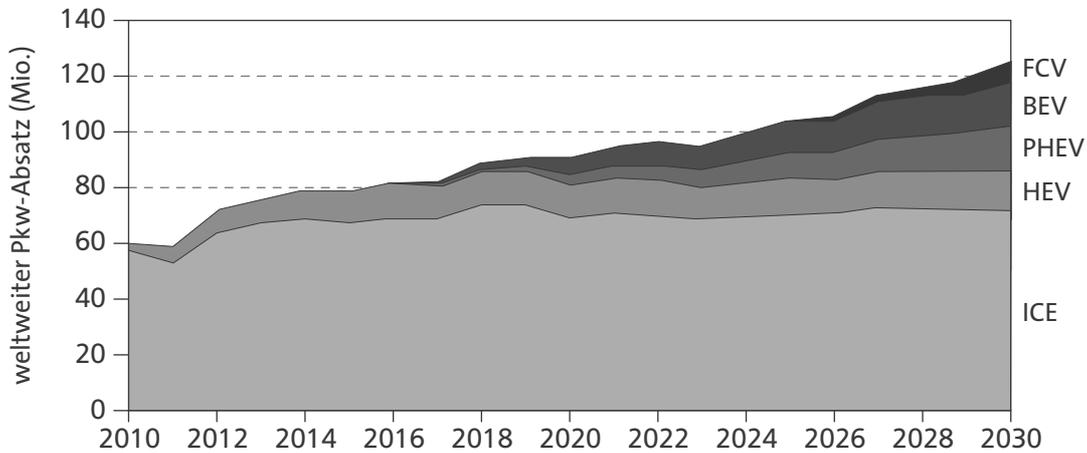
### Überblick über die betrachteten Fahrzeugkomponenten

Hauptmodul	Komponenten	ICEV	HEV	PHEV	BEV	FCEV
konventioneller Motor	Verbrennungsmotor	Modifikation	Modifikation	Modifikation	Entfall	Entfall
	Starter und Lichtmaschine	Modifikation	Modifikation	Modifikation	Entfall	Entfall
	Abgasanlage	Modifikation	Modifikation	Modifikation	Entfall	Entfall
	Kraftstoffversorgung	Modifikation	Modifikation	Modifikation	Entfall	Modifikation
Elektroantrieb	Elektromotor	–	neu	neu	neu	neu
Antriebsstrang	Getriebe	Modifikation	Modifikation	Modifikation	Entfall	Entfall
Elektronik	Traktionsbatterie	–	neu	neu	neu	neu
	Ladegerät	–	neu	neu	neu	neu
	Leistungselektronik	–	neu	neu	neu	neu

Quelle: Stahlecker et al. 2011

Abbildung III.19

**Angenommene Entwicklung der weltweiten Absatzmengen für Pkw bis 2030, differenziert nach Antriebstechnologien**



Quelle: TAB 2012 (Szenario „Technologiebruch“)

Verglichen mit dem in Kapitel II.2.7 beschriebenen MarkthochlaufszENARIO für Deutschland, welches zur ökologischen Bewertung (Kap. III.1) einer Verbreitung der Elektromobilität in Deutschland herangezogen wurde, geht das weltweite Szenario „Technologiebruch“ in eine ähnliche Richtung. Allerdings werden im Szenario „Technologiebruch“ FCEV weltweit in der Summe erst später gesehen, da weltweit eine umfassende Wasserstoffinfrastruktur wahrscheinlich erst verzögert realisierbar ist und große Pkw mit hoher Fahrleistung, für die sich FCEV besonders anbieten, im Vergleich zu Deutschland eher unterrepräsentiert sind. Weiterhin wird im Szenario „Technologiebruch“ BEV in Megacities weltweit eine größere Rolle zugesprochen als es im MarkthochlaufszENARIO für deutsche Großstädte der Fall ist.

**2.2.3 Wertschöpfungspotenziale**

Im Folgenden werden nun die mittels des Wertschöpfungsmodells eruierten potenziellen Veränderungen der direkten Bruttowertschöpfung (nachfolgend als „Wertschöpfung“ bezeichnet) dargestellt. Bei der Interpretation dieser Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die in Kapitel III.2.2.1 dargestellten Eingangsparameter mit Unsicherheiten behaftet sind. In einem ersten Schritt wird aufgezeigt, wie sich gemäß Modell die Wertschöpfung bei Komponenten konventioneller Technologien (Verbrennungsmotor inklusive Optimierungsmaßnahmen, Starter/Lichtmaschine, Abgasanlage, Kraftstoffversorgung, Getriebe) in absoluter Höhe entwickeln wird. Dem werden die Komponenten gegenüber gestellt, die bei alternativen Antriebskonzepten neu benötigt werden, wie die Traktionsbatterie, der Elektromotor, die Leistungselektronik, das Ladegerät ebenso wie Brennstoffzelle und Wasserstofftank (Abb. III.20).

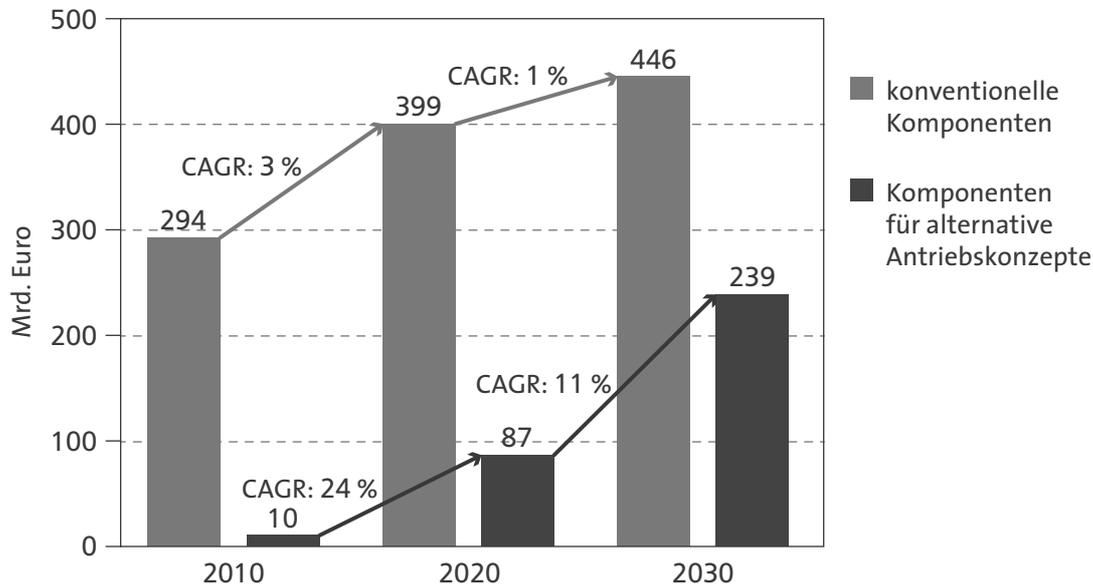
Abbildung III.20 zeigt, dass mit den betrachteten konventionellen Komponenten gegenwärtig eine weltweite Wertschöpfung in Höhe von 294 Mrd. Euro realisiert wird. Den Berechnungen zufolge steigt die Wertschöpfung mit konventionellen Komponenten bis 2020 jährlich um durchschnittlich 3 Prozent auf knapp 399 Mrd. Euro an. Da der gesamte Automobilmarkt in diesem Zeitraum pro Jahr durchschnittlich um über 4 Prozent wächst, sind die Wachstumschancen für konventionelle Komponenten allerdings als leicht unterdurchschnittlich zu bewerten. Für den Zeitraum von 2020 bis 2030 ist für konventionelle Komponenten mit einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von nur 1 Prozent zu rechnen, sodass im Jahr 2030 deren absolute Wertschöpfung bei rund 446 Mrd. Euro liegen wird. Damit profitiert dieser Markt auch im kommenden Jahrzehnt nach wie vor vom Gesamtwachstum. Allerdings ist wiederum nur von einem unterdurchschnittlichen Wachstum auszugehen, da für den Gesamtmarkt ein durchschnittliches jährliches Wachstum von über 3 Prozent prognostiziert wird.

Die Wachstumserwartungen für Komponenten alternativer Antriebskonzepte sind deutlich positiver einzuschätzen. Bis 2020 wird sich die Wertschöpfung bei diesen Komponenten jährlich um durchschnittlich 24 Prozent auf rund 87 Mrd. Euro steigern. Im Jahr 2030 könnte der Wert bei 239 Mrd. Euro liegen. Dies entspricht mehr als der Hälfte des Wertes für konventionelle Komponenten. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die jährlichen Wachstumsraten der neuen Komponenten im gesamten Betrachtungszeitraum signifikant über denen des Gesamtmarktes liegen.

Eine vertiefende Betrachtung entlang der einzelnen Komponenten offenbart, wo die größten Wachstumschancen für Komponenten alternativer Antriebskonzepte bzw. die größten Wachstumsrisiken für konventionelle Kompo-

Abbildung III.20

## Globale Wertschöpfungspotenziale (elektromobilitätsrelevant = inkl. HEV und FCEV)



Eigene Darstellung

nennten liegen (Abb. III.21). Im Zeitraum bis 2020 können die unterschiedlichen konventionellen Komponenten in etwa vergleichbare jährliche Wachstumsraten um 3 Prozent erzielen. Eine Ausnahme bildet das Getriebe, das mit einem jährlichen Wachstum von 4 Prozent nahezu dem Gesamtmarktwachstum entspricht. Dies ist damit zu begründen, dass zumindest in HEV und auch in PHEV leistungsfähige und damit werthaltige Getriebe in vergleichbarem Umfang benötigt werden wie in konventionellen Fahrzeugen. Erweitert man den Zeithorizont bis ins Jahr 2030, so zeigen sich ähnliche Tendenzen. Die jährlichen Wachstumsraten der übrigen konventioneller Komponenten pendeln sich bei rund 1 Prozent ein, während das Getriebe immer noch überdurchschnittlich profitiert. Zudem fällt auf, dass Komponenten, die für die Optimierung des Verbrennungsmotors erforderlich sind, wie variabler Ventiltrieb oder Benzindirekteinspritzung, kaum noch Wachstum realisieren können. Die Ursache hierfür ist darin zu sehen, dass mit der abnehmenden technischen Bedeutung der klassischen Verbrennungstechnologie als Antriebsquelle auch die Wirkung von Optimierungsmaßnahmen bezogen auf die Gesamtleistung eines Fahrzeugs zurückgeht. Die Hebeleffekte der technischen Optimierung werden zukünftig eher im Bereich der Batterie und der Leistungselektronik verortet sein.

Bei den Komponenten alternativer Antriebskonzepte lässt sich zunächst erwartungsgemäß feststellen, dass die Batterie sowohl mittelfristig als auch langfristig die Komponente mit der höchsten Wertschöpfung darstellt. Bis ins Jahr 2020 können im Bereich der Batterie die höchsten jährlichen Wachstumsraten mit durchschnittlich knapp 30 Prozent realisiert werden. Darauf folgen Leistungs-

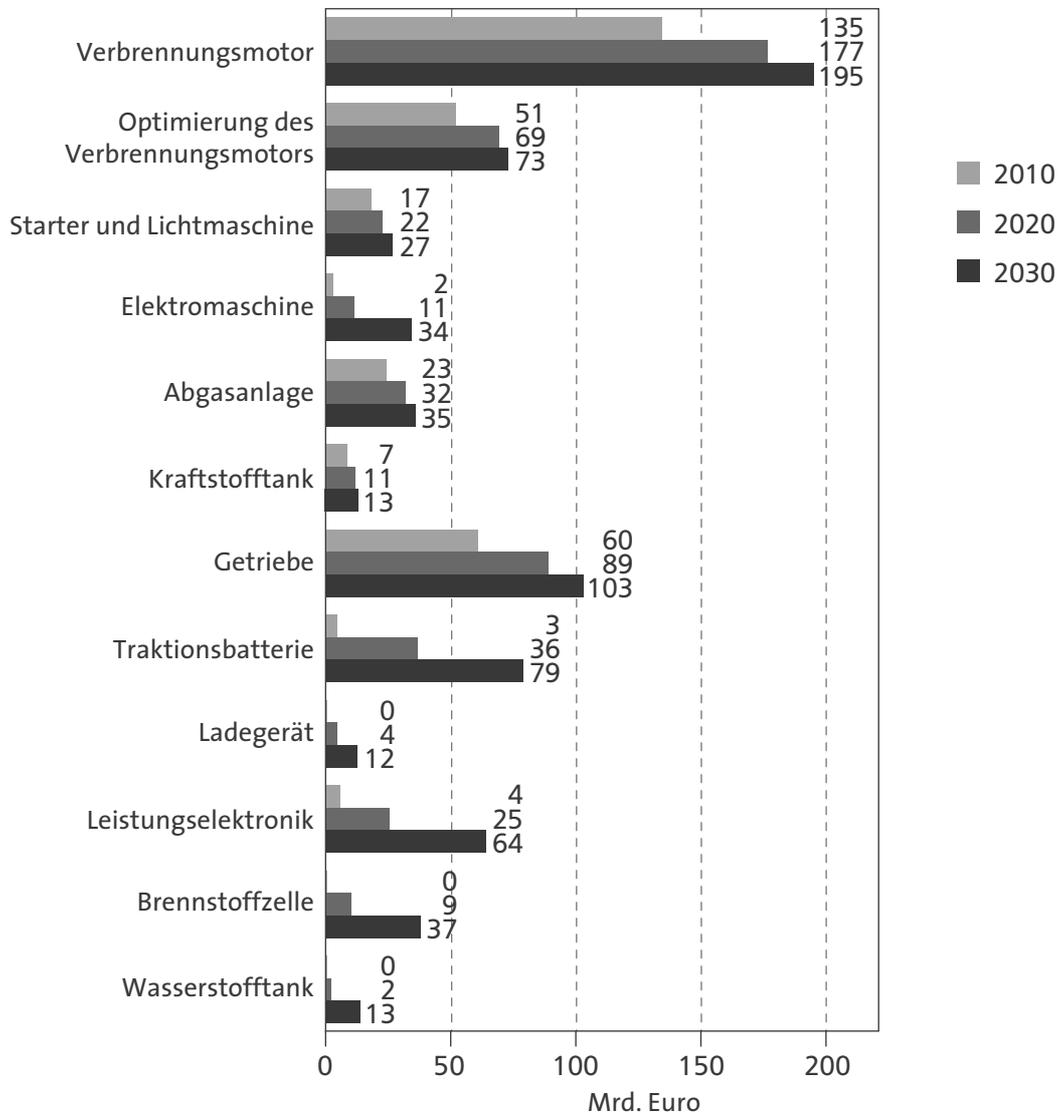
elektronik und Elektromotor. In der langfristigen Betrachtung zeigt sich aber auch, dass die jährlichen Wertschöpfungszuwächse der Batterie unter denen von Leistungselektronik oder Elektromotor liegen. Ein wesentlicher Grund für diese Entwicklung ist, dass ab 2020 bei der Batterieherstellung verstärkt Kostendegressions-effekte durch technische Weiterentwicklung und Lernfortschritte zum Tragen kommen. Bei Elektromotoren ebenso wie bei der Leistungselektronik sind aufgrund des schon hohen Ausgangsniveaus durch jahrzehntelange Erfahrung geringere Produktivitätsfortschritte zu erwarten, sodass sich die zunehmende Nachfrage auch unmittelbar in der Wertschöpfung niederschlägt. Eine wertmäßig eher untergeordnete Rolle spielt das Ladegerät.

Zudem schlägt sich der Bedeutungszuwachs von FCEV, welche sich voraussichtlich ab Mitte des nächsten Jahrzehnts verstärkt im Markt etablieren werden, in den Wertschöpfungspotenzialen nieder. Für das Jahr 2030 wird angenommen, dass die durch die Brennstoffzelle realisierte Wertschöpfung bei rund 37 Mrd. Euro liegen wird. Vergleichbare Wachstumsraten werden für den fahrzeuginternen Wasserstofftank angenommen.

Wie bereits dargelegt, stellt die Batterie zukünftig eines der wichtigsten und wachstumsstärksten Bauteile in Pkw dar. Daher scheint es lohnenswert, die zentralen Wertschöpfungsschritte und ihre Wertschöpfungspotenziale im Rahmen der Batterieherstellung näher zu beleuchten. Grundsätzlich lässt sich bei der Batterieherstellung zwischen den beiden Hauptwertschöpfungsschritten Zelle und Batteriepack/-system unterscheiden. In letzterem werden die einzelnen Zellen zu einem Gesamtsystem zusammengesetzt.

Abbildung III.21

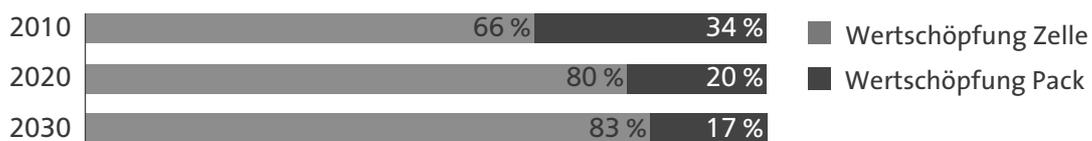
**Wertschöpfungspotenziale von zentralen Fahrzeugkomponenten**



Eigene Darstellung

Abbildung III.22

**Wertschöpfungspotenziale im Rahmen der Batterieherstellung**



Eigene Darstellung

Wie die in Abbildung III.22 dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, erfolgt ein Großteil der Wertschöpfung im Rahmen der Zellherstellung. Das Verhältnis, das aktuell etwa zwei Drittel der Wertschöpfung durch die Zellherstellung und ein Drittel durch die Packherstellung generiert werden, ändert sich noch weiter zugunsten der Zellherstellung. Diese wird im Jahr 2030 voraussichtlich über 80 Prozent der Wertschöpfung der Batterie einnehmen. Die Gründe für diese Verschiebung sind in erster Linie darin zu sehen, dass im Rahmen der Batteriesystemherstellung eine deutlich höhere Kostendegression und Produktivitätssteigerung zu erwarten ist als bei der Herstellung der Zelle. Bei der Zellherstellung ist lediglich bei den Herstellungsprozessen mit nennenswerten Produktivitätsfortschritten zu rechnen. Die übrigen Kostenbestandteile verharren aufgrund ihrer hohen Rohstoffintensität auf einem nahezu gleichen Niveau.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass konventionelle Fahrzeugkomponenten auch langfristig im Automobilbau benötigt werden. Allerdings nehmen sowohl ihre technische als auch ökonomische Bedeutung sukzessive ab, insbesondere im Laufe des nächsten Jahrzehnts. Nennenswerte Wachstumspotenziale versprechen nur Komponenten, die für alternativ betriebene Fahrzeuge von hoher Relevanz sind.

Analysiert man vor dem Hintergrund dieser Entwicklungsperspektiven die Aktivitäten der Automobilhersteller und der großen bekannten Automobilzulieferfirmen im Bereich der Elektromobilität, so wird deutlich, dass die deutsche Automobilindustrie ein hohes Aktivitätsniveau in diesem Bereich aufweist. Neben den Automobilherstellern sind insbesondere auch die großen Zulieferunternehmen aktiv und positionieren sich als Anbieter von Gesamtsystemen für die Elektromobilität am Markt oder konzentrieren sich auf die Entwicklung von Komponenten und Teilen für solche Systeme (Stahlecker et al. 2011). Als ausgeprägt sind die Kompetenzen vor allem im Bereich der Leistungselektronik einzuschätzen. Vor allem große Systemlieferanten wie die Robert Bosch GmbH oder die Continental AG verfügen über langjährige Erfahrungen in der Entwicklung und Herstellung solcher Systeme, haben sich als global führende Akteure etabliert und können auf entsprechende Zulieferstrukturen aufbauen. Ein ähnliches Bild zeigt sich im Bereich Elektromotoren. Unternehmen, die seit Jahren elektrische Antriebe für automobiler Anwendungen, beispielsweise für Fensterheber, entwickeln und herstellen, versuchen sich mit ihren Kompetenzen auch als leistungsstarke Zulieferer für elektrische Antriebsmotoren zu etablieren bzw. haben dies schon in bestimmten Nischensegmenten erreicht. Auch Unternehmen, deren Kerngeschäft die Herstellung von Elektromotoren ist, die aber bislang nicht im Automobilbereich tätig waren, haben das Marktpotenzial erkannt und versuchen, ihr Know-how auch für die automobiler Anwendung nutzbar zu machen. Beispielhaft seien die Unternehmen Siemens oder SEW Eurodrive angeführt. Gleichzeitig verstärken Automobilhersteller ihre Anstrengungen, Kompetenzen zur Entwicklung und Fertigung von Elektromotoren aufzubauen, wie beispiels-

weise die Kooperation zwischen der Robert Bosch GmbH und der Daimler AG zeigt.

Im Hinblick auf die Herstellung von Traktionsbatterien erscheint die gegenwärtige Situation differenzierter. Einerseits lassen sich sowohl bei Automobilherstellern als auch bei großen Systemzulieferern vielfältige Aktivitäten und Erfolge im Bereich der Batteriesysteme beobachten. Andererseits ist das Aktivitätsniveau im Bereich der Zellherstellung deutlich geringer, obgleich dieser Bereich das Vielfache an Wertschöpfung verspricht. Hier scheint es, als ob die führenden und vorrangig in Asien beheimateten Hersteller von Batterien für Konsumgüter, insbesondere Lithium-Ionen-Batterien, ihre dominierende Stellung auch auf den Markt für Fahrzeugbatterien übertragen könnten. Bis auf wenige Ausnahmen, wie die Li-Tec Battery GmbH, haben sich in der deutschen Automobilindustrie bislang keine eigenständigen Strukturen für die Entwicklung und Herstellung von Zellen für Fahrzeugbatterien etabliert. Einige Unternehmen der deutschen Automobilindustrie verfolgen daher die Strategie, den Technologiezugang über Kooperationen mit Batterieherstellern zu realisieren. So ist beispielsweise das Unternehmen LiMotive ein Gemeinschaftsunternehmen der Samsung SDI und der Robert Bosch GmbH. Im Rahmen der Zellherstellung wird auf das umfangreiche Know-how von Samsung zurückgegriffen mit der Konsequenz, dass neue Entwicklungs- und Fertigungskapazitäten für Traktionsbatterien bei Samsung in Korea angesiedelt werden und nicht in Deutschland.

Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass sich die Aussagen auf Basis der vorliegenden Analysen vorrangig auf Automobilhersteller und große Zulieferunternehmen beziehen. Das gezeichnete Bild einer größtenteils global führenden Automobil- und Zulieferbranche in Deutschland bedarf unter Umständen einer gewissen Korrektur, betrachtet man die Zulieferindustrie insgesamt. Das eingangs skizzierte Spezifikum der Automobilindustrie, d. h. die hohe Arbeitsteilung über verschiedene Zulieferebenen hinweg und die damit verbundene Spezialisierung insbesondere auf tieferen Ebenen, könnte bedeuten, dass solche technologisch eng fokussierten Zulieferbetriebe mittelfristig ihr Technologie- und Produktportfolio grundlegend überarbeiten müssen, wenn sie auch zukünftig am Marktwachstum partizipieren wollen. Diese Unternehmen sind häufiger von kleiner oder mittlerer Größe, sodass sie ein solcher Wandel vor enorme Herausforderungen stellt. Daher sollten gerade diese Zulieferunternehmen adressiert werden, wenn es darum geht, günstige Rahmenbedingungen für einen technologischen Wandel zu schaffen.

### 2.3 Strategische Positionierung der Automobilhersteller

Für die Automobilhersteller sind verschiedene Strategien einer Positionierung im Zukunftsmarkt alternativer Antriebskonzepte möglich. Potenzielle Strategien unterscheiden sich im Fokus auf spezifische alternative Antriebsarten (BEV, PHEV, FCEV) und im Zeitpunkt des Markteintritts („first mover“, „fast follower“, „second

mover“). Die offiziellen Verlautbarungen der meisten Automobilhersteller erzeugen ein Bild, nach dem diese auf alle drei Antriebskonzepte (BEV, PHEV, FCEV) setzen würden. Tatsächlich werden sehr verschiedene Strategien verfolgt, die sich vor allem in der zeitlichen Positionierung des Markteintritts bzgl. der verschiedenen Antriebstechnologien unterscheiden. Zum Teil priorisieren einzelne Hersteller auch gezielt eine der Antriebsarten.

Im Bereich der BEV wird eine First-Mover-Strategie von Herstellern wie Mitsubishi (i-MiEV), Nissan (LEAF) und Renault (Kangoo Z.E., Fluence Z.E., ZOE, Twizy) verfolgt, die ihre ersten BEV in den Jahren 2009 bis 2011 auf den Markt gebracht haben. In Europa wird 2012 vor allem die europaweite Einführung der vier ZE-Modelle (Zero-Emission-Modelle) von Renault Schlussfolgerungen auf den Erfolg dieser First-Mover-Strategie ermöglichen.<sup>7</sup> Daneben existieren in diesem Zeitraum zahlreiche Anbieter von BEV in Kleinserien bzw. Umbauten von existierenden Pkw, die sowohl elektrische Sportwagen als auch Klein- und Kompaktwagen anbieten. Als „fast follower“ wird im Jahr 2012 auch Daimler den Smart electric drive in größeren Stückzahlen auf den Markt bringen sowie Ford den Focus Electric.

Danach plant im Bereich der BEV eine größere Gruppe von Automobilherstellern mit einer Second-Mover-Strategie den Beginn der Markteinführung im Jahr 2013. Dazu gehören BMW (i3), Volkswagen (up!, Golf) und evtl. auch Audi (A2) sowie Kia (Ray EV). Teilweise erweitern in 2013 die „first mover“ bzw. „fast follower“ ihr Angebot wie z. B. Daimler (B-Klasse E-cell). Daneben entwickeln die Hersteller eine ganze Reihe von elektrischen Kleinstfahrzeugen, Scootern oder Fahrrädern, teilweise auch mit dem Ziel der Markteinführung in den Jahren 2012 bis 2014.

Die Strategien der Hersteller unterscheiden sich noch hinsichtlich des Ansatzes, entweder ein existierendes Fahrzeug zu einem Elektrofahrzeug weiterzuentwickeln oder ein komplett neues, auf die Elektromobilität ausgerichtetes Fahrzeugkonzept zu entwerfen (Kap. III.2.2.1). Beispielhaft sollte an dieser Stelle der BMW i3 genannt werden, dem völlige Neuentwicklungen bei Karosseriebau und Materialverwendung zugrunde liegen. Dieses Fahrzeug wurde speziell für den Einsatz als BEV designt.

Bei den PHEV wird die First-Mover-Strategie von anderen Herstellern als bei den BEV verfolgt. Die First-Mover-Phase erstreckt sich auf den Zeitraum von 2010 bis 2012, in dem GM (Chevrolet Volt), Opel (Ampera) und Toyota (Prius Plug-in Hybrid) entsprechende Modelle auf den Markt bringen. Als „fast follower“ im Jahr 2013 können sowohl Ford (Fusion), Volvo (V60 Plug-in Hybrid) und Hyundai (i30 plug-in) angesehen werden. „Second mover“ sind hier BMW (i8, ggf. weitere Modelle) sowie Volkswagen, Daimler und Audi, die die Markteinführung von PHEV für den Zeitraum von 2013 bis 2015 angekün-

dig haben. Peugeot hat die ersten PHEV für 2016 avisiert. Insgesamt ist die strategische Situation bei PHEV am unübersichtlichsten.

Im Bereich der FCEV treibt insbesondere eine Gruppe von vier Automobilherstellern über die Industrieinitiative „H2 Mobility“ die Kommerzialisierung für das Jahr 2015 voran. Zu diesen „first mover“ bei FCEV gehören Daimler, GM, Nissan und Toyota. Hinzu kommt Hyundai mit dem Ziel, bereits bis 2014 rund 2 000 FCEV für Testzwecke zu produzieren und 2015 kommerziell auf den Markt zu bringen. Die Aussagen über Kosten der Fahrzeuge sowie über Produktionskapazitäten sind heute noch vage und entziehen sich einer fundierten Beurteilung.

Eine alternative Strategie zur Verringerung von THG-Emissionen sowie der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern liegt in der Steigerung der Effizienz konventioneller Pkw bzw. von HEV. Hier sind auch von deutschen Herstellern deutliche Fortschritte angekündigt. Beispielsweise strebt Volkswagen bis 2015 einen CO<sub>2</sub>-Emissionswert für alle seine Neuwagen in Europa von 120 g CO<sub>2</sub>/km an und läge damit um knapp 13 g CO<sub>2</sub>/km unter seinem durch die Europäische Kommission vorgegebenen spezifischen Grenzwert von 132,8 g CO<sub>2</sub>/km für dieses Jahr (Kap. II.5.3).

Sowohl Elektrofahrzeuge als auch FCEV sind als Ergänzung zu anderen alternativen Technologien (und Kraftstoffen) zu verstehen. Inwieweit die Automobilindustrie diese Vielfalt an Antriebskonzepten entwickeln und einführen kann, ist noch offen. Einige große Hersteller werden wohl in der Lage sein, ein breites Portfolio alternativer Antriebe zu entwickeln und anzubieten, während dies anderen Herstellern allenfalls über (internationale) Joint Ventures möglich sein wird.

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass deutsche Hersteller im Bereich der Elektromobilität (BEV, PHEV) eine eher abwartende Position einnehmen und nicht zu den „first mover“ gehören. Allerdings beziehen alle nationalen Automobilbauer eine Position zumindest im Bereich der „second mover“. Dies lässt erwarten, dass sie beim Markthochlauf bis 2020 auch mit größeren Marktanteilen beteiligt sein werden. Im Bereich der FCEV gehört Daimler zur Gruppe der „first mover“, während sich die anderen nationalen Automobilhersteller noch bedeckt halten.

## 2.4 Gesamtwirtschaftliche Effekte

Während Kapitel III.2.2 zur ökonomischen Analyse von Effekten der Elektromobilität auf die automobilen Wertschöpfung einen sogenannten Bottom-up-Ansatz verfolgt, der von einer Analyse der Einzeltechnologien und der von Veränderungen betroffenen Akteure in der automobilen Wertschöpfungskette ausgeht, wird in diesem Kapitel die Perspektive gewechselt und eine Analyse der gesamtwirtschaftlichen Effekte der Elektromobilität entwickelt. Diese Analyse verwendet wie die Analysen zur automobilen Wertschöpfung Ergebnisse des weltweiten Szenarios „Technologiebruch“ (Kap. III.2.2.2), baut aber auf einer anderen Methodik auf, bei der das europäische

<sup>7</sup> Der Mitsubishi i-MiEV wird auch von Peugeot und Citroën unter eigenem Namen (iOn, C-Zero) vermarktet. Renault und Nissan bilden seit mehr als 10 Jahren eine Allianz und kooperieren bei den BEV sehr eng miteinander.

integrierte Bewertungsmodell ASTRA (Assessment of Transport Strategies)<sup>8</sup> zur Abschätzung der gesamtwirtschaftlichen Effekte eingesetzt wird.

**2.4.1 Gesamtwirtschaftliche Analysen mit dem ASTRA-Modell**

Das ASTRA-Modell wird seit dem 4. Forschungsrahmenprogramm der europäischen Kommission entwickelt und zur Politikanalyse im europäischen Rahmen eingesetzt, seit 2007 auch zur Analyse nationaler Politiken in Deutschland. Ziel der ASTRA-Entwicklung war die Bereitstellung eines Werkzeugs zur strategischen Bewertung der europäischen Verkehrspolitik. „Strategisch“ bedeutet zum einen eine längerfristige Perspektive (30 bis 50 Jahre Zeithorizont) zu wählen und zum anderen eine integrierte Analyse der Wirkungen sowohl im Verkehrssystem als auch im Wirtschaftssystem und im Umweltbereich zu ermöglichen. Da zwischen diesen einzelnen Systemen eine Vielzahl von Rückkopplungen beobachtet werden können, wurde System Dynamics als Modellierungsansatz gewählt, dessen Stärken in der Abbildung solcher Rückkopplungseffekte liegen.

Anwendungen von ASTRA seit 2000 befassen sich z. B. mit der Entwicklung der Lissabon-Strategie, der Abschätzung der Beschäftigungswirkung von Technologiepolitiken und von Politiken zur Förderung erneuerbarer Energien, der Bewertung der Transeuropäischen Verkehrsnetze, mit Verkehrspreispolitik und mit Szenarien zur Einführung neuer Technologien und Kraftstoffe im Verkehrssystem, der Abschätzung der ökonomischen Wirkungen hoher Ölpreise auf die EU und der Be-

wertung von Klimaschutzstrategien im Verkehr. Eine detailliertere Beschreibung der Anwendung des Modells am Beispiel von Klimaschutzpolitik in Deutschland im Bereich Gebäude, Unternehmen und Verkehr (inklusive der Einführung der Elektromobilität als eine der Maßnahmen) findet sich in Schade et al. (2009). Mittlerweile werden in Deutschland neben ASTRA weitere Ansätze zur gesamtwirtschaftlichen Analyse vorangetrieben, die – ebenfalls basierend auf der Modellierung der Rückkopplungen zwischen Verkehr und Ökonomie – eine Bewertung der Elektromobilität vornehmen. Dazu gehört das Marktmodell Elektromobilität (ESMT 2011).

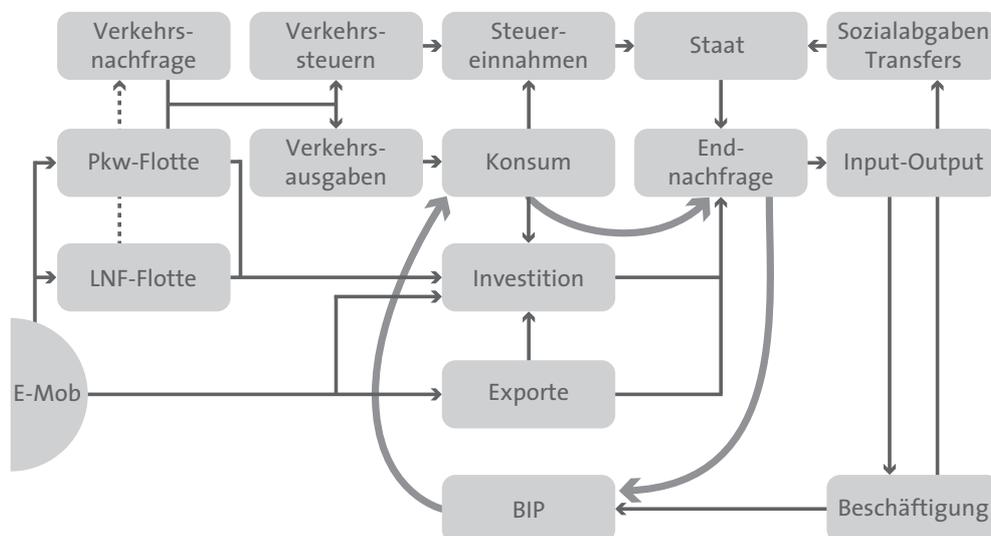
ASTRA beschreibt 29 europäische Länder, deren Ökonomien jeweils in 25 Sektoren in der europäischen Gliederung für Input-Output-Tabellen von 1979 (NACE-CLIO) unterteilt und untereinander verknüpft sind, sowohl über den innereuropäischen Handel als auch über die Verkehrsströme zwischen den einzelnen Ländern. Relevant für die Einführung von Maßnahmen und die Auswertung sind die Ergebnisse bzgl. der gesamtwirtschaftlichen Effekte in Deutschland.

ASTRA besteht aus neun Modulen, die hier nur in Ausschnitten skizziert werden sollen. Abbildung III.23 beschreibt schematisch den Einbezug der Elektromobilität (E-Mob) in den Verkehrs- und Ökonomiemodulen. Das Bevölkerungsmodul stellt anderen Modulen relevante Rahmenbedingungen zur Verfügung, wie das Arbeitskräftepotenzial oder die aufgrund von Unterschieden im Verkehrsverhalten relevanten Altersgruppen. Im makroökonomischen Modul werden die Angebotsseite (d. h. Produktionsfaktoren und Produktivität) und die Nachfrageseite (d. h. Konsum, Investition, Ex-/Importe und Staatskonsum) der Volkswirtschaften, die sektoralen Verflechtungen mittels Input-Output-Tabelle, die sektorale Beschäftigung und der Staatshaushalt abgebildet.

<sup>8</sup> Beschreibung und Anwendungen des ASTRA-Modells finden sich auf der Website [www.astra-model.eu](http://www.astra-model.eu). Eine umfassende Dokumentation ist in Schade 2005 und Krail 2009 enthalten.

Abbildung III.23

**Schematische Darstellung der Modellbeziehungen der Elektromobilität im gesamtwirtschaftlichen Kontext in ASTRA**



Eigene Darstellung

Das ökonomische Konzept von ASTRA folgt nicht einer einzelnen ökonomischen Theorie, sondern nutzt Elemente aus verschiedenen Theoriegebäuden und verknüpft diese durch die System-Dynamics-Methode, indem Rückkopplungen zwischen diesen Elementen implementiert werden. Ein zentraler Baustein ist das keynesianisch konsumgetriebene Investitionsverhalten, welches ergänzt wird durch Investitionsstimuli der Exporte. Auf der Angebotsseite wird eine neoklassische Produktionsfunktion verwendet, ergänzt um endogenisierten technischen Fortschritt, der unter anderem ausgelöst wird durch die sektoralen Investitionen. Innerhalb bzw. zwischen den einzelnen Rückkopplungsschleifen können Verzögerungseffekte auftreten und berücksichtigt werden.

Einnahme- und Ausgabeseite des Staatshaushaltes sind ebenfalls vollständig modelliert. Dabei sind die verkehrsbezogenen Ein- und Ausgaben (u. a. Mineralölsteuer, Kfz-Steuer, Mehrwertsteuer auf Kraftstoffe und Pkw) detailliert abgebildet, während für andere Größen (wie Einkommensteuer, Mehrwertsteuer, Transferzahlungen, Importsteuer) vereinfachte Aggregate abgeschätzt werden.

Verkehrspolitische Maßnahmen werden im Verkehrsmodell implementiert. Sie lösen dort ökonomische Impulse aus. Beispielsweise führt eine Veränderung der Mineralölsteuer zu einer geänderten Modalwahl und verändertem Pkw-Kaufverhalten. In der Summe der Effekte ergeben sich eine veränderte Nachfrage nach Kraftstoffen und Pkw und damit veränderte Steuereinnahmen durch Mineralölsteuer, Kfz-Steuer oder Mehrwertsteuer auf Kraftstoffe und Pkw, aber auch durch veränderte Strukturen der Konsumausgaben der Haushalte. Diese Veränderungen werden als Impulse über Mikro-Makro-Brücken an das ökonomische Modul weitergegeben.<sup>9</sup> Neben den Impulsen aus dem Verkehrssystem können auch direkte Effekte einer Maßnahme im ökonomischen Modell exogen eingebracht werden. Beispiele wären induzierte Investitionen in FuE oder in neue Produktionsanlagen zur Herstellung von Elektromotoren oder Batterien bzw. eine Steigerung der Exporte durch die Erlangung eines Leitmarktes.

Das Verkehrssystem ist in ASTRA mit einem voll integrierten 4-Stufen-Verkehrsmo­dell implementiert (Verkehrserzeugung, -verteilung, Modal- und Routenwahl) mit der Einschränkung, dass die Routenwahl sich nur auf die Wahl der Routenkategorie (z. B. Autobahn, Landstraße) bezieht und nicht auf die Wahl der exakten Route. Das Verkehrsmodell ist verknüpft mit Flottenmodellen für Pkw, LNF, Lkw und Busse. Die Flottenmodelle bestimmen Verbrauchs- und Emissionsfaktoren sowie die Verkehrskosten der Straßenfahrzeuge. Veränderungen im modellierten Verkehrsverhalten der Verkehrsnutzer können auf allen Entscheidungsstufen des 4-Stufen-Verkehrs-

modells abgeschätzt werden, d. h. bei Modalwahl, Zielwahl und somit auch bei zurückgelegten Distanzen.

#### 2.4.2 Szenarien und Analyseparameter

Im Allgemeinen erfolgen die Analysen von Politikmaßnahmen mit ASTRA durch Vergleich eines Referenzszenarios mit Politik­szenarien. Zum vertieften Verständnis der Politik­szenarien werden zusätzlich Sensitivitätsanalysen der Szenarien durchgeführt, d. h. einzelne Parameter oder Inputgrößen werden variiert und ihr Einfluss auf die Ergebnisse der Politikmaßnahmen geprüft.

Als *Referenzszenario* dient in diesem Projekt eine Kombination von Szenarien, welche in den Projekten GHG-TransPoRD ([www.ghg-transpord.eu](http://www.ghg-transpord.eu)) und Politik­szenarien-VI (noch unveröffentlicht) entwickelt wurden. Dieses Referenzszenario berücksichtigt die Effekte der Finanz- und Wirtschaftskrise von 2008/2009 sowohl im Wirtschaftssystem als auch im Verkehrssystem. Tabelle III.7 stellt die Entwicklung der wesentlichen Variablen im Referenzszenario dar. Das Bruttoinlandsprodukt wächst im gesamten Zeitraum von 2010 bis 2030 durchschnittlich mit 1,3 Prozent jährlich. Allerdings fällt das Wachstum in der 1. Dekade mit 1,7 Prozent höher aus als in der 2. Dekade mit 0,8 Prozent. Hier wirkt sich der demografische Wandel nach 2020 aus, wodurch sich insbesondere die Zahl der Personen im arbeitsfähigen Alter deutlich verringert, was sich auch in der abnehmenden Beschäftigung zwischen 2020 und 2030 niederschlägt. Nach einem leichten Anstieg der Beschäftigung bis 2020 um durchschnittlich 0,1 Prozent jährlich, fällt die Beschäftigung in der 2. Dekade um 1 Prozent jährlich. Die Pkw-Flotte verharrt praktisch auf einem konstanten Niveau zwischen 42 und 43 Millionen Pkw in Deutschland. Im Referenzszenario findet nur eine sehr geringe Verbreitung von HEV und PHEV statt. Im Modell ist dies bedingt durch moderate Effizienzverbesserungen bei ICE und nur geringe Kostenreduktionen bei HEV und PHEV.

Das *E-Mobilitätsszenario* ist entsprechend den Vorgaben der Bundesregierung implementiert, d. h. rund 1 Million Pkw mit alternativen Antriebskonzepten im Bereich Elektromobilität (BEV und PHEV) und Brennstoffzellen (FCEV) im Jahr 2020 und mindestens 6 Millionen im Jahr 2030. Durch die endogenen Entscheidungsfunktionen des Modells werden bis 2025 fast 3 Millionen und bis 2030 über 8 Millionen Pkw mit alternativen Antriebskonzepten in den Markt eingeführt. Zur Erlangung der technischen Reife und Erstellung der Produktionsanlagen von Elektrofahrzeugen müssen zusätzliche Investitionen von 44 Mrd. Euro im Zeitraum von 2011 bis 2019 und 13 Mrd. Euro im Zeitraum von 2020 bis 2030 aufgewendet werden. Diese verteilen sich auf die Sektoren Chemie (14 Prozent), Maschinenbau (19 Prozent), Elektronik (14 Prozent), Hoch- und Tiefbau (11 Prozent) sowie marktbestimmte Dienstleistungen (42 Prozent, hier insbesondere Forschungsdienstleistungen).

Zusätzliche Variationen des E-Mobilitätsszenarios wurden untersucht hinsichtlich der Steigerung der Pkw-Exporte als Folge der Erlangung eines Leitmarktvorteils (*Exportsensitivität*), sowie des Einflusses höherer Fahr-

<sup>9</sup> Man spricht hier von Mikro-Makro-Brücken, weil die Impulse in einer mikroökonomischen Modellierung (z. B. in Discrete-Choice-Modellen) entstehen, an die makroökonomischen Modelle übergeben und dort mit makroökonomischen Modellen (z. B. Produktionsfunktionen) weiterverarbeitet werden.

Tabelle III.7

## Entwicklung des Referenzszenarios in ASTRA

	Einheit	2010	2020	2030
Bruttoinlandsprodukt	Mrd. Euro	2.352	2.825	3.073
privater Konsum	Mrd. Euro	1.372	1.696	1.857
Beschäftigung	1.000 Personen	40.500	40.839	36.692
Pkw-Flotte	1.000 Pkw	42.301	42.543	42.421
Mineralölsteuer	Mio. Euro	37.583	38.494	35.983

monetäre Angaben in realen Preisen von 2005

Eigene Berechnungen

zeugpreise als Folge des Einsatzes effizienterer Technik (*Wertschöpfungssensitivität*). Die niedrigeren Betriebskosten von Elektrofahrzeugen und die damit verbundenen Einsparungen gegenüber konventionellen Fahrzeugen führen dazu, dass höhere Anschaffungspreise akzeptiert werden. Dadurch fällt trotz ungefähr gleicher Anzahl verkaufter Pkw die Wertschöpfung in der Automobilindustrie und vorgelagerten Industrien entsprechend höher aus. Die Ergebnisse des E-Mobilitätsszenarios werden im Folgenden im Vergleich zum zuvor beschriebenen Referenzszenario dargestellt.

### 2.4.3 Beschäftigung und andere gesamtwirtschaftliche Effekte

Tabelle III.8 fasst die zentralen gesamtwirtschaftlichen Änderungen zusammen, welche sich aus dem E-Mobilitätsszenario im Vergleich zum Referenzszenario ergeben. Es lässt sich feststellen, dass bis 2020 nur geringfügige gesamtwirtschaftliche Änderungen durch die Elektromobilität beobachtet werden. Veränderungen des Bruttoinlandsprodukts (BIP) und der Beschäftigung liegen im Bereich eines Zuwachses von rund 0,2 Prozent gegenüber dem Referenzszenario. Die größten Veränderungen können bei den Sektoren beobachtet werden, die zusätzliche Investitionen auf sich ziehen. Die Nachfrage nach Investitionsgütern steigt um 2 bis 3 Prozent in den Sektoren Maschinenbau, Computer, Elektronik, sonstige Industrieerzeugnisse, Hoch- und Tiefbau sowie marktbestimmte Dienstleistung in Form von FuE-Leistungen. Einige Sektoren können ihre Beschäftigung um rund 0,5 Prozent steigern, wie z. B. Maschinenbau, Fahrzeugbau, Hoch- und Tiefbau. Die rund 1 Million Elektrofahrzeuge bzw. FCEV (rund zwei Fünftel je PHEV und BEV, knapp ein Fünftel FCEV) verursachen bis zu diesem Zeitpunkt keinen nennenswerten ökonomischen Strukturwandel.

Bis 2030 erhöht sich der Zuwachs beim BIP auf 24,2 Mrd. Euro in 2005er Werten (0,8 Prozent) und die Beschäftigung steigt um 230 000 Personen (0,6 Prozent) gegenüber dem Referenzszenario. Der Konsum ist sogar um 1,1 Prozent erhöht. Damit lässt sich ein leicht positiver gesamtwirtschaftlicher Effekt für die Einführung der Elektromobilität konstatieren.

Tabelle III.8

## Gesamtwirtschaftliche Entwicklung im E-Mobilitätsszenario

	Einheit	2020	2030
Bruttoinlandsprodukt	Mrd. Euro	7,1	24,2
privater Konsum	Mrd. Euro	4,9	20,3
Beschäftigung	1.000 Personen	69	230

monetäre Angaben in realen Preisen von 2005

Eigene Berechnungen (ASTRA-Modell)

Die gesamtwirtschaftlichen Effekte setzen sich aus drei Effekten zusammen, die eine unterschiedliche Fristigkeit aufweisen und in Erstrundeneffekte (treten direkt mit Ergreifen einer Maßnahme ein) und Zweitrundeneffekte (treten verzögert nach einer oder mehreren Zeitperioden der direkten Maßnahmenwirkung ein) unterschieden werden können:

- *Direkte Maßnahmeneffekte* (Erstrundeneffekte) werden als monetärer Impuls der Maßnahme in den ökonomischen Modellen exogen eingeführt wirksam. Im Allgemeinen gehören hierzu Investitionsimpulse, Exportimpulse oder Impulse durch staatliche Ausgaben.
- *Substitutionseffekte* (Erst- und Zweitrundeneffekte) ergeben sich durch Änderungen der Produktpreise durch eine Maßnahme, welche die Ausgabenstruktur der Haushalte verändern. Beispielsweise werden bei steigenden Preisen und Ausgaben für ein Produkt (hier z. B. Elektrofahrzeuge) die Mehrausgaben für dieses Produkt durch Reduktion der Ausgaben für andere Güter kompensiert. Gleichzeitig verändern sich die nachgefragten Mengen der Produkte, sodass insgesamt die Budgetbeschränkung der Haushalte eingehalten wird. Hier können durch eine Maßnahme sowohl Erstrundeneffekte als auch Zweitrundeneffekte auftreten.

- *Einkommensmultiplikatoreffekte* (Zweitrundeneffekte) entwickeln sich über die Zeit. Ein Investitionsimpuls in einer Periode kann zu einem höheren BIP und gesteigertem Einkommen in der nächsten Periode führen. Dadurch erhöhen sich die Konsumausgaben und in der nächsten Periode wird auf diese gesteigerte Nachfrage mit zusätzlichen Investitionen zur Angebotsausweitung reagiert. Diese steigern wieder das BIP und das Einkommen. Dieser Kreislauf kann sich über die folgenden Perioden fortsetzen. Die Multiplikatoreffekte können über die Zeit wesentlich größer werden als die anfänglichen Impulse einer Maßnahme.

Das Vorliegen von Multiplikatoreffekten lässt sich bereits aus der Steigerung des BIP und des privaten Konsums im Jahr 2030 ablesen: Die direkten Maßnahmeneffekte der Einführung von Elektrofahrzeugen und FCEV liegen nur noch im Bereich von 1 Mrd. Euro, während das BIP und der private Konsum beide über 20 Mrd. Euro höher liegen als im Referenzszenario. Auch die Struktur des privaten Konsums ändert sich (Abb. III.24). Die Gesamtausgaben für Verkehr ohne Steuern steigen im Jahr 2030 mit knapp 1 Mrd. Euro leicht an, getrieben durch Mehrausgaben für den Kauf von Pkw mit alternativen Antrieben und abgemildert durch sinkende Ausgaben für Kraftstoffe und insbesondere für klassische Verkehrsdienstleistungen des ÖV. Vermehrte Nutzung von Carsharing bzw. multimodalen Verkehrskonzepten durch Einführung der Elektromobilität wird im ASTRA-Modell bisher nicht abgebildet.

Die Reduktion der Ausgaben für Verkehrsdienstleistungen spiegelt einen Reboundeffekt durch Senkung der variablen Kosten des Elektrofahrzeugverkehrs wider, welcher im Modell zu einer Erhöhung des Modalanteils des Pkw führt und die Nachfrage nach klassischen ÖV-Angeboten reduziert. Diese resultiert aus der Verringerung der variablen Kosten von Elektrofahrzeugen im Vergleich mit

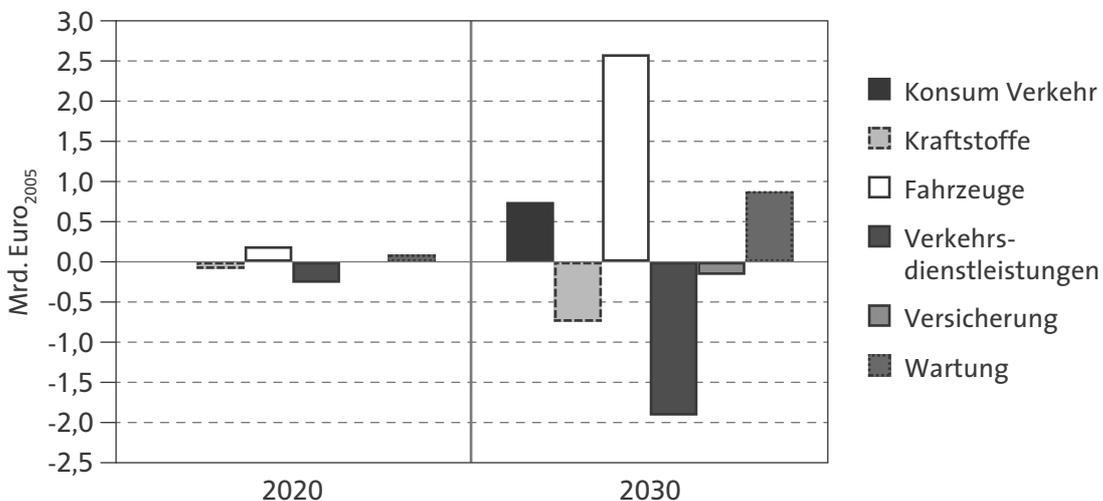
konventionellen Pkw, sodass bei vorhandenem Elektrofahrzeug die Modalwahl für eine Fahrt gemäß Modelllogik häufiger zugunsten desselben und zulasten des ÖV ausgeht im Vergleich mit dem Referenzszenario. Die Modellergebnisse zeigen, dass sich eine starke Diffusion von Elektrofahrzeugen wahrscheinlich auch auf die Nutzung anderer Verkehrsmittel auswirkt. Solche Effekte dürften aber entscheidend durch kommunalpolitische Rahmenbedingungen (wie z. B. Parkraumbewirtschaftung und Vorrangschaltung ÖV) beeinflusst werden.

Ein weiteres Resultat ist die Veränderung der Einnahmen aus Energiesteuer und Mehrwertsteuer (MwSt.) im Verkehr (Abb. III.25). Die Kraftstoffsteuer ist im Jahr 2030 um über 3 Mrd. Euro reduziert gegenüber dem Referenzszenario. Davon entfällt der größte Teil auf eine verringerte Nachfrage nach Benzin durch die privaten Haushalte; dies führt zu knapp 2,5 Mrd. Euro weniger Einnahmen durch die Kraftstoffsteuer. Teilweise kann der Steuerausfall bei der Kraftstoffsteuer kompensiert werden durch einen Anstieg der Mehrwertsteuereinnahmen aufgrund eines insgesamt gestiegenen Konsums der Haushalte durch positive Multiplikatoreffekte.

Die Veränderungen der Beschäftigung sind in einer sektoralen Gliederung in Abbildung III.26 dargestellt. Anhand des Musters der Veränderung in den Jahren 2020 und 2030 kann festgestellt werden, welche Sektoren eher von den Erstrundeneffekten der Elektromobilität profitieren und welche von den Zweitrundeneffekten. Sektoren die bereits 2020 eine gesteigerte Beschäftigung aufweisen und 2030 nur noch eine geringfügige weitere Erhöhung, profitieren direkt von der Elektromobilität. Dies sind die verarbeitende Industrie und der Hoch- und Tiefbau. Auch die sonstigen Dienstleistungen profitieren von direkten Effekten und weisen einen Anstieg von über 20 000 Personen im Jahr 2020 aus. Viel stärker wirken sich aber in

Abbildung III.24

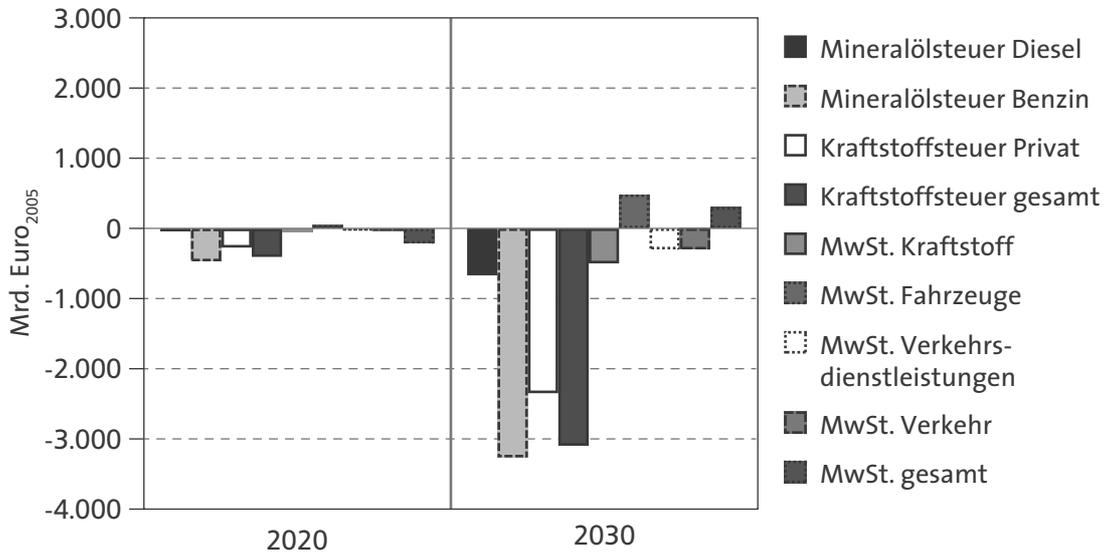
**Veränderung der Konsumausgaben für Verkehr**



Eigene Berechnungen (ASTRA-Modell)

Abbildung III.25

**Veränderung der Steuerstruktur für Verkehr**



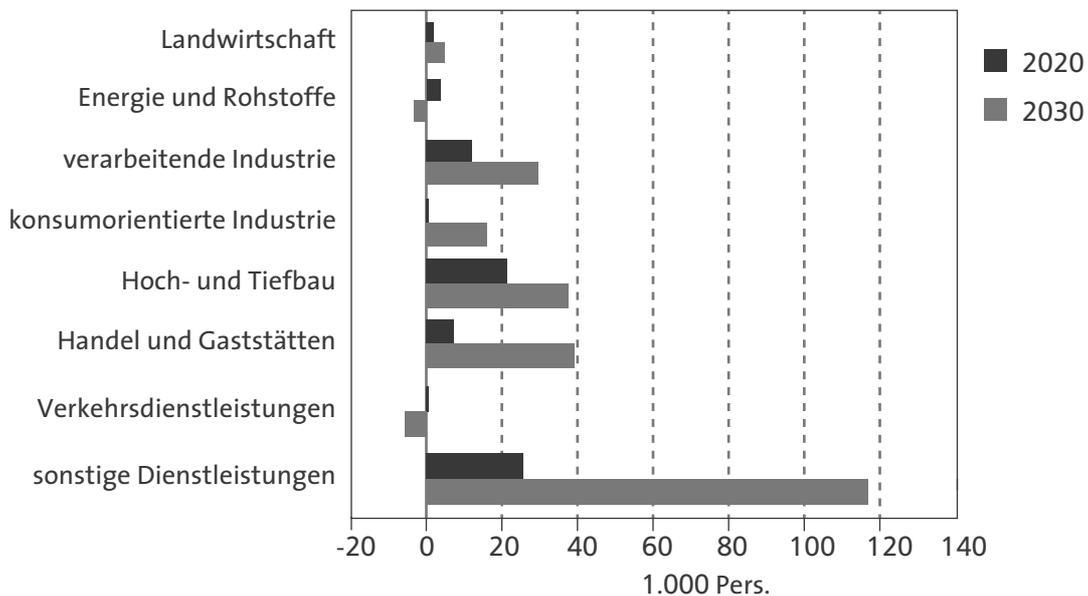
Eigene Berechnungen (ASTRA-Modell)

diesem Sektor die Zweitrundeneffekte aus, sodass bis 2030 dort knapp 120 000 zusätzliche Personen beschäftigt werden. Andere typische Sektoren für das Auftreten von positiven Zweitrundeneffekten sind die konsumorientierte Industrie sowie Handel und Gaststätten. Bei den Verkehrsdienstleistungen kann aufgrund der zuvor erwähnten verringerten Nachfrage eine leichte Reduktion der Beschäftigung beobachtet werden.

Herausstechend im Bereich der verarbeitenden Industrie sind die Sektoren Chemie (+2 000 Beschäftigte im Jahr 2020, +3 800 im Jahr 2030), Industriemaschinen (+4 900 im Jahr 2020, +5 200 im Jahr 2030) und Fahrzeugbau (+4 300 im Jahr 2020, +17 600 im Jahr 2030). Anzumerken ist hier, dass die sektoralen Veränderungen durch die Elektromobilität im Modell vereinfachend als Nachfrageimpulse in den Nachfragevektoren von Konsum und In-

Abbildung III.26

**Veränderung der sektoralen Beschäftigung**



Eigene Berechnungen (ASTRA-Modell)

vestitionen eingeführt wurden und nicht über die sektoralen Input-Output-Koeffizienten.

Die Analyse der Ergebnisse wurde unterstützt durch eine Reihe von Sensitivitätsanalysen, da durch eine Variation der Szenarien eine bessere Einordnung der Ergebnisse erzielt werden kann. Als Erstes wurde die Erlangung eines moderaten Leitmarktvorteils unterstellt, sodass 2020 rund 1 Mrd. Euro und 2030 knapp 7 Mrd. Euro zusätzliche Exporte auf die Sektoren Chemie, Elektronik und Fahrzeuge entfallen mit dem größten Anteil bei den Fahrzeugen und einem starken Anstieg ab 2025. Gleichzeitig wurden die Fahrzeugmehrkosten der Elektromobilität variiert. Der moderate Leitmarktvorteil würde das BIP im Jahr 2030 zusätzlich um 0,15 bis 0,3 Prozent erhöhen. Der Effekt bleibt moderat, da die gesteigerten Exporte auch zu erhöhten Importen an Vorleistungen führen und nur der Saldo des Außenhandels wachstumsfördernd wirkt. Die Beschäftigung würde etwas stärker von einem Leitmarktvorteil profitieren als das BIP.

Der wirkmächtigste Faktor in der Sensitivitätsanalyse ist der Preisaufschlag für Elektrofahrzeuge. Lassen sich diese zu höheren Preisen in den Markt bringen, ergeben sich ein höherer Umsatz und gesteigerte Wertschöpfung der Automobilindustrie, da die Zulassungszahlen bei einem Preisaufschlag nicht im selben Umfang schrumpfen. Vielmehr dürften die Käufer einen moderaten Preisaufschlag akzeptieren, da sie bei den variablen Kosten entlastet werden. Die gesteigerte Nachfrage im Fahrzeugbausektor hat einen starken Einfluss im Investitionsmodell von ASTRA. In Deutschland weist ASTRA für die Automobilindustrie die höchste Elastizität der sektoralen Nachfrage auf die Nachfrage nach Investitionsgütern aus. Letztendlich wirkt dieser Effekt stärker fördernd auf Wachstum und Beschäftigung als der exogene Investitionsimpuls oder der Leitmarkteffekt.

Interessant sind auch Reboundeffekte im Pkw-Verkehr, welche sich gemäß den Modellannahmen und -ergebnissen ergeben. Im Jahr 2030 ist die Pkw-Flotte im E-Mobilitätsszenario um 0,4 Prozent verringert. Einsparungen bei den variablen Kosten aufgrund effizienterer Fahrzeuge führen aber dazu, dass die Pkw-Fahrleistung um 3,3 Prozent zunimmt. Die größten Zuwächse an Pkw-Fahrleistungen mit je rund 4,5 Prozent werden dabei in den Entfernungsklassen von 8 bis 40 km (insgesamt rund 8 Mrd. Fzkm) und von 40 bis 160 km (insgesamt 6 Mrd. Fzkm) erwartet. Diese Fahrdistanzen dürften 2030 auch aus technischer Sicht durch BEV abgedeckt werden können.

## 2.5 Kritische Rohstoffe

Innovative Technologien bieten Antworten auf die drängenden Herausforderungen unserer Zeit, setzen jedoch häufig neue Werkstoffe voraus, die bislang nicht im Fokus der Aufmerksamkeit standen. So wird sich auch das erwartete Marktwachstum bei Elektrofahrzeugen auf die Nachfrage nach dazu notwendigen Rohstoffen auswirken, wozu etwa Kobalt und Lithium für Batterien oder Kupfer und Neodym für Elektromotoren gehören. Daher ist es wichtig, die Versorgungssicherheit bei Rohstoffen für die Elektromobilität zu prüfen.

Dieses Kapitel zeigt nach einer allgemeinen Thematisierung der Rohstofffrage auf, wie sich Bedarfe und mögliche Engpässe an wichtigen Rohstoffen für die Elektromobilität in den nächsten Jahren entwickeln und welche konkreten Strategien zum Umgang mit dieser Herausforderung notwendig werden. Er schließt mit Empfehlungen für eine Rohstoffstrategie. Die Darstellung lehnt sich dabei an Buller et al. (2012) an.

### 2.5.1 Verfügbarkeit von Rohstoffen

Seit Anfang der 1990er Jahre hat sich die weltweite Entnahme von mineralischen und metallischen Rohstoffen auf 35 Mrd. t verdoppelt (Krausmann et al. 2009). Dies wurde durch den Markteintritt neuer Marktteilnehmer aus sich schnell entwickelnden Schwellenländern wie China und durch Nachfrageeffekte durch technische Innovationen, beispielsweise in Bereichen der Mobilität, der Energieversorgung und den Informationstechnologien ausgelöst. Turbulenzen auf den Rohstoffmärkten waren die Folge. Der Anstieg der Preise hat sich direkt auf die Materialkosten der Industrie ausgewirkt, einer der größten Kostenblöcke, der künftig weiter wachsen wird (Angerer et al. 2009a).

Besonders problematisch für Europa ist dabei, dass es bei Metallen in hohem Maße auf Importe angewiesen ist. Als Hochlohnländer sind die Staaten Europas durch technologische Exzellenz und Innovationen zu führenden Exportnationen aufgestiegen. Eine gesicherte Versorgung mit Hightech-Metallen ist deshalb für die Wirtschaft und den Wohlstand der Gesellschaft von essenzieller Bedeutung.

Die Rohstoffvorkommen sind aus geologischen Gründen weltweit sehr unterschiedlich verteilt, so liegen z. B. ca. 88 Prozent der wirtschaftlich verwertbaren Reserven an Platinmetallen in Südafrika, 76 Prozent der Lithiumreserven in Chile und 62 Prozent der Tantalreserven in Brasilien (Angerer et al. 2009a). Diese Reserven werden aber nicht in allen Ländern gleichermaßen abgebaut.

Ein bekanntes Beispiel sind die Seltenen Erden. Dies ist eine Sammelbezeichnung für die Metalle Scandium, Yttrium und Lanthan der dritten Nebengruppe des Periodensystems sowie der nach Lanthan folgenden sogenannten Lanthanoide. Diese Metalle sind nicht selten, wie der Name implizieren könnte (der Massenanteil von Neodym in der Erdkruste ist etwa so hoch wie der von Blei). Der Name geht darauf zurück, dass sie bei ihrer Entdeckung in seltenen Mineralien gefunden und aus diesen in Form ihrer „Erden“ (Oxide) isoliert wurden. Obwohl China nur ein Drittel der weltweiten Reserven besitzt, produzierte es 2009 mit 120 000 t ca. 97 Prozent der Weltproduktion (Lynas 2011). Über Jahrzehnte hat China den Weltmarkt preiswert mit Seltenen Erden beliefert, wodurch in anderen Ländern, wie etwa den USA, die 1990 noch gut ein Drittel der Gewinnung der Seltenen Erden abdeckten, die umweltbelastende Produktion dieser Metalle aufgegeben wurde. Erst seit China den Export der Seltenen Erden in den letzten Jahren stark einschränkte und sich dadurch die Preise für Neodym zeitweise vervierfachen, werden wieder neue Minenprojekte gestartet bzw. alte Minen wie die Mountain Pass in Kalifornien wieder geöffnet (Elsner et al. 2010). Dadurch wird sich jedoch primär die Situation

bei den leichten Seltenen Erden (unter anderem Neodym) entspannen, nicht aber die bei den schweren Seltenen Erden wie beispielsweise Dysprosium.

Für die Sicherheit der Rohstoffversorgung müssen zukünftig folgende Fragen beantwortet werden: Wie ist der zukünftige Gesamtverbrauch für alle Anwendungen? Wie hoch sind die abbaubaren Ressourcen? Welche Potenziale hat die Gewinnung von Sekundärrohstoffen durch Recycling und welche Substitutionsmöglichkeiten gibt es durch andere Rohstoffe oder Materialien?

Im vorliegenden Kapitel werden die aus heutiger Sicht für die Elektromobilität relevanten kritischen Rohstoffe identifiziert. Für die beiden Rohstoffe Kupfer und Lithium wird eine detaillierte Analyse entlang der zuvor genannten Fragen vorgenommen. Anhand unterschiedlicher Szenarien für die weltweite Marktverbreitung der Elektromobilität werden mögliche Entwicklungen der Rohstoffnachfrage in Bezug gesetzt zu vorhandenen Reserven und Ressourcen. Auf der Basis dieser Analysen werden erste Schlussfolgerungen gezogen.

### 2.5.2 Rohstoffe für die Elektromobilität

Die zunehmende Bedeutung der Elektromobilität hat weitreichende Folgen für die Rohstofffrage im Automobilsektor. Relevante Änderungen am Fahrzeug beim Umstieg auf die Elektromobilität betreffen in erster Linie den Antriebsstrang (Kap. II.1). Der erwartete Anstieg beim Rohstoffbedarf betrifft pro Fahrzeug ca. 3 kg Lithium als Ladungsträger in der Lithium-Ionen-Batterie, einige kg Nickel, Mangan, Kobalt und andere Rohstoffe als Elektrodenmaterialien, sowie ca. 1 kg Neodym und Dysprosium für den Permanentmagnet im Elektromotor. Hinzu kommt Platin als Katalysator beim Einsatz von Brennstoffzellen. Der größte Mehrbedarf besteht mit etwa 40 kg beim Kupfer für Motor und Stromleitungen im Fahrzeug.

Als Kriterien für die Einordnung als kritischer Rohstoff werden Verfügbarkeit sowie wirtschaftliche Relevanz herangezogen. Vergleicht man die von der EU als kritisch identifizierten Rohstoffe (Tab. III.9; EK 2010) 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.

Tabelle III.9

#### Kritische Rohstoffe laut EU

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

grau unterlegt: für Elektromobilität relevante Rohstoffe

Quelle: EK 2010

Zur Gruppe der Seltenen Erden gehört Neodym. Für Neodym sind Hochleistungspermanentmagnete das wichtigste zukünftige Anwendungsfeld im Bereich der Elektromobilität. Ein weiteres bedeutendes Anwendungsfeld sind Laser. Der Neodymbedarf für Magnete wird sich aufgrund der durch die Elektromobilität ausgelösten Nachfrage vervielfachen. Wie die sich dadurch abzeichnende Bedarfslücke gedeckt werden kann, ist derzeit noch unklar. Perspektivisch bietet sich ein Recycling an; hier sind allerdings noch viele Forschungsfragen offen.

Eine Studie von Buchert et al. (2011) zur Ressourceneffizienz und zu ressourcenpolitischen Aspekten der Elektromobilität im Rahmen des Projekts OPTUM des Öko-Instituts basiert auf der Studie von McKinsey (2009). McKinsey (2009) beschrieben die weltweiten Neuzulassungen und gingen in einem ambitionierten Szenario „Hybrid and Electric“ von 20 Millionen Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 und 54 Millionen Fahrzeugen im Jahr 2030 aus. Buchert et al. (2011) unterschieden vier Szenarien. Im Basisszenario wurde der aktuelle Bedarf je Fahrzeug an den betrachteten Materialien fortgeschrieben, im Innovationsszenario wurde eine Steigerung der Effizienz im Materialeinsatz unterstellt, die je nach Metall variiert. Für Seltene Erden im Allgemeinen wurde eine Steigerung der Effizienz von 10 Prozent bis 2020 und von 20 Prozent von 2020 bis 2030 angenommen. Da für Dysprosium eine besonders schwierige Versorgungslage und hohe Preise erwartet wurden, ist hier der Innovationsdruck besonders hoch und es wurde eine Effizienzsteigerung von 15 Prozent bis 2020 und von 30 Prozent in den Jahren 2020 bis 2030 angenommen. Im Recyclingszenario wurden zusätzlich Effekte durch Recycling einbezogen, wobei von einer Recyclingquote bei Seltenen Erden von 60 Prozent im Jahr 2020 und 80 Prozent im Jahr 2030 ausgegangen wurde. Als weiteres Szenario (Substitutionsszenario) wurde die Möglichkeit einer Substitution von Elektromotoren mit Permanentmagneten durch solche mit fremderregten Magneten betrachtet (Buchert et al. 2011).

Im Vergleich zur Primärproduktion der Metalle im Ausgangsjahr 2010 fielen vor allem die Seltenen Erden als besonders relevant auf (Buchert et al. 2011). Am markantesten zeigte sich der Bedarfsanstieg der Elektromobilität bei Dysprosium. Hier entspricht der Bedarf für die Elektromobilität im Jahr 2030 im Basisszenario, verglichen mit der heutigen Gesamtproduktion dieses Metalls, ca. 480 Prozent. In den anderen Szenarien sind durch die unterstellten Maßnahmen zwar Dämpfungen des Bedarfsanstiegs festzustellen, aber mit ca. 290 Prozent (Innovationsszenario), 190 Prozent (Recyclingszenario) sowie 70 Prozent (Substitutionsszenario) stellten Buchert et al. (2011), auch bei umfangreichen zukünftigen Maßnahmen, einen deutlich wachsenden Bedarf an Dysprosium für Elektromobilität fest. Dysprosium findet sich vor allem in den Lagerstätten der Seltenen Erden in China, sodass für dieses Metall noch länger eine Abhängigkeit von chinesischem Export besteht.

In Lithium-Ionen-Batterien werden je nach Anforderung an Kapazität und Stromstärke unterschiedliche Metall-

oxide als Kathoden genutzt (Kap. II.1). Für hohe Kapazitäten, wie sie für die Elektromobilität notwendig sind, werden Kobaltkathoden aufgrund höherer möglicher Energiedichten bevorzugt. Kobalt ist ein Element, dem aufgrund seiner Einsatzmöglichkeiten für Spitzentechnologien eine große wirtschaftliche Bedeutung zukommt. Neben der Verwendung in Batterien findet Kobalt u. a. Anwendung in Superlegierungen, Katalysatoren, Hartmetallen und Spezialchemikalien. Aufgrund des breiten Anwendungsspektrums wird die Nachfrage gerade für Anwendungen in Hochtechnologien in den nächsten Jahrzehnten erheblich ansteigen. Allein für die Anwendung in Batterien wird für das Jahr 2030 ein Bedarf von 20 400 t gegenüber 12 000 t im Jahr 2006 geschätzt. Damals betrug die gesamte Weltproduktion 67 500 t (Weissenberger-Eibl et al. 2010).

Die Reichweite der Kobaltreserven und -ressourcen wird bei gleichbleibender Produktion auf 110 bzw. 220 Jahre geschätzt. Als Reserven werden diejenigen Rohstoffvorräte bezeichnet, die unter den heutigen Bedingungen ökonomisch und technisch abbaubar sind. Die Ressourcen umfassen darüber hinaus diejenigen bekannten Vorräte, deren Abbau bislang nicht wirtschaftlich ist.

Wichtigstes Förderland für Kobalt ist die Demokratische Republik Kongo mit einem Weltmarktanteil von ca. 40 Prozent. Dabei handelt es sich nicht nur um eines der ärmsten Länder der Welt, sondern auch um eine politisch instabile Region. Die wirtschaftliche Bedeutung von Kobalt, die Dominanz der Demokratischen Republik Kongo bei der Produktion sowie die Instabilität Zentralafrikas verleihen Kobalt den Charakter eines vulnerablen bzw. kritischen Rohstoffs (EK 2010).

### 2.5.3 Kupfer und Lithium als kritische Rohstoffe

Als klassische Rohstoffe für die Elektromobilität werden Kupfer und Lithium im Folgenden ausführlicher auf Basis von detaillierten Analysen des Fraunhofer ISI hinsichtlich der Bedarfe durch mögliche zukünftige Entwicklungen der Elektromobilität behandelt (Angerer et al. 2009a, 2009b u. 2010). Hierzu wurden zwei Szenarien für die weltweite Entwicklung der Elektromobilität bis zum

Jahre 2050 betrachtet (Kap. II.2.2; Fraunhofer ISI 2011). Beim ersten Szenario, dem Pluralismusszenario, wird von einer Marktdurchdringung ausgegangen, bei der Elektrofahrzeuge bis 2050 weltweit 50 Prozent der Neuzulassungen im motorisierten Individualverkehr erreichen. Bei einem zweiten Szenario, dem Dominanzszenario, wird mit einem Marktanteil von 85 Prozent Elektrofahrzeugen bei den Neuzulassungen gerechnet. Zwei alternative Entwicklungen der Marktpenetration wurden gewählt, um die Sensitivität der Ergebnisse bzgl. der Rohstoffbedarfe zu untersuchen. Zudem ist das Dominanzszenario ein extremes Szenario bezüglich der Höhe der Marktdurchdringung und dient dazu zu zeigen, ob selbst bei solchen Annahmen die Rohstoffbasis noch gesichert ist.

### Kupfer als kritischer Rohstoff?

Kupfer ist ein wichtiger Rohstoff für die Elektromobilität, aber auch für die konventionelle Mobilität. Tabelle III.10 zeigt die Kupferinventare für unterschiedliche Antriebsysteme. Das Metall spielt seit jeher in elektrotechnischen Anwendungen eine zentrale Rolle und findet aufgrund seiner Eigenschaften auch in zahlreichen weiteren Feldern Anwendung. Dazu zählen u. a. Wasserversorgung, Wärmetauscher, diverse Verbraucherprodukte oder Architektur.

Für Kupfer zeigen die Analysen, dass der Verbrauch in den nächsten 40 Jahren nur wenig durch die Elektromobilität beeinflusst wird. Im Pluralismusszenario ist 2050 nur 14 Prozent des Kupferverbrauchs der Elektromobilität zuzuordnen und auch im Dominanzszenario liegt der Anteil nur wenig höher mit 21 Prozent (Abb. III.27). Das Sekundärkupfer deckt hierbei knapp 26 Prozent des Gesamtbedarfes im Jahr 2050. Ein wesentlicher 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. In beiden Szenarien werden aber die mit der heute verfügbaren Technik wirtschaftlich abbaubaren Kupferreserven Mitte der 30er Jahre des 21. Jahrhunderts erschöpft sein.

Tabelle III.10

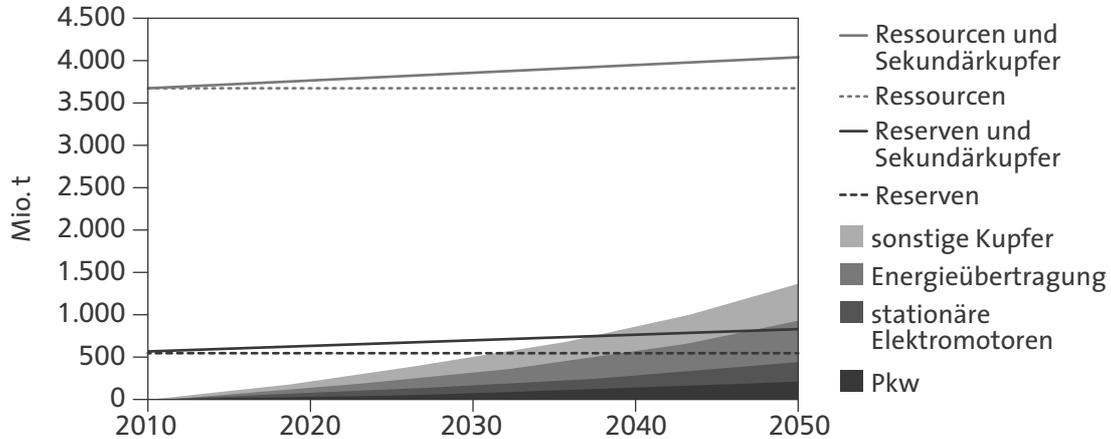
### Kupferinventare unterschiedlicher Fahrzeugsysteme

		ICEV	HEV	PHEV	BEV	FCEV
elektrische Motorleistung	kW	0	20	50	50	50
Akkukapazität	kWh	0	1,4	20,0	20,0	1,4
Kupferinventare	kg Cu	25,0	43,5	77,2	65,2	58,5
Elektromotor	kg Cu	0	18,0	45,0	45,0	45,0
Verbrennungsmotor	kg Cu	12,0	12,0	12,0	0	0
Li-Ion-Akku	kg Cu	0	0,5	7,2	7,2	0,5
übrige Komponenten	kg Cu	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0

Quelle: Angerer et al. 2009a; IZT 2004

Abbildung III.27

**Kumulierter Kupferverbrauch weltweit im Dominanzszenario (Marktanteil von Elektrofahrzeugen bei Neuzulassungen: 85 Prozent)**



Quelle: Angerer et al. 2010

Dieser Entwicklung kann durch verschiedene Maßnahmen entgegengewirkt werden. An erster Stelle steht dabei die Erschließung neuer Vorkommen, deren Abbau jedoch höhere Kosten mit Auswirkungen auf den Kupferpreis verursacht. Diese Vorkommen sind in Abbildung III.27 als Ressourcen eingetragen und werden – inklusive Kupfer in Tiefseemanganknollen – auf ca. 3,7 Mrd. t geschätzt (USGS 2010). Um eine kontinuierliche Versorgung der Weltwirtschaft mit Kupfer sicherzustellen, muss aufgrund der langen Vorlaufzeiten die Erschließung neuer Minen in den nächsten 10 bis 15 Jahren geplant werden.

Zur Schonung der natürlichen Vorkommen ist zudem der Ausbau des weltweiten Recyclings und somit die Nutzung des gewonnenen Sekundärkupfers voranzutreiben. Während Deutschland und andere Industrieländer bereits hohe Einsatzquoten von Sekundärkupfer erreicht haben, liegen in den Entwicklungsländern große Potenziale brach, die durch Transfer von Know-how zu Recyclingmaßnahmen in diese Länder gehoben werden können.

Als weitere Maßnahme kommt die Erschließung von Materiallagern infrage, die sich weltweit in Deponien und der Technosphäre angesammelt haben. Diese Lager werden auf über 400 Mio. t Kupfer geschätzt – mehr als das 20-Fache der heutigen Weltproduktion.

Schließlich kann Kupfer durch andere Rohstoffe substituiert werden. In elektrischen Anwendungen, beispielsweise in Elektromotoren und Kabeln, kann Kupfer durch Aluminium ersetzt werden, allerdings zum Preis einer gravierenden Verschlechterung der Energieeffizienz. Glasfaserkabel oder die drahtlose Übertragung bieten sich in der Telekommunikation als Substitut an, während in

der Wasserversorgung Kupfer durch Kunststoff- oder verzinkte Stahlrohre ersetzt werden kann.

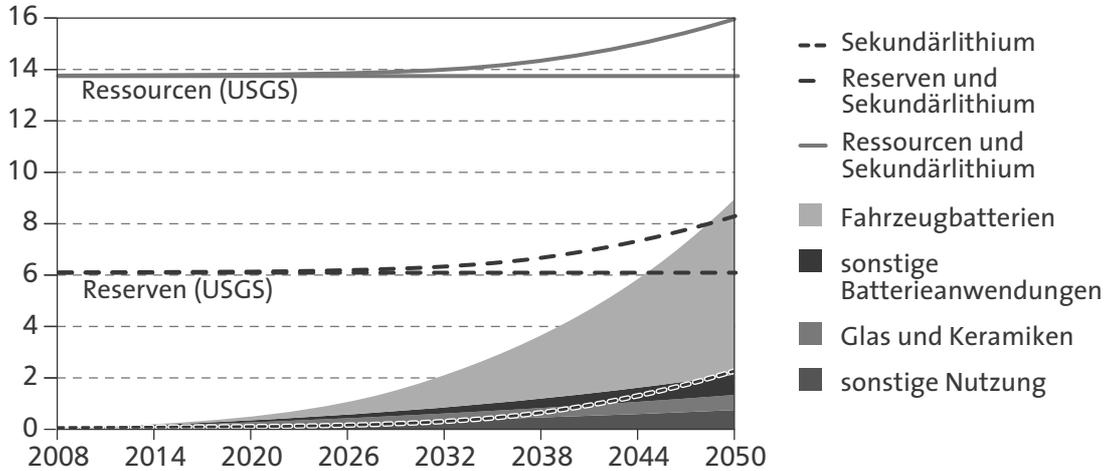
#### Lithium als kritischer Rohstoff?

Lithium-Ionen-Batterien gelten aufgrund ihrer hohen Energie- und Leistungsdichte und dem damit verbundenen geringen Gewicht als besonders geeignet für den Einsatz in Elektrofahrzeugen wie auch in anderen mobilen Anwendungen wie Laptops oder Elektrokleingeräten, die derzeit hohe Zuwachsraten verzeichnen. Weitere Anwendungsbereiche, in denen die chemischen Eigenschaften von Lithium zum Tragen kommen, sind Glaskeramiken, Autoreifen, Pharmazeutika und der Flugzeugleichtbau (Angerer et al. 2009a). Vor dem Hintergrund dieses wachsenden Bedarfs ist die Verfügbarkeit von Lithium elementare Voraussetzung dafür, dass mit Lithium-Ionen-Batterien ausgestattete Elektrofahrzeuge sich im Massenmarkt durchsetzen können.

Bei den vom Fraunhofer ISI durchgeführten Analysen für Lithium wurden die Verwendung von Sekundärlithium aus recyceltem Material sowie die Lithiumnachfrage für andere Anwendungen (z. B. Ceranfelder, hitzebeständige Ofenfenster, Aluminiumschmelzen zur Fluoridreduzierung oder Schmierfette) berücksichtigt (Angerer et al. 2009b). Gemäß den Ergebnissen werden 2050 im Pluralismusszenario (50-prozentiger Marktanteil von Elektrofahrzeugen bei den Neuzulassungen) erst rund 20 Prozent der weltweit vorhandenen Lithiumressourcen verbraucht sein. Diese Berechnung geht von einer vorsichtigen Schätzung der Vorkommen aus. Dabei deckt das Recyclinglithium ca. 25 Prozent des Gesamtbedarfs. Auch im Dominanzszenario (85-prozentiger Marktanteil von Elektrofahrzeugen bei den Neuzulassungen) kommt es bis

Abbildung III.28

**Kumulierter Lithiumverbrauch weltweit im Dominanzszenario (Marktanteil von Elektrofahrzeugen bei Neuzulassungen 2050: 85 Prozent)**



Quelle: Angerer et al. 2009b

2050 nicht zu einer Erschöpfung der Lithiumressourcen. Allerdings werden in diesem Szenario am Ende des Betrachtungszeitraums die bekannten Reserven erschöpft sein (Abb. III.28). Das heißt, die Kosten für Lithium werden mittelfristig steigen. Eine weitere Herausforderung ist, dass die Lithiumvorkommen weltweit auf wenige Länder verteilt sind, insbesondere Chile und Bolivien, die politisch nicht unbedingt als stabil gelten. Daraus resultiert die Notwendigkeit, neue Vorkommen zu erschließen. Vorsorglich sollte frühzeitig ein Recyclingsystem für Lithium aufgebaut sowie langfristig die Entwicklung alternativer Batterietypen, die ohne Lithium auskommen, vorangetrieben werden.

**2.5.3 Schlussfolgerungen**

Zusammenfassend gibt es beim Thema „kritische Rohstoffe“ noch 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. Bei einigen der Seltenen Erden, wie beispielsweise Dysprosium, sieht die Situation anders aus – hier könnte es kurz- bzw. mittelfristig zu einer Verknappung bei den Reserven kommen (Hoenderdaal et al. 2013).

Generelle quantitative Aussagen zu Preisentwicklungen können dabei nicht zuletzt wegen des hohen spekulativen Anteils der Rohstoffpreise kaum getroffen werden. Recyclingverfahren, Waste Mining, Urban Mining und die Entwicklung von Substituten sowie einer Rohstoffstrategie sind in diesem Zusammenhang wichtige Zukunftsthemen. Waste Mining bezeichnet die Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus Abfalldeponien (UBA 2012); auf heutigen Deponien ist die Konzentration mancher Stoffe höher als in bestimmten Abbauregionen. Urban Mining bezeichnet die Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus der Technosphäre.

Elemente einer Rohstoffstrategie sind die systematische Erschließung neuer Abbaustätten, die oftmals einen längeren Vorlauf benötigt. Entwicklungsländer sollten beim Abbau der Ressourcen unterstützt werden und es sollte eine möglichst diversifizierte Beschaffungsstrategie aufgebaut werden. Für Unternehmen bieten sich Joint Ventures, Beteiligungen an bzw. Übernahme und Betrieb von Minen als Strategiepfade an. Wird die erwartete Rohstoffnachfrage bei der Technologieentwicklung bedacht, können frühzeitig alternative Technologiepfade und Materialentwicklungen gefördert werden. Die Identifikation und Nutzung vorhandener Effizienzpotenziale beim Materialeinsatz, beispielweise durch konstruktive Maßnahmen oder Verlängerung der Lebensdauer, können ebenfalls die Nachfrage senken (Jochem et al. 2004). Ein wichtiger Stichpunkt ist die Konzeption einer europäischen Rohstoffpolitik, gerade auch als Gegengewicht zur Politik Chinas, das sich in Afrika und anderen Teilen der Welt systematisch Rohstoffzugänge sichert. Die Politik sollte ebenfalls kritisch mögliche preistreibende Spekulationsgeschäfte im Auge behalten.

**3. Bewertung sozialer Aspekte**

Eine erfolgreiche Markteinführung und -verbreitung von Elektrofahrzeugen verursacht vielseitige Auswirkungen auf die Gesellschaft und ihre Individuen. Diese sozialen Effekte werden im vorliegenden Kapitel betrachtet.

Für die Fahrzeugnutzer selbst bedeutet ein Wandel hin zu mehr Elektromobilität mehr als einen Wechsel des An-

triebssystems, vielmehr impliziert er einen Systemwechsel, d. h. Veränderungen auf vielen verschiedenen Ebenen. Wie in Kapitel II bereits dargestellt, verändern sich nicht nur die Fahrzeuge und ihre Handhabung, sondern auch die Infrastrukturen, Marktakteure und Geschäftsmodelle, welche den Konsumenten vertraut sind und die sie gewohnt sind.

Ein solcher Systemwechsel hat nur dann eine Chance auf Erfolg, wenn er von den Kunden mitgetragen wird, nicht nur im Sinne einer reaktiven Duldung, sondern vielmehr in Form einer aktiven Bereitschaft. Für die umfassende Verbreitung von Elektromobilität ist deshalb die *Akzeptanz* durch die Konsumenten notwendig: Eignen sich Elektrofahrzeuge zur Befriedigung ihrer Bedürfnisse und passen sie zu ihrem Lebensstil, d. h. ihren Gewohnheiten, Einstellungen und Werten? Elektromobilität muss dabei für die Konsumenten attraktiv sein – d. h. attraktiver als bisherige auf dem Markt erhältliche Angebote. Elektrofahrzeuge müssen aber nicht unbedingt in jeder Hinsicht vergleichbar mit konventionellen Fahrzeugen sein. In diesem Kapitel wird die Elektromobilität dazu sowohl aus der Perspektive von Privatkunden als auch von gewerblichen Kunden betrachtet.

Der angesprochene Systemwechsel, der mit der Elektromobilität einhergeht, impliziert auch Veränderungen des *Nutzerverhaltens*, die hier behandelt werden sollen – dazu gehören insbesondere Änderungen, welche wiederum aus ökologischer Sicht relevant sein können. In Hinblick auf andere Verkehrsteilnehmer sowie die Bevölkerung insgesamt werden Fragen der *Sicherheit* sowie Effekte auf Gesundheit und Lebensqualität durch die durch Elektromobilität erreichbare *Lärmreduktion* diskutiert. In den Blickwinkel einer sozialen Bewertung gehören zudem die in Kapitel III.2.4 dargestellten *Arbeitsplatzeffekte*, auf welche hier nur verwiesen wird.

### 3.1 Akzeptanz

Der aktuelle Bestand an Elektrofahrzeugen in der Bundesrepublik ist noch sehr gering: Zu Beginn des Jahres 2012 waren laut Kraftfahrt-Bundesamt (KBA 2012) gerade ca. 4 500 BEV bei über 40 Millionen zugelassenen Pkw in Deutschland registriert (Kap. II.2.1). Dies liegt vor allem auch daran, dass Elektrofahrzeuge „der 2. Generation“, d. h., die mit heutiger Technologie ausgestattet sind und von Herstellern direkt angeboten (somit nicht umgerüstet) werden, erst schrittweise auf den Markt kommen. Dementsprechend liegen auch erst wenige Erkenntnisse zur Akzeptanz tatsächlicher Nutzer vor. In der Regel stammen sie aus Flottenversuchen, d. h. aus einem besonderen Umfeld. Im Vergleich zu Elektrofahrzeugen ist der Markt für elektromobile Zweiräder schon weiter entwickelt. Bislang bestimmen hier sogenannte Pedelecs (Kap. II.2.5 und II.3.4) den Markt; ihr Bestand hat sich in den letzten 5 Jahren auf fast 1. Millionen Pedelecs im Jahr 2011 vervierfacht (Paetz et al. 2012). Aber auch hier liegen nur wenige Studien zu den Erfahrungen tatsächlicher Nutzer vor. Bei der Befragung potenzieller Nutzer stellt sich umgekehrt jedoch die Herausforderung, dass diese ihre Erwartungen an neue Technologien, mit denen

sie noch keine Erfahrungen gesammelt haben, nur schwer antizipieren können. Dies weist auf die Notwendigkeit hin, die Nutzerakzeptanz und ihre Entwicklung mit einem breiten methodischen Ansatz zu untersuchen und dabei sowohl unterschiedliche Nutzer- als auch Nichtnutzerguppen einzubeziehen.

In den zahlreichen Forschungs- und Pilotprojekten, welche in den letzten 3 Jahren zur Elektromobilität durchgeführt wurden, spielt das Thema der Nutzerakzeptanz eine wichtige Rolle. Im Folgenden wird ein Überblick über derzeit vorliegende Ergebnisse gegeben, wobei verschiedene Studien herangezogen werden, die die unterschiedlichen angewendeten Perspektiven und methodischen Ansätze sowie die verschiedenen Konsumentengruppen angemessen abdecken. Dabei werden sowohl die Sichtweise potenzieller Nutzer als auch die Erfahrungen und Sichtweise tatsächlicher Nutzer einbezogen sowie private und gewerbliche Kunden unterschieden. Untersucht wurde bzw. wird die Nutzerakzeptanz insbesondere im Rahmen der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität (BMBF) (Fraunhofer ISI et al. 2011), im Rahmen der Plattform Sozialwissenschaften zur Begleitung der Modellregionen (BMVBS) (Fraunhofer ISI 2012a) sowie in den Projekten MeRegioMobil (BMW) (Paetz /Dütschke 2012; Paetz et al. 2011): und „Early Adopter – Erstkäufer von Elektrofahrzeugen“ (BMW) (Wietschel et al. 2012). Zudem werden vorliegende Ergebnisse aus anderen Studien zur Nutzerakzeptanz in Deutschland herangezogen.

#### 3.1.1 Wissen und Erwartungen der Bevölkerung

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 (Technomar GmbH/TÜV SÜD 2009). Gleichzeitig äußern die Befragten, nicht genügend über Elektrofahrzeuge zu wissen (PwC/Fraunhofer IAO 2010). Ergebnisse von Marktstudien der letzten Jahre weisen darauf hin, dass dadurch die geäußerten Erwartungen an Elektroautos stark an den Charakteristika konventioneller Fahrzeuge ausgerichtet werden. Elektrofahrzeuge scheinen demnach nur dann eine Chance zu haben, wenn sie hinsichtlich Preis und Leistungsmerkmalen wie Reichweite, Ladedauer und Höchstgeschwindigkeiten mit konventionellen Autos mithalten können (ADAC 2009). Eine vergleichende Breitenbefragung des Fraunhofer ISI von vier Gruppen potenzieller privater Autokäufer mit unterschiedlichem Erfahrungsstand weist jedoch darauf hin, dass sich die Wahrnehmung und Bewertung von Elektrofahrzeugen mit zunehmendem Erfahrungs- und Wissensstand verändern (Peters et al. 2011; Schneider et al. 2013). Dabei wurde zwischen aktuellen Nutzern, Personen mit konkreten Anschaffungsideen, interessierten Personen ohne Kaufabsicht und bisher an Elektromobilität Nichtinteressierten unterschieden. Nutzer und Personen mit konkreter Kaufabsicht beurteilen Fahreigenschaften, Betriebskosten und Umweltauswirkungen von Elektrofahrzeugen sowie ihre Vereinbarkeit mit den eigenen Einstellungen und Bedürfnissen deutlich posi-

ver als die bisher weniger Interessierten. Zudem ist insbesondere den derzeit interessierten Konsumenten sehr wichtig, dass Elektroautos umweltfreundlich und energiesparend sind – die Vergleichbarkeit mit konventionellen Autos ist für sie nicht vorrangig. Diese und andere Befragungen von interessierten privaten wie auch gewerblichen Konsumenten mit konkreter Kaufabsicht bzw. zukünftigen Nutzern im Rahmen von Flottenversuchen zeigen, dass diese überwiegend realistische Vorstellungen von Elektrofahrzeugen haben, welche aktuell bzw. in Kürze auf den Markt kommen (Fraunhofer ISI 2012a; Dütschke et al. 2011; Peters/Hoffmann 2011). Obwohl gewisse Hemmnisse und weiterer Entwicklungsbedarf, welche im nächsten Kapitel dargestellt werden, wahrgenommen werden, werden die derzeitigen Elektrofahrzeuge von zukünftigen und potenziellen ebenso wie von tatsächlichen Nutzern bereits als weitgehend alltagstauglich eingeschätzt (Fraunhofer ISI 2012a; Dütschke et al. 2011; Peters et al. 2011; Peters/Hoffmann 2011). Obwohl das Interesse an Elektrofahrzeugen und ihrer weiteren Entwicklung im Allgemeinen hoch ist, zeigen die Befragungen insgesamt aber auch, dass sowohl potenzielle als auch die tatsächlichen privaten und gewerblichen Nutzer im Rahmen der Flottenversuche vielfach noch unsicher sind, wie sie sich künftig entscheiden werden, und ob sie Elektrofahrzeuge (auch) zukünftig kaufen bzw. im Rahmen von Sharingkonzepten nutzen werden.

Der Markt für elektrische Zweiräder zeigt sich schon in einem fortgeschrittenen Stadium (Kap. II.2.5): Für diese Form der Elektromobilität ist bereits eine große Bekanntheit sowie ein deutliches Interesse und eine hohe Akzeptanz in allen Alters- und Nutzergruppen feststellbar (Kohlberg 2011; Sinus 2011), was sich auch in höheren Absatzzahlen im Zweiradmarkt im Vergleich zum Pkw-Sektor widerspiegelt (5 Prozent im Vergleich zu 0,02 Prozent nach Paetz et al. [2012]). Das aktuelle Interesse an Pedelecs (Fahrräder mit einem Elektromotor zur Tretunterstützung; Kap. II.3.4), das sich nach einer repräsentativen Befragung zur Fahrradnutzung in Deutschland (Sinus 2011) im Jahr 2011 (47 Prozent der Befragten) im Vergleich zu 2009 (24 Prozent) nahezu verdoppelt hat, lässt weitere Absatzsteigerungen erwarten. Dabei wird von den 60- bis 69-Jährigen das höchste Interesse geäußert.

### 3.1.2 Wesentliche Hemmnisse

Kritisch erscheinen aus Nutzersicht insbesondere die Themen Anschaffungskosten und Reichweite (Fraunhofer ISI 2012a; Peters et al. 2011; Peters/Hoffmann 2011; Wietschel et al. 2012). Die Anschaffungspreise von Elektrofahrzeugen werden momentan sowohl von privaten als auch gewerblichen Nutzern als noch deutlich zu hoch bewertet. Niedrigere Anschaffungspreise bzw. intelligente Geschäftsmodelle, welche die Kosten reduzieren oder umverteilen, erscheinen somit als wichtige Voraussetzung für eine breite Nutzung. Befragungen und Gruppendiskussionen mit potenziellen Erstkäufern zeigen dabei aber durchaus eine gewisse Mehrpreisbereitschaft hinsichtlich der Anschaffungskosten und weisen darauf hin, dass weder die absolute Vergleichbarkeit der Kosten zum konventionellen Fahrzeug

noch die Wirtschaftlichkeit alleiniges Kriterium für eine positive Kaufentscheidung dieser Käufergruppen sein dürften (Wietschel et al. 2012).

In den Modellregionen des BMVBS wurden die privaten und gewerblichen Nutzer gefragt, für welche zusätzlich eingeführten Vorteile sie einen Mehrpreis für Elektrofahrzeuge in Kauf nehmen würden (Fraunhofer ISI 2012a). Dabei zeigt sich eine klare Präferenz für finanzielle gegenüber nichtfinanziellen Anreizen: Finanzielle Anreize in Form von preiswertem Ladestrom oder Vergünstigungen bei Kfz-Steuer und -versicherung schneiden bei den Teilnehmern deutlich besser ab als nichtfinanzielle Anreize wie kostenlose oder reservierte Parkplätze und die Nutzung von Busspuren.

Die Reichweite ist für potenzielle und tatsächliche Nutzer insbesondere bei der Betrachtung von BEV noch verbesserungswürdig. Ergebnisse aus den Modellregionen (Fraunhofer ISI 2012a) weisen darauf hin, dass gleichzeitig auch das Vertrauen in die Reichweite der Fahrzeuge sowohl bei privaten als auch gewerblichen Nutzern nur mittelmäßig ausgeprägt ist, d. h. die Nutzer sind sich mitunter unsicher, wie viel Reichweite ihnen noch zur Verfügung steht. Dabei wird die Nützlichkeit der Fahrzeuge im Alltag – trotz der beklagten begrenzten Reichweiten – aber insgesamt als hoch bewertet. Verlässlichere und präzisere Anzeigen zur Reichweite könnten also bestehende Vorbehalte abbauen und sich positiv auf die Akzeptanz auswirken. Auch durch die Erfahrung mit Elektromobilität kann sich das Vertrauen in die Reichweite ein Stück weit verbessern, wie ein Vergleich der Antworten von Testnutzern in den Modellregionen bzw. Flottenversuchen vor und während der Nutzung zeigt (Schneider et al. 2013).

Die Ergebnisse zum Bedarf an einem Aufbau öffentlicher und halböffentlicher Infrastruktur zeigen dagegen noch ein uneinheitliches Bild. Die Nutzer im Rahmen der Modellregionen formulieren zum Teil den Wunsch nach einem Infrastrukturausbau, der es ihnen ermöglicht, die Fahrzeuge auch unterwegs bzw. tagsüber zu laden, d. h. in Stadtzentren oder am Arbeitsplatz. Dieses Bedürfnis steht vermutlich in engem Zusammenhang mit der als zu gering empfundenen Reichweite der Fahrzeuge. Bisher in den Testgebieten aufgestellte Ladesäulen werden aber wenig in Anspruch genommen, weder von Nutzern privater oder gewerblicher Elektrofahrzeuge (Plötz et al. 2012c; Gnann et al. 2012a) noch im Rahmen integrierter E-Carsharingangebote (Kap. III.3.1.4; Knie et al. 2012). Ähnliche Ergebnisse zur geringen Nutzung öffentlicher Ladeinfrastruktur zeigen sich in amerikanischen und britischen Feldversuchen (Bruce et al. 2012; ECO/INL 2012). Im britischen Projekt CABLED wurde zum Laden der 110 Elektrofahrzeuge in über 60 Prozent der Fälle zuhause geladen, in rund 30 Prozent der Fälle am Arbeitsplatz und in nur 3 Prozent an öffentlichen Lademöglichkeiten. Im vergleichsweise großen „EV Project“ (mit 4 500 Elektrofahrzeugen) in den USA finden 91 Prozent aller Ladevorgänge (mit 92 Prozent des benötigten Fahrstroms) zuhause statt. Nur 9 Prozent der Ladevorgänge finden an den ca. 1 000 öffentlichen Ladepunkten statt (ECO/INL 2012). Für Batteriewechselsysteme, für welche zum Teil die Erwartung geäußert wird, dass sie

Hemmnisse aufgrund der begrenzten Reichweite von Elektrofahrzeugen abbauen könnten, liegen bisher keine empirischen Befunde zur Nutzerakzeptanz vor. Aus Expertensicht bestehen allerdings Zweifel hinsichtlich einer Bereitschaft der Nutzer, das Risiko einzugehen, bei einem Batteriewechsel eine Batterie von schlechterer Qualität zu erhalten (Peters/Dütschke 2010).

Aus Sicht von Experten erscheint für die Markteinführung von Elektrofahrzeugen der Ausbau von Ladestationen zur leitfähigen Ladung, wenn überhaupt, für die Sichtbarkeit von Elektromobilität und die Reduktion von Unsicherheit vor der Kaufentscheidung bedeutsam – voraussichtlich werden die frühen privaten und gewerblichen Nutzergruppen die Fahrzeuge vor allem zuhause oder am Arbeitsplatz laden (Peters/Dütschke 2010; Wietschel et al. 2011).

Grundsätzlich sind Kompensationseffekte, d. h. eine wechselseitige Wirkung zwischen gegebener Reichweite und dem Bedürfnis nach einem Infrastrukturausbau und zwischen vorhandener Infrastruktur und dem Bedürfnis nach einer höheren Reichweite, durchaus wahrscheinlich: Bei steigenden Reichweiten könnte die Forderung nach weiterer Infrastruktur in den Hintergrund treten, bei zunehmender Infrastruktur das Reichweitenproblem als geringer empfunden werden. Im Zusammenhang mit Reichweiteeinschränkungen und Bedürfnissen, welche durch Elektrofahrzeuge nicht abgedeckt werden, betonen Experten aber auch die Bedeutung von umfassenden Mobilitätspaketen, welche dem Nutzer je nach Bedürfnis das passende Verkehrsmittel zu einfachen und transparenten Bedingungen zur Verfügung stellen. Entsprechende Vorschläge und Konzepte werden auch von potenziellen und tatsächlichen Nutzern als zukunftsweisend und attraktiv beurteilt (Fraunhofer ISI 2012a; Peters/Hoffmann 2011).

Ein Hemmnis ganz anderer Art besteht schließlich in den aus Sicht von Nichtnutzern noch unzureichend vorhandenen Testmöglichkeiten (Peters et al. 2011).

### 3.1.3 Förderliche Faktoren

Aus Sicht von Experten, potenziellen und tatsächlichen privaten wie auch gewerblichen Nutzern zeigt sich eine Reihe von Aspekten, bei denen Elektrofahrzeuge gegenüber konventionellen Fahrzeugen deutliche Vorteile aufweisen können (Fraunhofer ISI 2012a; Peters/Dütschke 2010; Peters/Hoffmann 2011). Die Hauptvorteile der Elektromobilität sind aus Sicht aller genannten Gruppen Umweltvorteile, niedrige Lärmemissionen sowie niedrige Betriebskosten. Als weitere wichtige Vorteile heben Experten und tatsächliche Nutzer Fahrverhalten und Fahrkomfort von Elektrofahrzeugen positiv hervor. So zeigen sich die Teilnehmer an den Feldversuchen in den Modellregionen insgesamt von ihren Fahrzeugen<sup>10</sup> und von Elektromobilität begeistert: Sie schätzen den Fahrspaß und das Fahrverhalten der Fahrzeuge und bewerten

ihre Handhabung sowohl beim Fahren als auch beim Laden als unproblematisch und leicht erlernbar (Fraunhofer ISI 2012a).

Die Ergebnisse von Nutzerbefragungen im Rahmen der Modellregionen (Fraunhofer ISI 2012a) zeigen, dass sich die Beurteilungen der privaten von denen der gewerblichen Nutzer sowohl bezüglich der förderlichen Faktoren als auch bezüglich Verbesserungspotenzialen (Kap. III.3.1.2) kaum unterscheiden. Darüber hinaus erwarten die gewerblichen Nutzer in der Mehrheit positive Effekte für das Image ihres Unternehmens und die Wahrnehmung durch ihre Kunden.

Gerade das Image von Elektrofahrzeugen als umweltfreundliche und innovative Technologie kann ein relevanter Treiber sowohl für die Akzeptanz bei gewerblichen<sup>11</sup> als auch bei privaten Nutzern<sup>12</sup> sein. Deutlich wird aber auch, dass dieses Image (die Umweltfreundlichkeit) durch transparente und glaubwürdige Angebote, insbesondere eine konsequente Bereitstellung von erneuerbaren Energien, gesichert werden muss, da Zweifel an der Umweltbilanz die Akzeptanz gefährden können (Fraunhofer ISI 2012a; Götz et al. 2011; Peters/Dütschke 2010; Peters et al. 2011).

Der Vergleich verschiedener privater Käufergruppen mit unterschiedlich ausgeprägtem Interesse an Elektrofahrzeugen zeigt, dass eine große Rolle für die Kaufentscheidung die Einschätzung spielt, wie sehr ein Elektrofahrzeug zum eigenen Lebensstil und der eigenen Persönlichkeit passt (Peters et al. 2011). Je besser Elektrofahrzeuge mit den eigenen Gewohnheiten und täglichen Aufgaben sowie mit den eigenen Einstellungen vereinbar erscheinen, desto höher ist die Bereitschaft, eines zu kaufen bzw. zu nutzen. Diese subjektiv wahrgenommene Vereinbarkeit ist nicht allein an spezifische objektive Rahmenbedingungen und die tatsächlichen Mobilitätsprofile gebunden; vielmehr spielt die subjektive Wahrnehmung der eigenen Mobilitätsbedürfnisse sowie die individuelle Bewertung der Eigenschaften von Elektrofahrzeugen hier eine entscheidende Rolle. Möglichkeiten zum Ausprobieren von Elektrofahrzeugen, insbesondere im eigenen Alltag, können helfen, die Alltagstauglichkeit und Passung von Elektrofahrzeugen zu überprüfen sowie ihre Eigenschaften kennenzulernen, werden aber noch als kaum vorhanden wahrgenommen. Auch Daten aus den Modellregionen weisen darauf hin, dass die Nutzung von Elektrofahrzeugen sich positiv auf die Akzeptanz auswirkt (Schneider et al. 2013). Das gilt auch für Pedelegs, bei denen sich Testfahrten sowie persönliche Kontakte zu Fachhändlern und/oder anderen Nutzern als förderlich erweisen (Paetz et al. 2012).

Die wahrgenommenen Vorteile können gewisse Hemmnisse im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen, wie bereits erwähnt, kompensieren helfen. Für Elektrofahrzeuge scheint dies bei den aktuell bestehenden und in

<sup>10</sup> Diese Angaben beziehen sich auf eine Vielzahl an unterschiedlichen Fahrzeugen, die im Rahmen der Modellregionen getestet werden bzw. wurden. Bei der Hälfte der genutzten Fahrzeuge handelt es sich um Pkw, aber auch Zweiräder werden/wurden häufig eingesetzt, Transporter machten 5 Prozent der Fahrzeuge aus.

<sup>11</sup> Für gewerbliche Nutzer neben BMVBS (2012) siehe Busch (2010); Paetz/Dütschke (2012).

<sup>12</sup> Für private Nutzer BMVBS (2012); Peters et al. (2011); Peters/Hoffmann (2011).

Kürze zu erwartenden Bedingungen und Angeboten jedoch nur begrenzt möglich, wie auch die noch verhalten geäußerten Kaufabsichten sowohl privater als auch gewerblicher Nutzer in Befragungen und Gruppendiskussionen zeigen (Fraunhofer ISI 2012a; Peters/Hoffmann 2011). Letztlich erscheint hier eine Weiterentwicklung der Fahrzeuge und Mensch-Maschine-Schnittstellen sowie ein breites und ausgereiftes Angebot passender Geschäftsmodelle und verkehrsmittelübergreifender Konzepte notwendig, um die noch vorhandenen Hemmnisse bei den kaufinteressierten, aber noch abwartenden Konsumentengruppen abzubauen. Die in dieser Hinsicht wichtigsten Voraussetzungen für eine Marktdurchdringung mit Elektrofahrzeugen auf Basis der Anforderungen potenzieller Erstkäufer (Kap. III.3.1.5) sind die folgt (Wietschel et al. 2012):

- größere Auswahl an Elektrofahrzeugen namhafter Hersteller und verschiedener Größe mit gängigen Qualitäts- und Komfortstandards
- vermehrtes Angebot an PHEV (keine Reichweiten- und Ladeeinschränkung)
- deutliche Reduktion des Anschaffungspreises
- Testmöglichkeiten
- neue Mobilitäts- und Geschäftsmodelle
- Glaubwürdigkeit von „grünen“ Angeboten
- Ausbau der privaten Ladeinfrastruktur

Für Elektrozeigeräder, speziell Pedelecs, zeigen die Marktzahlen<sup>13</sup> bereits, dass diese trotz eines deutlich höheren Kaufpreises im Vergleich zu nichtmotorisierten Fahrrädern auf zunehmende Akzeptanz stoßen. Pedelecs werden als kostengünstige und umweltfreundliche Alternative zu täglichen Autofahrten, vor allem für das Pendeln zur Arbeit, wahrgenommen (Paetz et al. 2012). Dabei ermöglichen sie auch körperlich eingeschränkten Personen, wieder auf das Fahrrad umzusteigen. Ihr Fahrverhalten und ihre Handhabung werden positiv erlebt und sie lassen sich aus Sicht der Nutzer – auch ohne gesonderte Infrastruktur – gut in den Alltag integrieren.

### 3.1.4 Mobilitätskonzepte aus Nutzersicht

Aus vorliegenden Studien und Erfahrungen wurde deutlich, dass die interessierten Konsumenten ihre Mobilitätsbedürfnisse auch mit einem Elektrofahrzeug auf angenehme Weise und ohne übermäßige Einschränkungen oder Aufwand erfüllen können wollen (Peters/Hoffmann 2011; Götz et al. 2011). Aus Nutzersicht müssen Elektrofahrzeuge dazu nicht unbedingt alle denkbaren Mobilitätsbedürfnisse erfüllen. Befragungen zeigen vielmehr, dass bisherige Nutzer von Elektrofahrzeugen häufig über mehr als ein Fahrzeug verfügen bzw. verfügen und somit das Elektrofahrzeug als zusätzliches Fahrzeug nutzen bzw. genutzt haben (Knie et al. 1999; Wietschel et al.

2012). Für eine weitere Verbreitung der Elektromobilität erscheinen angesichts der aktuellen Hemmnisse bei Elektrofahrzeugen zudem intelligente Carsharing- und Mobilitätskonzepte attraktiv, welche Kosten und Aufwand reduzieren und Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Verkehrsträgern bieten. Solche Konzepte können für die Wahrnehmung der Alltagstauglichkeit von Elektrofahrzeugen von entscheidender Bedeutung sein. Bei der Fahrzeugnutzung wird von den privaten Nutzern zwar generell das klassische Modell bevorzugt, in dem der Nutzer der Eigentümer des Fahrzeugs ist. Aber auch Carsharing ist für einen signifikanten Anteil der Teilnehmer in den verschiedenen Studien vorstellbar (Fraunhofer ISI 2012a; Peters/Dütschke 2010; Peters et al. 2011; Peters/Hoffmann 2011). Für die Befragten im Rahmen der Modellregionen ist die Nutzung von Elektrofahrzeugen im Rahmen von Sharingkonzepten und multimodalen Mobilitätsangeboten deutlich vorstellbarer als der Kauf; hierin liegt aus ihrer Sicht zunächst auch das Zukunftspotenzial der Elektromobilität (Fraunhofer ISI 2012a). Für dessen Erschließung ist allerdings die Entwicklung von leicht zugänglichen, flexiblen Konzepten entscheidend.

Im Rahmen des Projekts „BeMobility“ wurde die Nutzung von Elektrofahrzeugen im Rahmen von Carsharing in Kombination mit dem öffentlichen Verkehr getestet. Nach Knie et al. (2012) bewerteten die befragten Nutzer diese Nutzungsvariante insgesamt als sehr positiv und mehrheitlich als geeignet, alltägliche sowie nicht alltägliche Mobilitätsbedürfnisse zu befriedigen. Hinsichtlich Mobilitätsbedürfnissen, für welche das Elektroauto nicht geeignet ist, war dabei für die meisten Befragten neben der Nutzung des öffentlichen Verkehrs auch die Möglichkeit wichtig, gelegentlich auf konventionelle Carsharing-Pkw zurückgreifen zu können. Neben dem Angebot von Elektrofahrzeugen im herkömmlichen Carsharing wurde im Rahmen des Projekts mit der „Mobilitätskarte Berlin elektroMobil“ ein integriertes Angebot entwickelt und getestet, welches verschiedene Bausteine umfasste: neben der ÖPNV-Nutzung ein Zeitguthaben für Leih-Elektrofahrzeuge, 30 Freiminuten pro Fahrt mit Leihfahrrädern sowie freies Parken an öffentlichen Ladestellen sowie in bestimmten Parkhäusern. Sowohl der Zugang zu verschiedenen Verkehrsmitteln im Rahmen eines integrierten Angebots, d. h. über eine Monatskarte, wie auch der Preis wurden als sehr attraktiv beurteilt. Dass sich die Karte für unterschiedliche Mobilitätsbedürfnisse bewährt hatte, zeigte nicht zuletzt die Absicht von rund drei Vierteln der Nutzer, ÖV und E-Carsharing über die Zeitkarte auch nach Ablauf der Testphase zu nutzen. Knie et al. (2012) weisen aber ebenso auf Verbesserungsbedarf hinsichtlich Qualität, Verfügbarkeit und Kosten aller Elemente (Fahrzeuge und Infrastruktur) im Rahmen solcher multimodalen Angebote hin. Unter anderem scheint insbesondere für eine routinisierte Nutzung von E-Carsharing ein Ausbau von Carsharingstationen mit Elektrofahrzeugen an ÖV-Knotenpunkten und unmittelbar in Wohngebieten erforderlich.

Geht es um die Weiterentwicklung von Elektrofahrzeugen und die Ausgestaltung elektromobiler Angebote, so wurde in den Studien deutlich, dass die Elektromobilität

<sup>13</sup> Die Absatzzahlen von Elektrofahrzeugen in 2011 liegen bei 5 Prozent des Fahrradmarktes gegenüber 0,02 Prozent im Pkw-Sektor (Paetz et al. 2012).

ihr Potenzial bei der Umweltfreundlichkeit – einem aus Nutzersicht entscheidenden Argument für die Nutzung – nicht verspielen darf (Fraunhofer ISI 2012a; Götz et al. 2011; Peters et al. 2011).

### 3.1.5 Potenzielle Erstkäufer bzw. -nutzer

Bei der Identifikation potenzieller Erstkäufer von Elektrofahrzeugen sind verschiedene Kriterien und Ansatzpunkte zu berücksichtigen. Zum einen weisen die eingeschränkte Reichweite und die notwendigen Ladezeiten von Elektrofahrzeugen sowie die für die Wirtschaftlichkeit notwendige Fahrleistung auf die Bedeutung passender Mobilitätsbedürfnisse und -profile hin. Ebenso scheinen gewisse sozioökonomische Charakteristika sinnvolle Indikatoren für Erstkäufer zu sein, wie z. B. ausreichende finanzielle Ressourcen als Indikator für eine höhere Zahlungsbereitschaft. Zum anderen wurde aber in bisherigen Studien darauf hingewiesen, dass aussichtsreiche Nutzergruppen von Elektromobilität, insbesondere unter den Privatkonsumenten, sich nur zum Teil durch sozioökonomische und -demografische Merkmale definieren lassen. Auch psychologische Merkmale wie Einstellungen, Werte oder der Lebensstil spielten eine wichtige Rolle (Peters/Dütschke 2010; Peters/Hoffmann 2011; Wietschel et al. 2012).

In Hinblick auf aussichtsreiche Erstkäufergruppen unter den Privatkäufern wurden in der Early-Adopter-Studie (Wietschel et al. 2012) die verschiedenen Ansätze vor dem Hintergrund der weiteren Entwicklung elektromobiler Angebote zusammengeführt. Tabelle III.11 stellt Charakteristika wahrscheinlicher Erstkäufer bzw. -nutzer von Elektrofahrzeugen dar, welche auf Basis von Literaturrecherchen, Datenanalysen und empirischen Studien ermittelt wurden.

Nach Wietschel et al. (2012) stellen unter den Privatkäufern technikinteressierte Männer im mittleren Alter, die Wert auf Fahrspaß sowie umweltfreundliches Fahren legen, die aussichtsreichste Zielgruppe dar. Als weitere mögliche Käufer kommen gut situierte Personen im Ruhestand in Betracht, welche ein ausgeprägtes Technikinteresse und/oder Umweltpräferenzen haben sowie den Wunsch, dies nach außen zu repräsentieren und sich etwas Besonderes zu gönnen. Insbesondere bei dieser Zielgruppe dürften zudem ausgeprägte Komfortansprüche wichtige Kauf- bzw. Nutzungskriterien darstellen. Wirtschaftliche Überlegungen dürften für diese Zielgruppen für ihre Kaufentscheidung weniger ausschlaggebend sein, die Mehrpreisbereitschaft erscheint aber auch bei diesen Gruppen begrenzt, d. h. die heutigen Mehrkosten elektrischer Fahrzeuge noch deutlich zu hoch.

Tabelle III.11

#### Charakteristika potenzieller privater „early adopter“ (früher Käufer bzw. Nutzer) der Elektromobilität aus soziodemografischer, psychologischer und ökonomischer Perspektive

Perspektive	Charakteristika potenzieller „early adopter“
Soziodemografie	<p>wohnen eher in ländlichen Gebieten oder Vorstädten; überwiegend Männer mittleren Alters, höherer Bildung und Einkommen, technische Berufe, Mehrpersonenhaushalt</p> <p><i>in der Folge:</i> zunehmend auch Frauen und jüngere Menschen, zunehmend auch durchschnittliche Einkommensklassen; ältere Menschen mit höheren Einkommen oder Renten/Pensionen, wohnhaft in Städten oder Vorstädten</p> <p><i>bei integrierten Angeboten (Carsharing, Mobilitätskarten, o. Ä.):</i> auch Personen im städtischen Raum</p>
Psychologie	<p>hohe Technikaffinität; dominant bei Entscheidung sind Fahrspaß und Fahrgefühl, Umweltentlastung, Individualismus, neue Technologie</p> <p><i>in der Folge:</i> zunehmend umweltorientierte Käufer mit z. T. geringerem Technikinteresse; Entscheidung insbesondere älterer Käufergruppen abhängig von Komfortangebot und Technikaffinität; Akzeptanz von neuen Mobilitätskonzepten u. Geschäftsmodellen</p>
Ökonomie/ Fahrprofil	<p>Akzeptanz von höheren Anschaffungspreisen (aber unter heutigem Niveau)</p> <p><i>in der Folge:</i> Akzeptanz von etwas höheren Anschaffungspreisen und höhere Relevanz einer Wirtschaftlichkeit</p> <p><i>Fahrprofil:</i> hohe Fahrleistungen und hoher Stadtfahranteil (d. h. v. a. Vollzeitbeschäftigte); bei älteren Käufergruppen teilweise Akzeptanz von höheren Anschaffungspreisen (aber unter heutigem Niveau)</p> <p><i>für integrierte Angebote:</i> Personen, welche bereits multimodal mobil sind (d. h. verschiedene Verkehrsmittel für verschiedene Strecken und Streckenabschnitte kombinieren)</p>

Eigene Zusammenstellung nach Wietschel et al. 2012

Je sichtbarer und erfahrbarer Elektrofahrzeuge im Alltag der Autokäufer werden, desto mehr dürften weitere Käufergruppen an Bedeutung gewinnen und desto weniger dürfte nach Wietschel et al. (2012) das Technikinteresse ausschlaggebend sein. Die Umweltentlastung als Kaufmotiv sowie das generelle Image der Elektromobilität in der Bevölkerung dürfte dagegen weiter an Bedeutung gewinnen (Peters et al. 2011), ebenso höhere Anforderungen an Komfort, Bedienbarkeit, Reichweite und Ladedauer. Zunehmend dürften auch Frauen, die tendenziell eine höhere Umweltorientierung (BMU 2010), aber tendenziell ein geringeres Technikinteresse als Männer aufweisen, zu den Käufern gehören.

Bei einem attraktiven Angebot von Elektrofahrzeugen im Rahmen von Carsharing oder umfassenden Mobilitätsangeboten könnten aber auch Nutzergruppen erschlossen werden, deren Mobilitätsbedürfnisse die Anschaffung eines Elektrofahrzeugs nicht sinnvoll erscheinen lassen oder welche sich den Kauf eines Elektrofahrzeugs finanziell nicht leisten können. Bei entsprechenden Angeboten könnte Elektromobilität demnach auch für Personen sehr interessant sein, die Wert auf flexible und individuelle Mobilität legen und bereits multimodal mobil sind, d. h. verschiedene Verkehrsmittel für verschiedene Strecken und Streckenabschnitte kombinieren. Für sie könnte die Nutzung von Elektrofahrzeugen im Rahmen von Carsharing oder integrierten Mobilitätskonzepten eine attraktive Ergänzung zu anderen Verkehrsmitteln darstellen.

Neben den aufgeführten privaten Käufergruppen kommt gewerblichen Fahrzeughaltern, die generell einen hohen Anteil an den Pkw-Neuzulassungen aufweisen, eine große Bedeutung für die Verbreitung der Elektromobilität in den kommenden Jahren zu. Gewerbliche Fahrzeughalter machen derzeit einen großen Anteil der aktuellen Käufer bzw. Nutzer von Elektrofahrzeugen aus (Wietschel et al. 2012; Kap. III.2.1.2). Aspekte, welche für den Einsatz von Elektrofahrzeugen in Firmen- und Serviceflotten sowie im Bereich des Carsharings sprechen, wurden bereits in den Kapiteln II.3.2 und II.3.5 ausgeführt. In diesem Bereich dürften letztlich geeignete Fahrprofile und Transportbedürfnisse, unterstützende Rahmenbedingungen und daraus resultierende Wirtschaftlichkeitsvorteile die entscheidende Rolle spielen.

Auch die Ergebnisse aus der Modellregion Rhein-Ruhr „colognE-mobil“ weisen darauf hin, dass Wirtschaftlichkeitsvorteilen im Rahmen einer TCO-Analyse (Analyse der gesamten Kosten aus Anschaffung und Nutzung) im gewerblichen Bereich eine zentrale Bedeutung zukommt (Universität Duisburg-Essen 2012). Insofern ist im Hinblick auf potenzielle Erstkäufer auf die dargestellten Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen zu verweisen (Kap. III.2.1). Der Imagegewinn für Firmen durch die Nutzung von Elektrofahrzeugen spielt hauptsächlich in den Branchen eine Rolle, die sich nah am Endkunden befinden und ein besonderes Interesse daran haben, als innovativ, umweltfreundlich und dynamisch wahrgenommen zu werden. Wie eine Umfrage im Rahmen des Projekts „colognE-mobil“ (Universität Duisburg-Essen 2012) zeigt, erscheinen Elektrofahrzeuge in

dieser Hinsicht z. B. für größere Architekturbüros, Werbeagenturen und Hotels interessant, die auch eine höhere Zahlungsbereitschaft angeben als Unternehmen anderer Branchen (bspw. soziale Dienste).

### 3.2 Nutzerverhalten

Für die ökologische Bewertung der Elektromobilität ist nicht allein die theoretisch mögliche Reduktion von Umweltbelastungen relevant. Von großer Bedeutung bei der Frage der Förderung umweltfreundlicher und energieeffizienter Technologien ist generell die Frage, inwieweit und unter welchen Bedingungen diese Potenziale tatsächlich realisiert werden können. Hier spielt die tatsächliche Nutzung von Elektrofahrzeugen, d. h. Veränderungen im Nutzerverhalten im Vergleich zur Nutzung konventioneller Fahrzeuge, eine entscheidende Rolle.

So ist zu prüfen, ob *Reboundeffekte* durch eine vermehrte Nachfrage bzw. Nutzung von Elektrofahrzeugen zu erwarten sind, welche die theoretisch realisierbaren Umweltvorteile zum Teil oder sogar völlig kompensieren. Aber auch im Hinblick auf die Einbindung erneuerbarer Energien spielen das Nutzerverhalten und die Akzeptanz eines optimalen *Lademanagements* eine wichtige Rolle.

In Hinblick auf Reboundeffekte stellt sich die Frage, wie Elektrofahrzeuge genutzt werden, welche Fahrzeuge die Nutzer von Elektrofahrzeugen nachfragen und ob sich der Fahrzeugbesitz und damit der gesamte Fahrzeugbestand verändert. Übernehmen Elektrofahrzeuge den Wegeanteil, welchen die Konsumenten vorher mit einem konventionellen Fahrzeug zurückgelegt haben oder führen sie zu einem Anstieg des individuellen motorisierten Verkehrs, indem sie als zusätzliche Fahrzeuge angeschafft werden und/oder Mehrfahrten veranlassen oder nichtmotorisierte und öffentliche Verkehrsmittel ersetzen? Zu den tatsächlichen Veränderungen des Nutzerverhaltens liegen bisher nur wenige publizierte Ergebnisse aus den aktuellen Pilotprojekten und Feldversuchen in Deutschland vor. Für die Modellregion E-Mobilität Rhein-Main, in der verschiedene Elektrofahrzeuge, u. a. auch Pedelecs zum Einsatz kommen, zeigen Blättel-Mink et al. (2011), dass sich das eigene Mobilitätsverhalten bei den meisten Nutzern nicht signifikant verändert hat; allerdings ergeben sich Veränderungen bei Wegekettten.

Aus jetziger Sicht ist nicht auszuschließen, dass durch die Elektromobilität der Motorisierungsgrad ansteigen könnte und Fahrten mit öffentlichen Verkehrsmitteln oder Langsamverkehr durch Fahrten mit Elektrofahrzeugen ersetzt werden – insbesondere, wenn diese Elektrofahrzeuge als ökologisch akzeptable Alternative zum übrigen motorisierten Individualverkehr (MIV) wahrgenommen werden (Peters/Dütschke 2010).

Gleichzeitig erscheinen Elektrofahrzeuge aber grundsätzlich geeignet, die Nutzung des MIV zu reduzieren, da sie durch ihre Beschränkungen die Nutzung und Kombination verschiedener Verkehrsmittel anregen. Gerade wenn sie Nutzer zum Umstieg vom eigenen Auto auf Sharing- und multimodale Mobilitätskonzepte animieren, erscheint eine Reduktion des Motorisierungsgrades sowie der mit

Pkw zurückgelegten Kilometer wahrscheinlich. So zeigte sich im Projekt BeMobility, dass das multimodale Angebot der Mobilitätskarte für verschiedene Verkehrsmittel (Kap. III.3.1.4) zu einer vermehrten Nutzung von ÖPNV und (E-)Carsharing und einer Abnahme privater Pkw-Fahrten führte (Knie et al. 2012). Das „Carsharing Barometer 2012“ des Automotive Institute for Management (AIM 2012) weist insgesamt auf eine sehr hohe Bereitschaft der Konsumenten hin, Carsharing privat zu nutzen. Auch für den gewerblichen Bereich zeigt sich ein deutliches Marktpotenzial für gewerbliches Carsharing. Über 50 Prozent der befragten Unternehmen können sich dabei vorstellen, Elektrofahrzeuge im Rahmen eines organisierten gewerblichen Carsharings zu nutzen.

Daneben ist eine Aufstockung des gesamten Fahrzeugbestands weniger wahrscheinlich, wenn Elektrofahrzeuge vor allem von Mehrpersonenhaushalten und damit häufig überdurchschnittlich motorisierten Bevölkerungssegmenten bzw. für den Einsatz in gewerblichen Fahrzeugflotten gekauft werden. Das Elektrofahrzeug kann dann leichter eines der konventionellen Fahrzeuge ersetzen, da immer noch konventionelle Fahrzeuge für die Einsatzzwecke zur Verfügung stehen, für die sich Elektrofahrzeuge nicht eignen. Nach den Ergebnissen von Knie et al. (1999) wurden auch in den 1990er Jahren Elektrofahrzeuge vor allem von überdurchschnittlich motorisierten Bevölkerungssegmenten gekauft. Das Elektrofahrzeug wurde dabei für die meisten Nutzer mit mehreren Fahrzeugen zum Fahrzeug, das im Alltag am meisten genutzt wurde, insbesondere für kurze Strecken, die während der Woche zurückgelegt wurden.<sup>14</sup> Auf das konventionelle Fahrzeug wurde nur noch zurückgegriffen, wenn das Elektrofahrzeug sich nicht eignete (lange Fahrten, größere Transporte). Die Elektrofahrzeuge wurden in den verschiedenen Ländern sowohl in städtischen als auch in ländlichen Gebieten eingesetzt. Die Verkehrsmittelwahl (d. h. Wahl zwischen Auto, ÖV, Rad- oder Fußverkehr) änderte sich beim Kauf eines Elektrofahrzeugs kaum.

Sowohl in der Studie von Knie et al. (1999) zur 1. Generation von Elektrofahrzeugnutzern wie auch in aktuellen internationalen Studien mit tatsächlichen Nutzern wurde dabei darauf hingewiesen, dass mit der Nutzung von Elektrofahrzeugen Lerneffekte einhergehen, die sich wiederum auf das Nutzungsverhalten auswirken: Art und Umfang der täglichen Wege wurden wieder neu betrachtet und das Verhalten den technisch bedingten Möglichkeiten angepasst (Graham-Rowe et al. 2011; Knie et al. 1999; Kurani et al. 2007).

Aktuell fehlt es jedoch noch an umfassenden Carsharing- und Mobilitätsangeboten, welche eine über diese Änderungen hinausgehende, tatsächlich integrierte Nutzung von Elektrofahrzeugen anregen. Aus Sicht von Experten unterstützt die Nutzung von Elektrofahrzeugen bei entsprechendem Angebot eine flexible und zweckorientierte Verkehrsmittelwahl und kann einen Beitrag zu einer funktionsfähigen multimodalen Mobilität leisten, ohne dass

dies als Einschränkung erlebt wird (Knie et al. 1999; Peters/Dütschke 2010). Dass ein solches Potenzial und ein grundsätzliches Interesse bei potenziellen Nutzergruppen für gemeinschaftliche und multimodale Mobilitätsformen vorhanden sind, zeigen auch die zuvor aufgeführten Ergebnisse zur Nutzerakzeptanz (Peters/Hoffmann 2011; Fraunhofer ISI 2012a) wie auch erste Anzeichen für generelle Veränderungen im Mobilitätsverhalten und dem Pkw-Besitz bzw. der Nutzung von Sharingangeboten durch die Verkehrsteilnehmer (ifmo 2011; Peters/Dütschke 2010). So zeigen Daten zum Mobilitätsverhalten junger Erwachsener, dass seit Ende der 1990er Jahre der Pkw-Anteil an den Wegen junger Erwachsener in Deutschland deutlich abgenommen hat (ifmo 2011). Zum einen ist der Pkw-Besitz zurückgegangen, stärker aber noch die Pkw-Nutzung junger Autofahrer. Immer mehr junge Autofahrer kombinieren die Autonutzung mit der Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel und greifen nicht mehr täglich zum Auto.

In Hinblick auf die Fahrzeugwahl dürften die technischen Anforderungen an die Batterien und deren Eigenschaften mit hoher Wahrscheinlichkeit dazu beitragen, dass Elektrofahrzeuge eher in kleineren Autogrößenklassen angeboten werden. In aktuellen Studien wurde gezeigt, dass kleinere Elektrofahrzeuge auch dem Bild und den Erwartungen der Konsumenten entsprechen (Agosti 2011; Götz et al. 2011; Peters/Hoffmann 2011). In der bereits erwähnten breiten Onlinebefragung von Agosti (2011) wurden verschiedene Konsumentengruppen nach ihrem subjektiven Bild sowie der hypothetisch präferierten Fahrzeugklasse gefragt. Die meisten Nutzer und die interessierten Konsumenten (je 43 Prozent) stellen sich ein typisches Elektroauto als Kompaktwagen vor, und auch bei der Nutzungspräferenz liegt der Kompaktwagen bei allen Gruppen vorne. Am zweithäufigsten wird in allen affinen Gruppen ein noch kleineres Auto präferiert, und immerhin knapp ein Viertel der Nutzer präferiert sogar ein Leichtelektromobil oder dreirädriges Elektrofahrzeug (Zweiräder wurden bei der Befragung nicht berücksichtigt). Es kann aber aus aktueller Sicht nicht ausgeschlossen werden, dass bei einem Angebot von Elektrofahrzeugen auch in größeren Fahrzeugklassen Pkw-Nutzer in bedeutsamem Ausmaß auf Elektrofahrzeuge umsteigen, welche größer sind als ihr vorheriges konventionelles Fahrzeug.

Zum Thema Lademanagement und Nutzerverhalten gibt es bisher wenige aussagekräftige Studien, vor allem, da aktuell noch an der Entwicklung intelligenter Systeme gearbeitet wird und belastbare Praxistests mangels ausgereifter Systeme noch fehlen. Dementsprechend bezogen sich die Kommentare von Nutzern in den wenigen vorliegenden Studien zu diesem Thema vor allem auf technische Probleme und Mängel beim Lademanagement (Paetz et al. 2011). Studien zum Thema „smart metering“ zeigen eine gewisse, allerdings begrenzte Bereitschaft der Konsumenten zur Lastverschiebung auf (VaasaETT 2011). Dabei zeichnet sich ab, dass das genaue Ausmaß finanzieller Anreize bzw. der Einsparmöglichkeiten weniger ausschlaggebend dafür ist, ob die Nutzer sich auf eine Lastverschiebung einlassen (z. B. die Nutzung der Waschmaschine auf günstige Tarifzeiten verlagern).

<sup>14</sup> Dies bestätigen auch Ergebnisse aus aktuellen Flottenversuchen (Paetz/Dütschke 2012).

Wichtig scheint eher zu sein, dass die Verbraucher von der Sinnhaftigkeit überzeugt sind (VaasaETT 2011). Insgesamt bevorzugen die Nutzer einfache Tarifsysteme und wären am ehesten dann offen für ein Lademanagement, wenn es nicht mit einer Einschränkung ihrer Mobilitätsbedürfnisse verbunden ist. Um dies zu gewährleisten und gleichzeitig das Potenzial intelligenter Lademanagementsysteme optimal ausnutzen zu können, erscheint es jedoch hilfreich, wenn die Nutzer bei Beginn des Ladevorganges angeben, wann und für welche Strecken sie das nächste Mal das Auto nutzen wollen. Erste Ergebnisse von Hahnel et al. (2011) weisen darauf hin, dass Autofahrer solche Vorhersagen meist relativ gut treffen können. Dabei spielen allerdings der Wegezweck sowie die Streckenlänge und die Zeit zwischen Vorhersage und Fahrtbeginn eine Rolle. Die Entwicklung intelligenter Lademanagementsysteme und die Wahl der Energiereserven, die aufgrund der Angaben der Nutzer vorgehalten werden, sollten solche Faktoren und entsprechende Unterschiede in der Vorhersagegenauigkeit berücksichtigen.

**3.3 Verkehrslärm und Unfallgeschehen**

Elektrofahrzeuge weisen nur geringe oder keine Antriebsgeräusche auf, welche gerade bei niedrigen Geschwindigkeiten die überwiegende Lärmquelle von Fahrzeugen darstellen. Sie helfen damit, die durch die EU vorgegebenen Lärmgrenzwerte in Agglomerationen einzuhalten. Lärmemissionen von Fahrzeugen stellen jedoch auch Warnsignale für andere Verkehrsteilnehmer dar. Entsprechend wird in der Forschung kontrovers diskutiert, ob künstliche Geräusche oder alternativ aktive Sicherheitssysteme notwendig sind, um die Orientierung insbesondere Älterer, Sehbehinderter oder Kinder im Straßenverkehr zu erhalten.

**3.3.1 Wirkungen des Verkehrslärms**

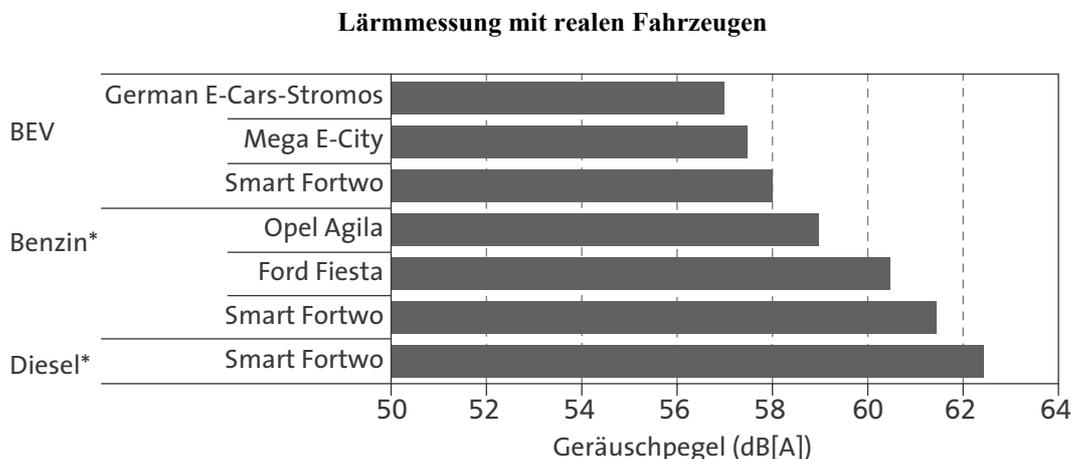
Nach Angaben der Europäischen Umweltagentur (EEA 2010b) leiden in der EU, der Schweiz und Norwegen etwa 42 Millionen Menschen unter nächtlichen Lärmbelastungen über 50 dB(A) in Agglomerationsräumen, sowie 23 Millionen außerhalb (EEA 2010b). In Deutsch-

land sind dies 2,8 Millionen in Agglomerationen und 1,5 Millionen außerhalb von Ballungsräumen. Die Grenzwerte nach der 16. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) betragen in Wohngebieten nachts 49 dB(A) und tagsüber 59 dB(A) (BMJ 2006).

Die Auswirkungen des Verkehrslärms reichen von subjektiv empfundenen Störungen des täglichen Lebens bis hin zu statistisch messbaren Einflüssen auf Herz-Kreislauf-Erkrankungen, das Lernverhalten von Kindern und Jugendlichen, Schlafstörungen sowie Beeinträchtigungen des Hörens (WHO/JRC 2011). Während subjektive Störungen bereits ab Schallpegeln um 55 dB(A) festgestellt werden können, treten medizinische Folgewirkungen ab einer Dauerexposition von etwa 70 dB(A) tagsüber auf. Die ökonomischen Kosten durch reduzierte Immobilienwerte und medizinische Folgekosten infolge des Verkehrslärms von Pkw werden von CE Delft et al. (2011) auf 8,2 Mrd. Euro geschätzt (Jahr 2008, EU sowie Schweiz und Norwegen). Nach CE Delft et al. (2011) entspricht dies zwar nur etwa 2 Prozent der gesamten externen Kosten des Verkehrs, das Problem konzentriert sich jedoch auf Agglomerationsräume und Nachtstunden, in welchen die Sensibilität gegenüber Lärm wesentlich höher ist als am Tag. Eine differenzierte Bewertung der Lärmwirkungen ergibt Grenzkosten je Fzkm, also die durch eine Fahrt unmittelbar verursachten sozialen Kosten in Abhängigkeit von der Dichte der umliegenden Wohnhäuser, zwischen 0,009 und 0,022 Euro tagsüber gegenüber 0,016 und 0,040 Euro nachts (CE Delft et al. 2011).

Straßenverkehrslärm entsteht im Wesentlichen durch die Faktoren Motor, Rollgeräusche und Aerodynamik. Bei geringen Geschwindigkeiten bis 30 km/h sowie beim Beschleunigen und Abbremsen von herkömmlichen Fahrzeugen überwiegen die Motorgeräusche, während zwischen 30 bis etwa 50 km/h die Rollgeräusche dominieren und bei höheren Geschwindigkeiten zusätzlich die Auswirkungen des Luftwiderstands hörbar werden. Einen Vergleich der Geräuschemissionen von Benzin-, Diesel- und Elektrofahrzeugen bei Geschwindigkeiten von 30 km/h liefert die in Abbildung III.29 dargestellte Messreihe von Dudenhöffer/Hause (2012).

Abbildung III.29



\* Fahrt im 2. Gang  
Quelle: Dudenhöffer/Hause 2012

Die obigen Ergebnisse werden durch Messungen im Rahmen der Modellregion Elektromobilität Bremen-Oldenburg bestätigt (IFAM/DFKI 2011). Jedoch weisen Dudenhöffer/Hause (2012) auch darauf hin, dass moderne Fahrzeuge durch Motorkapselung, Start-Stopp-Automatik und ähnliche Technologien in vielen Situationen auch nicht mehr akustisch wahrnehmbar sind (Ökonews.at 2011) und dass lärmreiche Straßen in der Regel Fahrgeschwindigkeiten über 50 km/h aufweisen, bei welchen Elektroautos nicht leiser sind als konventionelle Fahrzeuge (FfE 2010). Ferner ist zu vermuten, dass sich die Aufmerksamkeit aller Verkehrsteilnehmer gegenüber leisen Fahrzeugen steigern wird, je größer deren Anteil am Verkehrsaufkommen ist. Belege hierfür liegen jedoch zurzeit noch nicht vor.

Die physikalischen Eigenschaften des Schalls und die Sensitivität des menschlichen Gehörs bedingen, dass sich mehrere Schallquellen nicht linear zu einem Gesamtschallpegel addieren, sondern dieser nach einer logarithmischen Skala zu berechnen ist. Danach führt eine Verdoppelung der Schallquellen immer zu einem konstanten Wachstum der empfundenen Lautstärke um 3 dB(A). Für den Einsatz von Elektrofahrzeugen bedeutet dies, dass kleine Anteile an der Verkehrsmenge kaum einen Einfluss auf die Lärmbelastung durch den Straßenverkehr haben. Erst wenn eine überwiegende Menge der Straßenfahrzeuge ohne Verbrennungsmotor betrieben wird, wird der Unterschied messbar. Abbildung III.30 verdeutlicht die Charakteristik für einen fiktiven geraden Straßenabschnitt mit trockener Fahrbahn ohne Lkw in einem Abstand von 25 m zum Immissionsort. Die Formel zur Pegelermittlung wurde dabei aus der 16. Bundesimmissionsschutzverordnung, Anlage 1 (BMJ 2006), übernommen.

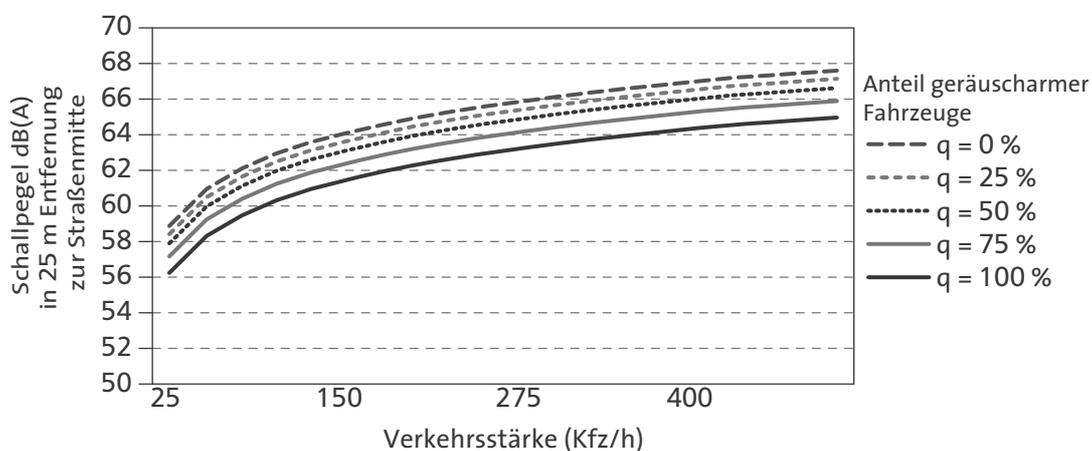
Der Abstand der Kurven zeigt, dass eine deutliche Reduktion der Lärmemissionen im Verkehrssektor bei einer

Geschwindigkeit von 40 km/h nur bei einem hohen Anteil von Elektrofahrzeugen am MIV erreicht werden kann. Nach dem im Kapitel II.2.7 aufgespannten Markthochlaufszenario beträgt der Bestand an BEV, PHEV und FCEV 2030 etwa 8 Millionen. Aber auch die Lärmemissionen konventioneller Fahrzeuge werden zukünftig weiter abnehmen. Die dargestellten Einflussfaktoren weisen darauf hin, dass die Lärmreduktion bei niedrigen Geschwindigkeiten für das einzelne Fahrzeug betrachtet zwar deutlich wahrnehmbar ist, die Gesamtwirkung auf die Lärmemissionen durch den Straßenverkehr aber bis 2030 sehr gering sein wird. Eine wichtige Ausnahme sind Situationen bei niedrigen Geschwindigkeiten in Verbindung mit geringen Verkehrsstärken, bei denen einzelne Geräuschevents deutlich wahrnehmbar sind. Dies trifft vor allem auf die lärmsensiblen Nachtstunden in Wohngebieten zu (Tab. III.12).

Lärm ist ein zeitlich und räumlich sehr begrenztes Phänomen, weshalb pauschale Betrachtungen zu möglichen Lärmpegelreduktionen den Kern des Problems nicht treffen. In einer differenzierten Betrachtungsweise sind Straßentypen, Tageszeiten und zugehörige Verkehrscharakteristika zu unterscheiden. In städtischen Räumen sind grundsätzlich dicht befahrene Hauptverkehrsstraßen mit höheren Fahrgeschwindigkeiten und einem höheren Anteil an Liefer- und Güterfahrzeugen von Anwohnerstraßen zu unterscheiden. Geschwindigkeiten und der Fahrzeugmix beeinflussen die Lärmreduktionswirkung von Elektrofahrzeugen entscheidend, indem bei Geschwindigkeiten über 40 km/h und bei hohem Güterverkehrsanteil der Einfluss alternativer Antriebssysteme auf die Geräuschentwicklung des Verkehrs vernachlässigbar wird. Tageszeiten sind insofern relevant, da sich sowohl der Aufenthaltsort von Menschen, ihre Sensibilität gegenüber störenden Geräuschen sowie die Belastung durch Hintergrundlärm deutlich unterscheiden. Entsprechend variiert

Abbildung III.30

### Schallpegel an Straßen in Abhängigkeit von Verkehrsstärke und Anteil geräuscharmer Fahrzeuge



Eigene Berechnungen

Tabelle III.12

## Typische Verkehrssituationen und deren Lärmreduktionspotenzial durch Elektrofahrzeuge

Straßentyp	Tageszeit, Verkehrsstärke*	Geschwindigkeit** km/h	Anteil Güterverkehr** %	Lärmgrenzwert*** dB(A)	Reduktionspotenzial
Hauptverkehrsstraße	Tag HVZ	40	> 20	59	+
	Tag NVZ	50	> 20	59	0
	Abend/Nacht	30	< 10	49	++
Anliegerstraße	Tag HVZ	30	10–20	59	+
	Tag NVZ	30	< 10	59	++
	Abend/Nacht	niedrig	< 5	49	+++

\* HVZ = Hauptverkehrszeit, NVZ = Nebenverkehrszeit

\*\* Annahmen zur Illustration der Verkehrssituation

\*\*\* entsprechend 16. BImSchV (BMJ 2006)

Eigene Berechnungen

ren die maximal zulässigen Lärmgrenzwerte, welche nach der 16. Bundesimmissionsschutzverordnung bei Neubau oder dem wesentlichen Umbau von Straßen in reinen oder allgemeinen Wohngebieten nicht überschritten werden dürfen, zwischen 49 dB(A) nachts und 59 dB(A) am Tag (BMJ 2006). Ein um 2 dB(A) geminderter Schallpegel gilt vor Schulen, Altersheimen oder Krankenhäusern. Unter anderem für die Belieferung in Wohn- und Mischgebieten während der Nachtstunden stellen die Grenzwerte der BImSchV eine Restriktion für den Wirtschaftsverkehr dar (Kap. III.2.1.2).

Tabelle III.12 zeigt typische Verkehrssituationen und die daraus abgeleiteten Potenziale für eine Lärmreduktion durch Elektrofahrzeuge. Da sich die Situationen lokal sehr unterscheiden können und die Berechnung der Lärmemission von Elektrofahrzeugen bei verschiedenen Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten nur ungefähr mög-

lich ist, wurde hier bewusst auf die Verwendung konkreter Zahlenwerte verzichtet.

Nach dieser Analyse liegt der wesentliche Vorteil von Elektrofahrzeugen in der Lärmreduktion in Wohngebieten, insbesondere in den sensiblen Abend- und Nachtstunden. Zu dieser Tageszeit kann die Lebensqualität in Innenstädten deutlich gesteigert werden. Ferner bieten sich neue Möglichkeiten im Wirtschaftsverkehr durch das Verlegen von Servicedienstleistungen in die Tagesrandzeiten, welche bisher auch aus Gründen des Lärmschutzes nur beschränkt möglich sind. Verglichen mit der breiten Palette alternativer Maßnahmen technischer, verkehrspolitischer und städtebaulicher Natur (UBA/EAUE 2008), stellt eine Erhöhung des Anteils an Elektrofahrzeugen vor allem im unteren Geschwindigkeitsbereich eine effektive Maßnahme zur Senkung des Lärm- ausstoßes des Straßenverkehrs dar (Tab. III.13).

Tabelle III.13

## Vergleich urbaner Maßnahmen zur Lärminderung des Straßenverkehrs in dB(A)

	Lärminderung bei 30 km/h	Lärminderung bei 50 km/h
Anteil Elektrofahrzeuge 20 %	1,0–2,0	0,2–0,5
Verstetigung Verkehrsfluss	1,0–2,0	2,0–3,0
Lkw-Anteil -5 %	1,4–1,8	0,8–1,2
Sanierung Fahrbahndecken	0,5–1,4	0,5–1,4
Verkehrsmenge -20 %	0,8–1,2	0,8–1,2
Abstand Straße/Fassaden + 3m	0,5–1,0	0,5–1,0
Geschwindigkeit -20 km/h		2,0–5,0

Eigene Berechnungen nach UBA/EAUE 2008

Mit Blick auf die kommenden Jahrzehnte ist zu konstatieren, dass auch konventionelle Fahrzeuge kontinuierlich leiser werden. Hiermit schwinden die Lärmvorteile der Elektrofahrzeuge teilweise; in den benannten sensiblen Tageszeiten und Stadtregionen werden sie jedoch weiter zum Tragen kommen.

### 3.3.2 Aspekte der Verkehrssicherheit

Personen mit physischen und kognitiven Einschränkungen, Kinder und Senioren sind im Straßenverkehr besonders verletzlich. Blinde und sehbehinderte Menschen nehmen die Geräusche im Straßenverkehr zur Orientierung, zur Information über Fußgängerüberwege oder als Warnsignale wahr. Dies ist insbesondere in städtischen Umgebungen mit niedrigen Pkw-Geschwindigkeiten der Fall. Ohne weitere Sicherheitsmaßnahmen würde eine weitgehende Elektrifizierung des Straßenverkehrs die Verkehrssicherheit dieser Personengruppe gefährden und damit deren Teilhabe an einem selbstbestimmten, mobilen Leben einschränken, wie in experimentellen Studien belegt wurde (Dudenhöffer/Hause 2011). Auf Grundlage einer Studie unter Beteiligung Betroffener fordert der Deutsche Blinden- und Sehbehindertenverband für Fahrzeuge unter 40 km/h der Fahrzeugbewegung zuordenbare und durch den Fahrer nichtdeaktivierbare Warngeräusche (DBSV 2011; Dudenhöffer/Hause 2012).

Statistiken über Verkehrsunfälle mit Menschen mit Behinderungen liegen nicht vor, weshalb im Folgenden Zahlen zur Unfallbeteiligung von Senioren, also Personen über 65 Jahren, betrachtet werden. Dies ist gerechtfertigt, da die Schwerbehindertenstatistiken des Statistischen Bundesamtes (Statistisches Bundesamt 2009a) einen deutlichen Zusammenhang zwischen Alter und verschiedenen Behinderungsgraden zeigen. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes starben im Jahr 2010 insgesamt 476 Fußgänger, von welchen 48 Prozent (227) über 65 Jahre alt waren (Tab. III.14). 2010 betrug der Anteil der Senioren 25 Prozent an allen Getöteten im Straßenverkehr sowie 23 Prozent an der Gesamtbevölkerung. Dieser Anteil wird sich nach der 12. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung bis 2060 auf 34 Prozent erhöhen (Statistisches Bundesamt 2009b), womit der Schutz

älterer und mobilitätseingeschränkter Menschen deutlich an Bedeutung gewinnen wird.

Verkehrsunfälle verursachen Leid und Trauer von Angehörigen und Freunden der Opfer, medizinische Behandlungs- und Nachsorgekosten im Gesundheitswesen, Produktionsausfälle und ggf. Neubesetzungen in der Wirtschaft sowie Einsatzkosten der Polizei und Rettungsdienste. Der statistische Wert eines menschlichen Lebens ist aus ethischen Gründen nicht unumstritten, für die Abwägung zwischen Nutzen und Kosten von Verkehrssicherheitsmaßnahmen ist eine solche Quantifizierung jedoch notwendig und findet u. a. in der Bundesverkehrswegeplanung (BVWP) (BMVBS 2005; Link et al. 2002) Anwendung. In der EU hat sich ein Mittelwert von etwa 1,7 Mio. Euro 2010 etabliert (CE Delft et al. 2011), während die BVWP einen Wert von etwa 1 Mio. Euro pro Todesfall verwendet. Pro 1 000 Fzkm schätzen CE Delft et al. (2011) die ungedeckten Unfallkosten auf 32,3 Euro, wovon 18 Prozent oder 5,97 Euro Unfällen zwischen Pkw und ungeschützten Verkehrsteilnehmern zugeordnet werden können. Nach Studien mit Hybridfahrzeugen aus den Niederlanden (PBL 2009) und den USA (NHTSA 2009) könnten sich diese Unfallkostenraten beim Einsatz von Elektrofahrzeugen etwa verdoppeln, wenn Elektro- und Hybridfahrzeuge flächendeckend zum Einsatz kommen sollten. Diese Aussagen basieren jedoch auf relativ kleinen Fallzahlen und berücksichtigen keinen Gewöhnungseffekt der Verkehrsteilnehmer bei einer weiteren Verbreitung von Elektro- wie auch leisen konventionellen Fahrzeugen, wie auch im folgenden Kapitel diskutiert wird.

### 3.3.3 Spannungsfeld Sicherheit und Lärmreduktion

Die obigen Kapitel haben gezeigt, dass durch einen steigenden Anteil geräuscharmer Fahrzeuge sinkende externe Kosten durch Lärmbelastung steigenden Unfallkosten gegenüberstehen können. Die in den kommenden Jahrzehnten möglichen Effekte sind jedoch entweder eher gering (wie bei der Lärmbelastung) oder sehr ungewiss (wie bei der Sicherheit ungeschützter Verkehrsteilnehmer).

Tabelle III.14

**Straßenverkehrsunfälle nach Verkehrsbeteiligung und Alter der Opfer 2010**

	<b>Fußgänger</b>	<b>Fahrrad</b>	<b>Motorzweirad</b>	<b>Pkw</b>	<b>Bus/Lkw</b>	<b>gesamt*</b>
Beteiligte (in 1.000)	32,145	71,103	43,898	354,919	46,508	548,573
davon > 65 Jahre	19 %	15 %	5 %	11 %	4 %	10 %
Getötete (in 1.000)	0,476	0,381	0,709	1,84	0,229	3,635
davon > 65 Jahre	48 %	52 %	8 %	21 %	14 %	23 %

\* alle Verkehrsmittel inkl. Eisenbahn und ÖPNV  
Eigene Zusammenstellung nach Statistisches Bundesamt 2011

Vor dem Hintergrund der aktuellen Informationslage erscheint eine Erhöhung der Verkehrssicherheit für sensorisch eingeschränkte Menschen auch jenseits der Debatte um Elektrofahrzeuge unbedingt angezeigt. Dies betrifft sowohl moderne leise Diesel- und Benzinfahrzeuge, als auch Elektrofahrzeuge und FCEV. Mit Blick auf die physischen und psychischen Folgewirkungen des Verkehrslärms ist die obligatorische Einführung künstlicher Geräusche bei leisen Motorfahrzeugen kritisch zu hinterfragen. Auch ist zu prüfen, ob die Geräuscharmut von Elektrofahrzeugen die Aufmerksamkeit der Fahrer für die Umgebung nicht positiv beeinflusst, sodass die verminderte akustische Warnwirkung der Motorgeräusche teilweise ausgeglichen wird. Zahlreiche Autoren empfehlen deshalb, die Entwicklung aktiver Warnsysteme in den Fahrzeugen sowie für die betroffenen Verkehrsteilnehmer zu entwickeln. Dies ist insbesondere geboten, da auch konventionelle Fahrzeuge immer leiser werden.

Wie diese Assistenzsysteme aussehen und auf welchen Standards und Technologien sie basieren sollen, ist jedoch noch weitgehend unklar. Positive Beispiele bieten nach DBSV (2011) die Sicherungssysteme der führerlosen U-Bahnen in Berlin und Nürnberg. Bis hierfür ein einheitlicher internationaler Standard gefunden ist und die notwendigen technologischen Entwicklungen abgeschlossen sind, kann eine temporäre Pflichteinführung von Warngeräuschen bei Elektro- und Hybridfahrzeugen durchaus sinnvoll sein. Diese sollten, wie bei herkömmlichen Verbrennungsmotoren, die Bewegungsdynamik der Fahrzeuge in Fahrtrichtung weitergeben, ohne dass die gesamte Umgebung des Fahrzeugs von störenden Geräuschen belästigt wird.

Insgesamt sind die Schlussfolgerungen über Sicherheitsprobleme leiser Fahrzeuge für Kinder, Senioren, sehbehinderte und blinde Menschen jedoch noch uneinheitlich. Zuverlässige statistische Daten zum tatsächlichen Unfallrisiko liegen noch nicht vor. Vor der Einführung gesetzlicher Regelungen sollten diese Wissenslücken durch weitere Forschungsarbeiten unbedingt geschlossen werden. Laufende Untersuchungen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) sowie der informellen Arbeitsgruppe zu „Quiet Road Transport Vehicles“ (QRTV) der UNECE (2011) arbeiten an einer Verbesserung von Datengrundlagen und Empfehlungen zu Warn- und Assistenzsystemen.

#### IV. Synthese

Ziel dieses Kapitels ist eine Synthese der Bewertung der Elektromobilität und ihrer potenziellen Entwicklungen aus einer Gesamtperspektive im Hinblick auf ihre gesamtgesellschaftliche Bedeutung, insbesondere in ökologischer, ökonomischer und sozialer Hinsicht. Darauf aufbauend werden Schlussfolgerungen für politische Handlungsoptionen im Kontext der Elektromobilität abgeleitet. In Kapitel IV.1 erfolgt dazu, auf Basis der bisherigen Kapitel, eine umfassende Diskussion der wesentlichen kritischen Aspekte und Potenziale der weiteren Entwicklung und zukünftigen Verbreitung der Elektromobilität. Kapitel IV.2 diskutiert unterschiedliche Fördermaßnahmen und deren Ausgestaltung. In Kapitel IV.3

werden konkrete Schlussfolgerungen und Handlungsoptionen für die weitere Entwicklung und Förderung der Elektromobilität in Deutschland abgeleitet und abschließend diskutiert.

Wie in Kapitel I eingeführt, werden im Rahmen dieses Berichts mit dem Begriff Elektrofahrzeuge vierrädrige Fahrzeuge bezeichnet, die über eine Batterie verfügen, welche extern über einen Anschluss an das Stromnetz geladen werden kann. Unter diese Definition fallen reine Batteriefahrzeuge (BEV) und Hybridfahrzeuge mit Netzanschluss, d. h. Plug-in-Hybride (PHEV), welche über eine externe Lademöglichkeit und Kombinationen aus Elektro- und Verbrennungsmotor verfügen. Wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) werden in diesem Bericht nicht als Elektrofahrzeuge betrachtet, werden jedoch bei ausgewählten Fragestellungen zum Vergleich mit einbezogen, um zu prüfen, inwiefern sie langfristig eine Alternative bzw. Konkurrenz zu Elektrofahrzeugen darstellen können.

#### 1. Kritische Aspekte und Potenziale der Elektromobilität

Elektromobilität – als motorisierter Individualverkehr – ist kein neues Phänomen. Bereits in den 1990er Jahren wurden in Deutschland Flottenversuche mit batteriebetriebenen Pkw durchgeführt, ohne dass es jedoch zu einer breiten Markteinführung gekommen ist. Aufgrund veränderter Rahmenbedingungen, verbesserter Technologien und erster Anzeichen für einen Wandel von Fahrzeug- und Mobilitätskonzepten wird in den kommenden Jahren mit einer Verbreitung der Elektromobilität in den Märkten für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge gerechnet. Zentrale Änderungen der Rahmenbedingungen für die Elektromobilität betreffen:

- Klimaschutz ist ein zentrales politisches und mediales Thema geworden und die Einführung der Elektromobilität gilt als wesentliche Maßnahme für die Reduktion von Treibhausgasen (THG) des Verkehrs – unter der Voraussetzung, dass zunehmend erneuerbare Energien genutzt werden.
- Mittel- und langfristig ist mit weiter steigenden Preisen fossiler Kraftstoffe zu rechnen, insbesondere durch einen Anstieg der weltweiten Verkehrsleistungen und einer zunehmenden Knappheit fossiler Energieträger.
- Der von der Politik mit der Energiewende beschlossene beschleunigte Umbau des Energiesystems hin zu fluktuierenden erneuerbaren Energien weist Elektrofahrzeugen eine wichtige Rolle bei der Lastverlagerung zu – und unter Umständen langfristig auch bei der Energiespeicherung.
- Die Entwicklung wesentlicher Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität schreitet voran, d. h. wesentliche Schlüsselkomponenten (Batterie, Leistungselektronik, Leichtbaumaterialien etc.) werden besser (Kap. II.1).

- Länder wie Japan, China, Südkorea und die USA bemühen sich, eine führende Position beim Aufbau einer Elektrofahrzeugindustrie zu erreichen (Kap. II.5).
- Viele führende Automobilhersteller haben sich mit der Ankündigung von konkreten Fahrzeugmodellen als zukünftige Anbieter im Bereich der Elektromobilität positioniert bzw. haben schon Fahrzeuge auf den Markt gebracht (Kap. III.2.3).
- Derzeit wächst das Angebot an multimodalen Mobilitätskonzepten, welche mithilfe heutiger Informations- und Kommunikationstechnologien eine komfortable, flexible und kostengünstige Nutzung von öffentlichem Personennahverkehr (ÖPNV) und Sharingkonzepten je nach Bedürfnissen ermöglichen und die Elektromobilität dabei sinnvoll integrieren (Kap. II.3.3).
- Gleichzeitig gibt es Anzeichen, dass zusammen mit den beschriebenen Veränderungen auf der Angebotsseite das Nachfrage- und Mobilitätsverhalten der Verkehrsteilnehmer, insbesondere in Großstädten, flexibler und multimodaler wird. Ein gewisser Trend hin zum „Nutzen statt besitzen“ und ein Interesse an neuen, integrierten Mobilitätskonzepten lässt sich feststellen (Kap. II.3.1 u. III.3.2).

Diese Veränderungen stellen wichtige Treiber bzw. Ausgangsbedingungen für eine zukünftige Verbreitung der Elektromobilität dar. Mit Elektrofahrzeugen werden dementsprechend über viele gesellschaftliche Gruppen hinweg große Hoffnungen verbunden, die Abhängigkeit Deutschlands von Ölimporten sowie den Verbrauch fossiler Ressourcen zu reduzieren und Emissionen von THG, Luftschadstoffen und Lärm sowohl global als auch lokal zu vermeiden. Auch in volkswirtschaftlicher Hinsicht weckt das Thema Elektromobilität große Hoffnungen. Deutschland hat sich das Ziel gesetzt, im internationalen Wettbewerb zum Leitanbieter und Leitmarkt für Elektromobilität zu werden, um so die starke deutsche Stellung im Automobilbau sowie die damit verbundenen Arbeitsplätze, heimische Wertschöpfung und Exportchancen auch zukünftig zu sichern (Kap. II.5.2).

Eine sowohl aus ökologischer, ökonomischer und sozialer Sicht nachhaltige Verbreitung der Elektromobilität wird jedoch kein Selbstläufer sein. Dies belegt auch der Anfang 2012 noch schleppende Verkauf von Elektrofahrzeugen (Kap. II.2.1). In aktuellen Studien entworfene Szenarien für die zukünftig mögliche Verbreitung von Elektrofahrzeugen zeigen eine große Bandbreite möglicher Entwicklungen und z. T. ein skeptisches Bild (Kap. II.2.2 u. II.2.4). Beim Vergleich von Szenarien, die eine erfolgreiche Verbreitung von Elektrofahrzeugen postulieren mit jenen, in denen eine Marktdurchdringung ausbleibt, zeigt sich – neben der Bedeutung äußerer Einflussfaktoren (z. B. des Rohölpreises), welche nur bedingt beeinflussbar sind – die zentrale Rolle sowohl weiterer technologischer Fortschritte als auch umfassender und abgestimmter politischer Maßnahmen.

Entscheidungen über entsprechende Politikmaßnahmen müssen gestützt werden durch eine ganzheitliche Betrachtung einer Verbreitung der Elektromobilität basie-

rend auf einer Bewertung ihrer ökologischen, ökonomischen und sozialen Effekte. Mögliche Potenziale der Elektromobilität können aber nur dann realisiert werden, wenn die Akzeptanz für entsprechende Konzepte aufseiten relevanter Zielgruppen gegeben ist. Daher ist bei einer Förderung nicht zuletzt die Akzeptanz in aussichtsreichen und tragfähigen Erstmärkten und Zielgruppen zu berücksichtigen bzw. zu fördern.

Als Grundlage für die ganzheitliche Bewertung der Elektromobilität (Kap. III) wurden ein Marktpenetrationsszenario (Kap. II.2.7) und ein Energieszenario (Kap. II.4) für Deutschland abgeleitet, welche auf den aktuellen politischen Zielsetzungen für eine Verbreitung der Elektromobilität sowie für die künftige Entwicklung der Energieversorgung aufbauen. Für Analysen, für welche die zukünftige weltweite Nachfrage bzw. Verbreitung von Elektrofahrzeugen relevant ist, wurden zudem weltweite Marktpenetrationsszenarien herangezogen, welche mit den Annahmen des deutschlandweiten Szenarios möglichst konsistent gehalten wurden (Kap. III.2.2, III.2.4 u. III.2.5). Im Folgenden werden die kritischen Aspekte und Potenziale der Elektromobilität aus einer Gesamtsicht diskutiert.

### 1.1 Technologische Herausforderungen und Fahrzeugkonzepte

Für eine erfolgreiche, umfassende Markteinführung und -verbreitung von Elektrofahrzeugen sind eine Reihe technischer Herausforderungen zu lösen. Dies wird in Kapitel I (sowie u. a. auch im Rahmen der „Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität“ [FSEM] von Wietschel et al. [2011]) aufgezeigt. Dabei ist die Batterie als Schlüsseltechnologie zu bezeichnen. Durch die zurzeit noch hohen spezifischen Batteriekosten entfällt auf das Batteriesystem ein großer Anteil der Fahrzeugkosten (Kap. III.2.1). Außerdem limitieren die Energiedichten, welche mit aktuell zur Verfügung stehenden Batterietechnologien erreichbar sind, die Reichweiten von Elektrofahrzeugen signifikant (Kap. II.1.1.1).

Die Lithium-Ionen-Batterie ist heute wegen ihrer hohen Energiedichte im Vergleich zu anderen verfügbaren Batteriesystemen die Technologie der Wahl für Elektrofahrzeuge (Kap. II.1.1.1). Um aber eine breite Markteinführung zu ermöglichen, ist eine Kostensenkung auf unter 300 Euro/kWh notwendig (Kap. III.2.1.1). Zusätzlich muss die kalendarische Lebensdauer von 7 auf 10 Jahre erhöht, müssen die gravimetrische sowie volumetrische Energiedichte weiter optimiert sowie Leistungsparameter und Sicherheit verbessert werden (Kap. II.1.1.1). Die Energiedichte dürfte durch intensive FuE in vielen Ländern in den nächsten Jahren kontinuierlich ansteigen. Bei heutigen und künftigen lithiumbasierten Batterietechnologien werden verschiedene Generationen unterschieden. Während aktuell und in naher Zukunft Fahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterien der 2. Generation auf den Markt kommen, wird für den Markthochlauf der Elektromobilität erwartet, dass verschiedene Konfigurationen von Lithium-Ionen-Batterien der 2. bis 3. Generation zum Einsatz kommen. Die Entwicklung kommender Batterie-

generationen (z. B. Lithium-Schwefel-, Lithium-Luft- oder Metall-Luft-Batterien der 4. Generation) ist für eine langfristig hohe Marktdurchdringung eine wesentliche Herausforderung. Während die Reichweiten konventioneller Pkw mit einer Optimierung der heutigen Generation Lithium-Ionen-Batterien aufgrund physikalisch-chemischer Grenzen bei Weitem nicht erreichbar sind, könnte mit Batterietypen der 4. Generation die Energiedichte so weit gesteigert werden, dass die Reichweiten heutiger konventioneller Fahrzeuge sogar übertroffen werden könnten. Allerdings befinden sich entsprechende Konzepte noch im Bereich der Grundlagenforschung. Mit der Markteinführung solcher Batterien der 4. Generation rechnen Experten größtenteils erst deutlich später als 2020.

Weitere notwendige technische Verbesserungen betreffen die Optimierung der Elektromotoren (Kap. II.1.3) sowie die Verbesserung der On-board-Leistungselektronik (Kap. II.1.2). Die Entwicklung von Ladesystemen, die höhere Ladungsgeschwindigkeiten erlauben, kann zudem dazu beitragen, dass das Hemmnis der limitierten Reichweite von Elektrofahrzeugen weniger ins Gewicht fällt (Kap. II.1.4 u. III.3.1.2).

Die Eigenschaften der heute kommerziell verfügbaren Batterien führen dazu, dass BEV in den nächsten Jahren nur die Mobilitätsbedürfnisse bestimmter Marktsegmente befriedigen können (Kap. III.2.1). Deshalb stehen zurzeit verstärkt PHEV im Fokus. Diese verbinden die Möglichkeit, rein elektrisch zu fahren und die Fahrzeugbatterie extern aufzuladen, mit der Option, auch längere Distanzen mit Unterstützung eines Verbrennungsmotors zurückzulegen (sei es als Aggregat für den direkten Antrieb oder zur Erzeugung elektrischer Energie) (Kap. II.1). Dadurch können sie den Einsatzbereich konventioneller Pkw fast vollständig abdecken. PHEV kommen mit kleineren Batterien aus als BEV und weisen damit geringere Batteriekosten auf (Kap. III.2.1). Dieser Kostenvorteil wird zumindest teilweise aufgehoben durch die Notwendigkeit, zwei Antriebstechnologien zu integrieren (Kap. II.1). FCEV ermöglichen es, elektrische Energie auch ohne Einbau eines zusätzlichen Verbrennungsmotors für größere Distanzen nutzbar zu machen (Kap. II.1 u. III.2.1.3). Die Markteinführung von FCEV erfordert jedoch eine Bereitstellung der Wasserstoffbetankungsinfrastruktur sowie eine deutliche Reduktion der Kosten für Brennstoffzellen und Wasserstofftanks (Kap. II.1.5 u. III.2.1.3).

## 1.2 Volkswirtschaftliche Potenziale

Die deutsche Automobilindustrie nimmt derzeit sowohl wirtschaftlich als auch technologisch eine weltweite Spitzenposition ein (Kap. II.5). Die absehbare Verbreitung der Elektromobilität könnte diese Spitzenposition zumindest mittelfristig in Gefahr bringen (Kap. III.2.2). Aufgrund der erwarteten weltweiten Marktdurchdringung mit Elektromobilen, insbesondere ab 2020, ist damit zu rechnen, dass sich die Wachstumsraten für den Absatz konventionell betriebener Fahrzeuge verringern.

Während für konventionelle Automobilkomponenten (Verbrennungsmotor, Starter und Lichtmaschine, Abgas-

anlage, Kraftstofftank, Getriebe) trotz wachsender Gesamtmärkte bis 2030 allenfalls leicht steigende Wertschöpfungspotenziale zu erwarten sind, versprechen elektromobilitätsrelevante Komponenten, insbesondere Batterie, Leistungselektronik und Elektromotor, deutlich mehr Potenzial (Kap. III.2.2). Die prognostizierte Wachstumsschwäche konventioneller Komponenten ist kritisch für die deutsche Automobilindustrie zu sehen, die traditionell stark und technologisch führend im Bereich der Verbrennungsmotoren ist, wie die Patentanalysen (Kap. II.5.1) unterstreichen. Der Produktivitätsfortschritt in diesen etablierten Technologien sowie ein verschärfter Kostendruck durch Wettbewerber aus den heutigen Schwellenländern könnten dazu führen, dass Umsatz und Beschäftigung in Deutschland, welche durch konventionelle Technologien generiert werden, zurückgehen (Kap. III.2.2 u. III.2.4).

Die Batterieherstellung wird zukünftig voraussichtlich einen der wachstumsstärksten Bereiche darstellen (Kap. III.2.2.3). Dabei erfolgt der Großteil der Wertschöpfung im Rahmen der Produktion von Batteriezellen (im Jahr 2010 zwei Drittel), die Produktion von Batteriesystemen hat einen deutlich kleineren Anteil inne (im Jahr 2010 ein Drittel). Bis 2030 wird der Anteil der Batteriezellproduktion an der Wertschöpfung voraussichtlich noch weiter steigen (auf rund 80 Prozent).

Während die deutsche Industrie bei der Systemherstellung beachtliche Kompetenzen aufweisen kann, nimmt sie im Bereich der Herstellung von Lithium-Ionen-Batteriezellen derzeit allenfalls eine Mittelfeldposition im internationalen Vergleich ein (Kap. II.5.1 u. III.2.2.3). Bedeutende Kapazitäten zur Batteriezellentwicklung und -fertigung sind dagegen bei etablierten Herstellern angesiedelt, die vornehmlich aus dem asiatischen Raum, insbesondere aus Japan, Südkorea und China stammen. Offen ist, ob bzw. wann dieser Vorsprung aufgeholt werden kann. Da Deutschland aktuell kaum für die Batteriezellproduktion spezifische Kompetenzen auf wissenschaftlicher und industrieller Seite aufweist, müssten diese von Grund auf mit hohem Kapitaleinsatz aufgebaut werden. Mittel- bis langfristig besteht für Deutschland durchaus die Chance, den Markt für Batteriezellen zu erschließen. Bei der Produktion des Batteriesystems (Modulproduktion und Packzusammenstellung mit Regelungselektronik und Mechanik) kann Deutschland evtl. auch schon kurzfristig relevante Marktanteile gewinnen (Kap. III.2.2.3).

Für andere elektromobilitätsrelevante Komponenten zeigen die Analysen internationaler Technologieaktivitäten (Kap. II.5.1), dass die deutsche Industrie durchaus über ausgewiesene Stärken im Bereich der Elektromobilität verfügt. Sowohl die qualitative Analyse der Aktivitäten als auch die Patentanalysen verdeutlichen die derzeitige Leistungsfähigkeit und die Innovationspotenziale in den Bereichen Leistungselektronik und Elektromotor.

Im Bereich der Leistungselektronik ist Deutschland neben Japan weltweit führend (Kap. II.5.1). Dieses Zukunftsfeld ist sowohl bedeutsam für den Automobilbau, aber auch für andere Zukunftstechnologien wie Effizienz- und erneuerbare Technologien sowie für die Steuerung

der Stromnetze. Die deutsche Position in diesem Gebiet sollte unbedingt gesichert werden, zumal dies eine Kernkompetenz, insbesondere bei hybriden Antriebstechnologien wie PHEV darstellt, die die deutsche Automobilindustrie nutzen sollte. In den nächsten Jahren werden PHEV gemäß vielen aktuellen Studien – so auch in dem für diesen Bericht festgelegten Marktpenetrationsszenario – größere Marktanteile eingeräumt als BEV und FCEV (Kap. II.2). Es muss allerdings bedacht werden, dass PHEV aufgrund ihrer größeren Komplexität langfristig, d. h. nach 2030, einen Kostennachteil sowohl gegenüber BEV als auch gegenüber FCEV aufweisen könnten, vor allem wenn die Kosten für Batterien bzw. Brennstoffzellen im Fall hoher Marktdurchdringung bis 2030 deutlich sinken. Für die deutsche Industrie gilt es, sich darauf entsprechend einzustellen.

Bei der Produktion von Elektromotoren für nichtautomobile Anwendungen ist Deutschland wettbewerbsfähig und verfügt über eine gute Ausgangsposition (Kap. II.5.1). Ein erfolgreicher Transfer dieser Fähigkeiten auf Elektromotoren für den automobilen Antrieb erscheint durchaus möglich und erfolversprechend. Bemühungen in diese Richtung werden bereits von einigen Systemlieferanten, spezialisierten Technologielieferanten und Automobilherstellern verfolgt (Kap. III.2.2.3).

Die Wertschöpfung im Automobilbereich wird auch mit zunehmender Verbreitung von Elektrofahrzeugen durch eine hohe Arbeitsteilung über verschiedene Zuliefererebenen hinweg und eine Spezialisierung insbesondere auf tieferen Ebenen gekennzeichnet sein (Kap. III.2.2). Bisher scheinen vor allem die Automobilhersteller und die großen Systemlieferanten die Veränderungen zu antizipieren und durch angepasste Ausrichtung der FuE-Aktivitäten sowie durch Eingehen neuer Partnerschaften zu reagieren. Auf tieferen Ebenen der Zulieferpyramide ist das Aktivitätsniveau bis dato noch sehr wenig ausgeprägt. Insbesondere diese technologisch meist eng fokussierten Zulieferbetriebe müssen vermutlich mittelfristig ihr Technologie- und Produktportfolio grundlegend überarbeiten, wenn sie auch zukünftig am Marktwachstum partizipieren wollen. Diese Unternehmen sind häufig von kleiner oder mittlerer Größe, sodass sie ein solcher Wandel vor enorme Herausforderungen stellt.

Für Automobilhersteller sind verschiedene Strategien einer Positionierung im Zukunftsmarkt Elektromobilität möglich, die sich in ihrem Fokus auf spezifische Fahrzeugkonzepte der Elektromobilität und im anvisierten Zeitpunkt des Markteintritts („first mover“, „fast follower“, „second mover“) unterscheiden (Kap. III.2.3). Dabei scheinen die deutschen Hersteller eine eher abwartende Position bezogen zu haben und gehören nicht zu den „first mover“. Dennoch ist zu erwarten, dass sie beim Markthochlauf bis 2020 auch aus einer Second-Mover-Position heraus mit größeren Marktanteilen beteiligt sein werden.

Die gesamtwirtschaftliche Analyse ergibt, dass der Markthochlauf der Elektromobilität bis 2020 noch nicht zu einem nennenswerten Strukturwandel, d. h. einer Verschiebung der Wertschöpfung zwischen den untersuchten

Wirtschaftssektoren führen wird (Kap. III.2.4). BIP und Beschäftigung werden leicht um 0,2 Prozent gesteigert gegenüber dem Referenzszenario ohne Elektromobilität. Bei der Beschäftigung profitieren zu diesem Zeitpunkt vor allem Investitionsgütersektoren, die zur Entwicklung und zum Aufbau der Elektromobilität beitragen, z. B. der Chemiesektor mit 2 000 Personen, der Maschinenbau mit 4 900 Personen, der Fahrzeugbau mit 4 300 Personen und der Dienstleistungssektor inklusive der Forschungsdienstleistungen mit gut 20 000 Personen. Im Wesentlichen sind dies Effekte, welche durch die zusätzlichen Investitionen zur Entwicklung und zum Aufbau der Produktion von Elektrofahrzeugen eintreten.

Dieser Anfangsimpuls und die zunehmende Einsparung der Haushalte an Ausgaben für Kraftstoffe, welche dann zum Konsum in anderen Sektoren ausgegeben werden können, lösen nach 2020 und bis 2030 sich verstärkende Effekte aus (Kap. III.2.4). Von diesen Zweitrundeneffekten profitieren vor allem die Konsumgüterindustrie und der Dienstleistungssektor, da diese von einem erhöhten Einkommen der Haushalte und dadurch steigenden Konsumausgaben profitieren. Bis 2030 steigt so das BIP um 0,8 Prozent (24,2 Mrd. Euro gemessen an realen Preisen von 2005) und die Beschäftigung wächst um 230 000 Personen. Mehr als die Hälfte dieser zusätzlichen Beschäftigung entfällt auf die sonstigen Dienstleistungen mit 120 000 Personen, 40 000 Personen auf Handel und Gaststätten. Im Fahrzeugbau führt der zunehmende Absatz von Elektrofahrzeugen mit einem etwas höheren Anschaffungspreis als der im Referenzszenario enthaltenen konventionellen Pkw zu 17 600 mehr beschäftigten Personen. Die Erlangung eines Leitmarktvorteils kann die ökonomischen Indikatoren noch moderat verbessern. Gesamtwirtschaftlich führt die Einführung der Elektromobilität also nicht zu Mehrkosten, sondern es ist ein leicht positiver Effekt auf BIP und Beschäftigung zu konstatieren.

Der gewählte makroökonomische Ansatz erlaubt aber keine Abschätzung der Beschäftigungswirkungen auf verschiedenen Stufen der Zuliefererpyramide, da zwar eine sektorale Differenzierung vorgenommen wurde, aber keine Differenzierung in die unterschiedlichen Firmentypen eines Sektors, z. B. Systemzulieferer im Bereich Elektronik versus Komponentenanbieter eines Elektronikbauteils (Kap. III.2.4).

### 1.3 Ökologische Auswirkungen

Bei der Bewertung der ökologischen Auswirkungen von Elektrofahrzeugen ist zwischen lokalen Luftschadstoffen und Treibhausgasen (THG) zu unterscheiden (Kap. III.1.1.1). Lokale Luftschadstoffe wirken eher kurzfristig und lokal. Sie können auch an konventionellen Fahrzeugen durch technische Maßnahmen oft recht gut gemindert werden. Treibhausgase (THG) hingegen wirken langfristig und global und sind technisch nur unter erheblichem Aufwand zu reduzieren. Eine zentrale Eigenschaft von Elektrofahrzeugen ist, dass sie im lokalen Betrieb quasi emissionsfrei sind. Aber auch andere Lebenszyklusabschnitte als die Fahrzeugnutzung verursa-

chen Emissionen und sind zu berücksichtigen, wenn die ökologischen Auswirkungen von Elektrofahrzeugen mit jenen konventioneller Fahrzeuge verglichen werden. Somit ist eine Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus von eminenter Wichtigkeit. Dieser umfasst die Fahrzeugherstellung (inkl. die Gewinnung und Verarbeitung der benötigten Rohstoffe), die Bereitstellung der Energie für den Fahrzeugbetrieb, den Fahrzeugbetrieb an sich sowie Wartung und Entsorgung der Fahrzeuge (Kap. III.1.1.2).

Im Rahmen dieses Berichts wurden für eine umfassende Lebenszyklusanalyse die wichtigsten aktuellen Studien sowie das in Auftrag gegebene Gutachten (Bünger/Weindorf 2011) herangezogen. Die betrachteten Analysen unterstreichen einhellig die Wichtigkeit des Konzepts des „ökologischen Rucksacks“ für den Vergleich der ökologischen Auswirkungen von Elektrofahrzeugen mit denen konventioneller Fahrzeuge. Der Begriff „ökologischer Rucksack“ bezeichnet die Emissionen aus der Fahrzeugherstellung und -entsorgung, welche auch ohne den Betrieb des Fahrzeugs entstehen. Verglichen mit konventionellen Fahrzeugen verursacht die Herstellung von Elektrofahrzeugen durchgehend höhere Umweltbelastungen. Um eine Reduktion der ökologischen Auswirkungen durch Elektrofahrzeuge zu erreichen, müssen diese erhöhten Umweltbelastungen im Betrieb durch niedrigere Belastungen durch variable Emissionen ausgeglichen werden. Dieser Zusammenhang spielt im Bereich der lokalen Luftschadstoffe (Kap. III.1.2) eine bedeutendere Rolle als bei den THG-Emissionen (Kap. III.1.3).

### Lokale Luftschadstoffe

Mit Ausnahme der Partikelfreisetzung durch Brems- und Reifenabrieb führt der Betrieb von Elektrofahrzeugen im Gegensatz zu konventionellen Fahrzeugen zu keinen lokalen Luftschadstoffemissionen wie  $\text{NO}_x$ , VOC,  $\text{SO}_x$  und Rußpartikeln. Diese fallen, je nach eingesetzter Energiequelle, nur am Ort der Stromerzeugung an. Elektrofahrzeuge bieten im Hinblick auf die durch den direkten Betrieb verursachten Emissionen unbestreitbare Vorteile gegenüber konventionellen Pkw. Diese Vorteile werden jedoch relativiert, da auch für konventionelle Pkw die Bedeutung von Luftschadstoffen aus dem Fahrzeugbetrieb durch weiter verschärfte Abgasnormen zukünftig weiter deutlich abnehmen wird (Kap. III.1.2.2).

Ein anderes Bild entsteht, betrachtet man im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse nicht nur den direkten Betrieb von Elektrofahrzeugen, sondern auch die Fahrzeugherstellung und die Bereitstellung der Energie. Hier zeigt sich die hohe Relevanz des ökologischen Rucksacks: In der Bewertung von vier betrachteten Wirkungskategorien (Feinstaub, Sommersmog, Eutrophierung und Versauerung) zeigt sich in den Kategorien Feinstaub und Versauerung ein ökologischer Rucksack, welcher durch den Betrieb nicht oder kaum abgebaut werden kann (Kap. III.1.2.2, Abb. III.2). Die gleiche Aussage gilt für die Wirkungskategorie Sommersmog, wenn man Elektrofahrzeuge mit Dieselfahrzeugen vergleicht. Benzinbetriebene Pkw sind in dieser Beziehung deutlich am umweltschädlichsten. Nur in der Kategorie Eutrophierung kann

der ökologische Rucksack von Elektrofahrzeugen, insbesondere bei Verwendung erneuerbarer Energie, im Betrieb ausgeglichen werden, sodass Elektrofahrzeugen auch im Sinne einer ganzheitlichen Lebenszyklusanalyse Vorteile zugeschrieben werden können. Die Verwendung erneuerbarer elektrischer Energie, im Gegensatz zum aktuellen deutschen Strommix, verbessert generell die Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. Dieser Effekt ist jedoch für Luftschadstoffe gegenüber dem Effekt des ökologischen Rucksacks zweitrangig (Kap. III.1.2.2). Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse zeigen, dass die Batterie bzw. der Abbau der für die Batterie benötigten Rohstoffe eine dominante Rolle spielen. Daher hat das jeweils gewählte Fahrzeugkonzept (Fahrzeuggröße, BEV oder PHEV) wegen der unterschiedlichen Dimensionierung der Komponenten, insbesondere der Batterie, einen entscheidenden Einfluss auf die Umweltwirkungen.

Zu beachten ist, dass die in der Lebenszyklusanalyse durchgeführten Betrachtungen nicht auf Deutschland beschränkt, sondern global sind. Neben lokalen Schadstoffemissionen in Deutschland werden daher auch Umweltwirkungen durch den Abbau von Rohstoffen in den jeweiligen Herkunftsländern sowie durch die überwiegend globale Produktion der Fahrzeuge berücksichtigt. Bezogen auf die Umweltbelastungen durch Schadstoffe in Deutschland fällt die Bilanz von Elektrofahrzeugen jedoch günstiger aus als die konventioneller Pkw.

Im Vergleich zu konventionellen Pkw, bei welchen mit einer weiteren Absenkung der Schadstoffemission bei Verbrennungsmotoren durch zunehmend strengere Abgasnormen und verbesserte Technologien zu rechnen ist, kann von einer Verringerung der Umweltbelastung durch den Abbau von Lithium, Neodym und anderen kritischen Rohstoffen in den jeweiligen Ländern nicht ohne Weiteres ausgegangen werden. Aufgrund des bedeutenden Einflusses der globalen Luftschadstoffbelastungen auf die Umweltbilanz der Elektrofahrzeuge sind einerseits eine nachhaltige, d. h. auf sozialen und ökologischen Ausgleich bedachte Rohstoffpolitik der Industriestaaten wie auch möglichst hohe Recyclingquoten zu empfehlen.

### Treibhausgasemissionen

Wie bei lokalen Luftschadstoffen sind auch bei THG-Emissionen der ökologische Rucksack sowie die für den Fahrzeugbetrieb genutzte elektrische Energie (ausschließlich erneuerbare Energie vs. deutscher Strommix) zu betrachten. Zuerst zeigt sich durch eine Well-to-Wheel-Analyse (WTW-Analyse) der spezifischen  $\text{CO}_2$ -Emissionen von verschiedenen Fahrzeugkonzepten und einer mittel- und langfristigen Betrachtung, dass die Herkunft der verwendeten Energie eine entscheidende Rolle für die spezifischen  $\text{CO}_2$ -Emissionen spielt. Es wurden der deutsche Strommix in den Jahren 2015 und 2030 gemäß dem Energiekonzept der Bundesregierung (BMWi/BMU 2010) mit dem ausschließlichen Einsatz zusätzlich installierter Kapazitäten erneuerbarer Energien verglichen. Diese WTW-Analysen belegen, dass im Vergleich zu konventionellen Pkw bereits 2015 für BEV und PHEV auch bei Verwendung des deutschen Strommix positive

Auswirkungen auf die THG-Emissionen entstehen. Das maximale Potenzial der Umweltvorteile wird mit dem Einsatz von rein erneuerbarer Energie ausgeschöpft.

Die erwähnten Analysen setzen eine gelungene Umsetzung der Energiewende voraus, mit einem entsprechend klimafreundlicher werdenden Strommix. Dies wirkt sich direkt auf die Umweltvorteile von Elektrofahrzeugen aus. Davon profitieren alle Elektrofahrzeuge auf der Straße unabhängig von ihrem Anschaffungsjahr gleichermaßen. Somit weist ein bereits heute zugelassenes Elektrofahrzeug mit durchschnittlichen jährlichen Fahrleistungen über seine gesamte Lebensdauer eine bessere THG-Bilanz bei der Nutzung auf als ein konventioneller Pkw.

Wie bei der Analyse der lokalen Luftschadstoffe wurde auch für THG-Emissionen der Einfluss der Fahrzeugherstellung und Entsorgung untersucht, um den ökologischen Rucksack von Elektrofahrzeugen im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse bewerten zu können (Kap. III.1.3.3). Die Untersuchungen verdeutlichen, dass dieser ökologische Rucksack gegenüber konventionellen Pkw jedoch nicht die Bedeutung wie im Bereich der lokalen Luftschadstoffe annimmt (Kap. III.1.3.4). Eine Berechnung der Jahresfahrleistung, bei welcher der ökologische Rucksack an THG-Emissionen durch die Einsparungen im Betrieb genau ausgeglichen wird, zeigte, dass Elektrofahrzeuge (BEV und PHEV) bei Nutzung ausschließlich erneuerbarer Energien ihren ökologischen Rucksack an THG-Emissionen bereits bei sehr geringen Jahresfahrleistungen ausgleichen und eine positive THG-Bilanz erreichen können. Im Referenzjahr 2030 gelingt dies sogar mit dem deutschen Strommix. Der Vergleich der wichtigsten aktuellen Studien im Bereich der Lebenszyklusanalysen von THG-Emissionen zeigt allerdings eine hohe Bandbreite der Resultate und veranschaulicht die Sensitivität der ökologischen Bewertung bezüglich der getroffenen Annahmen. Hauptsächliche Einflussfaktoren stellen insbesondere die Entwicklung der technologischen Komponenten (Batterielebensdauer, Energiedichte) wie auch die Entwicklung des Energiesystems dar.

In einer weiter gehenden Analyse wurde untersucht, welche Auswirkung eine Verbreitung der Elektromobilität in Deutschland auf die gesamten THG-Emissionen hat (Kap. III.1.3.2). Diesen Gesamtszenarien der THG-Emissionen lag das Marktpenetrationsszenario zugrunde (Kap. II.2.7), welches eine Marktpenetration entlang der politischen Ziele der Bundesregierung annimmt. Unterschieden wird wiederum zwischen der Verwendung des deutschen Strommix auf der einen Seite und erneuerbarer elektrischer Energie auf der anderen Seite. Dabei ist auch bei der Entwicklung des deutschen Strommix ein verstärkter Einsatz von erneuerbaren Energien berücksichtigt (Kap. II.4). Demgemäß lassen sich im Jahr 2020 0,8 Mio. t und im Jahr 2030 5,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. aus der Kraftstoff- bzw. Strombereitstellung und dem Fahrzeugbetrieb einsparen. Bei einer ausschließlichen Verwendung von erneuerbarer elektrischer Energie können 2020 1,9 Mio. t und 2030 9,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. eingespart werden.

Im Vergleich zu konventionellen Pkw schneiden BEV und PHEV aufgrund ihrer vorteilhaften Energieeffizienz auch hinsichtlich des Energieeinsatzes deutlich besser ab. Die zusätzliche Stromnachfrage durch 1 Million Elektrofahrzeuge im Jahr 2020 fällt mit 2 TWh oder ca. 0,4 Prozent der gesamten Stromnachfrage sehr gering aus. Dementsprechend ist auch der Beitrag von Elektrofahrzeugen zur Minderung der gesamten THG-Emissionen des Verkehrssektors im Jahr 2020 noch niedrig. Um die THG-Emissionen im Verkehrssektor kurzfristig deutlich zu senken, sind daher parallel andere Maßnahmen zur THG-Reduktion wie die weitere Verbesserung konventioneller Pkw von großer Wichtigkeit. Auch das politische Ziel von 6 Millionen Elektrofahrzeugen im Jahr 2030 hat einen geringen Effekt auf die Stromnachfrage von 13,7 TWh oder 3 Prozent der gesamten Stromnachfrage. Verglichen mit dem Angebot an Strom aus erneuerbaren Energien weist der Stromverbrauch von 1 Million Elektrofahrzeugen (2 TWh) darauf hin, dass im Jahr 2020 zusätzliche Mengen an erneuerbarem Strom durch Elektromobilität von deutlich unter 2 Prozent nachgefragt werden. Die Forderung, den Fahrstrom aus erneuerbaren Quellen bereitzustellen, erscheint somit – zumindest bilanzmäßig – gut erfüllbar. Die zusätzlichen Kosten erneuerbarer Energien (verglichen werden die Kosten aus Windkraft gegenüber den Kosten des Strommix) sind im Vergleich zu den Gesamtkosten für die Mobilität gering. Pro Kilometer macht dies bei heutigen deutschen Verhältnissen im Energiesystem und einem Mittelklassefahrzeug lediglich eine Preisdifferenz von ca. 0,004 Euro/km aus, bei Gesamtkosten von ca. 0,30 Euro/km für Elektrofahrzeuge.

Die durchgeführten WTW- und Lebenszyklusanalysen bejahen somit die Frage, ob Elektrofahrzeuge positive Auswirkungen in Bezug auf Klimafolgen haben. Dies gilt insbesondere bei ausschließlicher Nutzung erneuerbarer Energien, in geringerem Maße aber auch bei Verwendung des durchschnittlichen Strommix. Diese Resultate können durch weitere Betrachtungen hinterfragt werden. Aus der Perspektive des CO<sub>2</sub>-EU-Emissionshandels sind für den Kraftwerkssektor bis 2020 europaweit CO<sub>2</sub>-Emissionsmengen verbindlich festgelegt. Unter diesem Blickwinkel lässt sich argumentieren, dass der Beitrag der Elektromobilität zum Klimaschutz von Anfang an sehr hoch ist, da zumindest bis 2020 keine zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Elektrofahrzeuge anfallen, unabhängig davon, ob ausschließlich erneuerbare Energien verwendet werden oder nicht. Davon abweichende Schlussfolgerungen ergeben sich aus der Betrachtung des sogenannten Grenzkostenkraftwerkes. Dabei werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Kraftwerkspark ermittelt, welcher zur Deckung der realen Lastganglinie für Elektrofahrzeuge tatsächlich genutzt wird. Signifikante CO<sub>2</sub>-Einsparungen ergeben sich beim Ansatz des Grenzkostenkraftwerkes erst dann, wenn sowohl eine intelligent gesteuerte Ladung von Elektrofahrzeugen durch ein Lastmanagement als auch eine Deckung des Fahrstromes aus zusätzlichen erneuerbaren Energien sichergestellt werden.

Entsprechend kann geschlussfolgert werden, dass Elektrofahrzeuge deutlich positive THG-Bilanzen erreichen

können, wenn eine Ladung mit zusätzlichen Kapazitäten erneuerbarer Energien sichergestellt wird. Um das Potenzial der Elektromobilität nutzen zu können, ist dabei ein Lademanagement unerlässlich, das sich nach der Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien (insbesondere Wind- und Sonnenenergie) richtet. Aufgrund des im Vergleich zu konventionellen Pkw höheren ökologischen Rucksacks aus der Fahrzeugherstellung bedeuten hohe Fahrleistungen für Elektrofahrzeuge auch höhere positive ökologische Auswirkungen. Der ökologische Rucksack kann jedoch bei relativ geringen Jahresfahrleistungen ausgeglichen werden. Entscheidend für die THG-Bilanz ist dabei, dass von den Elektrofahrzeugen auch tatsächlich Kilometer ersetzt werden, welche vorher bzw. andernfalls mit konventionellen Fahrzeugen zurückgelegt wurden bzw. worden wären. Dieser Aspekt, welcher sich auf das tatsächliche Nutzerverhalten bzgl. der Verwendung der Fahrzeuge bezieht (Kap. III.3.2), ist von zentraler Bedeutung für die Realisierung von ökologischen Potenzialen von Elektrofahrzeugen. Durch die relativ niedrigen Betriebskosten von Elektrofahrzeugen erscheint es möglich, dass eine Substitution von Fahrleistung auftritt, welche bisher mit dem ÖPNV zurückgelegt wurde, oder die Fahrleistungen allgemein ansteigen. Solchen möglichen Reboundeffekten sollte entgegengewirkt werden, beispielweise indem Elektrofahrzeuge durch alternative Mobilitätskonzepte in das Verkehrssystem integriert werden. Neben ökologischen Vorteilen können Elektrofahrzeuge bei einer intelligent gesteuerten Ladung auch zur besseren Integration der erneuerbaren Energien beitragen. Elektrofahrzeuge (wie auch FCEV) unterstützen schließlich eine Senkung des Verbrauchs an fossilen Rohölimporten und erhöhen damit die Energieversorgungssicherheit Deutschlands.

#### Vergleichende Betrachtung von FCEV

FCEV werden häufig als Alternative zu Elektrofahrzeugen (BEV und PHEV) betrachtet. Bei der Untersuchung der ökologischen Auswirkungen von FCEV gilt dabei wie für Elektrofahrzeuge, dass auch FCEV lokal quasi emissionsfrei fahren und eine ganzheitliche Betrachtung den ökologischen Rucksack aus der Herstellung sowie der Bereitstellung der Energie berücksichtigen muss. In diesem Bericht wurde die THG- und Energiebilanz von FCEV über den Lebenszyklus (inklusive Fahrzeug- und Kraftstoffproduktion) mit der von Elektrofahrzeugen und konventionellen Pkw verglichen (Kap. III.1.4). Dabei werden für FCEV verschiedene Technologien der Wasserstoffherzeugung (Herstellung mittels Elektrolyse und Reformierung aus Erdgas) berücksichtigt.

Die Ergebnisse für das Jahr 2030 zeigen, dass der Betrieb von FCEV mit Wasserstoff, welcher entweder mittels des deutschen Strommix 2030 durch Elektrolyse erzeugt oder durch Erdgas reformiert wurde, 2030 keine Vorteile bei den THG-Emissionen über den Lebenszyklus im Vergleich zu konventionellen Pkw aufweist. In ersterem Fall liegen die THG-Emissionen sogar über jenen von Benzinfahrzeugen. Durch die ausschließliche Verwendung zusätzlicher erneuerbarer Energiequellen zur Wasserstoffproduktion können die THG-Emissionen von FCEV

jedoch auf das Niveau von BEV und deutlich unter die Emissionen von PHEV gesenkt werden.

Durch die energieintensive Herstellung, Verteilung und Speicherung von Wasserstoff liegt die Primärenergieeffizienz von FCEV generell unter der Effizienz von BEV und PHEV und übersteigt die Effizienz von konventionellen Fahrzeugen nur bei Elektrolyse des Wasserstoffs mit erneuerbaren Energien geringfügig. Die Brennstoffzellentechnik erscheint entsprechend innerhalb des gewählten Zeithorizonts nur in solchen Anwendungsfeldern sinnvoll, in denen hohe Reichweiten und eine schnelle Betankung notwendig sind. FCEV erscheinen entsprechend als mögliche Ergänzung zu Elektrofahrzeugen und weniger als direkte Konkurrenz. Die ausschließliche Nutzung zusätzlicher erneuerbarer Energiequellen ist dabei für die Klimafreundlichkeit von FCEV noch entscheidender als für Elektrofahrzeuge.

#### 1.4 Lärmreduktion und Sicherheit

Wesentliche Beiträge von Elektrofahrzeugen werden auch in einer Verringerung des Verkehrslärms und seiner Folgen, insbesondere für die psychische und physische Gesundheit der Bevölkerung, gesehen. Die externen Kosten von Lärm durch gesundheitliche Beeinträchtigungen bzw. medizinische Folgekosten sowie reduzierte Immobilienwerte werden europaweit auf 8,2 Mrd. Euro geschätzt (Kap. III.3.3.1). Dabei sind vor allem Lärmemissionen in Agglomerationsräumen und Nachtstunden entscheidend. Auch von Nutzern von Elektrofahrzeugen und interessierten Konsumenten wird Lärmreduktion als wichtiger Vorteil der Elektromobilität betrachtet (Kap. III.3.1.3). Eine Lärmreduktion durch Elektrofahrzeuge wird jedoch kontrovers diskutiert, da mit einer Minderung der Geräusche motorisierter Fahrzeuge auch eine Beeinträchtigung der Sicherheit anderer Verkehrsteilnehmer einhergehen könnte (Kap. III.3.3).

Die Lärmreduktion, welche durch Elektrofahrzeuge erreicht werden kann, wird entscheidend durch die Fahrgeschwindigkeit und den Gesamtfahrzeugmix auf den Straßen beeinflusst. Bei geringen Geschwindigkeiten sind Elektrofahrzeuge wesentlich leiser als konventionelle Fahrzeuge, was sich vor allem nachts in Wohngebieten bemerkbar macht (Kap. III.3.3.1). Elektrofahrzeuge bieten dadurch die Möglichkeit, Servicedienstleistungen in Randstunden zu verlegen, was bisher aufgrund der spezifischen Lärmgrenzwerte nicht möglich ist. Somit stellt ein vermehrter Einsatz von Elektrofahrzeugen im unteren Geschwindigkeitsbereich eine effektive Maßnahme zur Lärmreduktion im Straßenverkehr dar. In diesen Bereichen kommen Vorteile von Elektrofahrzeugen auch dann zum Tragen, wenn sich zukünftig auch die Lärmemissionen konventioneller Fahrzeuge weiter vermindern. Für eine hörbare Reduktion des Verkehrslärms insgesamt durch Elektrofahrzeuge bedarf es jedoch eines überwiegenden Anteils entsprechender Fahrzeuge am Verkehrsaufkommen, was durch den Elektrofahrzeuganteil bis 2030 nicht erreicht werden wird (Kap. III.3.3.1).

Inwieweit eine Verbreitung von leisen Elektrofahrzeugen auf Kosten der Verkehrssicherheit ungeschützter und vor

allem sensorisch eingeschränkter Verkehrsteilnehmer geht, kann durch die aktuell verfügbaren empirischen Daten und Befunde nicht vollständig geklärt werden. In ersten experimentellen Studien wurde allerdings auch darauf hingewiesen, dass Elektrofahrzeuge insbesondere für Kinder, ältere Menschen und Behinderte ohne weitere Sicherheitsmaßnahmen eine höhere Unfallgefahr mit sich bringen könnten. Die statistische Datenbasis zum Unfallgeschehen nach Antriebstypen ist allerdings noch zu begrenzt, um valide Schlussfolgerungen zu ziehen, und muss zu einer Versachlichung der Diskussion verbessert werden.

Eine Erhöhung der Verkehrssicherheit für sensorisch eingeschränkte Menschen scheint aber unabhängig von einer Einführung von Elektrofahrzeugen angezeigt. Eine schnell umsetzbare Maßnahme mit positivem Effekt sowohl auf die Verkehrssicherheit als auch die Lärmbelastung durch alle Fahrzeugarten wäre ein generelles Tempolimit von 30 km/h in Innenstädten. Auch die Entwicklung neuer Sicherheitstechnologien erscheint sinnvoll und sollte forciert werden, da künftig auch konventionelle Pkw durch technologische Weiterentwicklung immer geräuscharmer werden. Die Einführung permanenter künstlicher Geräusche sollte, wenn überhaupt, nur als Übergangslösung in Betracht gezogen werden. Besser geeignet wäre die sensorisch gesteuerte, temporäre Erzeugung von Warngeräuschen für Fußgänger und Radfahrer. Durch einen Fokus auf Sicherheitstechnologien und Tempolimits kann vermieden werden, dass Lärmvorteile und Verkehrssicherheit sich gegenseitig ausspielen.

### 1.5 Kritische Rohstoffe

Bei der ökonomischen, ökologischen und sozialen Bewertung von Elektrofahrzeugen spielen sowohl Kosten und Versorgungsaspekte als auch Umweltbelastungen und Arbeitsbedingungen beim Abbau kritischer Rohstoffe eine Rolle, die für Batterien und Elektromotoren (und auch für Brennstoffzellen von FCEV) benötigt werden (Kap. III.2.5). Zu diesen Rohstoffen gehören z. B. Lithium, Kupfer, Platin, Neodym und andere Seltene Erden, welche bei steigender Nachfrage aus dem Automobilssektor nicht mehr in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen könnten. Außerdem ist ihre Gewinnung häufig mit starken Umweltbelastungen verbunden bzw. findet in Regionen statt, in denen nur geringe bis keine Umweltauflagen beachtet werden.

Für Lithium und Kupfer ist eine globale Verknappung auf Basis von Analysen der zukünftigen weltweiten Nachfrage, der geologischen Reichweite und der Recyclingfähigkeit nicht zu erwarten; durch den zu erwartenden stark steigenden Bedarf und eine Konzentration auf wenige Lieferländer könnten die Preise aber bis 2030 deutlich steigen. Bei einigen der Seltenen Erden, wie beispielsweise Dysprosium, sieht die Situation anders aus – hier könnte es kurz- bzw. mittelfristig zu einer Verknappung bei den Reserven kommen.

Insgesamt gibt es beim Thema „kritische Rohstoffe“ noch großen Forschungsbedarf. Generelle quantitative Aussagen, beispielsweise zu Verfügbarkeit bzw. Preisentwick-

lungen können kaum getroffen werden. Wichtige Zukunftsthemen sind Recyclingverfahren, Waste und Urban Mining, die Entwicklung von Substituten und die Ausarbeitung einer Rohstoffstrategie (Kap. III.2.5). Allerdings sind die Auswirkungen und Umweltbilanzen heutiger bzw. zukünftiger Recyclingverfahren aufgrund mangelnder Daten und Studien schwer zu beurteilen. Grundsätzlich erscheint Recycling unerlässlich, andererseits ist aber die Setzung von Standards bei der Gewinnung der Rohstoffe genauso wichtig, um negativen Auswirkungen auf THG-Emissionen, Umweltqualität und Sozialstandards in den Gewinnungsländern entgegenzusteuern.

### 1.6 Erstmärkte und Zielgruppen

Die bisher vorliegenden Ergebnisse aus Forschungs- und Pilotprojekten zur Akzeptanz potenzieller und tatsächlicher Nutzer von Elektrofahrzeugen zeigen, dass es durchaus aussichtsreiche Erstkäufer- bzw. Erstnutzerguppen sowohl im gewerblichen als auch privaten Bereich gibt (Kap. III.3.1).

Wichtige Kriterien aus Nutzersicht sind Umweltvorteile, niedrige Geräuschemissionen, niedrige Betriebskosten – aber auch Fahrverhalten und -komfort, welche häufig erst erfahren werden müssen und vielen potenziellen Nutzern nicht ohne Weiteres bekannt sind (Kap. III.3.1.3). Auch die Außenwirkung bzw. das Image von Elektrofahrzeugen kann ein wirkungsvoller Treiber sein, insbesondere für Unternehmen, aber auch für private Nutzer, welche mit einem Elektrofahrzeug Umwelterorientierung und Technikinteresse bzw. Innovativität ausdrücken können oder schlichtweg ein Fahrzeug fahren wollen, das nicht jeder hat. Gegenüber diesen Vorteilen stellen sowohl für potenzielle private als auch gewerbliche Nutzer die hohen Anschaffungskosten und die limitierte Reichweite von Elektrofahrzeugen derzeit entscheidende Hemmnisse dar (Kap. III.3.1.2).

Angesichts des hohen Anteils gewerblicher Konsumenten an den Pkw-Neuzulassungen (ca. 60 Prozent) sowie an den bisherigen Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen (über 90 Prozent) wird dieser Käufergruppe eine wichtige Rolle auf dem frühen Elektrofahrzeugmarkt zugesprochen (Kap. III.2.1.2). Wirtschaftlichkeit und die Passung zu den jeweiligen Mobilitätsbedürfnissen dürften letztlich ausschlaggebend für die Kaufentscheidung sein (Kap. III.3.1.5). Aber auch Umwelt- und Imagevorteile scheinen für bestimmte Unternehmen eine wichtige Motivation für die Anschaffung von Elektrofahrzeugen darzustellen.

In einer Reihe von Branchen ermöglichen die bestehenden Fahrprofile einen wirtschaftlichen Einsatz von Elektrofahrzeugen (Kap. III.2.1.2). Vielversprechend erscheinen hier vor allem Flotten mit einer höheren Jahresfahrleistung, aber regelmäßigen, planbaren Touren im Bereich bis 100 km. Für entsprechende Flotten wird der höhere Anschaffungspreis durch die deutlich niedrigeren Betriebskosten der Elektrofahrzeuge kompensiert.

Auch der öffentliche Sektor mit seinen Flotten, einschließlich der kommunalen Fuhrparks, stellt einen wich-

tigen Erstmarkt für Elektrofahrzeuge dar und kann zur Nachfrage von Elektrofahrzeugen beitragen sowie ihre Sichtbarkeit und Erfahrbarkeit fördern. Die Bundesregierung hat dementsprechend angekündigt, eine Vorreiterrolle zu übernehmen und einen Teil des Fuhrparks auf Elektrofahrzeuge umzustellen (Kap. II.5.2.6). Gerade in einer frühen Marktphase kann der öffentliche Sektor so effektiv zum Markthochlauf beitragen und eine Kostenreduktion durch Skaleneffekte unterstützen. Die Übernahme von Elektrofahrzeugen in kommunale Fuhrparks muss dabei auf kommunaler Ebene beschlossen werden. Hier könnten Anreize für Kommunen zur Integration von Elektrofahrzeugen förderlich sein. Die Kommunen selbst dürften aber auch ein entsprechendes Eigeninteresse haben, da Elektrofahrzeuge zu einer nachhaltigen Stadtentwicklung und zur Lebensqualität und einem positiven Image von Kommunen wesentlich beitragen können (Kap. II.3.6).

Bei den privaten Käufern erscheinen insgesamt Zielgruppen aussichtsreich, welche sich durch Charakteristika wie Technikaffinität, Interesse an einem besonderen Fahrzeug, Fahrspaß und nicht zuletzt umweltschonendem Fahren auszeichnen (Kap. III.3.1.5). Zum Teil akzeptieren diese potenziellen Käufergruppen gewisse Preisaufschläge im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen aufgrund der wahrgenommenen Vorteile von Elektrofahrzeugen. Die Mehrzahlungsbereitschaft dürfte aber i. d. R. deutlich niedriger liegen als die heutigen Mehrkosten von Elektrofahrzeugen. Die tatsächlichen Käufer werden vor allem in ländlichen Gebieten, in kleinen oder mittleren Städten oder im Umland von Großstädten erwartet, da hier häufiger ein Auto genutzt wird (Kap. III.2.1.1). Auch sehr umweltorientierte Personen dürften sich in diesen Wohnlagen, aufgrund mangelnder oder suboptimaler Alternativen zur Befriedigung ihrer Mobilitätsbedürfnisse, häufiger als umweltorientierte Konsumenten in städtischen Gebieten für ein Auto entscheiden, obwohl dies in Konflikt mit ihrem Umweltbewusstsein steht. Für diese Konsumenten dürfte eine wichtige Rolle spielen, dass sie mit einem Elektrofahrzeug einen Beitrag zur Umweltentlastung leisten können (Kap. III.3.1).

Entsprechend zeigen die Ergebnisse, dass jüngere und/oder umweltorientierte Zielgruppen in Großstädten nicht zu einer breiten Schicht von Käufern von Elektrofahrzeugen gehören dürften, aber als Nutzer im Rahmen multimodaler Sharingkonzepte aufgrund ihrer finanziellen Situation und/oder Wertvorstellungen vielversprechend erscheinen (Kap. III.3.1.5). Durch die geringe Fahrleistung in Großstädten bei gleichzeitig gutem Angebot alternativer Verkehrsmittel erscheint die Anschaffung eines Elektrofahrzeugs für diese Zielgruppe weder aus ökonomischen noch aus ökologischen Gründen vorteilhaft.

Bei der Diskussion aussichtsreicher und tragfähiger Erstmärkte und Zielgruppen sind auch die verschiedenen alternativen Antriebstechnologien (BEV, PHEV, FCEV) bzgl. ihrer Eignung für die jeweiligen Mobilitätsbedürfnisse zu diskutieren. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten und relativ geringer Reichweiten der heute kommerziell verfügbaren Batterien ist zu erwarten, dass BEV

in den nächsten Jahren nur in begrenzten Marktsegmenten mit entsprechenden Nutzungsprofilen bzw. im Rahmen multimodaler Mobilitätsangebote zum Einsatz kommen (Kap. II.3.3 u. III.2.1). Die Nutzung von BEV in den Fahrzeugsegmenten Klein- und Kompaktwagen erscheint z. B. bei mobilen Pflegediensten oder im Rahmen von größeren Carsharingflotten wirtschaftlich realisierbar (Kap. II.3.2, II.3.5 u. III.2.1.2). Im Bereich der leichten Nutzfahrzeuge bilden die Post- und Paketdienste mit ihren Flotten für die Auslieferung in Städten sowie diverse Handwerksdienstleister geeignete Erstmärkte (Kap. II.3.5 u. III.2.1.2).

Demgegenüber ermöglichen PHEV, auch längere Distanzen durch den zusätzlichen Verbrennungsmotor zurückzulegen, sodass sie einen breiteren Einsatzbereich und damit auch ein größeres Marktpotenzial haben (Kap. III.2.1). Auch FCEV bieten höhere Reichweiten. Bei Aufbau einer Infrastruktur für die Betankung mit Wasserstoff und deutlicher Reduktion der Kosten für Brennstoffzellen und Wasserstofftanks, dürften Potenziale zur Markteinführung von FCEV in den Segmenten der oberen Mittel- und der Oberklasse des Pkw-Marktes liegen (Kap. III.2.1.3). Bei häufigen langen Strecken und dem Transport großer Lasten, z. B. im Güterverkehr über 3,5 t, werden optimierte Dieselfahrzeuge aber wahrscheinlich noch längerfristig dominieren.

Um die verschiedenen beschriebenen Konsumentengruppen tatsächlich zu erreichen, erscheinen verschiedene Voraussetzungen zentral, u. a. eine Reduzierung der Anschaffungspreise, attraktive und umfassende Mobilitäts- und Sharingangebote und Geschäftsmodelle inklusive Mobilitätsgarantien, eine transparente positive Umweltbilanz sowie Test- und Erfahrungsmöglichkeiten (Kap. III.3.1.3 u. III.3.1.4).

## 2. Förderung der Elektromobilität

Die im Rahmen dieses Berichts vorgenommenen Bewertungen zeigen, dass Elektromobilität einen wesentlichen Beitrag zur Umweltentlastung und Erreichung klima- und energiepolitischer Ziele in Deutschland leisten und den Wandel zu einer nachhaltigen Mobilität entscheidend unterstützen kann (Kap. III). Eine wesentliche Voraussetzung ist, dass zusätzliche Kapazitäten erneuerbarer Energien genutzt werden, Elektromobilität mittels Lastmanagement in das Energiesystem und mittels alternativer Konzepte in die Verkehrssysteme integriert und eine Kombination mit anderen Verkehrsmitteln gefördert wird (Kap. III.1). Zudem ist die Förderung und Ausrichtung der deutschen Automobilindustrie auf Schlüsseltechnologien der Elektromobilität und die Produktion von Elektrofahrzeugen entscheidend, um Wettbewerbsfähigkeit und Arbeitsplätze in diesem Bereich zu sichern (Kap. III.2.3 u. III.2.4). Bei der Diskussion möglicher Fördermaßnahmen ist das komplexe Wirkungsgefüge zwischen den Maßnahmen und einer Vielzahl an externen Einflussfaktoren zu beachten:

- *Einflussfaktoren der Marktentwicklung:* Für die weitere Entwicklung der Verbreitung von Elektrofahrzeugen spielen eine Vielzahl an Einflussfaktoren und de-

ren Entwicklungen und Wechselwirkungen eine Rolle (Kap. II.2.2). Dazu gehören u. a. der Rohölpreis sowie die Entwicklung von Batterietechnologien und -preisen. Je nach Entwicklung können sich diese Einflussfaktoren stark positiv oder stark hemmend auf die Marktpenetration von Elektrofahrzeugen auswirken. Bei der Diskussion möglicher Fördermaßnahmen müssen diese Einflussfaktoren daher kontinuierlich beobachtet werden, insbesondere sollten die Maßnahmen so ausgestaltet sein, dass flexibel auf Änderungen reagiert werden kann.

- *Synergien bzw. Konflikte:* Bei Fördermaßnahmen sind insbesondere mögliche Synergien bzw. Konflikte zu beachten. Beispielsweise setzen sowohl die bestehenden CO<sub>2</sub>-Grenzwerte der EU wie auch eine etwaige monetäre Kaufförderung einen Anreiz zur Einführung von Elektrofahrzeugen (Kap. IV.2.3). Die Freigabe von Sonderspuren (z. B. Busspuren) für Elektrofahrzeuge kann im Widerspruch zu weiteren Zielen der kommunalen Verkehrsplanung stehen (Kap. IV.2.4).
- *Abbau von Hemmnissen:* Relevante Hemmnisse (organisatorische, informatorische, finanzielle, infrastrukturelle, ordnungsrechtliche) sind zu beseitigen (Kap. II.1.4, II.3.6, III.2.1 u. III.3.1).
- *Planbarkeit und Verlässlichkeit:* Unabdingbar sind nicht zuletzt Planbarkeit und Verlässlichkeit durch Standards und einen langfristigen gesetzlichen Rahmen, um zum einen Technologieaktivitäten und elektromobile Angebote durch die Industrie zu fördern und zum anderen die Nachfrage entsprechender Angebote durch private und gewerbliche Nutzer zu stimulieren.
- *Privat- und Wirtschaftsverkehr:* Bei der Identifikation und Ausgestaltung von Fördermaßnahmen bietet sich eine Unterscheidung zwischen privaten und gewerblichen Fahrzeugen aufgrund unterschiedlicher Rahmenbedingungen und Entscheidungsprozesse für deren Kauf bzw. Nutzung an (Kap. III.2.1 u. III.3.1). Die Entscheidungskriterien dürften ähnlich sein, aber z. T. unterschiedliches Gewicht im Entscheidungsprozess haben; beispielsweise dürften von gewerblichen Käufern die Gesamtkosten systematischer herangezogen werden. Zudem sind im gewerblichen Bereich bzw. bei gemeinschaftlicher Nutzung Elektrofahrzeuge eher wirtschaftlich einsetzbar, da die Jahresfahrleistungen meist höher als bei reinen Privatfahrzeugen sind.
- *Weitere alternative Technologien:* Bei einer Förderung der Elektromobilität sollten im Sinne eines technologieoffenen Ansatzes andere alternative Antriebskonzepte wie FCEV nicht ignoriert werden. Diese könnten langfristig einen zusätzlichen wichtigen Beitrag zu einem nachhaltigen Verkehrssystem leisten und die Einsatzgebiete von BEV und PHEV sinnvoll ergänzen (Kap. III.1.3., III.1.4.1 u. III.2.1.3). Die konkrete Ausgestaltung einer solchen technologieoffenen Förderung ist jedoch schwierig, da Marktreife, Kosten und Bedarf an zusätzlicher Infrastruktur sich zwischen Elektrofahrzeugen und FCEV zumindest derzeit noch

stark zuungunsten von FCEV unterscheiden (Kap. II.1.1.2 u. III.2.1.3).

Im Folgenden werden konkrete Strategien bzw. Maßnahmen zur Förderung der Elektromobilität vertieft diskutiert. Die Handlungsmöglichkeiten umfassen die Förderung von FuE-Aktivitäten, monetäre und nichtmonetäre Anreize zur Marktvorbereitung und Förderung der Nachfrage, den Ausbau einer Ladeinfrastruktur sowie die Förderung neuer bzw. alternativer Mobilitätskonzepte. Zur Einordnung erfolgt zunächst ein kurzer Überblick über den aktuellen Stand bezüglich der Technologieaktivitäten und Fördermaßnahmen im Kontext der Elektromobilität in Deutschland (Kap. II.5.1 u. II.5.2.6).

## 2.1 Aktuelle Technologieaktivitäten und Fördermaßnahmen

Eine Betrachtung des Status quo der Elektromobilität im internationalen Kontext zeigt, dass weltweit nur wenige Länder über die Ausgangsbasis sowie die Potenziale verfügen, einen Leitmarkt für die Elektromobilität mit einer starken Automobilindustrie aufzubauen, einschließlich dem Zugriff auf Schlüsseltechnologien, wie Batterietechnologie und -produktion, Antriebsstrang, Leistungselektronik etc. (Kap. II.5.1). Dazu gehören Japan, Südkorea und China sowie die USA und innerhalb Europas insbesondere Deutschland und Frankreich. Die Regierungen der USA, Chinas und Südkoreas haben für die kommenden Jahre milliardenschwere Programme, insbesondere zur Förderung der Batterieproduktion, angekündigt (Kap. II.5.2). Hierdurch sollen jeweilige Defizite gegenüber Japan, welches bereits seit Jahrzehnten entscheidende Schlüsseltechnologien fördert und heute Technologieführer und Vorreiter in der Elektromobilität ist, aufgeholt werden.

In Deutschland liegt der Schwerpunkt bei der Förderung der Elektromobilität auf der Koordination und Förderung von FuE-Aktivitäten durch Wissenschaft und Industrie, auf Test- und Demonstrationsprojekten (wie den Modellregionen und sogenannten „Schaufenstern“) sowie auf der Normung und Standardisierung (Kap. II.5.2.6). Wie die Förderung und Finanzierung der Elektromobilität im Zeitraum zwischen 2013 und 2020 ausgestaltet sein sollte, ist noch nicht endgültig festgelegt und die Notwendigkeit und Ausgestaltung von Maßnahmen zur Marktvorbereitung und Förderung der Nachfrage (z. B. durch monetäre Anreize und Infrastrukturausbau) werden z. T. kontrovers diskutiert.

Eine umfangreiche staatliche Förderung und Subventionierung des Kaufes bzw. der Nutzung von Elektrofahrzeugen erfolgt in Deutschland im Gegensatz zu einigen anderen Ländern nicht (Kap. II.5.2). Allerdings wird für BEV eine Kfz-Steuerbefreiung von derzeit 5 Jahren gewährt, welche auf 10 Jahre verlängert werden soll (Kap. II.5.2.6). Bei der Dienstwagenbesteuerung, welche Elektrofahrzeuge durch ihren höheren Anschaffungspreis aktuell benachteiligt, ist eine Gleichstellung mit konventionellen Fahrzeugen ab 2013 vorgesehen. Nichtmonetäre Anreize wie kostenloses Parken oder die Freigabe von Sonderspuren für Elektrofahrzeuge werden als wirksamer

Nutzeranreiz für die Elektromobilität gesehen und entsprechende Voraussetzungen (z. B. eine Regelung zur Kennzeichnung von Elektrofahrzeugen) vorbereitet. Ebenso werden aktuell Rahmenverträge und Beschaffungsleitfäden für die Einführung von Fahrzeugen mit niedrigen THG-Emissionen im öffentlichen Sektor erarbeitet (Ziel: 10 Prozent der neu angeschafften oder neu angemieteten Fahrzeuge ab 2013 sollen weniger als 50 g CO<sub>2</sub>/km emittieren) (Kap. II.5.2.6).

Bei der Betrachtung aktueller Maßnahmen und Rahmenbedingungen für eine Verbreitung der Elektromobilität in Deutschland sind nicht zuletzt die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte der EU zu berücksichtigen (Kap. II.5.3). Die im Rahmen dieses Berichts durchgeführten Berechnungen zeigen, dass Strafzahlungen, welche bei Nichteinhaltung der Grenzwerte anfallen, aus Sicht der einzelnen Hersteller unterschiedlich wahrscheinlich sind. Zum Teil müssen die Hersteller mit hohen Gewinneinbußen rechnen, sofern sie keine zusätzlichen Anstrengungen unternehmen (Kap. II.5.3.1). Die Einführung von alternativen Antriebstechnologien wie Elektrofahrzeugen stellt neben Effizienzsteigerungen konventioneller Fahrzeuge eine vielversprechende Möglichkeit für die Hersteller dar, die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte einzuhalten und Strafzahlungen zu vermeiden, insbesondere da BEV und FCEV – ungeachtet der Energie, welche für den Fahrzeugbetrieb genutzt wird – als emissionsfrei gelten und überproportional angerechnet werden. So gelten Pkw mit weniger als 50 g CO<sub>2</sub>/km im Jahr 2012 als 3,5 Fahrzeuge und im Jahr 2015 als 1,5 Fahrzeuge; für 2020 wird eine solche überproportionale Anrechnung derzeit diskutiert (Kap. II.5.3.2). Falls für den Fahrzeugbetrieb CO<sub>2</sub>-intensive elektrische Energie verwendet wird, ist eine stark verzerrte Bewertung dieser Fahrzeugtechnologien die Folge. Die Kopplung der Elektromobilität an zusätzliche erneuerbare Energien ist schon aus ökologischer Sicht (Kap. III.1) sowie aus Sicht der Nutzer geboten, für die umweltschonendes Fahren einen entscheidenden Vorteil der Elektromobilität darstellt (Kap. III.3). Der Bewertungsmechanismus im Rahmen der CO<sub>2</sub>-Grenzwerte der EU verleiht dieser Forderung aber zusätzliche Bedeutung.

In diesem Zusammenhang hat die Bundesregierung beschlossen, den zusätzlichen Bedarf an elektrischer Energie durch die Elektromobilität aus erneuerbaren Energien zu decken (Kap. III.1.3.1), wobei es sich überwiegend um zusätzliche Kapazitäten handeln soll, um keine Nutzungskonkurrenz zwischen Verkehr und anderen Wirtschaftsbereichen entstehen zu lassen. Konkret soll vorrangig anderweitig nicht nutzbarer Strom aus fluktuierenden erneuerbaren Energien genutzt werden. Dies soll durch Einbindung der Elektrofahrzeuge in das Energiesystem mittels Lastmanagement erreicht werden.

## 2.2 Förderung von Forschung und Entwicklung

Der internationale Vergleich hat gezeigt, dass Japan in elektromobilitätsrelevanten Schlüsseltechnologien (Batterie, Leistungselektronik und Elektromotoren) eine starke Position inne hat und diese bereits seit Jahrzehnten

systematisch im Energie- und Transportsektor fördert (Kap. II.5). China, Südkorea und die USA versuchen derzeit, Defizite in relevanten Schlüsseltechnologien u. a. durch starke FuE-Förderung aufzuholen.

Für Deutschland ist vor diesem Hintergrund die Förderung der FuE bei Batterien, Leistungselektronik und Elektromotoren mittel- bis langfristig von hoher Bedeutung, um eine Wettbewerbsfähigkeit bzw. Leitانبieterschaft im Bereich der Elektromobilität auf- und auszubauen. Um dabei Entwicklungs- und Produktionskompetenzen für leistungsfähige Batterien auch in Deutschland aufzubauen, erscheinen aus heutiger Sicht FuE-Investitionen in die zukünftigen Batterietechnologien (Lithiumbatterien der 3. u. 4. Generation) für die langfristige Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands erfolgversprechender als in die marktnahen bzw. bereits kommerzialisierten Lithium-Ionen-Batteriesysteme der 2. Generation (Kap. II.1.1.1 u. II.5.1). Für die heutigen und marktnahen Batteriesysteme gilt es vielmehr, Know-how in der Produktion großformatiger Batteriezellen aufzubauen, da sie in den kommenden Jahren noch die dominierende Technologie in Elektrofahrzeugen darstellen werden (Kap. II.1.1).

Schließlich sollten insbesondere die technologisch enger fokussierten Zulieferunternehmen kleiner und mittlerer Größe für den anstehenden Wandel sensibilisiert werden und es sollten günstige Rahmenbedingungen geschaffen werden, damit diese Unternehmen ihr Technologie- und Produktportfolio grundlegend überarbeiten können (Kap. III.2.2).

## 2.3 Monetäre Anreize

Da der hohe Kaufpreis von vielen Kunden als starker Nachteil von Elektrofahrzeugen betrachtet wird (Kap. III.3.1.2), wird sehr häufig das Instrument einer direkten Kaufsubvention thematisiert, welches durch einen stärkeren Kaufanreiz einen Anstieg der Verkaufszahlen erzielen soll. In einer Reihe von Studien wird davon ausgegangen, dass das Ziel für 2020 von mindestens 1 Million Elektrofahrzeugen auf deutschen Straßen ohne starke zusätzliche finanzielle Kaufanreize nicht erreicht werden kann (Kap. II.2.2).

Eine direkte Kaufsubvention wäre z. B. im Rahmen eines reinen Bonussystems für effiziente Fahrzeuge möglich, d. h. als Zuschuss beim Kauf eines Elektrofahrzeugs. Alternativ wäre auch ein Bonus-Malus-System denkbar, d. h. ein Zuschuss beim Kauf eines effizienten Fahrzeugs und ein Preisaufschlag beim Kauf eines ineffizienten Fahrzeugs. In Frankreich ist ein solches Bonus-Malus-System in Kraft, welches eine Subvention für Elektrofahrzeuge von 5 000 Euro beinhaltet (Kap. II.5.2). Die Verkaufszahlen aus Frankreich für 2011 von 2 629 Elektrofahrzeugen, davon weniger als 500 an private Käufer, deuten aber darauf hin, dass für eine weitere Verbreitung von Elektrofahrzeugen zusätzliche bzw. intensivere Maßnahmen notwendig sind.

Ein Bonus-Malus-System kann grundsätzlich haushaltsneutral umgesetzt werden, sodass es nicht zu Mehrkosten

für den Staat führen würde. Ein reines Bonussystem müsste über andere staatliche Mittel finanziert werden. Bei der Begründung möglicher finanzieller Anreize und ihrer Ausgestaltung sollten die zu erwartenden Effekte der Elektromobilität sowie bereits bestehende Anreize (wie die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für Pkw in der EU) für die Einführung von Elektrofahrzeugen betrachtet werden.

Im Folgenden werden Optionen zur Ausgestaltung monetärer Anreize zur Förderung der Nachfrage nach Elektrofahrzeugen diskutiert, zum einen hinsichtlich von Zielgruppen, zum anderen hinsichtlich der Anreizhöhe.

### Zielgruppen für die Setzung von Anreizen

Bei einer direkten Kaufförderung für Elektrofahrzeuge (oder alternative Antriebe mit niedrigen CO<sub>2</sub>-Emissionen) sollte berücksichtigt werden, dass die aktuell und mittelfristig deutlich höheren Anschaffungskosten von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit zunehmender Fahrleistung durch die deutlich niedrigeren Betriebskosten mehr und mehr ausgeglichen werden können. So erlauben Elektrofahrzeuge bei genügend hoher Fahrleistung einen wirtschaftlichen Einsatz. Auch die ökologische Bilanz verbessert sich, insbesondere nehmen die THG-Einsparungen durch ein Elektrofahrzeug zu, je besser ausgelastet es ist bzw. je höher die Fahrleistung ist. Die Jahresfahrleistung, ab welcher Elektrofahrzeuge THG-Emissionen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen einsparen, ist bei Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien sehr gering (Kap. III.1.3.4, Abb. III.9).

Monetäre Anreize, welche einen relevanten Anteil, aber nicht die gesamten Mehrkosten ausgleichen, führen dazu, dass früher ein wirtschaftlicher Betrieb erreicht wird bzw. eine geringere Mehrpreisbereitschaft für die Anschaffung eines Elektrofahrzeugs erforderlich ist.

Im gewerblichen Bereich, der mit 60 Prozent der Neuzulassungen große Bedeutung für eine Verbreitung der Elektromobilität hat, erscheint ein wirtschaftlicher Einsatz in einigen Wirtschaftszweigen möglich (Kap. III.2.1.2 u. IV.1.6). Monetäre Anreize könnten das vorhandene Potenzial noch erweitern.

Im privaten Bereich ist der aktuell hohe Kaufpreis eine relevante Barriere; eine Wirtschaftlichkeit unter Betrachtung der Gesamtkosten dürfte aber nicht in gleichem Maße wie im gewerblichen Bereich entscheidend sein (Kap. III.2.1.1 u. III.3.1.2). Kaufanreize können, insbesondere im privaten Bereich, auch als wichtiges Symbol für die Unterstützung der Elektromobilität seitens des Staates wahrgenommen werden, Aufmerksamkeit wecken und das Interesse für Elektrofahrzeuge im Kaufprozess fördern.

Eine Anreizwirkung auf Marktsegmente mit einer sehr niedrigen Fahrleistung und somit negativen Auswirkungen auf die THG-Emissionen könnte bei einer Förderhöhe, bei welcher immer noch ein signifikanter Anteil der Kaufpreisdifferenz durch die Nutzer selbst getragen wird, stark eingegrenzt werden, da für die Kaufentscheidung in diesen Segmenten auf Basis der Gesamtkosten immer

noch eine Mehrpreisbereitschaft notwendig wäre, welche noch deutlich über derjenigen der meisten potenziellen Käufer liegen dürfte.

Zudem sollte aus ökologischer Sicht vermieden werden, dass durch monetäre Anreize Reboundeffekte entstehen, d. h., dass z. B. in großem Maße Personen zum Kauf motiviert werden, welche sich ansonsten kein Auto angeschafft hätten, oder dass bei einem Umstieg auf ein Elektrofahrzeug ein signifikanter Anteil von ÖPNV-, Rad- und Fußwegen durch Fahrten mit dem Elektrofahrzeug ersetzt wird. Auch in dieser Hinsicht sollten Anreize nicht so hoch ausfallen, dass die Gesamtkosten von Elektrofahrzeugen mit denen konventioneller Fahrzeuge vergleichbar sind. Insbesondere sollte die Einbindung von Elektrofahrzeugen in multimodale Angebote bzw. in Flotten gefördert werden.

Als weitere finanzielle Anreize für private und gewerbliche Käufer kommen Steuervorteile wie die aktuell geltende Befreiung von der Kfz-Steuer infrage. Dabei ist zu beachten, dass laufende Kosten wie Steuern oder Treibstoff- bzw. Stromkosten für den Betrieb der Fahrzeuge bei der Kaufentscheidung nicht in gleichem Maße berücksichtigt werden wie Anschaffungskosten und eine Kalkulation der resultierenden Gesamtkosten in der Regel kaum erfolgt (Frederick et al. 2002; Hausman 1979; Turrentine/Kurani 2007). Eine Senkung der Betriebskosten dürfte daher – bei gleicher Reduktion der Gesamtkosten – weniger Fahrzeugkäufe stimulieren als eine direkte Kaufsubvention.

Eine zeitlich begrenzte Kombination aus reduzierter Dienstwagensteuer und Sonderabschreibung für Elektrofahrzeuge könnte schließlich eine weitere effektive Maßnahme sein, um die gewerbliche Nachfrage von Elektrofahrzeugen zu fördern (Kap. II.2.2; ESMT 2011). Ein Vorteil einer Förderung von Elektrofahrzeugen als Dienstwagen wäre, dass derart genutzte Fahrzeuge typischerweise nur wenige Jahre gehalten werden und entsprechend eingeführte Elektrofahrzeuge anschließend über den Gebrauchtwagenmarkt für Privatnutzer zu einem niedrigeren Preis zugänglich würden.

Eine weitere überlegenswerte Möglichkeit wäre es, Anreize an die Nutzung erneuerbarer Energien zu koppeln, z. B. an die Verpflichtung, beim Kauf eines Fahrzeugs gleichzeitig einen Vertrag über den Bezug von Strom aus erneuerbaren Energiequellen zur Ladung des Fahrzeugs abzuschließen.

### Höhe einer monetären Förderung

Die Bestimmung der Höhe monetärer Anreize kann sich auf drei verschiedene Ansätze oder eine Kombination von diesen stützen. Ein Ansatz zielt auf die positiven Umweltwirkungen und eine Abschätzung der vermiedenen externen Kosten ab. Eine weitere Option besteht in der Berechnung der volkswirtschaftlichen Wachstumsimpulse der Elektromobilität. Bei einer dritten Option wird abgeschätzt, wie hoch der Anreiz sein müsste, um das politische Ziel von mindestens 1 Million Elektrofahrzeugen bis

2020 in Deutschland zu erreichen. Diese drei Ansätze werden im Folgenden diskutiert.

In Kapitel III.1.5 werden die Einsparungen externer Kosten abgeschätzt, welche durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen an Stelle konventioneller Pkw erreicht werden können. Der Fokus liegt auf der WTW-Kette, d. h., es wurden direkte Emissionen während des Fahrbetriebs und indirekte Emissionen bei Bereitstellung der Antriebsenergie betrachtet. Die betrachteten externen Kosten unterteilen sich in Kosten von Klimafolgen und Kosten der Luftverschmutzung. Der Einsatz von BEV wird in der Fahrzeugklasse Pkw-Mini untersucht und jener von PHEV als Pkw-Kompakt. Ein deutliches Resultat ist, dass durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen die durch Klimafolgen verursachten externen Kosten in signifikantem Ausmaß reduziert werden können. Hingegen sieht die Analyse Elektrofahrzeuge und konventionelle Pkw im Hinblick auf externe Kosten aufgrund von Luftschadstoffemissionen nahezu gleichauf. Dies gilt umso mehr, als die Annahmen für konventionelle Pkw eher konservativ gewählt wurden und die Fahrzeugherstellung generell ausgeklammert wurde.

Die insgesamt hergeleiteten Einsparungen externer Kosten, welche als Rechtfertigung und zur Bestimmung der Höhe von Anreizen dienen können, betragen im Fall des ausschließlichen Einsatzes erneuerbarer Energien zwischen 1 800 und 3 200 Euro (Kap. III.1.5, Tab. III.18). Dabei ist zu beachten, dass diese Resultate mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Eine weiter gehende Betrachtung des ökologischen Rucksacks aufgrund der Herstellung der Fahrzeuge führt zu einer Reduktion der ermittelten Einsparungen um ca. 10 bis 25 Prozent, und zu entsprechend korrigierten Werten zwischen 1 300 und 2 900 Euro, nach wie vor unter der Bedingung des ausschließlichen Einsatzes erneuerbarer Energien. Umweltbelastungen durch die Fahrzeugherstellung entstehen global durch die Produktion von Vorprodukten und den Abbau Seltener Erden, womit diese durch nationale Energiestrategien nur bedingt beeinflussbar sind. Durch eine nachhaltige Zuliefer- und Rohstoffpolitik – die auch konventionellen Fahrzeugen zugutekommen würde – ließen sich erhebliche Teile dieses „ökologischen Rucksacks“ vermeiden. Ein möglicher Anstieg von Unfällen mit anderen Verkehrsteilnehmern ist in den zuvor ermittelten Werten nicht berücksichtigt, da die vorliegenden Daten keine diesbezüglichen Rückschlüsse zulassen (Kap. III.3.3).

Die volkswirtschaftlichen Auswirkungen der Einführung der Elektromobilität sind sehr vielschichtig und ihre Analyse ist dementsprechend komplex. Relevant ist bei ihrer Bewertung auch, wo diese Effekte anfallen, also beim Konsumenten, der Industrie oder dem Staat. Positive Effekte ergeben sich beispielsweise durch verminderte Ausgaben für Kraftstoffe beim Konsumenten und durch zusätzliche Beschäftigung im Fahrzeugbau und den Zulieferindustrien. Für den Staat reduzieren sich mit zunehmender Verbreitung von Elektrofahrzeugen und Verdrängung konventioneller Fahrzeuge die Einnahmen aus Mineralölsteuern, wenn es bei der jetzigen Mineralölsteuerbefreiung von Strom bleiben sollte. Für Hersteller und

Zulieferer nimmt die Wertschöpfung im Antriebsstrang ab, wenn die Batteriezellen überwiegend aus dem Ausland kommen sollten, was zumindest auf absehbare Zeit der wahrscheinliche Fall ist. Die Ergebnisse solcher Analysen hängen ebenfalls stark von den getroffenen Annahmen ab, beispielsweise der Entwicklung der Rohölpreise oder der heimischen Wertschöpfungsanteile bei Elektrofahrzeugen.

Im Marktmodell Elektromobilität (ESMT 2011) wurden verschiedene volkswirtschaftliche Aspekte analysiert und quantifiziert (Kap. II.2.2). Im Fazit führen alle dort analysierten Förderanreize, wie beispielsweise Kaufprämien, zu negativen volkswirtschaftlichen Effekten. Allerdings konzentriert sich das Modell auf die Abschätzung der Effekte, welche als direkte Folge der Maßnahmen eintreten. Investitionsimpulse oder Exportimpulse durch die Erlangung eines Leitmarktvorteils scheinen nicht im Modell abgebildet zu sein, was zu einer Vernachlässigung möglicher stimulierender Effekte der Elektromobilität führen dürfte. Die gesamtwirtschaftlichen Analysen des vorliegenden Berichts gelangen zu dem Schluss, dass die Effekte einer Einführung der Elektromobilität unter Beachtung der Investitions- und Exportimpulse positiv ausfallen können. Hier wurde allerdings vereinfachend unterstellt, dass das Marktpenetrationsszenario ohne monetäre Anreize erreicht werden könnte. Für ein abschließendes Urteil sollte in weiteren Studien ermittelt werden, bei welcher Anreizhöhe die eingesetzten Fördermittel und das induzierte BIP-Wachstum bzw. die gesamtwirtschaftlichen Effekte in einem akzeptablen Verhältnis stehen.

Der dritte Ansatz bezieht sich auf die Höhe des Anreizes, die notwendig ist, um das Ziel von mindestens 1 Million Elektrofahrzeuge bis 2020 (bzw. 6 Millionen bis 2030) in Deutschland erreichen zu können. Aus heutiger Sicht lässt sich aber – auch aufgrund der Unsicherheit bzgl. der Entwicklung wesentlicher Rahmenbedingungen (Kap. II.2.2 u. II.2.4) – nicht verlässlich vorhersagen, in welchen Segmenten bzw. Fällen ein monetärer Anreiz tatsächlich zur Kaufentscheidung beitragen kann und welche Anreizhöhe zur Zielerreichung nötig wäre. Im Gegensatz zu dem gesetzten Ziel für 2020 scheint das Ziel von mindestens 6 Millionen Elektrofahrzeugen in Deutschland bis 2030 aus heutiger Sicht eher, d. h. auch ohne monetäre Anreize, realisierbar, da zu erwarten ist, dass sich die Bedingungen für die Elektromobilität künftig weiter verbessern.

Um das Ziel für 2020 zu erreichen, schlägt die NPE neben nichtmonetären Anreizen auch eine Reihe monetärer Anreize vor (Kap. II.2.3). Diese umfassen u. a. eine Kfz-Steuersenkung, eine Änderung der Dienstwagenbesteuerung, Sonderregelungen für die Abschreibung und die Förderung der öffentlichen Beschaffung von Elektrofahrzeugen. Diese Maßnahmen sollen laut NPE die Kostenlücke nicht schließen, aber zumindest verringern, um den Markthochlauf zu stimulieren.

## 2.4 Nichtmonetäre Anreize

Neben monetären Anreizen stehen zur Förderung der Elektromobilität auch nichtmonetäre Anreize zur Aus-

wahl. Die Befragungen von Nutzern in den Modellregionen des BMVBS haben zwar ergeben, dass aus Sicht der Befragten nichtmonetäre Anreize wie kostenlose oder reservierte Parkplätze für Elektrofahrzeuge und Freigabe von Busspuren Mehrpreise bei Elektrofahrzeugen weniger kompensieren können als monetäre Anreize wie preiswerter Ladestrom oder Vergünstigungen bei Kfz-Steuer und -Versicherung (Kap. III.3.1.2). Welche Auswirkungen nichtmonetäre Anreize letztlich auf die Kaufentscheidung verschiedener Nutzergruppen haben, ist jedoch – aufgrund der noch begrenzten Praxiserfahrungen und besonderen Rahmenbedingungen – noch nicht klar absehbar und bedarf weiterer wissenschaftlicher Studien im Rahmen von Praxisprojekten und internationalen Marktbeobachtungen. Mit zunehmender Erfahrung und Sichtbarkeit von nichtmonetären Anreizen könnte sich deren Bedeutung für die Kaufentscheidung ändern. Generell könnten sie die Attraktivität von Fahrzeugen mit niedrigem CO<sub>2</sub>-Ausstoß, z. B. in Kombination mit anderen Anreizen, weiter verbessern.

Für gewerbliche Flotten, z. B. von Kurier- und Paketdiensten, erscheinen nichtmonetäre Anreize wie Umweltzonen und längere Zufahrtszeiten für Innenstädte (vor dem Hintergrund niedriger Schadstoff- und Lärmmissionen) durchaus vorteilhaft und geeignet zur Förderung des Einsatzes von Elektrofahrzeugen (Kap. III.2.1.2).

Solche Maßnahmen, ebenso wie eine Freigabe von Sonderparken und speziellen Parkplätzen für Elektrofahrzeuge, müssen überwiegend auf kommunaler Ebene entschieden und ausgestaltet werden (Kap. II.3). Eine einheitliche Regelung bzw. gesetzliche Grundlage zur Ausweisung von Stellplätzen und zu deren Schutz vor Falschparkern erscheint dafür als wichtige Voraussetzung. Allerdings werden diese Maßnahmen sehr kontrovers diskutiert, da sie Maßnahmen betreffen, welche ursprünglich zur Förderung des ÖV bzw. zur Steuerung des MIV konzipiert wurden. Ein Einsatz zur Förderung von Elektrofahrzeugen im Individualverkehr darf nicht zu Konflikten mit dem Umweltverbund, also dem öffentlichen Personennah-, Fuß- und Radverkehr führen und dem Ziel einer Vermeidung des MIV bzw. einer Verlagerung auf den ÖV entgegenstehen. Falls sich solche Anreize mit zunehmender Praxiserfahrung in Modellregionen bzw. Schaufenstern als effektiv erweisen, sollten sie daher allenfalls zeitlich befristet zur Markteinführung von Elektrofahrzeugen genutzt werden.

## 2.5 Ausbau einer Ladeinfrastruktur

Auch ein Infrastrukturausbau für Elektrofahrzeuge, vor allem in Form der Bereitstellung von Lademöglichkeiten, wird in Deutschland als Maßnahme vielfach diskutiert. In vielen anderen Ländern wird ein Infrastrukturausbau als wichtig erachtet und vorangetrieben (Kap. II.5.2). In Deutschland scheint auf Basis der vorliegenden Betrachtungen und Analysen jedoch keine dringende Notwendigkeit eines flächendeckenden Aufbaus öffentlicher Lademöglichkeiten zu bestehen, um die Markteinführung von Elektrofahrzeugen in den nächsten Jahren zu unterstützen (Kap. II.1.4, II.3.6 u. II.3.1.2); wichtige und kostengüns-

tige Maßnahmen im Bereich der Ladeinfrastruktur betreffen dagegen die Normung und Regulierung.

Von den verschiedenen Ladetechnologien erscheint das konduktive (d. h. kabelgebundene) Laden am aussichtsreichsten (Kap. II.1.4). Aus Sicht von Nutzern in den Modellregionen des BMVBS ist dies unproblematisch in der Handhabung und leicht zu erlernen (Kap. III.3.1.3). Der Batteriewechsel würde zwar ähnlich wie das Tanken konventioneller Fahrzeuge nur eine kurze Unterbrechung der Fahrt bzw. kurze Standzeiten von Elektrofahrzeugen erforderlich machen; mit einer breiten Einführung entsprechender Systeme ist jedoch in Deutschland aufgrund technischer sowie finanzieller Aspekte und vermutlich mangelnder Akzeptanz für einen Tausch der eigenen Batterie mit einer fremden nicht zu rechnen (Kap. II.1.4 u. III.3.1.2). Ein Batteriewechselsystem kann aber für einen lokal begrenzten, hochausgelasteten Markt mit standardisierten Fahrzeugen, z. B. Taxis, durchaus sinnvoll sein (Kap. II.1.4.3).

In Hinblick auf konduktive Lademöglichkeiten verfügt die überwiegende Mehrheit (über 60 Prozent) der Pkw-Nutzer in Deutschland über eine Garage oder einen festen Stellplatz am Haus, wo eine solche Lademöglichkeit gegeben bzw. leicht zu installieren wäre (Kap. II.1.4). In ländlichen Gebieten oder kleinen und mittleren Städten, wo die Mehrheit der frühen Käufergruppen erwartet wird, liegt die garagen- und hausnahe Stellplatzdichte sogar noch deutlich höher. Somit lassen sich Elektrofahrzeuge von den frühen potenziellen Käufergruppen i. d. R. gut zuhause laden. Die Erfahrungen aus Demonstrationsprojekten zeigen dementsprechend, dass bisherige Nutzer von Elektrofahrzeugen überwiegend zuhause oder am Arbeitsplatz laden und bereits vorhandene öffentliche Lademöglichkeiten kaum genutzt werden (Kap. III.3.1.2). Aus dieser Perspektive erscheint für Elektrofahrzeuge der Ausbau einer großen Zahl von zusätzlichen Lademöglichkeiten für eine Markteinführung nicht nötig – im Gegensatz zu FCEV, für deren Markteinführung eine Infrastruktur in Form von Wasserstofftankstellen erst in größerer Anzahl errichtet werden muss (Kap. II.1.5).

Dennoch äußern interessierte Konsumenten sowie bisherige Nutzer z. T. den Wunsch nach einem Infrastrukturausbau, der es ihnen ermöglicht, die Fahrzeuge auch unterwegs bzw. tagsüber zu laden; d. h., neben Lademöglichkeiten am Arbeitsplatz werden auch Ladestationen im öffentlichen Bereich gewünscht (Kap. III.3.1.2). Bei zunehmender Erfahrung mit Elektrofahrzeugen und vorhandenen Lademöglichkeiten sowie bei steigender Reichweite der Fahrzeuge aufgrund technologischen Fortschritts könnte weitere Infrastruktur aber auch aus Sicht der Konsumenten weniger bedeutsam werden.

Der Ausbau von öffentlichen Ladestationen zum konduktiven Laden an zentralen Orten scheint daher in der Phase der Marktvorbereitung und -einführung für die Sichtbarkeit von Elektromobilität und die Reduktion von Unsicherheit vor der Kaufentscheidung förderlich (Kap. II.3.6 u. III.3.1.2). Für die tatsächliche Alltagstauglichkeit von Elektrofahrzeugen in der jetzigen Phase der Markteinfüh-

zung wird er aber nicht als entscheidend betrachtet (Kap. II.1.4 u. III.3.1.2).

Die Aufgabe, öffentliche Ladeinfrastruktur an zentralen Orten zu schaffen, liegt bei den Kommunen, deren Aktivitäten zur Förderung der Elektromobilität so wiederum sichtbar gemacht werden können (Kap. II.3.6). Ein einfacher, ordnungsrechtlicher Rahmen erscheint wichtig, um Kommunen den Ausbau von Infrastruktur zu erleichtern. Dies umfasst auch Regelungen der Straßenverkehrsordnung, um existierende Parkplätze mit Ladesäulen gesondert ausweisen zu können (Kap. III.3.2.3).

Als weitere Maßnahme im Bereich Normung und Regulierung erscheinen eine Standardisierung und einheitliche Ausgestaltung von Steckern und Ladeformen auf deutscher und europäischer Ebene notwendig, um Planungs- und Investitionssicherheit sowohl für private Nutzer als auch die Industrie zu schaffen (Kap. II.2.3, II.2.4 u. II.5.2). Weder für induktives noch für induktives Laden sind bisher europaweite Normen verfügbar (Kap. II.1.4). Langfristig sind außerdem Maßnahmen sinnvoll, die Nutzern von Elektrofahrzeugen die Nutzung von Ladesäulen verschiedener Betreiber unkompliziert und ohne Kosten Nachteile ermöglichen (in verschiedenen Regionen sind bisher unterschiedliche Zugangssysteme in Betrieb) (Kap. II.1.4.2). Sämtliche genannten regulativen Maßnahmen im Bereich der Ladeinfrastruktur vermindern die Komplexität und erleichtern die Nutzung von Elektrofahrzeugen.

Auch wenn somit in einer frühen Marktphase kein umfassender Ausbau einer öffentlichen Ladeinfrastruktur nötig erscheint, sollte der Bedarf zu einem späteren Zeitpunkt erneut geprüft werden, da mit fortschreitender Marktentwicklung jene Pkw-Besitzer als potenzielle Käufer relevanter werden könnten, welche aktuell nicht über leicht realisierbare Möglichkeiten für ein Laden zuhause verfügen (Kap. II.1.4).

## 2.6 Neue Mobilitätskonzepte

Für eine nachhaltige Integration der Elektromobilität in die Verkehrssysteme ist eine Förderung von speziellen Nutzungskonzepten wie multimodalen Mobilitätsangeboten, Flottenbetrieb, Carsharing sowie Taxibetrieb zu empfehlen (Kap. II.3). In diesen Bereichen stellen Elektrofahrzeuge oft eine sinnvolle Ergänzung dar, da zum Teil hohe Jahresfahrleistungen erreicht werden und andere Fahrzeuge oder Verkehrsmittel zum Ausgleich etwaiger Reichweitenbeschränkungen zur Verfügung stehen. Insbesondere multimodale Mobilitätsangebote bieten sich für eine nachhaltige Integration von Elektrofahrzeugen an und können den Nutzern je nach Bedürfnis das passende Verkehrsmittel zu einfachen und transparenten Bedingungen zur Verfügung stellen (Kap. II.3.3, III.3.1 u. III.3.2). Elektrofahrzeuge bzw. -zweiräder im Rahmen von Car- und Bikesharing oder im Taxibetrieb ermöglichen, diejenigen Wege umweltschonender zurückzulegen, die nicht oder nur mit großem Aufwand mit dem Umweltverbund bewältigt werden können. Entsprechende Vorschläge und Konzepte für umfassende Mobilitätsangebote erscheinen

auch aus Nutzersicht zukunftsweisend und attraktiv (Kap. III.3.1 u. III.3.2).

Zudem leistet ein solcher Einsatz einen wirkungsvollen Beitrag zur Sichtbarkeit und Erfahrbarkeit von Elektrofahrzeugen. Durch eine zunehmende Sichtbarkeit von Elektrofahrzeugen im öffentlichen Raum kann bei den Konsumenten die Wahrnehmung gefördert werden, dass Elektrofahrzeuge alltagstauglich sind. Mobilitätsangebote, welche die Nutzung von Elektrofahrzeugen z. B. im Rahmen von Carsharing oder in gewerblichen Flotten ermöglichen, erlauben es interessierten Konsumenten, die neue Technologie im Alltag zu erfahren und zu überprüfen, ob sie zu den eigenen Gewohnheiten, Bedürfnissen und Einstellungen passt, ohne dass sie die noch hohen Anschaffungskosten der Fahrzeuge tragen müssen (Kap. III.3.1.3). Auch andere Testmöglichkeiten, welche ein Ausprobieren von Elektrofahrzeugen im Alltag ohne große Hürden ermöglichen, können die Zahl der Personen deutlich steigern, die Elektromobilität erlebt haben und damit eher bereit sind, diese Antriebstechnologie beim Fahrzeugkauf in Erwägung zu ziehen. Auch derartige Aspekte erscheinen verbesser- und ausbaubar (Kap. III.3.1).

Neben Carsharingflotten ist der Einsatz vor allem auch in gewerblichen Flotten (Dienstleister, Flotten des Bundes, der Länder und Kommunen) aus ökologischer sowie wirtschaftlicher Sicht sinnvoll. Geeignete Regulierungen und Anreize für den generellen Einsatz in Flotten können Umweltzonen und längere Zufahrtszeiten für Innenstädte für Elektrofahrzeuge, die Bereitstellung von Stellplätzen für Sharingsysteme, Standards für Buchungs- und Abrechnungssysteme sowie Roamingvorschriften zwischen verschiedenen Mobilitätsdienstleistern darstellen (Kap. II.3).

Bei vielen dieser Maßnahmen kommt den Kommunen eine wichtige Rolle zu. Bisher fehlen hier jedoch noch bundeseinheitliche Regelungen bzw. gesetzliche Grundlagen, beispielsweise zur Ausweisung von Stellplätzen für Carsharingfahrzeuge oder Elektrotaxis (Kap. II.3.6). Der Bundesverband CarSharing schlägt konkret die Anpassung von Straßenverkehrsgesetz und Straßenverkehrsordnung vor, sodass Carsharingstellplätze zu marktgängigen Gebühren im öffentlichen Raum zur Verfügung gestellt werden können (Kap. II.3.2; bcs 2012c).

## 3. Schlussfolgerungen und Handlungsoptionen

Elektromobilität wird in den nächsten 2 Dekaden ein wichtiger Bestandteil des Mobilitätssystems in Deutschland und der Welt werden. Bei zielorientierter Gestaltung der Nutzung kann diese Entwicklung dazu beitragen, die beiden Jahrhundertprobleme des Verkehrs zu lösen bzw. zumindest deutlich abzumildern: Treibhausgasemissionen und Knappheit fossiler Ressourcen. Eine signifikante Reduktion der Treibhausgasemissionen sowie des Verbrauchs fossiler Ressourcen kann nur erreicht werden, wenn der Strom zum Betrieb der Fahrzeuge aus erneuerbaren Energien erzeugt wird. Damit ist eine umweltfreundliche Elektromobilität direkt an das Gelingen der Energiewende gekoppelt. Einen direkten positiven Beitrag zur Energiewende leistet die Elektromobilität zudem

dadurch, dass Elektrofahrzeuge helfen können, fluktuierende erneuerbare Energieträger besser in das Energiesystem zu integrieren. Elektrofahrzeuge stellen flexible, steuerbare Lasten dar und die Fahrzeugbatterien können somit als Stromspeicher dienen. Um diese Potenziale auszunutzen, ist auf eine entsprechende energiewirtschaftliche Integration, u. a. durch intelligente Steuerungskonzepte und ein entsprechendes Lademanagement, zu achten. Dies schließt auch die Anpassung der gesetzlichen Rahmenbedingungen und die Standardisierung ein. Neben dem Klimawandel und der Ressourcenverfügbarkeit kann die Elektromobilität aber auch in anderen wichtigen Problemfeldern einen positiven Beitrag leisten, z. B. durch eine Verringerung der Lärmemissionen des Straßenverkehrs in Wohngebieten in den sensiblen Abend- und Nachtstunden sowie durch positive Effekte auf die Beschäftigung in Deutschland sowie das BIP-Wachstum.

Das Ziel, bis 2020 1 Million Elektrofahrzeuge in Deutschland auf die Straßen zu bringen, scheint unter den aktuellen Rahmenbedingungen und ohne deutliche Kauf- oder andere Anreize jedoch nur schwer erreichbar zu sein. Wichtige Rahmenbedingungen sind allerdings von großer Unsicherheit geprägt. Beispielsweise können ein stark steigender Ölpreis oder stark sinkende Batterie- und Fahrzeugkosten zu dynamischen Marktentwicklungen führen. Das Ziel von mindestens 6 Millionen Elektrofahrzeugen in Deutschland bis 2030 erscheint dagegen realisierbar, da zu erwarten ist, dass sich die Bedingungen für die Elektromobilität künftig weiter verbessern.

Es empfiehlt sich deshalb, Fördermaßnahmen immer zeitlich befristet einzuführen sowie regelmäßige Überprüfungen bzw. Anpassungen der Ausgestaltung vorzusehen, um auf geänderte Rahmenbedingungen reagieren zu können und Effektivität und Effizienz zu gewährleisten. Dennoch ist es wichtig, entsprechend bewilligte Fördervorhaben schnell umsetzen zu können, um nicht hinter die internationale Konkurrenz zurückzufallen. Zudem sollten Fördermaßnahmen auf die relevanten Zielgruppen und vielversprechenden Erstmärkte ausgerichtet und kompatibel mit den Strategien der Automobilhersteller sein. Folgende Schlussfolgerungen können für die Förderung der Elektromobilität gezogen werden.

Die Nutzung erneuerbarer Energien für den Betrieb von Elektrofahrzeugen sollte durch Regulierung bzw. Fördermaßnahmen sichergestellt werden. Da die große Mehrheit potenzieller Käufer Strom aus erneuerbaren Energien wünscht, aber z. T. Zweifel hinsichtlich der Bereitstellung hat, sollte die Politik für ein transparentes und vertrauenswürdigen System zur Sicherstellung des Strombezugs aus regenerativen Energien sorgen. Zweifel an der Umweltbilanz können die Akzeptanz der Nutzer gefährden.

Bei einer Marktanschubfinanzierung von einigen Tausend Euro ist zu erwarten, dass in den nächsten Jahren vorrangig Einsatzbereiche und Nutzungskonzepte angesprochen werden, welche eine hohe Fahrleistung der Fahrzeuge aufweisen. Für viele potenzielle Käufer dürfte der Kaufpreis dagegen auch bei einer gewissen Mehrpreisbereitschaft noch zu hoch liegen. Zu einem späteren Zeitpunkt, wenn die Anschaffungspreise entsprechend gesunken

sind, kann ein Anreiz effektiver sein, um breitere Segmente anzusprechen.

Monetäre Anreize für den Kauf von Elektrofahrzeugen ließen sich aufgrund vermiedener externer Kosten in Höhe von 1 800 bis 3 200 Euro rechtfertigen, wobei der ökologische Rucksack aufgrund der Fahrzeugherstellung nicht berücksichtigt ist. Ein Einbezug dieser Umweltauswirkungen reduziert die errechneten Werte um ca. 10 bis 25 Prozent. Bei einer solchen Förderung muss allerdings sichergestellt sein, dass der Strom für den Fahrzeugbetrieb aus zusätzlichen erneuerbaren Energiequellen stammt. Aufgrund der globalen Luftschadstoffbelastungen aus der Fahrzeugherstellung sind zudem eine nachhaltige, d. h. auf sozialen und ökologischen Ausgleich bedachte, Rohstoffpolitik der Industriestaaten wie auch möglichst hohe Recyclingquoten zu empfehlen.

Auch die gesamtwirtschaftlichen Analysen weisen auf positive Auswirkungen einer Verbreitung der Elektromobilität hin. Allerdings sind die Auswirkungen monetärer Anreizmaßnahmen noch nicht ausreichend untersucht, um eine Förderhöhe abzuleiten.

Bei Kaufsubventionen für Elektrofahrzeuge ist zu berücksichtigen, dass für die Hersteller bereits durch die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte der EU deutliche Anreize bestehen, neben Effizienzverbesserungen von konventionellen Pkw Fahrzeugen mit niedrigen CO<sub>2</sub>-Emissionen (Elektrofahrzeuge und FCEV) einzuführen. Auch für sie lohnt es sich unter Umständen, die Kosten für Strafzahlungen bei der Gestaltung der Preise für alternative Fahrzeuge zu berücksichtigen, sodass möglicherweise eine weitere Reduktion der Kaufpreise erzielt werden könnte. Zur wirkungsvollen Förderung der Elektromobilität sollte in diesem Zusammenhang auch eine frühzeitige Festlegung auf eine zukünftige Verschärfung der EU-Verordnung 443/2009 angestrebt werden.

Auch Regulierungen und nichtmonetäre Anreize könnten sich bei zunehmender Praxiserfahrung als effektives Instrument erweisen, um die Nutzung von Elektromobilität zu fördern. Es sollte allerdings darauf geachtet werden, dass dies nicht zu Konflikten mit dem Umweltverbund, also dem öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV), Fuß- und Radverkehr führt.

Für eine nachhaltige Verbreitung der Elektromobilität sollte auch die Einbindung von Elektrofahrzeugen in die sich entwickelnden neuen Mobilitätskonzepte im Zusammenhang mit Carsharing, ÖPNV und Bikesharing gefördert werden. Gestaltende Maßnahmen betreffen z. B. eine förderliche Stellplatzregelung für Carsharing, Standards für Buchungs- und Abrechnungssysteme sowie Roaming-Vorschriften zwischen verschiedenen Mobilitätsdienstleistern. Für gewerbliche Flotten können geeignete Regulierungen effektive Maßnahmen sein, z. B. Umweltzonen und die Ausdehnung von zeitlichen Lieferfenstern für innerstädtische Anlieferungen durch Elektrofahrzeuge.

Auch Demonstrationsprojekte, Modellregionen etc. sind gute Instrumente, um Elektromobilität für die Gesellschaft bzw. den Kunden erfahrbar zu machen. Dies erhöht

Akzeptanz und Vertrauen in die neue Technologie sowie die Nutzungsbereitschaft.

Im Vergleich zu monetären Kaufanreizen scheint die Förderung von FuE zum jetzigen Zeitpunkt eher angezeigt. Der Batterie kommt eine Schlüsselrolle für die Wertschöpfung der Elektromobilität zu, aber auch Schlüsseltechnologien wie Leistungselektronik und Elektromotoren spielen eine wichtige Rolle und sollten durch FuE auch mittel- und langfristig gefördert werden.

Ein subventionierter umfassender Ausbau von öffentlicher Ladeinfrastruktur erscheint derzeit aufgrund der hohen Verfügbarkeit bzw. leichten Installierbarkeit privater Lademöglichkeiten nicht dringlich. Ein Ausbau von öffentlichen Ladestationen sollte sich aktuell auf wenige gut zugängliche Stellen konzentrieren, um in Notfällen ein Nachladen zu ermöglichen, v.a. aber, um Hemmschwellen bzw. Befürchtungen bzgl. einer unzureichenden Reichweite abzubauen und die Sichtbarkeit der Elektromobilität zu erhöhen.

Bzüglich infrastrukturellen Erfordernissen erscheint ein politisches Engagement wichtiger, das auf die einheitli-

che Normung von Ladesystemen und einen langfristig diskriminierungsfreien Zugang zu Ladeinfrastrukturen gerichtet ist. Maßnahmen zur Normung und Regulierung sind auch für Exportchancen und Möglichkeiten der internationalen Markterschließung für die deutsche Automobil- und Zulieferindustrie von Bedeutung. Zu einem späteren Zeitpunkt der Marktentwicklung sollte der Bedarf eines weiteren Ausbaus öffentlicher Ladeinfrastruktur jedoch erneut überprüft werden.

Insgesamt wird deutlich, dass die Potenziale und Herausforderungen der Elektromobilität nur aus einer umfassenden und langfristigen Perspektive angemessen bewertet werden können. Auf lange Sicht bietet die Elektromobilität bedeutsame ökologische Vorteile wie auch wirtschaftliche Chancen. Eine angemessene Integration der Elektromobilität in die Energiesysteme ist notwendig, diese erscheint aber durchaus machbar. Für die Realisierung der Potenziale müssen die noch bestehenden Herausforderungen konsequent angegangen werden, indem Forschung und Entwicklung weiter vorangetrieben und geeignete politische Maßnahmen umgesetzt werden.

## Literatur

### 1. In Auftrag gegebenes Gutachten

Bünger, U., Weindorf, W. (2011): Well-to-Wheel-Analyse von Elektrofahrzeugen. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn

### 2. Weitere Literatur

A. T. Kearney (2009): Sparsam, sauber, elektrisch? Das Rennen um den Antrieb der Zukunft (Autoren: Klink, G., Krubasik, S., Rings, T.). Düsseldorf

ADAC (Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e. V.) (2009): ADAC-Umfrage: Kaufbereitschaft Elektroautos. Landsberg a. Lech

Agosti, R. (2011): Nutzerakzeptanz von Elektroautos. Untersuchung eines frühen Stadiums der Innovationsdiffusion bei verschiedenen Nutzergruppen. Unveröffentlichte Lizenzarbeit, Universität Zürich, Fraunhofer ISI, Zürich/Karlsruhe

AIM (Automotive Institute for Management) (2012): Aktuelles AIM Carsharing Barometer 2012: Große Marktpotenziale für privates und gewerbliches Carsharing. Presseinformation, [www.aim-eps.de/?p=1142](http://www.aim-eps.de/?p=1142) (9.4.2013)

AMADEE+COMPANY (2009): Lithium-Ion and Nickel-Metal Hydride Batteries, Lithium, Rare Earth Lanthanum and the Future of Hybrid Electric Vehicles, Plug-In Hybrid Electric Vehicles and Electric Vehicles. Bay Harbor Islands

Ambafrance (2011): Frankreich nimmt die Herausforderungen der Elektromobilität an. Zwei Millionen saubere Fahrzeuge bis Januar 2020. [www.ambafrance-at.org/IMG/pdf/Elektromobilitat\\_II-1.pdf](http://www.ambafrance-at.org/IMG/pdf/Elektromobilitat_II-1.pdf) (9.4.2013)

Angerer, G., Erdmann, L., Marscheider-Weidemann, F., Scharp, M., Lüllmann, A., Handke, V., Marwede, M. (2009a): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Stuttgart

Angerer, G., Marscheider-Weidemann, F., Wendl, M., Wietschel, M. (2009b): Lithium für Zukunftstechnologien – Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität, Karlsruhe

Angerer, G., Mohring, A., Marscheider-Weidemann, F., Wietschel, M. (2010): Kupfer für Zukunftstechnologien. Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität. Fraunhofer ISI, Karlsruhe

Argus, difu (LK Argus Kassel GmbH, Deutsches Institut für Urbanistik) (2010): Expertise „Mobilität Münster/Münsterland 2050“. Kassel/Berlin

Automobilwoche (2012): Renault und LG Chem planen Batterie-Fertigung in Frankreich. Artikel vom 27.7.2012, [www.automobilwoche.de/article/20120727/NACH\\_RICH\\_TEN/120729912/1280/renault-und-lg-chem-planen-batterie-fertigung-in-frankreich#.UWQhQJOeP2E](http://www.automobilwoche.de/article/20120727/NACH_RICH_TEN/120729912/1280/renault-und-lg-chem-planen-batterie-fertigung-in-frankreich#.UWQhQJOeP2E) (9.4.2013)

Ball, M., Seydel, P., Wietschel, M., Stiller, C. (2009): Hydrogen-infrastructure buildup in Europe. In: Ball/Wietschel (2009), S. 385–453

Ball, M., Wietschel, M. (eds.) (2009): The Hydrogen Economy. Opportunities and Challenges. Cambridge

BCG (Boston Consulting Group) (2009): The Comeback of the Electric Car? How Real, How Soon, and What Must Happen Next. [www.bcg.com/documents/file15404.pdf](http://www.bcg.com/documents/file15404.pdf) (11.3.2013)

bcs (Bundesverband CarSharing e. V.) (2011): Veränderungen fordern die Branche – wir gestalten den Wandel. Jahresbericht 2010. Berlin

bcs (2012a): Positionspapier Elektromobilität und Car-Sharing. Juli 2012. Berlin

bcs (2012b): CarSharing macht einen großen Sprung nach vorn. Pressemitteilung vom 16.2.2012, Berlin

bcs (2012c): Nationaler Entwicklungsplan CarSharing. Das „bessere Auto“ für lebenswerte Städte und flexible Menschen. Berlin

Beck, T., Albrecht, S., Fischer, M. (2010): Umweltrechner auf Grundlage der Studie „Nachhaltigkeit von Verpackungssystemen für Obst- und Gemüsetransporte in Europa basierend auf einer Lebenszyklusanalyse – Aktualisierung 2009“. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Lehrstuhl für Bauphysik der Universität Stuttgart, Stuttgart

Begon, C. (2011): Strategien der Verkehrsunternehmen: Integration von kollektiver Fahrzeugnutzung, Elektromobilität und integrierten Angeboten. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Fraunhofer ISI und Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

Biere, D., Dallinger, D., Wietschel, M. (2009): Ökonomische Analyse der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft 33(2), S. 173–181

Blättel-Mink, B., Buchsbaum, M., Dalichau, D., Hattenhauer, M., Weber, J. (2011): Sozialwissenschaftliche Begleitforschung Modellregion E-Mobilität Rhein-Main. Akzeptanz und Optimierung durch Nutzerinnen und Nutzer. Projektbericht, Frankfurt a.M.

Blesl, M., Bruchof, D., Hartmann, N., Özdemir, D., Fahl, U., Eltrop, L., Voß, A. (2009): Entwicklungsstand und Perspektiven der Elektromobilität. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart, Stuttgart

BMJ (Bundesministerium der Justiz) (2006): Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung – 16. BImSchV). Geändert durch Art. 3 G v. 19.9.2006 I 2146, [www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschv\\_16/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschv_16/gesamt.pdf) (11.4.2013)

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2011): Das Energiekonzept der Bundesregierung 2010 und die Energiewende 2011. Berlin

BMU (2012): Zeitreihen zur erneuerbaren Entwicklung in Deutschland. [www.erneuerbare-energien.de/erneuerbare\\_energien/datenservice/zeitreihen/doc/45919.php](http://www.erneuerbare-energien.de/erneuerbare_energien/datenservice/zeitreihen/doc/45919.php) (31.7.2012)

- BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) (Hg.) (2005): Bundesverkehrswegeplan 2003. Die gesamtwirtschaftliche Bewertungsmethodik. Berlin
- BMVBS (Hg.) (2011): Verkehr in Zahlen. Verschiedene Jahrgänge, Berlin
- BMW (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) (2010): Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO) nimmt Fahrt auf. Gemeinsame Pressemitteilung des BMW und des BMVBS vom 1.2.2010, Berlin, [www.bmw.de/BMWi/Navigation/Presse/pressemitteilungen,did=329290.html/](http://www.bmw.de/BMWi/Navigation/Presse/pressemitteilungen,did=329290.html/) (11.3.2013)
- BMW, BMU (2007): Bericht zur Umsetzung der in der Kabinettsklausur am 23./24.08.07 in Meseberg beschlossenen Eckpunkte für ein Integriertes Energie- und Klimaprogramm. Berlin, [www.bmw.de/Dateien/BMWi/PDF/gesamtbericht-iekp.property=pdf,bereich=bmw,sprache=de,rwb=true.pdf/](http://www.bmw.de/Dateien/BMWi/PDF/gesamtbericht-iekp.property=pdf,bereich=bmw,sprache=de,rwb=true.pdf/) (11.3.2013)
- BMW, BMU (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin
- Bratzel, S., Lehmann, L. (2010): Jugend und Automobil 2010. Eine empirische Studie zu Einstellungen und Verhaltensmustern von 18- bis 25-Jährigen in Deutschland. Fachhochschule der Wirtschaft, Arbeitspapier 2010–03, Bergisch-Gladbach
- Bruce, I., Butcher, N., Fell, C. (2012): Lessons and insights from experience of electric vehicles in the community. Proceedings of Electric Vehicle Symposium 26, Los Angeles
- Buchert, M., Jenseit, W., Dittrich, S., Hacker, F., Schüler-Hainsch, E., Ruhland, K., Knöfel, S., Goldmann, D., Rasenack, K., Treffer, F. (2011): Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität. Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Öko-Institut e. V., Daimler AG, TU Clausthal, Umicore, Darmstadt
- Buller, U., Marscheider-Weidemann, F., Wietschel, M. (2012): Alternativen bei drohender Rohstoffknappheit. In: Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft 2, S. 37–43
- Bundesregierung (2009): Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Berlin
- Bundesregierung (2011): Regierungsprogramm Elektromobilität. Berlin
- Bundesregierung (2012): Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG). Konsolidierte (unverbindliche) Fassung des Gesetzestextes in der ab 1. Januar 2012 geltenden Fassung, Berlin
- Bundesverband eMobilität e.V. (2012): Nissan LEAF: Leasingrückläufer als preislich attraktive Angebote. [www.bem-ev.de/nissan-leaf-leasingrucklaufer-als-preislich-attraktive-angebote/](http://www.bem-ev.de/nissan-leaf-leasingrucklaufer-als-preislich-attraktive-angebote/) (11.3.2013)
- Busch, N. E. (2010). Die Elektrifizierung betrieblicher Flotten: Individuelle und organisationale Einflüsse auf die Adoptionsbereitschaft. Unveröffentlichte Lizentiatsarbeit, Universität Zürich, Fraunhofer ISI, Zürich/Karlsruhe
- cambio (2012): Elektroautos im CarSharing jetzt auch in Köln. Pressemitteilung vom 10.2.2012, Köln. [www.cambio-carsharing.de/cms/carsharing/de/1/cms\\_f3\\_64/cms\\_f4\\_4/cms?cms\\_knuuid=5458b3d1-edfb-4c27-87fe-6d03cc61a922](http://www.cambio-carsharing.de/cms/carsharing/de/1/cms_f3_64/cms_f4_4/cms?cms_knuuid=5458b3d1-edfb-4c27-87fe-6d03cc61a922) (15.3.2012)
- Canzler, W., Knie, A. (2011): Einfach Aufladen. München
- CE Delft, INFRAS, Fraunhofer ISI (2011): External Costs of Transport in Europe. Update Study for 2008. Delft
- CGGC (Center on Globalization, Governance & Competitiveness, Duke University) (ed.) (2010): Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles: The U.S. Value Chain. Durham
- CRS (Congressional Research Service) (ed.) (2011): Battery Manufacturing for Hybrid and Electric Vehicles: Policy Issues. CRS Report for Congress R41709, Washington, D.C.
- Dallinger, D., Wietschel, M. (2012): Renewable and Sustainable Energy Reviews. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, S. 3370–3382
- Dallinger, D., Krampe, D., Wietschel, M. (2011): Vehicle-to-grid regulation reserves based on a dynamic simulation of mobility behavior. In: IEEE Transactions on Smart Grid 2(2), S. 302–313
- DAT (Deutsche Automobil Treuhand) (2011): DAT Report 2011. Ostfildern
- DB (Deutsche Bahn) (2011a): Deutsche Bahn startet e-Call a Bike in Aachen im öffentlichen Verleih. Presseinformation vom 26.9.2011, Berlin
- DB (2011b): Winterpause bei Call a Bike. Presseinformation vom 16.12.2011, Berlin
- DBSV (Deutscher Blinden- und Sehbehindertenverband e. V.) (2011): Sicherheit für nicht-motorisierte Verkehrsteilnehmer bei geräuscharmen Fahrzeugen. Berlin
- Deloitte (Deloitte & Touche GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft) (2010): Förderung von e-Mobility. Konjunkturpakete und andere konjunkturelle Anreize fördern die Entwicklung alternativer Fahrzeuge. [www.deloitte.com/assets/Dcom-Germany/Local%20Assets/Documents/08\\_Fertigungsindustrie/2010/DE\\_Automotive\\_Driving\\_emobility\\_230610\\_safe.pdf](http://www.deloitte.com/assets/Dcom-Germany/Local%20Assets/Documents/08_Fertigungsindustrie/2010/DE_Automotive_Driving_emobility_230610_safe.pdf) (11.3.2013)
- Deutsche Bank Company Research (2009): Electric Cars: Plugged In 2. A mega-theme gains momentum [www.fulermoney.com/content/2009-11-03/ElectricCarsPluggedIn2.pdf](http://www.fulermoney.com/content/2009-11-03/ElectricCarsPluggedIn2.pdf) (11.3.2013)
- Deutsche Welle (2012): French auto industry gets government boost. [www.dw.de/french-auto-industry-gets-government-boost/a-16123432](http://www.dw.de/french-auto-industry-gets-government-boost/a-16123432) (11.3.2013)

- Deutsches Kupferinstitut (2011): Sparen mit dem Sparmotor. Energieeffiziente Antriebsstränge mit Motoren nach IEC 60034-30. Düsseldorf
- DLR, Fraunhofer IWES, IFNE (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Ingenieurbüro für neue Energien) (2010): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global „Leitstudie 2010“. Berlin
- DLR, Fraunhofer ISE, RWTH Aachen, FGH (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V.) (2012): Perspektiven von Elektro-/Hybridfahrzeugen in einem Versorgungssystem mit hohem Anteil dezentraler und erneuerbarer Energiequellen. Schlussbericht, BMWi FKZ 0328005 A-C, Stuttgart u. a.O.
- DOE (U.S. Department of Energy) (2006): Fuel Cell Handbook. Morgantown, [www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/fuelcells/seca/pubs/FCHandbook7.pdf](http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/fuelcells/seca/pubs/FCHandbook7.pdf) (11.3.2013)
- DOE (2013): EV Everywhere Grand Challenge: DOE's 10-Year Vision for Plug-in Electric Vehicles. [www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/electric\\_vehicles/m/10\\_year\\_goal.html](http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/electric_vehicles/m/10_year_goal.html) (7.5.2013)
- Doll, C., Gutmann, M., Wietschel, M. (2011): Integration von Elektrofahrzeugen in Carsharing-Flotten – Simulation anhand realer Fahrprofile. Fraunhofer ISI, Karlsruhe
- Doll, C., Hartwig, J., Senger, F., Schade, W., Maibach, M., Sutter, D., Bertschmann, D., Lambrecht, U., Knörr, W., Dünnebeil, F. (2013): Wirtschaftliche Aspekte nichttechnischer Maßnahmen zur Emissionsminderung im Verkehr. FKZ 370945140 (Entwurf Schlussbericht), Fraunhofer ISI, INFRAS, IFEU, Karlsruhe u. a.O.
- Doll, C., Kley, F. (2011): Infrastrukturen für integrierte Elektromobilitätssysteme. In: Mager, T. J. (Hg.): Nachhaltige Mobilität – vom Mobilitätsmanagement bis zur Elektromobilität. Köln
- DST, VKU (Deutscher Städtetag, Verband kommunaler Unternehmen e. V.) (2010): Elektromobilität – kommunale Unternehmen machen nachhaltig mobil. Berlin
- Dudenhöffer, F., Pietron, K. (2010): CNG as automotive fuel for Europe/CEE is it possible to achieve 5 % + X market share for CNG? Necessary steps and actions to achieve? CAR-Center Automotive Research, Duisburg/ Essen
- Dudenhöffer, K., Hause, L. (2011): Hörbare Vehikel. Experimente zur Geräuschwahrnehmung von Elektroautos durch Handicap-Gruppen. In: UNIKATE 39, S. 52–61
- Dudenhöffer, K., Hause, L. (2012): Geräuschwahrnehmung von Elektroautos. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift 3, S. 258–263
- Dütschke, E., Schneider, U., Hoffmann, J. (2011): Was erwarten künftige Nutzer von elektrischen Fahrzeugen? Zwischenanalyse der Nutzerbefragung aus den Modellregionen des BMVBS. Fraunhofer ISI, Karlsruhe
- Ebike Online (2012): Der E-Bike/Pedelec-Boom in Zahlen. Marktentwicklung E-Bikes in Deutschland. [www.elektrobike-online.com/news/rad-szene-und-tourismus/der-e-bike-pedelec-boom-in-zahlen.524360.410636.htm](http://www.elektrobike-online.com/news/rad-szene-und-tourismus/der-e-bike-pedelec-boom-in-zahlen.524360.410636.htm) (16.3.2013)
- ECotality, INL (Idaho National Laboratory) (2012): The EV Project. Q1 2012 Report. [www.theevproject.com/downloads/documents/Q1%202012%20EVP%20Report.pdf](http://www.theevproject.com/downloads/documents/Q1%202012%20EVP%20Report.pdf) (16.3.2013)
- EEA (European Environment Agency) (2010a): Monitoring of CO<sub>2</sub> emissions from passenger cars – Regulation 43/2009. [www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/co2-cars-emission-1/](http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/co2-cars-emission-1/) (16.3.2013)
- EEA (2010b): EEA Good practice guide on noise exposure and potential health effects. Technical Report 11/2010, Kopenhagen
- EEA (2012): Nitrogen oxide emissions still a major problem in Europe. Pressemitteilung der Europäischen Umweltagentur (EEA) [www.eea.europa.eu/highlights/nitrogen-oxide-emissions-still-a](http://www.eea.europa.eu/highlights/nitrogen-oxide-emissions-still-a) (16.3.2013)
- EK (Europäische Kommission) (2008): HyWays – The European Hydrogen Energie Roadmap. [ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/energy/docs/hyways-roadmap\\_en.pdf](ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/energy/docs/hyways-roadmap_en.pdf)
- EK (2010): Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on refining critical raw materials. Brüssel, [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf) (16.3.2013)
- EK (2011): Weißbuch. Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem. KOM(2011) 144 endgültig, Brüssel
- EK (2012): Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council amending Regulation (EC) No 443/2009 to define the modalities for reaching the 2020 target to reduce CO<sub>2</sub> emissions from new passenger cars. COM(2012) 393 final 2012/0190 (COD) Brussels
- Elsner, H., Melcher, F., Schwarz-Schampera, U., Buchholz, P. (2010): Elektronikmetalle – zukünftig steigender Bedarf bei unzureichender Versorgungslage? Commodity Top News 33, BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe), Hannover
- Energy Trend (2012): [www.energytrend.com.tw/EV\\_20120614\\_4](http://www.energytrend.com.tw/EV_20120614_4) (3.7.2012)
- EPRI (Electric Power Research Institute) (2007): Environmental Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles – Volume 1: Nationwide Greenhouse Gas Emissions. Palo Alto
- Ernst, T. (2011): Sozialwissenschaftliche Begleitung der Modellregionen Elektromobilität Fokus: Elektromobilität und Stadt. Institut für Arbeitswissenschaft und Tech-

- nologiemanagement IAT der Universität Stuttgart. Präsentation vom 29.9.2011, Frankfurt a. M.
- ESMT (European School of Management and Technology) (2011): Marktmodell Elektromobilität. Berlin
- EU (Europäische Union) (2007): Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge. Straßburg/Brüssel
- EU (2009): Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emission von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen. Straßburg/Brüssel
- European Expert Group (2011): Future Transport Fuels. European Expert Group on Transport Fuels. [www.efoa.eu/en/document/2011-01-25-report-of-the-european-expert-group-on-future-transport-fuels.aspx](http://www.efoa.eu/en/document/2011-01-25-report-of-the-european-expert-group-on-future-transport-fuels.aspx) (16.3.2013)
- Fenn, B., Metz, D. (2009): Smart Grids mit dezentralen Speichern im Verteilnetz. In: Chichowski, R. R.: Jahrbuch Anlagentechnik 2010, S. 29–42
- FfE (Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.) (2010): Modellregion Elektromobilität München. Szenarien für das Potenzial an Elektrofahrzeugen im Münchner Individualverkehr bis 2030. München
- Fifo (Finanzwissenschaftliches Forschungsinstitut an der Universität zu Köln) (2011): Steuerliche Behandlung von Firmenwagen in Deutschland (Autoren: Diekmann, L., Gerhards, E., Klinski, S., Meyer, B., Schmidt, S., Thöne, M.). FiFo-Bericht Nr. 13, [www.foes.de/pdf/2011\\_Firmenwagenbesteuerung\\_lang.pdf](http://www.foes.de/pdf/2011_Firmenwagenbesteuerung_lang.pdf) (16.3.13)
- Follmer, R., Engelhardt, K., Gilberg, R., Kunert, U., Kloas, J., Kuhfeld, H. (2003): Mobilität in Deutschland 2002. Kontinuierliche Erhebung zum Verkehrsverhalten. Endbericht. infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften GmbH, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin
- Follmer, R., Gruschwitz, D., Jesske, B., Quandt, S., Lenz, B., Nobis, C., Köhler, K., Mehlin, M. (2010a): Mobilität in Deutschland 2008. Ergebnisbericht. Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends. infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften GmbH, Institut für Verkehrsforschung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Bonn/Berlin
- Follmer, R., Gruschwitz, D., Jesske, B., Quandt, S., Lenz, B., Nobis, C., Köhler, K., Mehlin, M. (2010b): Mobilität in Deutschland 2008 – Tabellenband. infas Institut für angewandte Sozialwissenschaften GmbH, Institut für Verkehrsforschung des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt e. V., Bonn/Berlin
- Fraunhofer ISI (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung) (2008): Quo vadis Elektromobilität? (Autoren: Wietschel, M., Dallinger, D.). In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 58(12), S. 8–15
- Fraunhofer ISI (2011): Marktpenetrationsszenarien Elektromobilität. Unveröffentlichter Bericht, Karlsruhe
- Fraunhofer ISI (2012a): Roadmap zur Kundenakzeptanz. Zentrale Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung in den Modellregionen. Technologie-Roadmapping am Fraunhofer ISI: Konzepte – Methoden – Praxisbeispiele Nr. 3, Berlin/Karlsruhe
- Fraunhofer ISI (2012b): Energiespeicher-Monitoring für die Elektromobilität (EMOTOR). Länderbericht Teil 1, Karlsruhe
- Fraunhofer ISI, IPK, IML, IAO, IBP, IZM, UMSICHT (2011): Untersuchung von Gesamtkonzepten und Gestaltungsoptionen der Elektromobilität, Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität (FSEM). Teilprojekt 4D, Karlsruhe
- Frederick, S., Loewenstein, G., O'Donoghue, T. (2002): Time Discounting and Time Preference: A Critical Review. In: Journal of Economic Literature 40(2), S. 351–401
- Freitag, M., Student, D. (2009): Autoindustrie. Der große Crash. In: Manager Magazin 3, S. 26–37
- Frost & Sullivan (2007): Global Market Analysis of Plug in Hybrid Electric Vehicles. London
- Frost & Sullivan (2011a). Strategic Analysis of Battery Technologies for Electric and Hybrid Vehicles in South Korea. Seoul
- Frost & Sullivan (2011b): The evolution of the supply chain in the automotive industry – The Evolution of the Automotive Ecosystem – The Emerging Business Models & Stakeholders. London
- FuelCellToday (2006): Technology Report. [www.fuelcelltoday.com/online/survey-landing-page/Technology](http://www.fuelcelltoday.com/online/survey-landing-page/Technology) (5.3.2012)
- Gauch, M., Widmer, R., Notter, D., Stamp, A., Althaus, H. J., Wäger, P. (2009): LCA of Li-Ion batteries for electric vehicles. EMPA (Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research), Dübendorf
- Genoese, F., Wietschel, M. (2011): Großtechnische Stromspeicheroptionen im Vergleich. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 61(6), S. 26–31
- Gnann, T., Plötz, P. (2011): Status Quo und Perspektiven der Elektromobilität in Deutschland. Working Paper Sustainability and Innovation No. S 14/2011. Fraunhofer ISI, Karlsruhe
- Gnann, T., Plötz P., Wietschel, M. (2012a): Infrastruktur für Elektromobilität: Stand und Perspektiven in Deutschland. Fraunhofer ISI, Karlsruhe

- Gnann, T., Plötz, P., Zischler, F., Wietschel, M. (2012b): Elektromobilität im Personenwirtschaftsverkehr – eine Potenzialanalyse. Fraunhofer ISI, Karlsruhe
- Goodman, J. D. (2010): An Electric Boost for Bicyclists. In: New York Times vom 01.02.12., New York, [www.nytimes.com/2010/02/01/business/global/01ebike.html?\\_r=1](http://www.nytimes.com/2010/02/01/business/global/01ebike.html?_r=1) (6.8.2012)
- Götz, K., Sunderer, G., Birzle-Harder, B., Deffner, J. (2011): Attraktivität und Akzeptanz von Elektroautos. Arbeitspaket 1 des Projekts OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Anhang zum Schlussbericht im Rahmen der Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität des BMU, ISOE (Institut für sozial-ökologische Forschung). Frankfurt a.M.
- Graham-Rowe, E., Gardner, B., Abraham, C., Skippon, S., Dittmar, H., Hutchins, R., Stannard, J. (2011): Mainstream consumers driving plug-in battery-electric and plug-in hybrid electric cars: A qualitative analysis of responses and evaluations. In: Transportation Research Part A, 46(1), S. 140–153
- Haan, P. de, Mueller, M.G., Peters, A. (2007): Anreizsysteme beim Neuwagenkauf: Wirkungsarten, Wirksamkeit und Wirkungseffizienz. Bericht zum Schweizer Autokaufverhalten Nr. 14, Bericht EMDM1561, ETH Zürich, IED, NSSI, Zürich
- Hacker, F., Harthan, R., Hermann, H., Kasten, P., Loreck, C., Seebach, D., Timple, C., Zimmer, W. (2011): Betrachtung der Umweltentlastungspotenziale durch den verstärkten Einsatz von kleinen, batterieelektrischen Fahrzeugen im Rahmen des Projekts „E-Mobility“. Öko-Institut im Auftrag des BMVBS, Freiburg
- Hahnel, U. J. J., Götz, S., Spada, H. (2011): Introducing human factors psychology to vehicle-to-grid technologies. In: Proceedings of the 3rd European Conference Smart Grids and E-Mobility, 3, S. 23–30
- Hatton, C., Beella, S., Brezet, J., Wijnia, Y. (2009): Charging stations for urban settings the design of a product platform for electric vehicle infrastructure in Dutch cities. In: Electric Vehicle Symposium 24, S. 1–13. Starvanger [www.e-mobile.ch/pdf/2010/EVS-24-1230095.pdf](http://www.e-mobile.ch/pdf/2010/EVS-24-1230095.pdf) (28.4.2011)
- Hausman, J. A. (1979): Individual Discount Rates and the Purchase and Utilization of Energy-Using Durables. In: The Bell Journal of Economics 10(1), S. 33–54
- Held, M., Baumann, M. (2011): Assessment of the environmental impacts of electric vehicle concepts. 43rd LCA Discussion Forum, Life Cycle Assessment of Electromobility, ETH Zürich
- Helms, H., Jöhrens, J., Hanusch, J., Höpfner, U., Lambrecht, U., Pehnt, M. (2011a): UMBReLA Umweltbilanzen Elektromobilität. Ergebnisbericht. Gefördert durch das BMU im Rahmen des FuE-Programms „Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität“ Förderkennzeichen 16EM0040. IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg
- Helms, H., Jöhrens, J., Hanusch, J., Höpfner, U., Lambrecht, U. und Pehnt, M. (2011b): UMBReLA Umweltbilanzen Elektromobilität. Wissenschaftlicher Grundlagenbericht. Gefördert durch das BMU im Rahmen des FuE-Programms „Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität“ Förderkennzeichen 16EM0040. IFEU, Heidelberg
- Heymann, E., Zähres, M. (2009): Automobilindustrie am Beginn einer Zeitenwende. Deutsche Bank Research, Frankfurt a. M.
- HM (Her Majesty's Treasury) (2006): Stern Review on the Economics of Climate Change. London
- Hoenderdaal, S., Tercero Espinoza, L., Marscheider-Weidemann, F., Graus, W. (2013): Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies? Energy 49, S. 344–355
- IEA (International Energy Agency) (2005): Prospects for Hydrogen and Fuel Cells. Paris
- IEA (2009): How the Energy Sector Can Deliver On A Climate Agreement in Copenhagen: Special early excerpt of the World Energy Outlook 2009 from the Bangkok UNFCCC meeting. Paris
- IEA (2010): Energy Technology Perspectives 2010. Paris, [www.iea.org/techno/etp/index.asp](http://www.iea.org/techno/etp/index.asp) (5.3.2012)
- IFAM, DFKI (Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz) (2011): Sehbehinderte und blinde Menschen testen Elektroautos: Müssen bald spürbare Fahrzeuge her? Presseinformation im Rahmen der Modellregion Elektromobilität Bremen-Oldenburg, gefördert durch das BMVBS, Bremen
- IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung) (2011): UmweltMobilCheck. Wissenschaftlicher Grundlagenbericht. Im Auftrag der Deutschen Bahn AG. Heidelberg
- ifmo (Institut für Mobilitätsforschung) (2011): Mobilität junger Menschen im Wandel – multimodaler und weiblicher. München
- India Budget (2011–2012): Highlights of Union Budget 2011–2012. [www.india.gov.in/events/budget2011.php?pg=5](http://www.india.gov.in/events/budget2011.php?pg=5) (31.7.2012)
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007): Fourth Assessment Report Climate Change 2007 (AR4). Synthesis Report. Klimarat der Vereinten Nationen, World Meteorological Organization (WMO), Genf
- IZT (Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung) (2004): Nachhaltige Bestandsbewirtschaftung nicht erneuerbarer knapper Ressourcen, Handlungsoptionen und Steuerungsinstrumente am Beispiel von Kupfer und Blei (Autoren: Erdmann, L., Handke, V., Klinski, S., Behrendt, S., Scharp, M.). Werkstatt Bericht 68, Berlin
- Jochem, E., Schön, M., Angerer, G., Ball, M., Bradke, H., Wietschel, M., Eichhammer, W., Mannsbart, W., Marscheider-Weidemann, F., Nathani, C., Walz, R., Celik, B.

- (2004): Werkstoffeffizienz. Einsparpotenziale bei Herstellung und Verwendung energieintensiver Grundstoffe. Stuttgart
- Jordan, T. (2008): Wasserstofftechnologie. Vorlesungsskript am Institut für Kern- und Energietechnik des Forschungszentrums Karlsruhe GmbH (heute: Karlsruher Institut für Technologie, KIT), Version 2.3 vom 14. April 2008. [www.hysafe.org/download/1576/Wasserstofftechnologie\\_V2p3.pdf](http://www.hysafe.org/download/1576/Wasserstofftechnologie_V2p3.pdf) (15.3.2012)
- Jossen, A., Weydanz, W. (2006): Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen. Inge Reichardt Verlag. Untermeitingen
- Kahn Ribeiro, S., Kobayashi, S., Beuthe, M., Gasca, J., Greene, D., Lee, D. S., Muromachi, Y., Newton, P. J., Plotkin, S., Sperling, D., Wit, R., Zhou, P. J. (2007): Transport and its infrastructure. In: Metz, B., Davidson, O. R., Bosch, P. R., Dave, R., Meyer, L. A. (Hg.) (2007): Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge/New York, S. 325–385
- Kaiser, O., Eickenbusch, H., Grimm, V., Zweck, A. (2008): Zukunft des Autos. Graz. Studie erstellt durch die Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH im Auftrag des VDI e. V. [www.vditz.de/fileadmin/media/publications/pdf/Band\\_75.pdf](http://www.vditz.de/fileadmin/media/publications/pdf/Band_75.pdf) (15.3.2012)
- KBA (Kraftfahrt-Bundesamt) (2011a): Bestand an Personenkraftwagen am 1. Januar 2011 nach Bundesländern sowie privaten und gewerblichen Haltern absolut. Flensburg [www.kba.de/cln\\_030/nn\\_268956/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Halter/2011\\_b\\_halter\\_dusl\\_absolut.html](http://www.kba.de/cln_030/nn_268956/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Halter/2011_b_halter_dusl_absolut.html) (7.3.2012)
- KBA (2011b): Bestand an Personenkraftwagen am 1. Januar 2011 nach Bundesländern und Kraftstoffarten absolut. Flensburg [www.kba.de/cln\\_030/nn\\_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/EmissionenKraftstoffe/2011\\_b\\_emi\\_eckdaten\\_absolut.html](http://www.kba.de/cln_030/nn_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/EmissionenKraftstoffe/2011_b_emi_eckdaten_absolut.html) (7.3.2012)
- KBA (2012): Emissionen, Kraftstoffe – Deutschland und seine Länder am 1. Januar 2011. Flensburg [www.kba.de/cln\\_030/nn\\_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/EmissionenKraftstoffe/2011\\_b\\_emi\\_eckdaten\\_absolut.html](http://www.kba.de/cln_030/nn_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/EmissionenKraftstoffe/2011_b_emi_eckdaten_absolut.html) (7.3.2012)
- Kentzler, M. (2009): HyFLEET:CUTE – Hydrogen Transports, Bus Technology and Fuels for TODAY and for a Sustainable Future. A report on the Achievements and Learnings from The HyFLEET:CUTE Project 2006–2009, Kirchheim/Teck
- Kiepe, F. (2012): Mobilitätsanforderungen der Zukunft in den Städten. Präsentation im Rahmen der Kommunalkonferenz „Elektromobilität in Kommunen 2012“ am 24.1.2012, Düsseldorf
- Kinkel, S., Zanker, C. (2007): Globale Produktionsstrategien in der Automobilzulieferindustrie. Berlin/Heidelberg
- Kley, F. (2011): Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge – Entwicklung und Bewertung einer Ausbaustrategie auf Basis des Fahrverhaltens. Fraunhofer ISI, Stuttgart
- Kley, F., Wietschel, M. (2010): Vergleich des Elektrorollers Elmoto mit herkömmlichen Rollern bezüglich Energieeffizienz und CO<sub>2</sub>-Emissionen. Kurzstudie im Auftrag der EnBW. Fraunhofer ISI, Karlsruhe
- Knie, A., Berthold, O., Harms, S., Truffer, B. (1999): Die Neuerfindung urbaner Automobilität. Elektroautos und ihr Gebrauch in den USA und Europa. Berlin
- Knie, A., Kramer, S., Scherf, C., Wolter, F. (2012): E-Carsharing als Bestandteil multimodaler Angebote. In: Internationales Verkehrswesen 64(1), S. 42–45
- Kohlberg, R. (2011): Die E-Bike-Trends 2012. In: Mobility-2.0 3/2011, S. 20–22
- Krail, M. (2009): System-Based Analysis of Income Distribution Impacts on Mobility Behaviour. Baden-Baden
- Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K. H., Haberl, H., Fischer-Kowalski, M. (2009): Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. In: Ecological Economics 68(10), S. 2696–2705
- Kurani, K., Heffner, R., Turrentine, T. (2007): Driving Plug-In Hybrid Electric Vehicles: Reports from U.S. Drivers of HEVs converted to PHEVs, circa 2006–07. University of California, Davis
- Landeshauptstadt Stuttgart (2011): Mit Elektrounterstützung in Stuttgart radeln. Erstmals können Pedelecs ausgeliehen werden. Presseinformation vom 28.10.2011 der Landeshauptstadt Stuttgart, Deutsche Bahn AG und EnBW Vertrieb GmbH, Stuttgart
- Leduc, G, Mongelli, I., Uihlein, A., Nemry, F. (2010): How can our cars become less polluting? An assessment of the environmental improvement potential of cars. In: Transport Policy 17, S. 409–419
- Link, H., Herry, M., Sedlacek, N., Lindberg, G., Johansson, P., Nilsson, J.-E., Schreyer, C., Maibach, M., van Donselaar, P., Carmighelet, H., Jansson, J.-O., Ericsson, R., Matthews, B., Nash, C., Himanen, V., Idström, T., Tsamboulas, D., Korizis, D., Kopsacheili, A. (2002): Unification of accounts and marginal costs for transport efficiency, Deliverable 10: Case Studies on Marginal Infrastructure Costs. Project funded by the 5th RTD framework program of the European Commission. Leeds
- Lödl, M., Witzmann, R., Metzger, M. (2010): Abschätzung des Speicherbedarfs in Niederspannungsverteilnetzen mit einem hohen Anteil dezentraler und fluktuierender Einspeisung. Konferenzbeitrag: Kraftwerk Batterie Mainz
- LUBW (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg) (2008): Ammoniak in der Umwelt. Messprogramme und Messergebnisse 2003–2007. Karlsruhe
- Lue, X. (2012): Die Fördermaßnahmen zur Entwicklung LIB in Südkorea, IEK, ITRI, Taipei

- Lynas (2011): Sydney. [www.lynascorp.com](http://www.lynascorp.com) (28.4.2011)
- Maibach, M., Schreyer, C., Sutter, D., Essen, H. P. van, Boon, B. H., Smokers, R., Schroten, A., Doll, C., Pawlowska, B., Bak, M. (2008): Handbook on estimation of external costs in the transport sector. Deliverable D1, Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport (IMPACT). INFRAS, CE Delft, Fraunhofer ISI, University of Gdansk, Delft
- Maibach, M., Suter, D., Lückge, H. (2012): Mit der Umwelt Rechnen. Eine Handlungsanleitung für den Einbezug von externen Kosten in die Entscheidungsfindung. Zürich
- McKinsey (2009): Roads toward a low-carbon future: Reducing CO<sub>2</sub> emissions from passenger vehicles in the global road transportation system. New York
- McKinsey (2011): A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis – The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. [www.zeroemissionvehicles.eu/](http://www.zeroemissionvehicles.eu/) (12.12.2011)
- Mercer Management Consulting, FhG-IPA, FhG-IML (eds.) (2004): Future automotive industry structure (FAST) 2015 – Die neue Arbeitsteilung in der Automobilindustrie. Verband der Automobilindustrie (VDA). In: Materialien zur Automobilindustrie 32, Frankfurt a. M.
- METI (Ministry of Economy, Trade and Industry) (2010). Announcement of the Next-Generation Vehicle Strategy 2010. Tokyo, [www.meti.go.jp/english/press/data/20100412\\_02.html](http://www.meti.go.jp/english/press/data/20100412_02.html) (12.12.2011)
- Michaelis, J., Plötz, P., Gnann, T., Wietschel, M. (2012, in Vorbereitung): Vergleich alternativer Antriebstechnologien Batterie-, Plugin Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeug. In: Jochem, P., Poganietz, W.-R., Grunwald, A., Fichtner, W. (Hg.): Alternative Antriebskonzepte bei sich wandelnden Mobilitätsstilen. Tagungsband des KIT (Karlsruher Institut für Technologie). Karlsruhe
- MIIT (Ministry of Industry and Information Technology, China) (2012): Entwicklungsplan für energieeffiziente und auf neuen Energieträgern basierende Fahrzeuge (2012–2020)
- MIT (Massachusetts Institute of Technology) (2008): On the Road in 2035: Reducing Transportation's Petroleum Consumption and GHG Emissions. Cambridge
- MKE (Ministry of Knowledge Economy) (2010): Plans to strengthen Competitiveness on Rechargeable Battery. Seoul
- MOF (Ministry of Finance, China) (2010): Ankündigung über Durchführung der Subvention des privaten Erwerbs von NEV in Pilotstädten. Beijing
- MOST (Ministry of Science and Technology) (2010): 863 key technology and system integration project for EVs. Beijing
- MOST (2012): Technologischer Entwicklungsplan der EV im Rahmen des 12. Fünfjahresplans (FYP). Beijing
- NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization) (2011): R&D of High-performance Batteries for Next-generation Vehicles in NEDO. 7th International Energy-Efficiency and New Energy Vehicles Innovation Development Forum and Exhibition, Seoul/Beijing
- NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) (2009): Incidence of Pedestrian and Bicyclist Crashes by Hybrid Electric Passenger Vehicles. Washington, D.C.
- NPE (Nationale Plattform Elektromobilität) (2010a): Die deutsche Normungs-Roadmap. Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung. Berlin, [www.elektromobilitaet.din.de/sixcms\\_upload/media/3310/Normung-Roadmap\\_Elektromobilitaet.pdf](http://www.elektromobilitaet.din.de/sixcms_upload/media/3310/Normung-Roadmap_Elektromobilitaet.pdf) (28.4.2011)
- NPE (2010b): Zwischenbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung, Berlin
- NPE (2011a): Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung, Berlin
- NPE (2011b): Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität – Anhang. Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung, Berlin
- NPE (2012): Dritter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung, Berlin
- OECD, IEA (Organization for Economic Co-Operation and Development, International Energy Agency) (2009): Technology Roadmap Electric and plug-in hybrid electric vehicles. Paris
- OECD, IEA (2011): Technology Roadmap Electric and plug-in hybrid electric vehicles (update). Paris
- Ökonews.at (2011): Keine Gefahr mit leisen Elektroautos. Orth, [http://oekonews.ch/index.php?mdoc\\_id=1060773](http://oekonews.ch/index.php?mdoc_id=1060773) (19.7.2011)
- Paetz, A.-G., Dütschke, E. (2012): Auf dem Weg in die elektromobile Zukunft – Ein Zwischenfazit zur Elektromobilität im Alltag. In: SIV.news 01/2012, S. 45–47
- Paetz, A.-G., Dütschke, E., Unterländer, M., Fichtner, W., Wietschel, M. (2011): Variable electricity tariffs: How are they perceived in households and individual traffic by consumers? Präsentationsfolien, ENERDAY Dresden
- Paetz, A.-G., Landzettel, L., Fichtner, W. (2012): Wer nutzt Pedelecs und warum? In: Internationales Verkehrswesen 64(1), S. 34–37
- PBL (Netherlands Environmental Assessment Agency) (2009): Electric driving. Evaluating transitions based on system options. Bilthoven
- Pehnt, M. (2002): Energierevolution Brennstoffzelle? Perspektiven, Fakten, Anwendungen. Weinheim

- Pehnt, M., Helms, H., Lambrecht, U., Dallinger, D., Wietschel, M., Heinrichs, H., Kohrs, R., Link, J., Trommer, S., Pollok, T., Behrens, P. (2011): Elektroautos in einer von erneuerbaren Energien geprägten Energiewirtschaft. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft 35(3), S. 221–234
- Peters, A., Agosti, R., Popp, M., Ryf, B. (2011): Elektroautos in der Wahrnehmung der Konsumenten: Zusammenfassung der Ergebnisse einer Befragung in Deutschland. Fraunhofer ISI, Karlsruhe
- Peters, A., Dütschke, E. (2010): Zur Nutzerakzeptanz von Elektromobilität: Analyse aus Expertensicht. Fraunhofer ISI, Karlsruhe
- Peters, A., Hoffmann, J. (2011): Nutzerakzeptanz von Elektromobilität: Eine empirische Studie zu attraktiven Nutzungsvarianten, Fahrzeugkonzepten und Geschäftsmodellen aus Sicht potenzieller Nutzer. Fraunhofer ISI, Karlsruhe
- Plötz, P., Eichhammer, W. (2011): Zukunftsmarkt effiziente Elektromotoren. Fallstudie im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative“, FKZ 03KSW016A und B, im Auftrag des BMU, Karlsruhe
- Plötz, P., Gnnann, T., Wietschel, M. (2012a): Total Ownership Cost Projection for the German Electric Vehicle Market with Implications for Future Power and Electricity Demand. In: Proceedings of Enerday-Conference 2012, Dresden
- Plötz, P., Kley, F., Wietschel, M. (2012b): Marktanalyse Fahrzeugtypen für Elektromobilität bis 2030. Unveröffentlichtes Arbeitspapier, Karlsruhe
- Plötz, P., Schneider, U., Gnnann, T., Wietschel, M. (2012c): Zwischenbericht „Wir machen Baden-Württemberg e-mobil“. Im Auftrag der EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Fraunhofer ISI, Karlsruhe
- Prognos, EWI, GWS (Prognos AG, Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung) (2010): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Projekt Nr. 12/10 des BMWi. Basel u. a. O.
- Prognos, EWI, GWS (2011): Energieszenarien 2011. Endbericht im Projekt Nr. 12/10 des BMWi. Basel u. a. O.
- Prognos, Öko-Institut (2009): Modell Deutschland – Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. Endbericht einer Studie im Auftrag des WWF (World Wide Fund For Nature) Deutschland. Basel/Berlin
- PwC, Fraunhofer IAO (PricewaterhouseCoopers AG, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation) (2010): Elektromobilität – Herausforderungen für Industrie und öffentliche Hand. Frankfurt/Stuttgart
- Realli, Green Energy Consultant (2012): The Trend Analysis of Li-B Info. In: Li-B Industry Research Monthly Reports. Beijing
- Roland Berger (2008): Powertrain 2020 – The future drives electric. (Autoren: Valentine-Urbschat, M., Bernhart, W.). In: Automotive InSights, Automotive Competence Center Client Magazine 02\_2008, S. 6–13
- Roland Berger (2009): Powertrain 2020 – China's ambition to become market leader in E-Vehicles. München/Shanghai
- SAE International (2010): SAE standard on EV charging connector approved, Warrendale, [www.sae.org/mags/AEI/7479](http://www.sae.org/mags/AEI/7479) (28.4.2011)
- Samsung SDI (2011): Consolidated Financial Statements.
- Sato, T. (2011): R&D of High-performance Batteries for Next-generation Vehicles in NEDO, Smart Community Department, NEDO, in 7th International Energy-Efficiency and New Energy Vehicles Innovation Development Forum and Exhibition
- Sauer, D.U. (2006): Optionen zur Speicherung elektrischer Energie in Energieversorgungssystemen mit regenerativer Stromerzeugung. In: Solarzeitalter 4/2006, S. 12–34
- Schade, W. (2005): Strategic Sustainability Analysis: Concept and application for the assessment of European Transport Policy. Baden-Baden
- Schade, W. (2011): Reducing greenhouse-gas emissions of transport beyond 2020: linking R&D, transport policies and reduction targets: Final Conference Summary Note. Karlsruhe
- Schade, W., Lüllmann, A., Beckmann, R., Köhler, J. (2009): IEKP-Makro – Gesamtwirtschaftliche Wirkungen von Energieeffizienzmaßnahmen in den Bereichen Gebäude, Unternehmen und Verkehr. Climate Change Series 8/2009, Umweltbundesamt (Hg.), Dessau-Roßlau
- Scharf, A. (2007): Leistungselektronik beschleunigt Hybridfahrzeuge. Haar [www.elektroniknet.de/automotive/technik-know-how/antriebstechnik/article/659/-0/Leistungselektronik\\_beschleunigt\\_Hybridfahrzeuge](http://www.elektroniknet.de/automotive/technik-know-how/antriebstechnik/article/659/-0/Leistungselektronik_beschleunigt_Hybridfahrzeuge) (28.4.2011)
- Schedler, D. (2009): Kontaktlose Energieübertragung – Neue Technologie für mobile Systeme. Süddeutscher Verlag onpact GmbH, München
- Schneider, U., Dütschke, E., Peters, A. (2013, ). How does the actual usage of electric vehicles influence consumer acceptance? In: Hülsmann, M., Fornahl, D. (eds.): Evolutionary Paths towards the Mobility Patterns of the Future. Bremen
- Schraven, S., Kley, F., Wietschel, M. (2011): Induktives Laden von Elektromobilen – Eine techno-ökonomische Bewertung. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft, 35(3), S. 209–219
- Schröder/Park (2010): Sachbericht – E-Mobility in Korea. Wissenschaftsreferat, Botschaft Seoul, Seoul

- Schubert, K. (2011): Vergleich externer Effekte von Elektro- und Verbrennungsfahrzeugen. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Karlsruher Institut für Technologie und Fraunhofer ISI, Karlsruhe
- Schüth, F., Felderhoff, M., Bogdanovic, B. (2007): Komplexe Hydride als Materialien für die Wasserstoffspeicherung. Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf
- Seydel, P. (2008): Entwicklung und Bewertung einer langfristigen regionalen Strategie zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur – auf Basis der Modellverknüpfung eines Geografischen Informationssystems und eines Energiemodells. Zürich
- Shell (2009): Shell Pkw-Szenarien bis 2030: Fakten, Trends und Handlungsoptionen. Shell Deutschland Oil GmbH, Hamburg
- Sinus (Sinus Markt- und Sozialforschung GmbH) (2011). Fahrrad-Monitor Deutschland 2011 – Ergebnisse einer repräsentativen Online-Befragung. Heidelberg
- Sirch, O. (2008): Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Vortrag im Rahmen der ersten Fachtagung „Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen“ vom Haus der Technik, München
- Skinner, I., van Essen, H., Smokers, R., Hill, N. (2010): EU Transport GHG: Routes to 2050? Towards the decarbonisation of the EU's transport sector by 2050. London
- Smith, R., Shahidinejad, S., Blair, D., Bibeau, E. L. (2011): Characterization of urban commuter driving profiles to optimize battery size in light-duty plug-in electric vehicles. In: Transportation Research Part D 16, S. 218–224
- Smokers, R., Fraga, F., Verbeek, M., Bleuanus, S., Sharpe, R., Dekker, H., Verbeek, R., Willems, F., Foster, D., Hill, N., Norris, D., Brannigan, C., van Essen, H., Kampman, B., den Boer, E., Schilling, S., Gruhlke, A., Breemers, T., De Ceuster, G., Vanherle, K., Wrigley, S., Owen, N., Johnson, A., De Vleeschauwer, T., Valla, V., Anand, G. (2011): Support for the revision of Regulation (EC) No 443/2009 on CO<sub>2</sub> emissions from cars. Final report. Brussels
- Sørensen, B. (2004): Total life-cycle assessment of PEM fuel cell car. Roskilde University, Roskilde
- SRU (Rat von Sachverständigen für Umweltfragen) (2005): Umwelt und Straßenverkehr. Hohe Mobilität – umweltverträglicher Verkehr. Sondergutachten, Berlin
- Stahlecker, T., Lay, G., Zanker, C. (2011): Elektromobilität: Zulieferer für den Strukturwandel gerüstet? Status quo und Handlungsempfehlungen für den Automobilstandort Metropolregion Stuttgart. Industrie- und Handelskammer Stuttgart (Hg.), Stuttgart
- Statista (2012a): Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktors für den Strommix in Deutschland von 1990 bis 2010 (in Gramm/Kilowattstunde). Hamburg, [http://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissions-](http://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/)
- [faktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/](http://de.statista.com/statistik/daten/studie/38893/umfrage/co2-emissionen-durch-stromerzeugung-in-deutschland-seit-1990/) (2.3.2012)
- Statista (2012b): Höhe der Kohlendioxid-Emissionen durch Stromerzeugung in Deutschland in den Jahren von 1990 bis 2010 (in Mio. Tonnen). Hamburg, [http://de.statista.com/statistik/daten/studie/38893/umfrage/co2-emissionen-durch-stromerzeugung-in-deutschland-seit-1990](http://de.statista.com/statistik/daten/studie/38893/umfrage/co2-emissionen-durch-stromerzeugung-in-deutschland-seit-1990/) (2.3.2012)
- Statistisches Bundesamt (2009a): Statistik der schwerbehinderten Menschen 2007. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2009b): Bevölkerung Deutschlands bis 2060. 12. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Begleitmaterial zur Pressekonferenz vom 18.11.2009 in Berlin, Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2011): Verkehrsunfälle 2010. Fachserie 8, Reihe 7. Wiesbaden
- T&E (Transport & Environment) (2011): European Federation of Transport and Environment: How clean are Europe's cars? An analysis of carmaker progress towards EU CO<sub>2</sub> targets in 2010. Brussels
- TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2008): Energiespeicher – Stand und Perspektiven (Autorin: Oertel, D.). Sachstandsbericht zum Monitoring „Nachhaltige Energieversorgung“, TAB-Arbeitsbericht Nr. 123, Berlin
- TAB (2012): Zukunft der Automobilindustrie (Autoren: Schade, W., Hettesheimer, T., Kinkel, S., Kühn, A., Zanker, C.). Innovationsreport, TAB-Arbeitsbericht Nr. 152, Berlin
- Tanaka, S. (2010): Japanese Automobile Industry and Automobile Industry Policy. Director, Automobile Division, Manufacturing Industries Bureau, Ministry of Economy, Trade and Industry (METI)
- Technomar, TÜV Süd, Energie & Management Verlagsgesellschaft (2009): Ergebnisse der Gemeinschaftsuntersuchung: Kurz- und mittelfristige Erschließung des Marktes für Elektroautomobile Deutschland – EU. München
- Thielmann, A., Isenmann, R., Wietschel, M. (2010): Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030, Karlsruhe
- Topp, H. (2011): Städtische Mobilität ohne Emissionen – eine Vision? In: INSIGHT Newsletter 3, Düsseldorf. [www.heuer-dialog.de/insight-3-2011-Hartmut-Topp-Mobilitaetskonzepte](http://www.heuer-dialog.de/insight-3-2011-Hartmut-Topp-Mobilitaetskonzepte) (15.3.2012)
- Turrentine, T. S., Kurani, K. S. (2007): Car buyers and fuel economy? In: Energy Policy 35, S. 1213–1223
- UBA (Umweltbundesamt) (2009): Feinstaubbelastung in Deutschland. Dessau-Roßlau
- UBA (2012): Glossar zum Ressourcenschutz. Dessau-Roßlau
- UBA, EAUE (European Agency for Urban Economy) (2008): Silent City: Handbuch Umgebungslärm, Aktionsplanung und Öffentlichkeitsbeteiligung. Berlin

- UC (University of California) Berkeley (2009): Electric Vehicles in the United States: A New Model with Forecasts to 2030 (Autor: Becker, T.A.). Berkeley
- UK BERR (Department for Business Enterprise and Regulatory Reform) (2008): Investigation into the Scope for the Transport Sector to Switch to Electric Vehicles and Plug-in Hybrid. London
- UN (Vereinte Nationen) (1987): Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Brundtland Report. New York
- UN DESA (United Nations Department of Economic and Social Affairs) (2011): Commission on Sustainable Development Nineteenth Session. New York, 2–13 May 2011. Electric vehicles in the context of sustainable development in China. In: Background Paper No. 9 CSD19/2011/BP9. Robert Earley et al. The Innovation Center for Energy and Transportation (iCET)
- UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) (2011): QRTV (Quiet Road Transport Vehicles) Briefing. United Nations Economic Commission for Europe, working party on noise (GRP), informal working group on QRTV, [www.unece.org/unece/dev/colloq/way/ch/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grb/qrtv\\_bm.html](http://www.unece.org/unece/dev/colloq/way/ch/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grb/qrtv_bm.html) (10.3.2012)
- UNEP (United Nations Environment Programme) (2010): Overview of the Republic of Korea's National Strategy for Green Growth. Genf [www.unep.org/PDF/PressReleases/201004\\_unep\\_national\\_strategy.pdf](http://www.unep.org/PDF/PressReleases/201004_unep_national_strategy.pdf) (10.7.2011)
- Universität Duisburg-Essen (2012). Schlussbericht der Universität Duisburg-Essen zum Forschungsvorhaben *cognE-mobil – Simulation und Begleitforschung*. Duisburg/Essen
- Universität Karlsruhe (2008): Mobilitätspanel Deutschland (MOP) 1994-2008. Projektbearbeitung durch das Institut für Verkehrswesen der. Datenzugang durch die Clearingstelle Verkehr des DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt). [www.clearingstelle-verkehr.de](http://www.clearingstelle-verkehr.de) (12.12.2011)
- USGS (U.S. Geological Survey) (2010): Mineral Commodity Summaries Copper. Reston, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/mcs-2010-coppe.pdf> (2.8.2012)
- VaasaETT (Global Energy Think Tank) (2011): The potential of smart meter enabled programs to increase energy and systems efficiency: a mass pilot comparison (Short name: Empower Demand). Helsinki [www.peaklma.com/Files/SEDC\\_Empower\\_Demand\\_Report.pdf](http://www.peaklma.com/Files/SEDC_Empower_Demand_Report.pdf) (15.1.2012)
- VCD (Verkehrsclub Deutschland) (2008a): VCD Hintergrundpapier: CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für Pkw. Berlin
- VCD (2008b): CO<sub>2</sub>-basierte Dienstwagenbesteuerung. Berlin
- VDI (2011): Strom lässt sich speichern – Forschung mit Wasserstoff läuft auf Hochtouren. In: VDI Nachrichten [www.vdi-nachrichten.com/artikel/Strom-laesst-sich-speichern-Forschung-mit-Wasserstoff-laeuft-auf-Hochtouren/](http://www.vdi-nachrichten.com/artikel/Strom-laesst-sich-speichern-Forschung-mit-Wasserstoff-laeuft-auf-Hochtouren/) (12.8.2011)
- VDV (Verband deutscher Verkehrsunternehmen) (2010): VDV-Statistik 2010. Köln
- Virtanen, A., Lee, Y.-M. (2010): Electric Vehicles South Korea. Seoul, [www.finpro.fi](http://www.finpro.fi) (31.7.2012)
- WBCSD (World Business Council for Sustainable Development) (2004): Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability. The Sustainable Mobility Project. Full Report. Geneve [www.wbcsd.org/Pages/EDocument/EDocumentDetails.aspx?ID=69&NoSearchContextKey=true](http://www.wbcsd.org/Pages/EDocument/EDocumentDetails.aspx?ID=69&NoSearchContextKey=true) (15.1.2012)
- Weinert, J., Ogden, J., Sperling, D., Burke, A. (2008): The future of electric two-wheelers and electric vehicles in China. In: Energy Policy 36(2008), S. 2544–2555
- Weissenberger-Eibl, M., Thielmann, A., Wietschel, M., Angerer, G., Marscheider-Weidemann, F., Tercero Espinoza, L. A., Ziegau, S. (2010): Rohstoffe für Zukunftstechnologien – Herausforderung für die Batterieforschung. In: VDI Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hg.): Baden-Baden Spezial 2010 Elektrisches Fahren machbar machen, Düsseldorf, S. 19–33
- WHO, JRC (World Health Organisation, Joint Research Centre) (2011): Burden of Disease from Environmental Noise. Quantification of Healthy Life Years Lost in Europe. WHO Regional Office for Europe, European Commission JRC. Kopenhagen
- Wietschel, M. (2012): Elektromobilität in der Automobilindustrie – Neuester Kenntnisstand in Punkto Vehicle to Grid. Vortrag auf der Konferenz „Energiespeicher für Deutschland“, Düsseldorf
- Wietschel, M., Arens, M., Dötsch, C., Herkel, S., Krewitt, W., Markewitz, P., Möst, D., Scheufen, M. (2010a): Energietechnologien 2050 – Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung (Technologienbericht). Stuttgart
- Wietschel, M., Bünger, U., Weindorf, W. (2010b): Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO<sub>2</sub>-freie Endenergieträger: Endbericht. Karlsruhe
- Wietschel, M., Dallinger, D., Doll, C., Gnann, T., Held, M., Kley, F., Lerch, C., Marscheider-Weidemann, F., Mattes, K., Peters, A., Plötz, P., Schröter, M. (2011): Gesellschaftspolitische Fragestellungen der Elektromobilität: Nachhaltigkeit. Rohstoffpreise & Verfügbarkeit. Nutzerakzeptanz. Erstmärkte. Technologie. Energiewirtschaft. Gesellschaftliche Entwicklungen. Studie des Fraunhofer ISI im Rahmen der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität, gefördert vom BMBF, Karlsruhe
- Wietschel, M., Dütschke, E., Schneider, U., Plötz, P., Peters, A., Roser, A., Globisch, J. (2012): Kaufpotenzial für Elektrofahrzeuge bei sogenannten „Early Adoptern“. Fraunhofer ISI, IREES GmbH, Karlsruhe
- Wietschel, M., Kley, F., Dallinger, D. (2009): Eine Bewertung der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. In: Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft, 12(3), S. 33–41

- World Bank, PRTM (PRTM Management Consultants, Inc.) (2011): The China New Energy Vehicles Program: Challenges and Opportunities. [www.worldbank.org/research/2011/04/14082658/china-new-energy-vehicles-program-challenges-opportunities](http://www.worldbank.org/research/2011/04/14082658/china-new-energy-vehicles-program-challenges-opportunities) (15.7.2012)
- Wurzelmann, S. (2011): U.S. Department of Energy's Recovery Act Investments. Pew Center on Global Climate Change. Washington, D.C.
- Yang, C.-J. (2010): Launching strategy for electric vehicles: Lessons from China and Taiwan. In: *Technological Forecasting and Social Change* 77, S. 831–834
- Zhang, Z. (2010): The Status and Future of Electric Vehicles in China. Ministry of Science and Technology
- Zimmer, W., Buchert, M., Dittrich, M., Hacker, F., Harthan, R., Hermann, H., Jenseit, W., Kasten, P., Loreck, C., Götz, K., Sunderer, G., Birzle-Harder, B., Deffner, J. (2011): OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen – Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft. Schlussbericht im Rahmen der Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Öko-Institut Freiburg, Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE), Frankfurt a. M.
- Zischler, F. (2011): Potenzialanalyse Elektromobilität für Gemeinden in Baden-Württemberg. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Fraunhofer ISI. Karlsruhe
- Zumkeller, D., Vortisch, P., Kagerbauer, M., Chlond, B., Wirtz, M. (2011): Deutsches Mobilitätspanel (MOP), wissenschaftliche Begleitung und erste Auswertungen. Bericht 2011: Alltagsmobilität. Institut für Verkehrswesen, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe
- Zweirad-Industrie-Verband (2011): Der Fahrradmarkt. EUROBIKE-Branchengespräch am 31. August 2010. Friedrichshafen, [www.ziv-zweirad.de/public/wpk-2010-ziv-praesentation\\_31-8-2010\\_end.pdf](http://www.ziv-zweirad.de/public/wpk-2010-ziv-praesentation_31-8-2010_end.pdf) (1.1.2012)

**Anhang****1. Tabellenverzeichnis**

	Seite	
Tabelle II.1	Übersicht unterschiedlicher Antriebskonzepte . . . . .	13
Tabelle II.2	Übersicht der Stärken und Schwächen der verschiedenen Ladetechnologien . . . . .	25
Tabelle II.3	Technisch sinnvolle Ladeinfrastrukturausprägungen . . .	27
Tabelle II.4	Übersicht Marktstudien und Szenarien zur Elektro- mobilität . . . . .	33
Tabelle II.5	Vergleich von Marktpenetrationsszenarien für Elektro- fahrzeuge anhand der Neuzulassungen für ver- schiedene Jahre und Regionen (in Prozent) . . . . .	37
Tabelle II.6	Verkäufe von Elektrofahrern in Deutschland . . . . .	39
Tabelle II.7	Übersicht Marktstudien und Szenarien zu FCEV . . . . .	40
Tabelle II.8	Markthochlaufszenario für Deutschland nach Antriebs- arten und Fahrzeuggröße (Fahrzeugbestände in Millionen) . . . . .	43
Tabelle II.9	Übersicht Carsharingunternehmen mit Elektrofahr- zeugen . . . . .	45
Tabelle II.10	Maximal wirtschaftlich einsetzbare BEV nach Batterieparametern, Subventionen und Buchungs- modell in den Jahren 2015 und 2030; günstigster Fall: Batteriepreise niedrig und Kraftstoffpreis hoch . . . . .	46
Tabelle II.11	Finanzielle Ersparnis für Nutzer von Carsharing und ÖV im Rahmen von Kooperationen zwischen Carsharing und ÖPNV-Unternehmen . . . . .	49
Tabelle II.12	Endenergieverbrauch Strom und spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionsentwicklung in den analysierten Szenarien . . . . .	53
Tabelle II.13	Schrittweise Einführung des CO <sub>2</sub> -Grenzwertes gemäß EU-Verordnung 443/2009 . . . . .	66
Tabelle II.14	Kennzahlen der betrachteten Hersteller . . . . .	66
Tabelle III.1	WTW-Analyse der THG-Emissionen für konven- tionelle Fahrzeuge und Elektrofahrzeuge 2015 und 2030 . . . . .	80
Tabelle III.2	THG-Emissionen der Fahrzeugherstellung und -entsorgung Perspektive 2030 . . . . .	85
Tabelle III.3	Wichtigste fahrzeugspezifische Daten zur Ermittlung des Gesamtenergiebedarfs bis 2030 . . . . .	91
Tabelle III.4	Einsparungen externer Umwelt- und Klimakosten der WTW-Kette durch den Ersatz konventioneller Pkw mit BEV und PHEV . . . . .	96
Tabelle III.5	Zuordnung von Antriebstechnologien zu Fahrzeug- segmenten . . . . .	103

	Seite	
Tabelle III.6	Überblick über die betrachteten Fahrzeugkomponenten	104
Tabelle III.7	Entwicklung des Referenzszenarios in ASTRA . . . . .	112
Tabelle III.8	Gesamtwirtschaftliche Entwicklung im E-Mobilitäts- szenario . . . . .	112
Tabelle III.9	Kritische Rohstoffe laut EU . . . . .	116
Tabelle III.10	Kupferinventare unterschiedlicher Fahrzeugsysteme . . .	117
Tabelle III.11	Charakteristika potenzieller privater „early adopter“ (früher Käufer bzw. Nutzer) der Elektromobilität aus soziodemografischer, psychologischer und ökonomischer Perspektive . . . . .	124
Tabelle III.12	Typische Verkehrssituationen und deren Lärmreduktions- potenzial durch Elektrofahrzeuge . . . . .	129
Tabelle III.13	Vergleich urbaner Maßnahmen zur Lärminderung des Straßenverkehrs in dB(A) . . . . .	129
Tabelle III.14	Straßenverkehrsunfälle nach Verkehrsbeteiligung und Alter der Opfer 2010 . . . . .	130

## 2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung II.1	Stand und Entwicklungsziele für Batterien . . . . .	18
Abbildung II.2	Verschiedene Ladekonzepte im Überblick . . . . .	23
Abbildung II.3	Ladepunkte in den Modellregionen des BMVBS . . . . .	28
Abbildung II.4	Optionen der Wasserstoffproduktion nach Energie- trägern . . . . .	30
Abbildung II.5	Historische Entwicklung des Kraftfahrzeugbestandes (links in linearer und rechts logarithmischer Auftragung) . . . . .	32
Abbildung II.6	Kfz-Bestand in Deutschland im Jahr 2011 nach Antrieben . . . . .	32
Abbildung II.7	Marktpenetration im zweiten Bericht der NPE bei entsprechenden Maßnahmen . . . . .	38
Abbildung II.8	Marktanteile Elektrofahrräder im europäischen Vergleich in Prozent . . . . .	39
Abbildung II.9	Drei Markthochlaufszszenarien für FCEV (weltweit) . . . .	41
Abbildung II.10	Markthochlaufszszenario für Elektrofahrzeuge in Deutschland für den Fahrzeugbestand . . . . .	42
Abbildung II.11	Nettostromerzeugung aus erneuerbaren Quellen in Deutschland für 2030 gemäß Szenarien aus aktuellen Studien . . . . .	53
Abbildung II.12	Entwicklungsdynamik weltweiter Patentanmeldungen in Technologiefeldern der Elektromobilität zwischen 1994 und 2009, normiert auf 100 im Jahr 1994 . . . . .	55

	Seite	
Abbildung II.13	Anteile führender Länder an Patentanmeldungen in Technologiefeldern der Elektromobilität zwischen 2007 und 2009 in Prozent . . . . .	56
Abbildung II.14	Relative Patentanteile (RPA) weltweit führender Länder nach Technologiefeldern im Kontext der Elektromobilität auf Basis der Patentanmeldungen zwischen 2007 und 2009 . . . . .	57
Abbildung II.15	Durchschnittliche CO <sub>2</sub> -Emissionen der Hersteller im Jahr 2010 im Vergleich zu ihren spezifischen Grenzwerten 2015 und 2020 . . . . .	68
Abbildung II.16	Zur Erreichung der Grenzwerte nötige CO <sub>2</sub> -Reduktionen für verschiedene Hersteller (in Prozent) . . . . .	68
Abbildung II.17	Differenz zu herstellerspezifischen CO <sub>2</sub> -Grenzwerten für 2020 in Abhängigkeit unterschiedlicher Reduktionsraten . . . . .	69
Abbildung II.18	Anteil der Strafzahlungen in Prozent im Jahr 2020 im Vergleich zum Unternehmensgewinn im Jahr 2011 bei einer Emissionsreduktion von 3,5 Prozent pro Jahr . . . . .	70
Abbildung II.19	Notwendiger Anteil an Nullemissionsfahrzeugen an der Herstellerflotte zur Erreichung der Grenzwerte im Jahr 2020 je nach Emissionsreduktionsrate bei konventionellen Pkw . . . . .	70
Abbildung II.20	Abstand der spezifischen CO <sub>2</sub> -Emissionen zum Grenzwert für verschiedene Hersteller in Abhängigkeit des Parameters $\alpha$ bei angenommener CO <sub>2</sub> -Emissionsminderung von 3,5 Prozent pro Jahr . . . . .	71
Abbildung III.1	Entwicklung der Luftschadstoff- und THG-Emissionen des Straßenverkehrs 1990–2007 . . . . .	73
Abbildung III.2	Lebenszyklusanalyse ausgewählter Wirkungskategorien eines Mittelklasse-Pkw 2010 . . . . .	76
Abbildung III.3	Versauerungspotenzial bei der Fahrzeugherstellung . . . . .	78
Abbildung III.4	Spezifische WTW-THG-Emissionen pro Pkm 2030 . . . . .	81
Abbildung III.5	Gesamteinsparungen an THG-Emissionen durch die Nutzung von Elektrofahrzeugen mit dem deutschen Strommix (WTW-Analyse) . . . . .	82
Abbildung III.6	Gesamteinsparungen an THG-Emissionen durch die Nutzung von Elektrofahrzeugen mit Strom aus erneuerbaren Energien (WTW-Analyse) . . . . .	82
Abbildung III.7	Auswirkungen auf die Lastganglinie durch die Marktpenetration mit Elektrofahrzeugen . . . . .	84
Abbildung III.8	Vergleich aktueller Studien zu Lebenszyklus-THG-Emissionen von Pkw der Mittelklasse für den Zeitraum 2020–2030 . . . . .	86
Abbildung III.9	THG-Emissionen pro Jahr von PHEV, BEV und konventionellen Pkw 2015 und 2030 in Abhängigkeit der Jahresfahrleistung (Fahrzeugherstellung/-entsorgung und WTW-Kette) . . . . .	88

	Seite
Abbildung III.10 Vergleich THG-Emissionen konventioneller Fahrzeuge, PHEV und FCEV 2030 .....	89
Abbildung III.11 Energie- und Klimaeffizienz alternativer Antriebstechnologien, WTW-Analyse 2030 für Pkw-Klassen Mini und Mittel .....	90
Abbildung III.12 Gesamter Stromverbrauch durch BEV und PHEV bis 2030 (WTW-Analyse) .....	92
Abbildung III.13 Energieeinsparungen durch Elektrofahrzeuge bis 2030 in t Rohöl (exklusive Energieverbrauch der Elektrofahrzeuge) .....	92
Abbildung III.14 Vergleich der Kosten pro km für einen Kleinwagen als BEV und als konventionelles Fahrzeug mit einer jährlichen Fahrleistung von 14 000 km im Jahr 2015, Betrachtung mit Steuern .....	98
Abbildung III.15 Vergleich der Kosten pro km für einen Kleinwagen als BEV und als konventionelles Fahrzeug mit einer jährlichen Fahrleistung von 14 000 km im Jahr 2015, Betrachtung ohne Steuern .....	99
Abbildung III.16 Wahl der Antriebsart in Abhängigkeit der Batteriekosten bei ausschließlichem Laden zuhause .....	99
Abbildung III.17 Verteilung der PKW-Nutzer, für die ein kleines BEV im Jahr 2015 ökonomisch sinnvoll ist, nach Größe des Wohnorts .....	100
Abbildung III.18 Jahresfahrleistungen privater und gewerblicher Halter ..	101
Abbildung III.19 Angenommene Entwicklung der weltweiten Absatzmengen für Pkw bis 2030 differenziert nach Antriebstechnologien .....	105
Abbildung III.20 Globale Wertschöpfungspotenziale (elektromobilitätsrelevant = inkl. HEV und FCEV) .....	106
Abbildung III.21 Wertschöpfungspotenziale von zentralen Fahrzeugkomponenten .....	107
Abbildung III.22 Wertschöpfungspotenziale im Rahmen der Batterieherstellung .....	107
Abbildung III.23 Schematische Darstellung der Modellbeziehungen der Elektromobilität im gesamtwirtschaftlichen Kontext in ASTRA .....	110
Abbildung III.24 Veränderung der Konsumausgaben für Verkehr .....	113
Abbildung III.25 Veränderung der Steuerstruktur für Verkehr .....	114
Abbildung III.26 Veränderung der sektoralen Beschäftigung .....	114
Abbildung III.27 Kumulierter Kupferverbrauch weltweit im Dominanzszenario (Marktanteil von Elektrofahrzeugen bei Neuzulassungen: 85 Prozent) .....	118

---

	Seite
Abbildung III.28 Kumulierter Lithiumverbrauch weltweit im Dominanzszenario (Marktanteil von Elektrofahrzeugen bei Neuzulassungen 2050: 85 Prozent) . . . . .	119
Abbildung III.29 Lärmmessung mit realen Fahrzeugen . . . . .	127
Abbildung III.30 Schallpegel an Straßen in Abhängigkeit von Verkehrsstärke und Anteil geräuscharmer Fahrzeuge . . . . .	128

### 3. Abkürzungen

Äq.	Äquivalent
BEV	„battery electric vehicle“ (rein batteriegetriebenes Fahrzeug)
CO	Kohlenmonoxyd
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
dB(A)	Dezibel, Filter A
EE	erneuerbare Energien
FCEV	„fuel cell electric vehicle“ (Brennstoffzellenfahrzeug)
FSEM	Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität
FuE	Forschung und Entwicklung
Fzkm	Fahrzeugkilometer
GWh	Gigawattstunde
HEV	„hybrid electric vehicle“ (Hybridelektrofahrzeug)
ICE	„internal combustion engine“ (Verbrennungsmotor)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
km/h	Kilometer pro Stunde
kWh	Kilowattstunde
LCA	„life cycle assessment“ (Lebenszyklusanalyse)
MiD	Datensatz „Mobilität in Deutschland“
MIV	motorisierter Individualverkehr
NACE-CLIO	Nomenclature générale des Activités économiques dans les Communautés Européennes in der Version für Input-Output-Tabellen (25 Sektoren)
NMVOG	flüchtige organische Verbindungen ohne Methan
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxid
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PHEV	„plug-in hybrid electric vehicle“ (Plug-in-Hybridfahrzeug)
Pkm	Personenkilometer
PM <sub>10</sub>	Feinstaub
REEV	„range extended electric vehicle“ (reichweitenverlängerndes Elektrofahrzeug mit zusätzlichem Verbrennungsmotor)
RPA	relativer Patentanteil
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
TCO	„total cost of ownership“ (Gesamtlebenskosten)
THG	Treibhausgas
TWh	Terawattstunde
VOC	„volatile organic compounds“ (flüchtige organische Verbindungen)

## Glossar

*Bidirektionaler Anschluss* – erlaubt eine Informations- und/oder Stromübertragung in beide Richtungen. Ein bidirektional angeschlossenes Fahrzeug kann also auch Energie von seiner Batterie in das Stromnetz zurückspeisen.

*Carnot-Wirkungsgrad* – beschreibt den theoretisch maximal möglichen Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine bei der Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Energie.

*CO<sub>2</sub>-Äquivalent* – Das Treibhauspotenzial („global warming potential“, „greenhouse warming potential“ oder GWP) oder CO<sub>2</sub>-Äquivalent gibt an, wie viel eine festgelegte Menge eines Treibhausgases (THG) zum Treibhauseffekt beiträgt. Verschiedene THG haben unterschiedliche starke klimatische Wirkung. Zur einfachen Vergleichbarkeit werden diese Wirkungen alle in CO<sub>2</sub>-Wirkungen umgerechnet, sodass die gesamte Klimawirkung der verschiedenen Gase gemeinsam in einer Einheit, in g CO<sub>2</sub>-Äquivalent, angegeben werden kann.

*Elektrofahrzeug* – Fahrzeuge, die über eine Batterie verfügen, welche extern über einen Anschluss an das Stromnetz geladen werden kann. Unter diese Definition fallen reine Batteriefahrzeuge (BEV) und Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV oder REEV). Fahrzeuge mit Brennstoffzellen (FCEV) werden mitunter – in einer weiter gefassten Definition von Elektromobilität – auch als Elektrofahrzeug verstanden, im vorliegenden Bericht werden sie aber nicht zu diesen gezählt.

*Eutrophierung* – anthropogener Nährstoffeintrag in Böden und Wasser, führt zum „Umkippen“ von Gewässern und einer verstärkten Anfälligkeit von Pflanzen gegenüber Schädlingen.

*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.

*Gesamtlebenskosten oder Gesamtbetriebskosten (TCO)* – sind ein Verfahren, die gesamten Kosten aus Anschaffung und Nutzung eines Geräts oder Produkts einheitlich zu berechnen.

*Hybridantrieb oder Hybridfahrzeug (HEV)* – bezeichnet die Kombination verschiedener Antriebstechniken für den Fahrzeugantrieb. Im Falle eines Hybridfahrzeugs wird dabei zumeist ein Verbrennungs- in Kombination mit einem Elektromotor verstanden. Ein Hybridelektrofahrzeug kann teilweise elektrisch angetrieben werden. Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV) werden üblicherweise nicht dazugezählt.

*Intelligentes Stromnetz („smart grid“)* – umfasst die kommunikative Vernetzung und Steuerung von Stromerzeugern, Speichern, elektrischer Verbraucher und Netzbetriebsmitteln in Energieübertragungs- und -verteilungsnetzen der Elektrizitätsversorgung.

*Konventioneller Pkw* – unter konventionellem Pkw wird im Rahmen dieser Studie ein rein verbrennungsmotorisch angetriebener Pkw verstanden.

*Lebenszyklusanalyse (LCA)* – die Lebenszyklusanalyse ist ein ganzheitlicher Ansatz zur Analyse von Umweltbelastungen von Produkten. Auf Grundlage der stofflichen Zusammensetzung von Produkten wird ihre Umweltwirkung ermittelt, indem die verschiedenen Lebensabschnitte berücksichtigt werden. Dazu gehören neben der Nutzung eines Produkts seine Produktion, die Erzeugung der für die Nutzung benötigten Energie sowie die Entsorgung des Produkts.

*Paralleler Hybrid* – besitzt im Vergleich zum seriellen Hybrid zwei Traktionsmotoren, die beide direkt zum Antrieb eines Fahrzeugs verwendet werden können.

*Plug-in-Hybrid oder Plug-in-Hybridfahrzeug (PHEV)* – Ein Pkw mit Hybridantrieb, dessen Batterie extern über das Stromnetz geladen werden kann.

*Range-Extended-Fahrzeug (REEV)* – ein Elektrofahrzeug, das hauptsächlich rein elektrisch betrieben wird, aber über einen zusätzlichen Verbrennungsmotor verfügt, der bei Bedarf dazu dient die Batterie zu laden und so die Reichweite des Fahrzeugs erhöht. Zum Teil wird zwischen PHEV und REEV explizit unterschieden, häufig werden beide Fahrzeugkonzepte aber auch unter dem Begriff PHEV zusammengefasst, so auch in der vorliegenden Studie.

*Reines batterieelektrisches Fahrzeug (BEV)* kommt ohne Verbrennungsmotor aus und wird nur über einen Elektromotor angetrieben, der seine Energie aus einem Batteriespeicher bezieht und extern über das Stromnetz 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 zum 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.

*Sommersmog* – durch Reaktionen von NO<sub>x</sub> und den flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NM-VOC) in der Atmosphäre entsteht Ozon, welches in Bodennähe (auch Sommersmog genannt) giftig ist und Vegetation sowie Materialien schädigen kann.

*Tank-to-Wheel-Analyse (TTW-Analyse)* – Analyse unter Betrachtung der Umweltbelastungen, die während der Nutzung des Fahrzeugs durch den Einsatz des jeweiligen Energieträgers (Benzin, Diesel, Gas, Biokraftstoffe, Strom etc.) entstehen.

*Umweltverbund* – Sammelbegriff für öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV), Fuß- und Radverkehr.

*Versauerung* – Säurebildung in Gewässern und Boden mit negativen Folgen für die Vegetation.

*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 seriellen 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.

*Well-to-Tank-Analyse (WTT-Analyse)* – Analyse unter Betrachtung der Umweltbelastungen, welche durch die Energiebereitstellung für den Fahrzeugbetrieb entstehen. Hierzu zählt die Bereitstellung fossiler, biologischer oder synthetischer Kraftstoffe für konventionelle Pkw oder FCEV als auch die Bereitstellung von elektrischem Strom für BEV und PHEV.

*Well-to-Wheel-Analyse (WTW-Analyse)* – Analyseketten unter Betrachtung der Umweltbelastungen aus der Herstellung der zum Fahrzeugbetrieb nötigen Energie (WTT) und der Umweltbelastungen während des Fahrzeugbetriebs (TTW).



