

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

Berlin, Oktober 2011

Autoren:

Öko-Institut e.V.
Dr. Wiebke Zimmer
Dr. Matthias Buchert
Stefanie Dittrich
Florian Hacker
Ralph Harthan
Hauke Hermann
Dr. Wolfgang Jenseit
Peter Kasten
Charlotte Loreck

Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE)

Dr. Konrad Götz
Georg Sunderer
Barbara Birzle-Harder
Dr. Jutta Deffner

Öko-Institut e.V.

Geschäftsstelle Freiburg
Postfach 17 71
79017 Freiburg, Deutschland
Hausadresse
Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg, Deutschland
Tel. +49 (0) 761 - 4 52 95-0
Fax +49 (0) 761 - 4 52 95-88

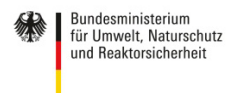
Büro Darmstadt
Rheinstraße 95
64295 Darmstadt, Deutschland
Tel. +49 (0) 6151 - 81 91-0
Fax +49 (0) 6151 - 81 91-33

Büro Berlin
Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin, Deutschland
Tel. +49 (0) 30 - 40 50 85-0
Fax +49 (0) 30 - 40 50 85-388

Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE)

Hamburger Allee 45
D - 60486 Frankfurt am Main
Tel. +49 (69) 7076919 25
Fax +49 (69) 7076919 11

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des *Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit* unter dem Förderkennzeichen 16EMO031 und 16EMO032 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

Inhaltsverzeichnis

1.	Executive Summary	4
2.	Hintergrund und Zielstellung des Forschungsvorhabens...	6
3.	Akzeptanz und Attraktivität von Elektroautos	9
3.1	Vorgehen	9
3.2	Ergebnisse	10
4.	Marktentwicklung und Strombedarf von Elektromobilität. 15	
4.1	Vorgehen	15
4.2	Ergebnisse	16
5.	Interaktion von Elektrofahrzeugen mit dem Stromsektor . 19	
5.1	Vorgehen	19
5.2	Ergebnisse	19
6.	CO₂-Bilanz Elektromobilität	23
6.1	Vorgehen	23
6.2	Ergebnisse zur CO ₂ -Bilanz auf Fahrzeugebene	23
6.3	Ergebnisse zur CO ₂ -Bilanz im Kontext des deutschen Pkw-Bestands	25
7.	Ökonomische Betrachtung der Speichermedien	27
7.1	Lademanagement	27
7.2	Vehicle-to-grid (V2G)	27
7.3	Regelenergiemarkt	28
7.4	Schlussfolgerungen	28
8.	Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität.....	30
8.1	Hintergrund	30
8.2	Vorgehen	30
8.3	Ergebnisse	32
9.	Zukunftsaussichten und weiterer F&E-Bedarf	35

10.	Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)	36
11.	Literaturverzeichnis	37

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Modellkonzept OPTUM	8
Abbildung 2:	Fahrzeugwahl im Jahr 2020	12
Abbildung 3:	Fahrzeugwahl im Jahr 2030	12
Abbildung 4:	Entwicklung des Bestands an Elektrofahrzeugen	17
Abbildung 5:	Entwicklung der Pkw-Fahrleistung im Szenario Elektromobilität.....	18
Abbildung 6:	Kraftwerkseinsatz in stündlicher Auflösung für eine ausgewählte Oktoberwoche im Szenariojahr 2030 – mit Elektromobilität ohne Lademanagement	20
Abbildung 7:	Kraftwerkseinsatz in stündlicher Auflösung für eine ausgewählte Oktoberwoche im Szenariojahr 2030 – mit Elektromobilität mit Lademanagement	21
Abbildung 8:	CO ₂ -Bilanz 2030 für unterschiedliche Stromerzeugungsoptionen, mit Lademanagement – Vergleich der spezifischen CO ₂ -Emissionen eines konventionellen Benzinfahrzeugs (CV) der Größenklasse “mittel“ mit einem Fahrzeug mit Plug-In-Hybrid- (PHEV) bzw. batterieelektrischem Antrieb (BEV).	24
Abbildung 9:	Vergleich der jährlichen CO ₂ -Emissionen eines konventionellen Benzin-Pkw (CV) mit einem Plug-In-Hybrid- (PHEV) bzw. batterieelektrischen Pkw (BEV) im Jahr 2030. (Emissionsfaktor der Stromerzeugung bei zusätzlichem Ausbau erneuerbarer Energien (Wind) und bei Lademanagement)	25
Abbildung 10:	CO ₂ -Emissionen des Pkw-Bestands im Referenzfall ohne Elektromobilität und im Szenario Elektromobilität für unterschiedliche Stromerzeugungsoptionen	26

Executive Summary

Im Rahmen des Forschungsprojektes OPTUM „Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen – Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft“ wurde ein integrativer Ansatz zur Bilanzierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen verfolgt, der neben der fahrzeugseitigen Betrachtung auch die Interaktionen mit dem Strommarkt berücksichtigt. Um den Gesamtumweltnutzen einer verstärkten Einführung von Elektrofahrzeugen bewerten zu können, wurden im Rahmen von OPTUM daher folgende zentrale Inhalte diskutiert, die alle wesentlichen Einflussfaktoren und deren Interaktionen integriert betrachten:

- » Akzeptanz und Attraktivität von Elektrofahrzeugen
- » Marktpotenziale für Elektrofahrzeuge
- » Interaktion von Elektrofahrzeugen mit dem Stromsektor
- » CO₂-Minderungspotenziale von Elektromobilität
- » Ökonomische Betrachtung der Speichermedien
- » Ressourceneffizienz des Systems Elektromobilität

Die empirische Untersuchung hat gezeigt, dass es ein erhebliches Akzeptanzpotenzial für Plug-In-Hybrid- und rein batterieelektrische Fahrzeuge gibt. Speziell für rein batterieelektrische Fahrzeuge existiert im Marktszenario je nach Betrachtungsjahr und Fahrzeugklasse ein Akzeptanzpotenzial von 12 bis 25 %.

In Kombination mit dem Maximalpotenzial für Elektrofahrzeuge, das auf Basis empirischer Mobilitätsdaten (MiD 2008) bestimmt wird und auf Basis von Fahrzeugnutzungsmustern den theoretisch substituierbaren Anteil des bundesdeutschen Pkw-Bestands beschreibt, kann unter Berücksichtigung von Technologiediffusionsraten eine Bestandsentwicklung abgeleitet werden. Die Ergebnisse für das Marktszenario Elektromobilität zeigen, dass die Dynamik von Elektrofahrzeugen im Zeitverlauf deutlich zunimmt: bis 2020 befinden sich etwas mehr als 500.000 Elektrofahrzeuge im Bestand. Dieser steigt dann bis 2030 auf etwa 5,9 Millionen an.

Lademanagement ermöglicht es, den Zeitpunkt der Batterieladung einerseits auf Zeitpunkte geringer Stromnachfrage zu verlagern und somit zusätzliche Lastspitzen zu vermeiden sowie andererseits bisher ungenutzte regenerativ erzeugte Strommengen zu integrieren und damit den Anteil erneuerbarer Energien am Fahrstrom zu erhöhen. Wesentliches Ergebnis für die Klimabilanz ist jedoch, dass ohne zusätzliche erneuerbare Energieanlagen das Lademanagement nicht nur den Anteil erneuerbarer Energien am Fahrstrom, sondern auch den Anteil an tendenziell emissionsintensivem Strom aus klassischen Grundlastkraftwerken erhöht.

Zentral für den Klimanutzen von Elektrofahrzeugen ist damit der Bau zusätzlicher erneuerbarer Kapazität: Mit zusätzlichen erneuerbaren Energien und bei Einsatz von Lademanagement ist der gegenüber dem Basisszenario zusätzlich produzierte „Fahrstrom“ vollständig erneuerbar. Die CO₂-Emissionsfaktoren dieser zusätzlichen Stromproduktion sind nahe Null und es kann ein – auch in der Gesamtbilanz – nahezu emissionsfreier Betrieb von Elektrofahrzeugen erreicht werden. In diesem Fall können die Emissionen des Pkw-Bestands um 0,6 Millionen Tonnen CO₂ im Jahr 2020 bzw. 5,2 Millionen Tonnen im Jahr 2030 gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Elektromobilität gesenkt werden. Dies entspricht einer Minderung

der Gesamtemissionen des Pkw-Verkehrs um 0,6 % bis zum Jahr 2020 bzw. 6,0 % bis zum Jahr 2030.

Elektromobilität kann also auch beim Einsatz zusätzlicher erneuerbarer Energien zunächst nur einen geringen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Klassische Antriebstechnologien und Minderungsmaßnahmen dürfen daher nicht außer Acht gelassen werden, sie werden in den kommenden zwanzig Jahren noch den größten Beitrag zur Minderung der CO₂-Emissionen liefern können.

Für langfristigen Klimaschutz sind alternative Antriebstechnologien jedoch unverzichtbar – immer unter der Voraussetzung der Nutzung zusätzlicher erneuerbarer Energien. Insgesamt wird es nur eine Kombination aus einer deutlichen Effizienzsteigerung der konventionellen Verkehrsmittel, alternativen Antrieben und Kraftstoffen – wie der Elektromobilität – in Verbindung mit einem veränderten Mobilitätsverhalten ermöglichen, die langfristigen Klimaschutzziele zu erreichen und eine nachhaltige Mobilität in Zukunft zu sichern.

Bei der Einführung neuer Technologien ist gleichzeitig auf die eingesetzten Rohstoffe zu achten. Im Vergleich zur gesamten Primärproduktion der Metalle im Ausgangsjahr 2010 fielen durch einen Bedarfsanstieg der Elektromobilität vor allem die Seltenen Erden (Neodym, Praseodym, Dysprosium, Terbium) sowie Gallium als besonders relevant auf. Wesentlich ist also beispielsweise auch, zügig ein effizientes Recycling-System für Seltene Erden Metalle aufzubauen und so einer Angebotsverknappung entgegenzuwirken und Umweltvorteile zu nutzen.

Hintergrund und Zielstellung des Forschungsvorhabens

Deutschland will seine Treibhausgasemissionen bis 2020 um 40 % gegenüber 1990 reduzieren. Laut dem nationalen Inventarbericht konnten in den vergangenen 20 Jahren die Emissionen um 24 % gesenkt werden, bis 2020 müssen also noch weitere 16 % gemindert werden. Ein ambitioniertes Ziel, das nur erreicht werden kann, wenn alle relevanten Sektoren – Industrie, Haushalte, Energiewirtschaft und Verkehr – ihre Kohlendioxid (CO₂)-Emissionen deutlich mindern. Wesentliche Sektoren haben bisher durchaus Erfolge vorzuweisen: Die Energiewirtschaft beispielsweise emittiert heute 20 %, das verarbeitende Gewerbe rund 40 % weniger als vor 20 Jahren [1]. Anders stellt sich die Situation im Verkehrssektor dar. Die CO₂-Emissionen des Verkehrs haben sich zwischen 1960 und heute mehr als verdoppelt, verglichen mit 1990 sind sie um knapp 8 % gestiegen [2]. Verantwortlich dafür ist im Wesentlichen der Straßenverkehr, der im Jahr 2009 rund 178 Millionen Tonnen CO₂ ausgestoßen hat und damit für 83 % der Emissionen im Verkehrssektor verantwortlich war.

Zwar sind heute Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor effizienter als noch vor 10 oder 15 Jahren. Diese Fortschritte verbessern die Gesamtbilanz aber kaum. Denn die technischen Optimierungen der vergangenen Jahre werden nahezu kompensiert. Zum einen ist die Popularität von schweren, leistungs- und verbrauchsstarken Modellen bei deutschen Autokäufern ungebrochen. Zum anderen steigt die Verkehrsleistung. Auch für die kommenden Jahre ist keine Trendwende in Sicht. Die letzte Verkehrsprognose geht davon aus, dass die Fahrleistung privater Pkw bis 2025 um 16 % höher liegen wird als 2004 [3].

Verbrennungsmotoren haben trotz aller technischen Fortschritte mit maximal 40 % einen relativ geringen Wirkungsgrad. Die im Diesel oder Benzin enthaltene Energie geht zu einem großen Teil als Wärme verloren. Elektrische Fahrzeugmotoren hingegen haben im Betrieb eine deutlich höhere Energieeffizienz als Verbrennungsmotoren, sie erreichen Wirkungsgrade von rund 90 %. Das gilt für den batterie-elektrischen Antrieb genauso wie für den Elektromotor im so genannten Plug-In-Hybrid, der zusätzlich auch einen Verbrennungsmotor besitzt. Elektrofahrzeuge nutzen Strom statt flüssige Kraftstoffe und ermöglichen damit abgasarmes oder sogar abgasfreies Fahren. Und wenn die Fahrzeuge mit Strom aus erneuerbaren Energien geladen werden, bergen sie ein großes Potenzial für eine klimaverträglichere Mobilität.

Unter anderem deshalb fördert die Bundesregierung die Elektromobilität in umfassender Weise. Ziel ist es, bis zum Jahr 2020 mindestens eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen zu bringen, 2030 sollen es bereits sechs Millionen sein.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war daher zu untersuchen, wie hoch die Umweltentlastung durch Elektrofahrzeuge sein kann und welche Fragen hierfür entscheidend sind. Ein Elektrofahrzeug verursacht – im Unterschied zu verbrennungsmotorischen Pkw – im Betrieb keine direkten Emissionen, aber bei der Stromerzeugung können relevante Mengen an CO₂ entstehen. Große Unterschiede ergeben sich je nachdem, ob die zusätzliche Stromnachfrage von Elektrofahrzeugen aus (zusätzlichen oder ansonsten ungenutzten) erneuerbaren oder aus fossilen Energien erzeugt wird. Ein konsistenter Vergleich von Elektrofahrzeugen und konventionellen Pkw ist daher nur unter Berücksichtigung der Gesamtemissionsbilanz inklusive der Energiebereitstellung möglich.

Wie stark elektrische Antriebe zum Klimaschutz beitragen können, hängt neben der Art der Stromerzeugung davon ab, wie viele Elektrofahrzeuge sich zu einem bestimmten Zeitpunkt im

Markt befinden, wie hoch deren Fahrleistung und der sich daraus ableitende reale Gesamtstrombedarf ist und welche konventionellen Fahrzeuge im Bestand ersetzt werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes OPTUM „Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen – Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft“ wurde daher ein integrativer Ansatz zur Bilanzierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen verfolgt, der neben der fahrzeugseitigen Betrachtung auch die Interaktionen mit dem Strommarkt berücksichtigt. Um den Gesamtumweltnutzen einer verstärkten Einführung von Elektrofahrzeugen bewerten zu können, wurden im Rahmen des hier vorgestellten Forschungsvorhabens folgende zentrale Inhalte verfolgt, die alle wesentlichen Einflussfaktoren und deren Interaktionen integriert betrachten:

» **Akzeptanz und Attraktivität von Elektrofahrzeugen (AP 1)**

Grundlage für die Betrachtung der Umweltentlastungspotenziale von Elektromobilität ist zunächst eine eingehende Analyse von Akzeptanz und Attraktivität verschiedener Fahrzeugkonzepte. 1.487 Neuwagenkäufer wurden im Rahmen des Vorhabens anhand variierender Preise, Emissionen, Kraftstoffkosten, Reichweiten und Ladedauer in einer simulierten Kaufentscheidung (Conjoint-Analyse) befragt, für wie attraktiv und alltagstauglich sie diese Fahrzeuge halten und welches Fahrzeug sie sich anschaffen würden. Diese Fragestellungen wurden vor allem vom ISOE bearbeitet.

» **Marktpotenziale für Elektrofahrzeuge (AP 2 und AP 5)**

Um abschätzen zu können, wie stark Elektrofahrzeuge zum Klimaschutz beitragen können, muss analysiert werden, ob sie die alltäglichen Mobilitätsbedürfnisse überhaupt erfüllen können. Genutzt wurden hierfür die Daten der MiD, einer Befragung zum Mobilitätsverhalten von 26.000 Haushalten. Sie lieferte die Grundlage zur Berechnung eines theoretischen Marktpotenzials von Elektroautos. In Verbindung mit der Untersuchung zur Akzeptanz wurde die Marktentwicklung für Elektrofahrzeuge bis ins Jahr 2030 abgeleitet. Diese Fragestellungen wurden vor allem vom Öko-Institut bearbeitet.

» **Interaktion mit dem Stromsektor (AP 3)**

Zur Ermittlung der Treibhausgasintensität der Strombereitstellung werden unterschiedliche Interaktionsmöglichkeiten zwischen den Elektrofahrzeugen und dem Energiesektor berücksichtigt: Unter anderem wurden die Wirkung unterschiedlicher Optionen des Ladeverhaltens auf den Kraftwerkspark und verschiedene Möglichkeiten der Strombereitstellung detailliert betrachtet. Diese Fragestellungen wurden vom Öko-Institut bearbeitet.

» **CO₂-Minderungspotenziale von Elektromobilität (AP 4)**

Ein abschließender Vergleich mit der Treibhausgasbilanz von zukünftigen verbrennungsmotorischen Fahrzeugen ermöglicht eine umfassende Bewertung des Umweltnutzens von Elektrofahrzeugen in verschiedenen Szenarien. Diese Fragestellungen wurden vom Öko-Institut bearbeitet.

» **Ökonomische Betrachtung der Speichermedien (AP 6)**

Das Ladeverhalten kann die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen beeinflussen. So werden die Strombezugskosten z. B. vom Ladezeitpunkt bestimmt. Im Rahmen von

OPTUM wurde daher eine ökonomische Bewertung der verschiedenen Interaktionen mit dem Energiesektor durch Elektrofahrzeuge durchgeführt.

» **Ressourceneffizienz des Systems Elektromobilität (AP 7)**

Es wurden die relevanten Rohstoffe identifiziert und auf Basis von globalen Marktdurchdringungsszenarien von Elektro-Pkw der zukünftige Rohstoffeinsatz für Elektromobilität und mögliche Recyclingpotenziale untersucht. Diese Fragestellungen wurden vor allem vom Öko-Institut mit weiteren Partnern (siehe Kapitel 8) bearbeitet.

Das in Abbildung 1 dargestellte Modellkonzept OPTUM fasst die wesentlichen Analyseschritte der Arbeitspakete 1 bis 5, die für die Bestimmung des Marktpotenzials und die CO₂-Bilanz von Elektromobilität notwendig waren, zusammen.

Die ökonomische Betrachtung der Speichermedien (AP 6) und das Teilprojekt „Ressourceneffizienz des Systems Elektromobilität“ (AP 7) wurden separat behandelt und sind daher in der Überblicksdarstellung nicht mit aufgeführt.

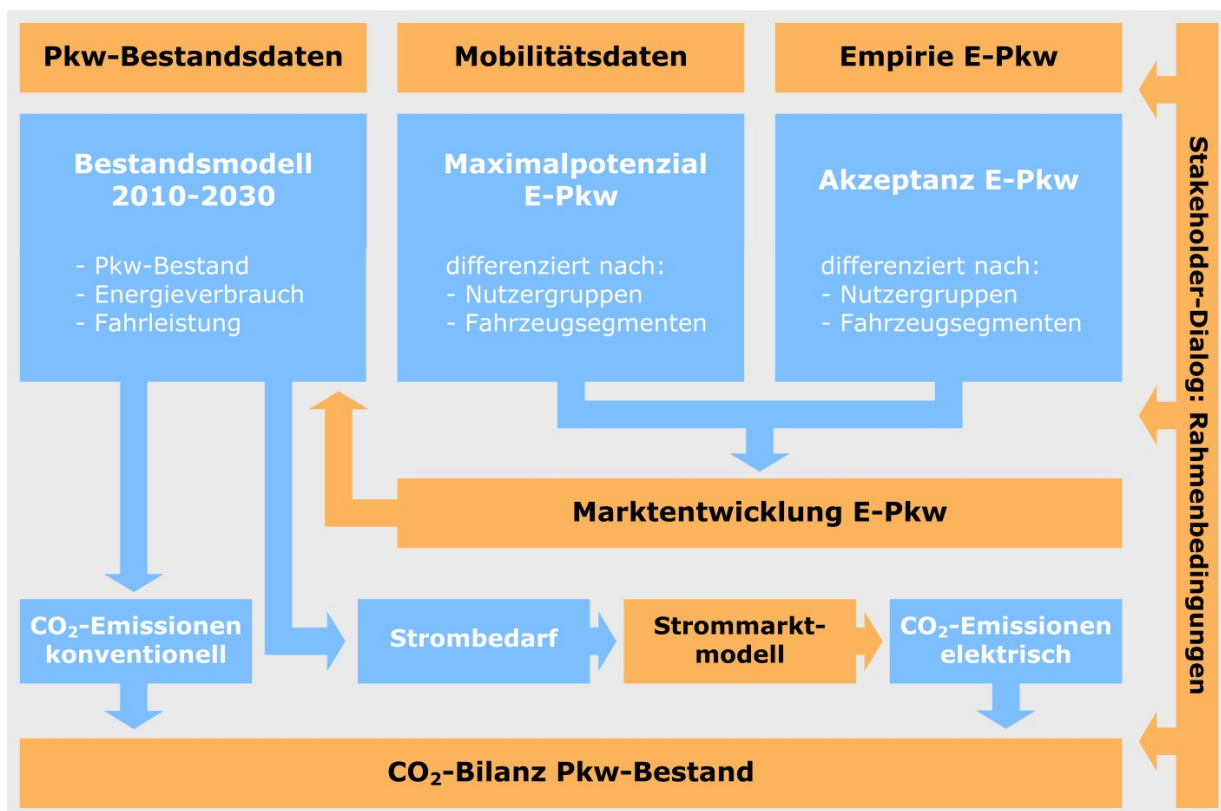


Abbildung 1: Modellkonzept OPTUM

Der vorliegende Schlussbericht beschäftigt sich mit den skizzierten Kernfragen in den folgenden Kapiteln. Eine ausführlichere Darstellung der angewandten Methoden und Ergebnisse befindet sich im Anhang für die Themen „Akzeptanz und Attraktivität von Elektroautos“, „Marktpotenziale und CO₂-Bilanz von Elektromobilität“, „Ökonomische Betrachtung der Speichermedien“ und „Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität“.

Akzeptanz und Attraktivität von Elektroautos

3.1 Vorgehen

Zur Attraktivität und Akzeptanz von Elektrofahrzeugen wurden zwei empirische Untersuchungen durchgeführt, die sich gegenseitig ergänzen: Zum einen eine qualitative Untersuchung mittels Fokusgruppen, zum anderen eine standardisierte Erhebung, bei der Neuwagenkäufer befragt wurden.

Die qualitative Untersuchung hatte eine sondierende, explorative Funktion. Mit ihr sollten Grundeinstellungen und Motive, Barrieren und Affinitäten, Vorstellungen und Vorurteile, aber auch Wissen, Nichtwissen oder Vorurteile bei potentiellen Zielgruppen eruiert werden. Dabei ging es nicht nur um rationale Argumentationen und Abwägungen, sondern auch um emotionale Empfindungen wie Spaß, Genuss und die Symbolik der Elektromobilität.

Um solche subjektiven Dimensionen zu erfassen, hat sich das Setting einer offenen Gesprächssituation in der Gruppe bewährt. Durch eine Quotierung, also eine systematische Auswahl, die nicht dem Zufallsprinzip folgt, wird hierbei angestrebt, dass möglichst Menschen aus ähnlichen sozialen Milieus zusammen kommen.

Insgesamt wurden vier Fokusgruppen durchgeführt, je zwei in Berlin und Frankfurt/Main. Sie waren mit je 10 Teilnehmern besetzt und dauerten etwa drei Stunden. Sie wurden im Juni 2010 durchgeführt.

Mit der qualitativen Untersuchung war es möglich, Fragen des Wie und des Warum zu klären. Die Auswertungsmethodik ist ganzheitlich und interpretativ.

Bei der zweiten Untersuchung, der standardisierten Erhebung, standen dagegen Fragen des Wie-viel im Vordergrund. Wie viele Neuwagenkäufer sind bereit, ein Elektrofahrzeug unter bestimmten ökonomischen und technischen Bedingungen zu kaufen und wie viele sind es, wenn sich die Bedingungen in eine bestimmte Richtung verändern. Um solche Fragen beantworten zu können, wurden 1.487 Personen befragt, die sich in den nächsten zwei Jahren einen Neuwagen anschaffen wollen. Mit der Befragung wurde eine Conjoint-Analyse gekoppelt. Dabei handelte es sich um eine Entscheidungssimulation zum Autokauf, bei der sich die Befragten mehrmals zwischen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (CV), Plug-In-Hybrid-Antrieb (PHEV) und voll-elektrischem Antrieb (BEV) entscheiden mussten. Die Fahrzeuge, die zur Auswahl standen, hatten jeweils unterschiedliche Eigenschaften. Es variierte jeweils der Anschaffungspreis, die Kraftstoff- bzw. Stromkosten (im Folgenden als Verbrauchskosten bezeichnet), die Leistung und die CO₂-Emissionen. Die voll-elektrischen Fahrzeugen wurden über diese Eigenschaften hinaus noch anhand dreier weiterer Merkmale beschrieben: Reichweite pro Ladung, der Ladedauer und einem Park-Privileg in der Innenstadt, das die gezeigten voll-elektrischen Fahrzeuge haben konnten oder nicht.

Auf Grundlage der Wahlentscheidungen wurde anschließend berechnet, welchen Wert (sog. Teilnutzenwert) die Befragten den einzelnen Produkteigenschaften zuschreiben. Über diese Teilnutzenwerte konnte ermittelt werden, wie viele der Befragten sich unter bestimmten ökonomischen und technischen Bedingungen für ein Elektrofahrzeug (voll-elektrisch oder Plug-In-Hybrid) entscheiden würden. Die Conjoint-Analyse liefert damit eine Datenbasis, mit der die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen systematisch in Abhängigkeit von unterschiedlichen Bedingungen untersucht werden kann. Dabei wird der Autokauf als das abgebildet, was er im

Normalfall ist: ein Abwägungsprozess zwischen zur Auswahl stehenden Fahrzeugen mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen.

Die Befragten wurden entsprechend ihren Anschaffungswünschen den Fahrzeugkategorien „Klein“, „Mittel“ oder „Groß“ zugeordnet. Die drei Kategorien umfassen jeweils Fahrzeugklassen, die in Punkto Anschaffungspreis, Verbrauch und Leistung ähnliche Spannen aufweisen. Welche Fahrzeugklassen zu den drei Fahrzeugkategorien im Einzelnen gehören, zeigt die folgende Übersicht:

- » Kategorie „Klein“: Minis und Kleinwagen
- » Kategorie „Mittel“: Kompaktwagen, Vans und Transporter
- » Kategorie „Groß“: Mittelklasse, Geländewagen und obere Mittelklasse
- » Die Fahrzeugklassen „Oberklasse“ und „Sportwagen“ wurden bei der Erhebung nicht berücksichtigt.

Die Einteilung der Befragten in die drei Fahrzeugkategorien erfolgte, damit jeder Befragte eine Conjoint-Analyse durchlaufen konnte, die speziell auf seinen Anschaffungswunsch hin angepasst und die simulierten Entscheidungssituationen für ihn somit möglichst realitätsnah waren. Die Befragten teilen sich zu etwa gleichen Anteilen auf die drei Fahrzeugkategorien auf: Kategorie „Klein“: 474; Kategorie „Mittel“: 473; Kategorie „Groß“: 540. Um sicherzustellen, dass für jede der drei Fahrzeugkategorien ein typisches Sample von Neuwagenkäufern vorliegt, wurden die Teilnehmenden nach Quotenvorgaben rekrutiert. Die Verbraucheranalyse 2010 diente hierbei als Datengrundlage [4]. Abweichungen von den Quotenvorgaben wurden im Anschluss an die Datenerhebung mithilfe einer Gewichtung korrigiert.

Neben der Conjoint-Analyse umfasste die standardisierte Befragung einen Rahmenfragebogen, der Fragen zu Soziodemographie, mobilitätsrelevanter Haushaltsausstattung, Verkehrsverhalten und Umwelteinstellungen enthielt. Die Erhebung erfolgte als computer-unterstützte persönliche Befragung (CAPI). Der Erhebungszeitraum war von Dezember 2010 bis Januar 2011.

3.2 Ergebnisse

Die qualitative Erhebung lieferte die folgenden zentralen Erkenntnisse: Die Grundeinstellungen zu Elektroautos unterschieden sich bei den unterschiedlichen sozialen Gruppen erheblich. Eine große Gruppe ist eher skeptisch. Deren Einstellungen sind geprägt von den als Nachteil wahrgenommenen Eigenschaften der Elektrofahrzeuge: geringere Reichweite, Batterie und höheres Preisniveau. Bei dieser Gruppe ist das Image der Elektroautos von Konzeptfahrzeugen und Designs geprägt, die nicht mit dem vertrauten Bild des konventionellen Autos vereinbar sind. Kommt noch ein möglicher Komfortverlust durch Verzicht auf Stromverbraucher hinzu, lautet das Urteil: Weniger Nutzen zu höherem Preis ist ein Rückschritt und kommt nicht in Frage. Psychologisch ist diese Haltung verknüpft mit einer Angst vor dem sozialen Abstieg. Die Haltung gegen Elektromobile ist zudem von gravierenden Informations- und Wissensdefiziten geprägt. Es wird z. B. häufig davon ausgegangen die Technik sei neu, komplex und anfällig. Dass das Gegenteil zutrifft, ist nicht bekannt.

Im Unterschied dazu gibt es aufgeschlossene Gruppen, denen die Vorteile der E-Autos bekannt und wichtig sind – Geräuscharmheit und Umweltfreundlichkeit. Dazu kommt der Ruf der Elektroautos, sie seien das Konzept der Zukunft. Für eine visionäre Teilgruppe innerhalb der Aufgeschlossenen ist die Verbindung von Nutzungskonzepten und Elektromobilität naheliegend. Auch ‚Vehicle to Grid‘ und die Idee eines Zusammenwachsens von Energie- und Mobilitätssystem ist für sie faszinierend und zukunftsweisend.

Doch wie viele der Neuwagenkäufer sind nun bereit, ein Elektroauto zu kaufen? Eine Antwort auf diese Frage gibt die standardisierte Erhebung. Hierfür musste allerdings zuerst einmal bestimmt werden, welche ökonomischen und technischen Eigenschaften Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, Fahrzeuge mit Plug-In-Hybrid-Antrieb und voll-elektrische Fahrzeuge in den Kategorien „Klein“, „Mittel“ und „Groß“ in Zukunft haben. Entsprechende Szenarien für die Jahre 2020 und 2030 wurden zusammen mit Vertretern der Autoindustrie, der Energiewirtschaft und von NGOs im Rahmen von Stakeholder-Workshops erarbeitet. Hierbei wurde in der Kategorie „Klein“ zusätzlich noch zwischen Minis und Kleinwagen unterschieden und bei der Kategorie „Groß“ wurde jeweils davon ausgegangen, dass sich keine voll-elektrischen Fahrzeuge auf dem Markt befinden¹. Für jede Fahrzeugkategorie – „Mini“, „Kleinwagen“, „Mittel“ und „Groß“ wurde anschließend auf Basis der Conjoint-Daten berechnet, wie viele der Neuwagenkäufer sich in den Jahren 2020 und 2030 für ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, wie viele sich für einen Plug-In-Hybrid und wie viele sich für ein voll-elektrisches Fahrzeug entscheiden würden. Diese Marktsimulationen führten zu folgenden Ergebnissen (siehe hierzu auch Abbildung 2 und Abbildung 3):

- » In beiden Jahren würden sich je nach Szenario und Fahrzeugkategorie 12 bis 25 % der Neuwagenkäufer für einen voll-elektrischen Pkw entscheiden.
- » Im Szenario für das Jahr 2020 gilt: Je kleiner die Fahrzeugklasse, desto größer der Anteil an voll-elektrischen Fahrzeugen. Für das Szenario im Jahr 2030 trifft dies nur noch in abgeschwächter Form zu, da aufgrund des technischen Fortschritts und geringeren Anschaffungspreisen (Szenarioannahmen für 2030) die Anteilswerte für voll-elektrische Pkw in den Kategorien „Kleinwagen“ und „Mittel“ zunehmen.
- » Zählt man die Anteile der voll-elektrischen Pkw und der Plug-In-Hybride jeweils zusammen, zeigt sich, dass im Jahr 2020 jeweils etwa 60 % der Befragten sich für einen voll-elektrischen Pkw oder einen Plug-In-Hybrid und etwa 40 % für einen konventionellen Pkw mit Verbrennungsmotor entscheiden würden.
- » Im Jahr 2030 reduziert sich in allen Fahrzeugkategorien der Anteil der konventionellen Pkw ein wenig und der Anteil derjenigen, die sich für einen voll-elektrischen Pkw oder einen Plug-In-Hybrid entscheiden würden, steigt entsprechend. Ursache ist auch hier der technische Fortschritt, der in den Szenarioannahmen berücksichtigt wird (z. B. kürzere Ladezeiten in 2030) und die Reduzierung der Aufpreise für voll-elektrische Pkw und Plug-In-Hybride, die für 2030 angenommen wird.

¹ Welche durchschnittlichen Fahrzeugeigenschaften die drei Fahrzeugtypen nach den Szenarien haben, ist im Anhang „Akzeptanz und Attraktivität von Elektroautos“ dargestellt.

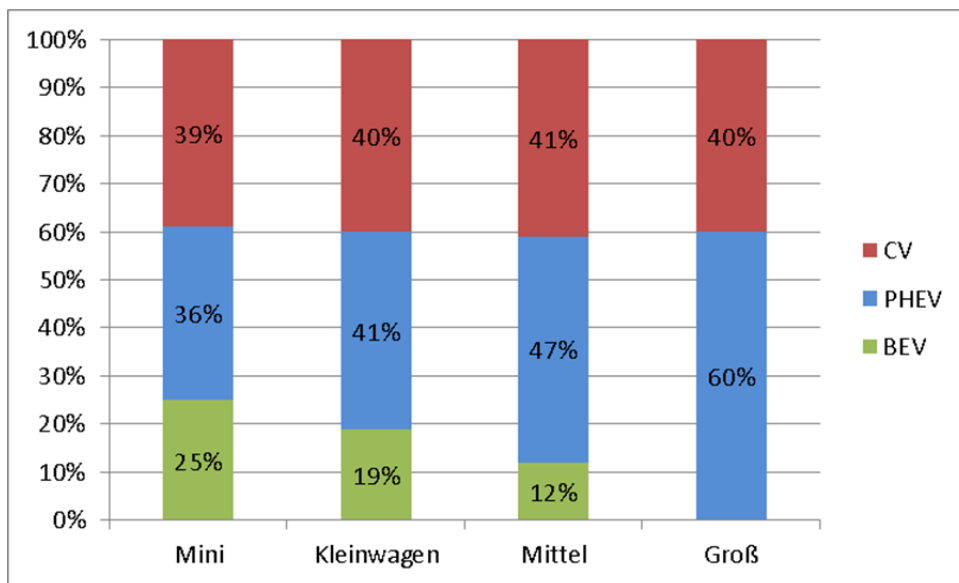


Abbildung 2: Fahrzeugwahl im Jahr 2020

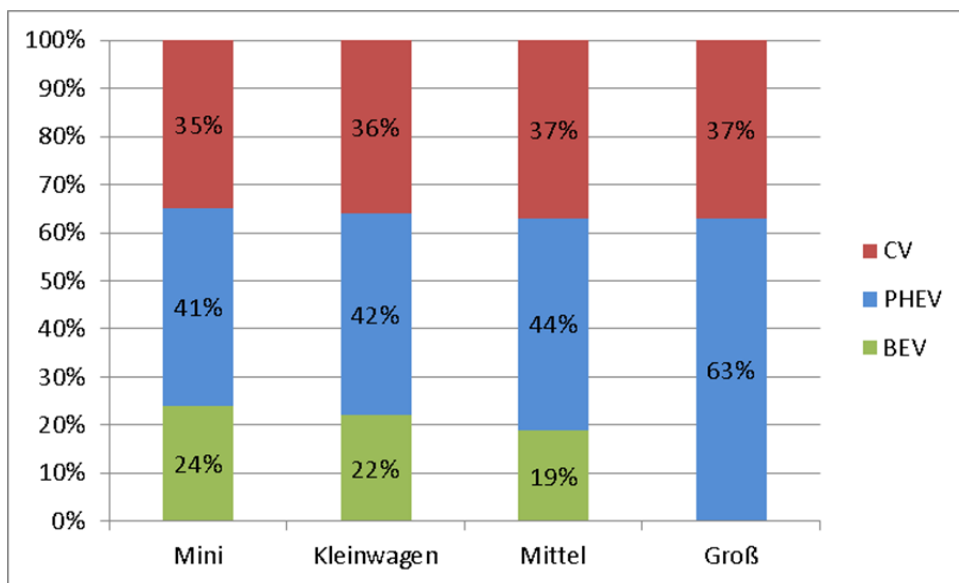


Abbildung 3: Fahrzeugwahl im Jahr 2030

In weiteren Analyseschritten wurde berechnet, wie sich die Anteilswerte für die drei Fahrzeugtypen in Abhängigkeit von bestimmten Entwicklungen verändern. Die generellen Erkenntnisse dieser Analysen werden im Folgenden anhand der Kategorie „Kleinwagen“ für das Jahr 2020, illustriert:

- » **Veränderung der Verbrauchskosten:** Verbrauchskosten sind eine wichtige Einflussgröße auf die Fahrzeugwahl. Steigt der Benzinpreis um 50 Cent oder mehr führt dies zu einer deutlichen Reduzierung des Anteils an Fahrzeugen mit

Verbrennungsmotor. So würden, wie die Ergebnisse für das Jahr 2020 zeigen, bei einem Benzinpreis von 1,52 Euro pro Liter 40 % der Kleinwagenkäufer ein Auto mit Verbrennungsmotor wählen, bei 2 Euro sind es 35 %, bei 2,50 Euro nur noch 30 % und bei 3,00 Euro pro Liter sinkt der Anteil auf 26 %. Dagegen führen Stromkostenerhöhungen zu einer Verringerung des Anteils der Plug-In-Hybride und voll-elektrischen Fahrzeuge und bremsen somit die Verbreitung solcher Fahrzeuge. Im Jahr 2020 wurde von einem Strompreis von 0,217 Euro pro kWh ausgegangen. Stiege dieser auf 0,3 Euro, reduziert sich der Anteil der Kleinwagenkäufer, die einen Plug-In-Hybrid oder ein voll-elektrisches Fahrzeug wählen, um 3 Prozentpunkte, der Anteil der konventionellen Fahrzeuge steigt dementsprechend. Bei einem Strompreis von 0,4 Euro reduziert sich der Anteil der Plug-In-Hybride und voll-elektrischen Fahrzeuge um 8 Prozentpunkte auf 52 % und bei einem Preis von 0,5 Euro pro kWh um 14 Prozentpunkte auf 46 %.

- » **Veränderung des Anschaffungspreises:** Auch der Anschaffungspreis ist eine wichtige Einflussgröße, doch haben Veränderungen des Anschaffungspreises einen geringeren Effekt als erwartet. So führt eine Steigerung der Anschaffungskosten für Plug-In-Hybride und voll-elektrische Fahrzeuge infolge höherer Batteriekosten zu folgenden Effekten: Bei einer Steigerung von 280 €/kWh (Annahme Szenario 2020) auf 350 €/kWh² reduziert sich der Anteil der Kleinwagenkäufer, die einen Plug-In-Hybrid oder ein Elektroauto nehmen würden, um 2 Prozentpunkte und bei einer Steigerung auf 500 €/kWh³ um 7 Prozentpunkte. Eine Reduzierung der Batteriekosten auf 200 €/kWh⁴ lässt den Anteil für die Plug-In-Hybride und Elektroautos im Kleinwagensektor um 2 Prozentpunkte steigen. Ein Grund dafür, dass der Effekt geringer ist als erwartet, liegt darin, dass es sowohl einen Stamm von Elektroauto-Fans als auch einen Stamm von Elektroauto-Ablehnern gibt, deren Hauptkriterium nicht der Anschaffungspreis ist (mehr dazu im Anhang „Akzeptanz und Attraktivität von Elektroautos“). Außerdem unterstreicht das Ergebnis, dass die Befragten nicht allein auf den Anschaffungspreis geachtet haben, sondern in starkem Maße auch auf die Verbrauchskosten.
- » **Veränderung der Reichweite und Ladedauer:** Verbesserungen bei der Reichweite pro Ladung oder der Ladedauer führen zu einer deutlichen Erhöhung des Anteils an voll-elektrischen Fahrzeugen. Allerdings erfolgt dies fast ausschließlich auf Kosten des Anteils der Plug-In-Hybride. Das heißt, der Anteil der konventionellen Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor verringert sich hierbei nur geringfügig. So vergrößert sich bei einer Erhöhung der Reichweite von 160 km (Annahme im Jahr 2020) auf 300 km der Anteil der voll-elektrischen Fahrzeuge im Kleinwagensegment um 6 Prozentpunkte auf 25 %; bei einer Reichweite von 500 km um 10 Prozentpunkte auf 29 %. Der Anteil der konventionellen Fahrzeuge verringert sich dagegen nur um 0,5 Prozentpunkte (300 km) bzw. 1,5 Prozentpunkte (500 km).

² Ausgehend vom Szenario im Jahr 2020 entspricht dies einer Erhöhung des Anschaffungspreises um 1.960 € (voll-elektrisch) bzw. 656 € (Plug-In-Hybrid).

³ Ausgehend vom Szenario im Jahr 2020 entspricht dies einer Erhöhung des Anschaffungspreises um 6.160 € (voll-elektrisch) bzw. 2.063 € (Plug-In-Hybrid).

⁴ Ausgehend vom Szenario im Jahr 2020 entspricht dies einer Senkung des Anschaffungspreises um 2.240 € (voll-elektrisch) bzw. 750 € (Plug-In-Hybrid).

Insgesamt verdeutlichen die Marktsimulationen, dass es ein erhebliches Akzeptanzpotential für Elektrofahrzeuge (Plug-In-Hybride und voll-elektrische Fahrzeuge) gibt, dessen Größe stark von Kostenentwicklungen (Verbrauchs- und Anschaffungskosten) abhängt. Veränderungen der Ladedauer oder der Reichweite wirken sich dagegen auf das gemeinsame Potential von Plug-In-Hybriden und voll-elektrischen Fahrzeugen nur wenig aus; sie beeinflussen aber stark, welchen Anteil voll-elektrische Fahrzeuge innerhalb der Klasse der Elektrofahrzeuge besitzen. Hinweise, wie dieses große Potential in Zukunft auch tatsächlich ausgeschöpft werden kann, liefert eine Segmentierung der Neuwagenkäufer, die als Zielgruppenmodell genutzt werden kann. Die entsprechende Beschreibung und zusätzliche Analysen der qualitativen und der standardisierten Untersuchung, sowie eine ausführliche Beschreibung der Methodik befinden sich im Anhang „Akzeptanz und Attraktivität von Elektroautos“.

Marktentwicklung und Strombedarf von Elektromobilität

4.1 Vorgehen

Die Voraussetzung für die Quantifizierung des möglichen CO₂-Minderungspotenzials von Elektromobilität ist die Ableitung einer plausiblen Marktentwicklung von Elektromobilität im Kontext des Pkw-Gesamtbestands, sowie die Bestimmung des zusätzlichen Strombedarfs für den Betrachtungszeitraum 2010 bis 2030.

Ausgangspunkt der Analysen zur Marktentwicklung stellt die Definition plausibler Rahmenbedingungen für den Betrachtungszeitraum bis zum Jahr 2030 dar. Neben realistischen Annahmen zur weiteren technologischen Entwicklung müssen auch weitere Einflussgrößen, wie die Veränderung der Energiepreise und die zukünftige Entwicklung des deutschen Kraftwerksparks, berücksichtigt werden. Begleitend zum Forschungsvorhaben wurde daher ein Szenarioprozess initiiert sowie weitere Expertenkonsultationen im Rahmen eines Experten-Workshops Elektromobilität durchgeführt. Im Verlauf dieser Veranstaltungsreihe wurden mit Vertretern aus Energie- und Verkehrswirtschaft sowie Verbänden mögliche Entwicklungspfade diskutiert und schließlich in einem konsolidierten Szenario zusammengeführt.

Das Maximalpotenzial beschreibt den auf Grund seiner Nutzungsmuster theoretisch substituierbaren Anteil des deutschen Pkw-Bestands. Es berücksichtigt die technischen Restriktionen von Elektrofahrzeugen – entsprechend der getroffenen Szenarioannahmen – und bestimmt, welche Fahrzeuge unter diesen Rahmenbedingungen bei unveränderten Einsatzmustern das jeweilige Mobilitätsbedürfnis weiterhin befriedigen könnten. Auf Basis der empirischen Mobilitätsdatenerhebung „Mobilität in Deutschland“ wurde der Pkw-Bestand anhand heutiger Pkw-Nutzungsmuster bezüglich der Potenziale für den Einsatz von batterieelektrischen und Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen untersucht und das jeweilige Maximalpotenzial differenziert nach Fahrzeuggrößenklassen für die Jahre 2020 und 2030 bestimmt.

Neben der Betrachtung technischer Einsatzrestriktionen spielt die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen bei potenziellen Käufern eine entscheidende Rolle für die Marktentwicklung von Elektromobilität. Im Rahmen einer empirischen Akzeptanzanalyse (siehe Kapitel 2) wurde daher ermittelt, unter welchen Umständen Pkw-Nutzer sich für ein Elektrofahrzeug entscheiden würden und deren Pkw-Wahlentscheidung für die Jahre 2020 und 2030 simuliert.

Aus der Kombination von Maximalpotenzial und Akzeptanz ergibt sich ein Marktpotenzial, das die Obergrenze des möglichen Marktanteils von Elektrofahrzeugen im Betrachtungszeitraum darstellt. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Angebotsentwicklung („Technologiediffusion“), welche dem Umstand Rechnung trägt, dass sich die Verfügbarkeit einer neuen Technologie im Markt erst mit der Zeit entwickelt, konnte die tatsächlich realisierbare Marktentwicklung von Elektromobilität unter Berücksichtigung der jeweiligen Rahmenbedingungen in Form von Anteilen an den jährlichen Pkw-Neuzulassungen simuliert werden.

Der Pkw-Bestand in Deutschland entwickelt sich dynamisch: neue Fahrzeuge kommen in den Bestand, Altfahrzeuge scheiden aus dem Bestand aus. Entsprechend des Anteils von Elektrofahrzeugen an den jährlichen Neuzulassungen steigt auch der absolute Bestand an Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2030 an.

Das entwickelte Bestandsmodell bietet die Möglichkeit, die Struktur des bundesdeutschen Pkw-Bestands jahresscharf und differenziert nach Größenklassen und Antriebstypen abzubilden und die Bestandsentwicklung von Elektrofahrzeugen für den Betrachtungszeitraum 2010 bis 2030 zu simulieren. Da für jede Fahrzeugkategorie die Jahresfahrleistung und der spezifische Energieverbrauch differenziert nach Neuzulassungsjahr hinterlegt sind, können mit dem Bestandsmodell die Entwicklung der (elektrischen) Gesamtfahrleistung sowie die Entwicklung des Energiebedarfs differenziert nach Energieträgern für den Pkw-Verkehr bis zum Jahr 2030 abgebildet werden.

Um die Effekte von Elektromobilität auf den Strommarkt darstellen zu können, sind neben dem absoluten Strombedarf auch detaillierte Informationen zur zeitlichen Verteilung der zusätzlichen Stromnachfrage erforderlich. Neben der Anzahl an Elektrofahrzeugen und der elektrischen Fahrleistung wurden daher aggregierte typische Wochennutzungsprofile für Elektrofahrzeuge generiert. Diese bestimmen, welche zusätzliche Stromnachfrage durch den Einsatz von Elektrofahrzeugen entsteht und zu welchen Zeitpunkten die Batterieladung erfolgen kann.

Die Grundlage für die Ableitung dieser typischen Fahrzeugnutzungsprofile stellt ebenfalls die Verkehrserhebung „Mobilität in Deutschland“ dar, welche Aufschluss über den täglichen Einsatz von Pkw in Deutschland u.a. hinsichtlich der Tagesfahrleistung, der Ziele bzw. der Standorte und der Standzeiten der Fahrzeuge gibt.

4.2 Ergebnisse

Die Analyse der Pkw-Nutzungsmuster zeigen, dass sowohl Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge als auch batterieelektrische Pkw die im Alltag anfallenden Mobilitätsbedürfnisse decken können. Allerdings können batterieelektrische Pkw ohne Zwischenladung nicht für unregelmäßig lange Fahrten genutzt werden. Das Potenzial für batterieelektrische Fahrzeuge ist daher stärker eingeschränkt. Ebenfalls mindernd auf das Potenzial von batterieelektrischen Pkw wirkt sich die Annahme aus, dass diese vermutlich bis zum Jahr 2030 lediglich bis zur Kompaktklasse verfügbar sein werden. Insbesondere große Fahrzeuge können daher nicht durch rein elektrische Pkw ersetzt werden.

Unter Berücksichtigung des heutigen Mobilitätsverhaltens liegt das Maximalpotenzial für batterieelektrische Pkw bezogen auf den Gesamtbestand bei unter 10 %. Das Maximalpotenzial von Plug-In-Hybriden ist nur durch den Ausbau der öffentlichen Infrastruktur begrenzt und liegt im betrachteten Szenario im Jahr 2030 bei rund 85 % aller Fahrzeuge.

Die Akzeptanz von elektrischen Fahrzeugen wurde über eine Simulation der Kaufentscheidung anhand acht verschiedener Parameter näher untersucht (Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Zur Auswahl standen den rund 1.500 potenziellen Neuwagenkäufern konventionelle Pkw, Plug-In-Hybridfahrzeuge und rein batterieelektrische Pkw. Im betrachteten Szenario würden sich im Jahr 2020 rund 60 % und im Jahr 2030 etwa 63 % für ein Fahrzeug mit elektrischem Antrieb entscheiden – wobei der Anteil an Plug-In-Hybrid-Pkw den Anteil batterieelektrischer Pkw übertrifft. Pkw-Halter ohne eigenen Stellplatz zeigen dabei eine besonders hohe Affinität zu Elektrofahrzeugen.

Die Verknüpfung von Maximalpotenzial und Akzeptanz zeigt, dass in den meisten Fahrzeugklassen das Marktpotenzial durch die Akzeptanz begrenzt ist. Das Marktpotenzial steigt von 49 % in 2020 auf knapp 57 % in 2030, was vor allem an einer steigenden Akzeptanz

bei geringeren Batteriekosten und kürzeren Ladedauern liegt. Die Verfügbarkeit von Ladestationen im semi-öffentlichen bzw. öffentlichen Raum begrenzt insbesondere in Bezug auf Plug-In-Hybrid-Pkw das Potenzial für Pkw-Nutzer ohne eigenen Stellplatz auf dem Grundstück.

Unter Berücksichtigung der Angebotsentwicklung mittels Technologiediffusion kann die tatsächliche Marktentwicklung quantifiziert werden. Im Marktszenario Elektromobilität würden im Jahr 2020 fast 200.000 Elektrofahrzeuge neu zugelassen, im Jahr 2030 bliebe die Anzahl der elektrischen Pkw-Neuzulassungen nur knapp unter der Millionenmarke und stellt damit 38 % der Gesamtzulassungen im Jahr 2030 dar. Der größte Anteil der elektrischen Neuzulassungen sind Plug-In-Hybrid-Pkw mit 87 %. Insbesondere in den ersten Jahren nach dem Markteintritt sind die Stückzahlen sehr gering. Trotzdem ist anzumerken, dass die jährliche Wachstumsrate im Szenario deutlich über durchschnittlichen Zuwachsraten von Technikinnovationen im Automobilsektor in der jüngeren Vergangenheit liegt und damit eine ambitionierte Marktentwicklung darstellt.

Dies spiegelt sich auch in der Bestandsentwicklung wider. Im Marktszenario Elektromobilität nimmt die Dynamik von Elektrofahrzeugen im Zeitverlauf deutlich zu: bis 2020 befinden sich demnach etwas mehr als 500.000 Elektrofahrzeuge im Bestand. Dieser würde dann bis 2030 auf etwa 5,9 Millionen ansteigen. Im Jahr 2022 würde die Millionenmarke im Bestand überschritten. Damit erreichen Elektrofahrzeuge im Jahr 2030 einen Anteil am Pkw-Bestand von rund 14 %. Mit über 80 % würde der Bestand an Elektrofahrzeugen von Plug-In-Hybridfahrzeugen dominiert.

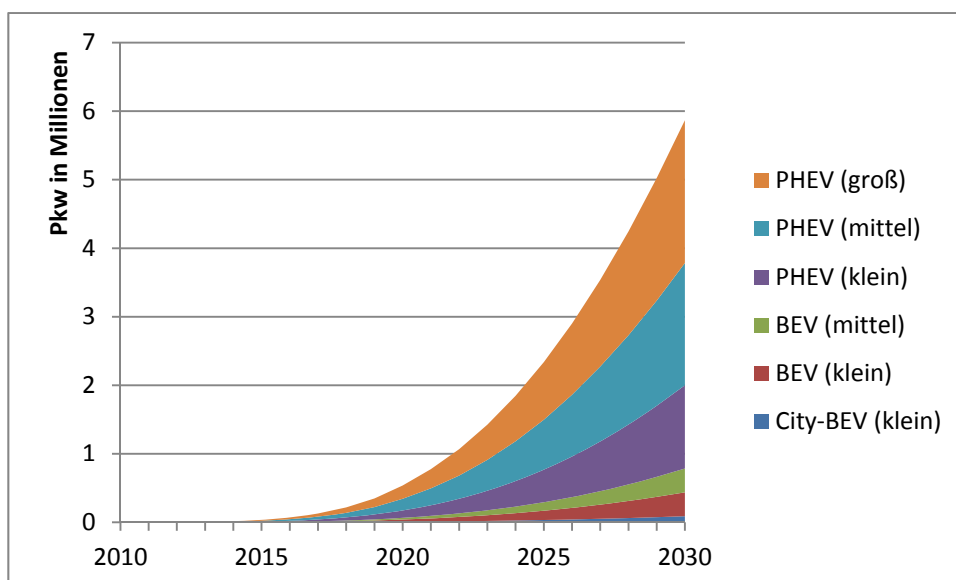


Abbildung 4: Entwicklung des Bestands an Elektrofahrzeugen

Die durch Elektrofahrzeuge substituierbare Fahrleistung bestimmt maßgeblich den zusätzlichen Strombedarf sowie die möglichen CO₂-Minderungspotenziale. Das Ergebnis der Pkw-Nutzungsanalyse zeigt, dass batterieelektrische Fahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Pkw desselben Segments eine im Durchschnitt 40 % geringere Jahresfahrleistung haben. Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge erreichen dagegen die Jahresfahrleistung von konventionellen Pkw. Hiervon werden – wie die Simulationsergebnisse zeigen – im

Durchschnitt jedoch nur zwei Drittel im elektrischen Fahrmodus zurückgelegt, da insbesondere bei langen Fahrten der Verbrennungsmotor zum Einsatz kommt. Die Fahrleistung aller Elektrofahrzeuge – inklusive dem konventionellen Fahranteil – erreicht im Jahr 2020 1,1 % und im Jahr 2030 11 % der Pkw-Gesamtfahrleistung. Die rein elektrische Fahrleistung stellt jedoch nur 0,8 % (2020) bzw. knapp 8 % (2030) dar.

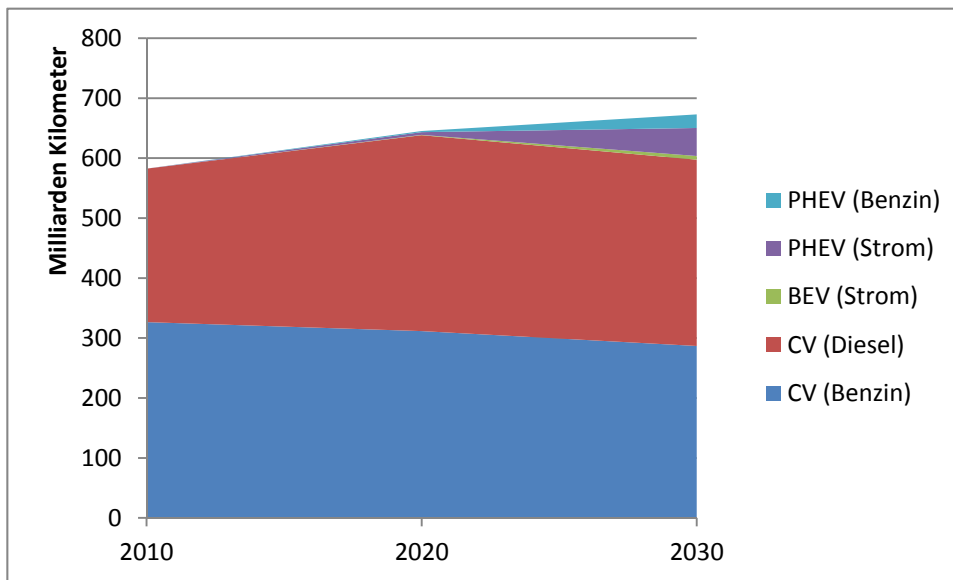


Abbildung 5: Entwicklung der Pkw-Fahrleistung im Szenario Elektromobilität

Der Strombedarf des Bestands an Elektrofahrzeugen ergibt sich aus der Nutzung dieser Fahrzeuge. Daher wurden insgesamt 60 aus empirischen Daten hergeleitete, typische Nutzungsmuster an das Strommarktmodell PowerFlex (Kapitel 5) übergeben, die die Nutzung elektrischer Fahrzeuge in stündlicher Auflösung abbilden und somit in der Strommarktmodellierung die Grundlage für die zusätzliche Stromnachfrage durch Elektrofahrzeuge liefert.

Interaktion von Elektrofahrzeugen mit dem Stromsektor

Für die Klimaverträglichkeit von Elektromobilität ist ein entscheidender Faktor, in welchen Kraftwerken der Strom zur Ladung der Batterien produziert wird, denn je nach Energieträger sind mit der Stromproduktion unterschiedlich hohe Treibhausgasemissionen verbunden. Abhängig davon, in welcher Zeit – und damit in welcher Angebots- und Nachfragesituation – der Verbrauch für die Batterieladung auftritt, kommen unterschiedliche Kraftwerke zum Einsatz, um diesen zusätzlichen Verbrauch zu decken. Die zeitliche Struktur der Nachfrage ist deshalb für den Kraftwerkseinsatz entscheidend.

5.1 Vorgehen

Um die Interaktionen zwischen Elektrofahrzeugen und Strommarkt detailliert und mit einer hohen zeitlichen Auflösung zu untersuchen, wurden Fahrzeugnutzungsprofile von Elektrofahrzeugen in das Strommarkt-Modell PowerFlex eingespeist. Zur Analyse der Umweltauswirkungen, die der Stromverbrauch der Elektrofahrzeuge verursacht, wurde aus Modellläufen ermittelt, durch welche Kraftwerke der zusätzlich benötigte Strom produziert wird. Dazu wurde die Differenz zwischen unterschiedlichen Szenarien mit Elektromobilität und einem Basisszenario ohne Elektromobilität betrachtet.

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein Modul zur detaillierten Abbildung des Ladeverhaltens von Elektrofahrzeugen und den damit verbundenen Auswirkungen auf die Stromerzeugung für das PowerFlex-Modell entwickelt. Der Stromverbrauch für die Batterieladung der Fahrzeuge kann ohne Lademanagement oder mit einem preisoptimierten Lademanagement in die Modellierung des Strommarkts integriert werden.

Im Rahmen der Strommarktmodellierungen wurde die Interaktion von Kraftwerkspark und Elektrofahrzeugen für die Szenariojahre 2020 und 2030 abgebildet. Dabei wurden die folgenden Szenarien betrachtet: Für beide Szenariojahre wurde ein Basisszenario ohne Elektromobilität sowie verschiedene Szenarien mit Elektrofahrzeugen modelliert. Die Rechenläufe mit Elektrofahrzeugen wurden mit und ohne Lademanagement durchgeführt. Um mögliche Entwicklungen der Ladeinfrastruktur zu unterscheiden, wurden außerdem zwei verschiedene Ladeszenarien modelliert: das Laden nach der letzten Fahrt am Wohnort, hauptsächlich abends (Ladeszenario 1), und das Laden auch tagsüber, zum Beispiel am Arbeitsplatz (Ladeszenario 2). In weiteren Szenarien wurden dem Modell zusammen mit der Elektromobilität zusätzliche erneuerbare Energien zur Verfügung gestellt, die rechnerisch den jährlichen Verbrauch der Elektrofahrzeuge decken können. Diese Rechenläufe mit zusätzlichen erneuerbaren Energien wurden in drei verschiedenen Varianten durchgeführt: mit erneuerbarem Strom aus Wind-onshore-Anlagen, aus Photovoltaik-Anlagen und aus Biogas-Anlagen.

5.2 Ergebnisse

Im Fall der *Elektromobilität ohne zusätzliche erneuerbare Energien* besteht im Jahr 2020 die zusätzliche Stromerzeugung vor allem aus zusätzlichem Kohlestrom, im Jahr 2030 dominieren Kohle und Erdgas die zusätzliche Stromerzeugung.

Die zeitaufgelöste Analyse zeigt, dass ohne Lademanagement durch gleichzeitiges Laden vieler Fahrzeuge hohe Lastspitzen auftreten, für deren Deckung in den modellierten

Szenariojahren der Einsatz teurer Reservekraftwerke oder Stromimporte (s. Abbildung 6, rot markiert) notwendig sind. Um solche Nachfragespitzen zu vermeiden, ist ein preisoptimiertes Lademanagement geeignet.

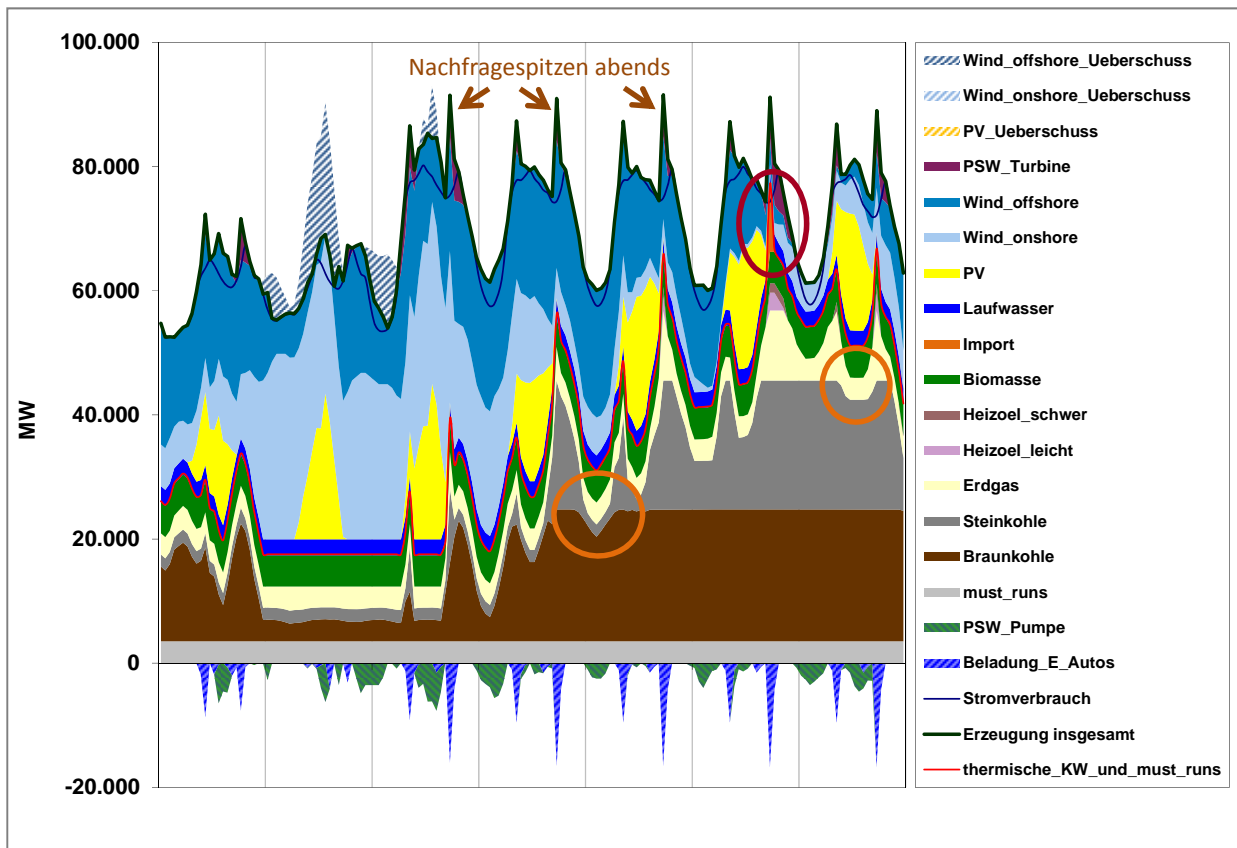


Abbildung 6: Kraftwerkseinsatz in stündlicher Auflösung für eine ausgewählte Oktoberwoche im Szenariojahr 2030 – mit Elektromobilität ohne Lademanagement

Das Lademanagement sorgt für die möglichst kostengünstige Produktion des zusätzlich erzeugten Stroms. Daher verschiebt es die Ladung der Autos in solche Stunden, in denen das Grenzkraftwerk ein möglichst kostengünstiges ist (Abbildung 7). Das sind insbesondere Kohlekraftwerke, deren Anteil an der zusätzlichen Stromproduktion mit Lademanagement deutlich höher ist als ohne Lademanagement (vgl. orange markierte Bereiche in Abbildung 6 und Abbildung 7). Noch günstiger sind erneuerbare Energien und im Jahr 2020 auch Kernenergie, aber diese werden bereits im Basislauf ohne Elektromobilität stets bevorzugt zur Deckung der Stromnachfrage verwendet, so dass es nur in Ausnahmefällen noch freie erneuerbare oder nukleare Kapazitäten gibt. Im Jahr 2020 ist dies nur selten der Fall, aber im Jahr 2030 kann das Lademanagement den Anteil erneuerbarer Energien am zusätzlich produzierten Strom immerhin von 5 % auf 19 % steigern.

Insgesamt erhöht das Lademanagement also sowohl den Anteil erneuerbarer Energien, falls es nutzbare Überschüsse gibt, als auch den Anteil an tendenziell emissionsintensiven Grundlastkraftwerken. Damit liegt der CO₂-Emissionsfaktor des zusätzlich produzierten „Fahrstroms“ mit knapp 900 g/kWh im Jahr 2020 bzw. ca. 700 g/kWh im Jahr 2030 deutlich

über dem durchschnittlichen Emissionsfaktor der gesamten Stromproduktion mit 520 g/kWh (2020) bzw. 490 g/kWh im Jahr 2030. Durch den zusätzlichen Verbrauch der Elektrofahrzeuge wird also nicht einfach mehr Strom mit durchschnittlicher Emissionsintensität produziert, sondern besonders CO₂-intensiver Strom.

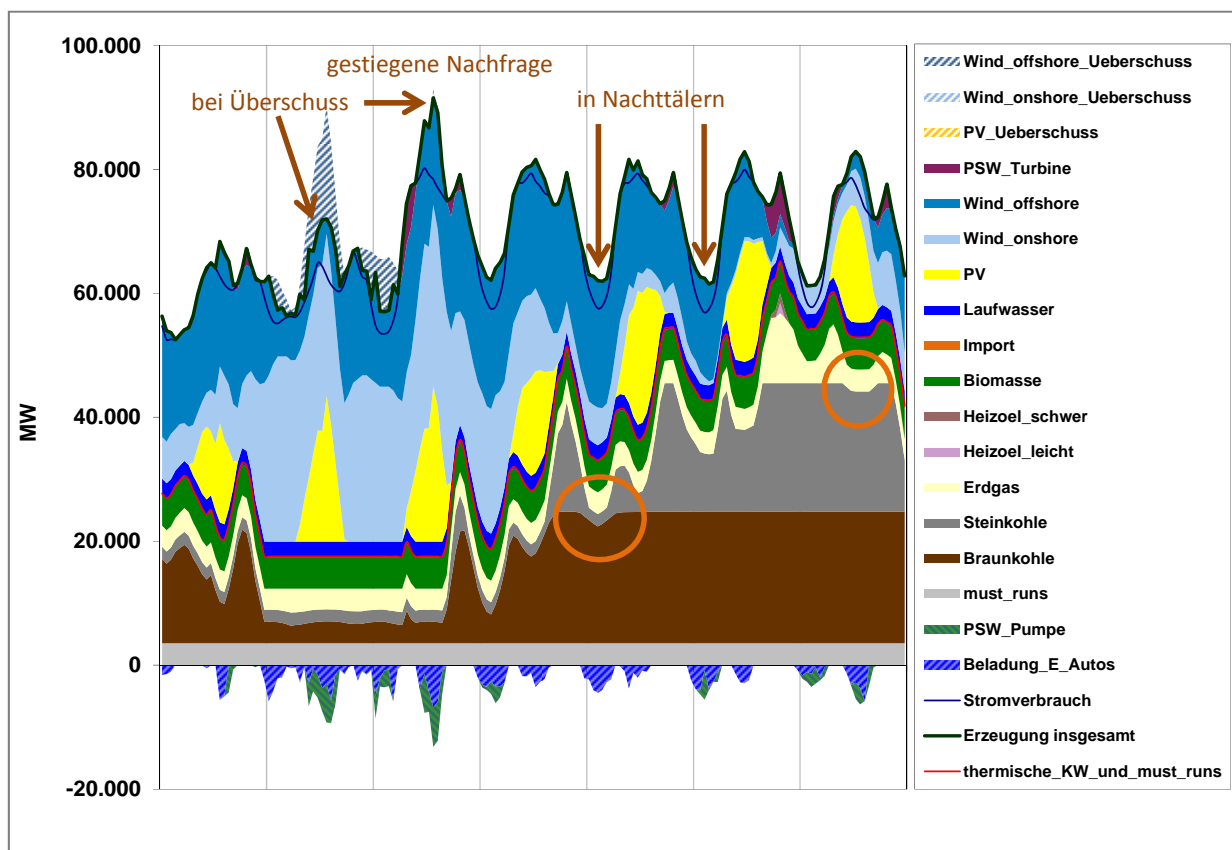


Abbildung 7: Kraftwerkseinsatz in stündlicher Auflösung für eine ausgewählte Oktoberwoche im Szenariojahr 2030 – mit Elektromobilität mit Lademanagement

Wenn zusammen mit der Elektromobilität auch erneuerbare Energien ins System kommen, können diese konventionelle Stromerzeugung ersetzen. So zeigen die Ergebnisse für die Läufe *ohne Lademanagement mit zusätzlichen erneuerbaren Energien*, dass die hier betrachteten erneuerbaren Energien, Wind, Photovoltaik und Biomasse vor allem Stromerzeugung in klassischen Grundlastkraftwerken verdrängen. Am stärksten tritt dieser Verdrängungsmechanismus bei der hier zugrunde gelegten Windeinspeisung auf. Hier kann selbst das Lademanagement, das prinzipiell kostengünstigere (Grundlast-)Kraftwerke bevorzugt, diesen Effekt nicht komplett aufheben. Bei zusätzlicher Photovoltaik-Einspeisung oder den regelbaren Biogasanlagen hingegen bewirkt das Lademanagement, dass die für die Elektrofahrzeuge stattfindende Stromerzeugung von teurerem Steinkohle- und Erdgasstrom hin zu kostengünstigeren Alternativen wie Braunkohle (2020) bzw. Wind (2030) verlagert wird.

In allen *Varianten mit zusätzlichen erneuerbaren Energien und Lademanagement* kann der Fahrstrom als vollständig erneuerbar angesehen werden. In den Varianten mit zusätzlichen PV- und Biogas-Anlagen steht nicht nur deren zusätzliche Stromerzeugung zur Verfügung,

sondern das Lademanagement kann außerdem bisher nicht integrierbaren überschüssigen erneuerbaren Strom nutzen, so dass sich rechnerisch ein erneuerbarer Anteil an der Differenzstromerzeugung von über 100 % ergibt. Es wird also nicht nur der Bedarf der Fahrzeuge gedeckt, sondern darüber hinaus auch konventionelle fossile Stromerzeugung verdrängt.

Die Emissionsfaktoren des zusätzlich erzeugten Stroms liegen zwischen maximal 179 g/kWh und niedrigen negativen Werten, wenn durch Verdrängungseffekte weniger CO₂ emittiert wurde als im Basislauf.

Im Hinblick auf die Effekte, die die Elektromobilität auf den Stromsektor hat, zeigen die Ergebnisse: Mit den hier verwendeten Annahmen sind nicht integrierbare, überschüssige erneuerbare Energien innerhalb des betrachteten Zeithorizonts bis 2030 nur in geringem Umfang vorhanden. Gleichzeitig ist die Elektromobilität mit einer jährlichen Stromnachfrage von ca. 11 TWh im Jahr 2030 im Vergleich zum gesamten Nettostromverbrauch von 593 TWh noch relativ niedrig. Aus Sicht des Energiesystems ist deshalb auch der Beitrag, den die Elektromobilität in Kombination mit Lademanagement für die Integration erneuerbarer Energien im betrachteten Zeithorizont leisten kann, noch überschaubar.

Interessant ist auch, dass das Lademanagement mit der anderen abgebildeten Flexibilitätsoption, den Pumpspeicherkraftwerken interagiert. Mit Lademanagement kommen diese weniger häufig zum Einsatz.

Aus den vorangegangenen Analysen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- » Lademanagement ist grundsätzlich sinnvoll, um Lastspitzen im System zu vermeiden.
- » Lademanagement erhöht den Anteil erneuerbarer Energien am Fahrstrom, falls es nutzbare, bisher nicht integrierbare erneuerbare Stromüberschüsse gibt.
- » Ohne zusätzliche erneuerbare Energieanlagen erhöht das Lademanagement nicht nur den Anteil erneuerbarer Energien am Fahrstrom, sondern auch den Anteil an tendenziell emissionsintensivem Strom aus klassischen Grundlastkraftwerken.
- » Zentral ist für den Klimanutzen von Elektrofahrzeugen der Bau zusätzlicher erneuerbarer Kapazität: Mit zusätzlichen erneuerbaren Energien und bei Einsatz von Lademanagement ist der gegenüber dem Basisszenario zusätzlich produzierte „Fahrstrom“ vollständig erneuerbar. Die CO₂-Emissionsfaktoren dieser zusätzlichen Stromproduktion sind nahe Null.
- » Generell sollte der Beitrag der Elektromobilität zur Erhöhung der Flexibilität im Stromsystem und zur Integration erneuerbarer Energien nicht losgelöst von anderen Flexibilitätsoptionen entwickelt werden. Elektromobilität muss dabei im Zusammenspiel mit anderen Flexibilitätsoptionen wie beispielsweise anderen intelligenten Verbrauchern und Speichern oder dem Netzausbau betrachtet werden.

CO₂-Bilanz Elektromobilität

6.1 Vorgehen

Da im Falle von Elektrofahrzeugen vor allem die Strombereitstellung ausschlaggebend für die Emissionsbilanz ist, erfordert der Emissionsvergleich verschiedener Antriebsoptionen eine Gesamtbetrachtung (Well-to-Wheel-Ansatz), die sowohl die direkten als auch die indirekten Emissionen des Fahrzeugantriebs berücksichtigt. Für den Vergleich auf Einzelfahrzeugebene werden die Ergebnisse der Strommarktmodellierung genutzt und die Treibhausgasintensität der Strombereitstellung mit der Stromnachfrage entsprechend der ermittelten Nutzungsprofile gekoppelt. Nur so ist ein konsistenter Vergleich konventioneller und elektrischer Pkw möglich. Neben der ermittelten CO₂-Intensität der zusätzlichen Stromerzeugung werden auch die CO₂-Emissionen der konventionellen Kraftstoffbereitstellung für verbrennungsmotorische Pkw in die Betrachtung mit einbezogen, da sich diese über die Zeit vor allem auf Grund einer zunehmenden Biokraftstoffbeimischung ändern. Ferner ist zu beachten, dass ein konsistenter Vergleich berücksichtigen muss, dass auch konventionelle Vergleichsfahrzeuge ihre Energieeffizienz bis 2030 noch deutlich steigern werden.

Neben einer exemplarischen Betrachtung auf Fahrzeugebene, die die CO₂-Bilanz der betrachteten Fahrzeugantriebe für verschiedene Optionen der Stromerzeugung gegenüberstellt, ermöglicht die Gesamtbetrachtung des deutschen Pkw-Bestands die Quantifizierung des CO₂-Minderungspotenzials für die in Kapitel 4 dargestellte Marktentwicklung Elektromobilität.

Die Ergebnisse der CO₂-Bilanzierung beziehen sich auf die unmittelbaren Auswirkungen von Elektromobilität auf die CO₂-Bilanz von Einzelfahrzeugen bzw. des Pkw-Bestands. Mögliche Wechselwirkungen mit dem Europäischen Emissionshandelssystem (ETS) werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

6.2 Ergebnisse zur CO₂-Bilanz auf Fahrzeugebene

Die Treibhausgasbilanzierung auf Fahrzeugebene veranschaulicht die CO₂-Minderung, die durch den Einsatz eines Plug-In-Hybrid-Pkw bzw. eines batterieelektrischen Fahrzeugs anstelle eines herkömmlichen verbrennungsmotorischen Pkw je gefahrenem Kilometer bei unterschiedlichen Stromerzeugungsoptionen realisiert werden kann.

Exemplarisch wird der CO₂-Bilanzvergleich der betrachteten Antriebstypen am Beispiel eines Fahrzeugs der Größenklasse „mittel“ und für das Jahr 2030 aufgezeigt. Die CO₂-Bilanzierung berücksichtigt den realen Energieverbrauch eines im Jahr 2030 neu zugelassenen Pkw. Für Fahrzeuge mit (teil-)elektrischem Antrieb wird ferner ein mittlerer Batterieladewirkungsgrad von 90 % unterstellt. Der elektrische Fahranteil des Plug-In-Hybridfahrzeugs von 67 % leitet sich als Durchschnittswert aus den Simulationen der Fahrzeugnutzung ab.

Beim Vergleich der Antriebsoptionen wird die Stromerzeugung für Elektrofahrzeuge für den Fall ohne zusätzlichen Ausbau von regenerativen Energien, sowie für den Fall eines zusätzlichen Ausbaus an Windenergieanlagen zur Deckung des Strombedarfs von Elektrofahrzeugen gegenübergestellt. In beiden Fällen wird ein Lademanagement unterstellt, das die Batterieladung auf möglichst preisoptimale Zeitpunkte verschiebt.

Wie Abbildung 8 veranschaulicht, ergeben sich je nach Art der Strombereitstellung sehr unterschiedliche Effekte auf die spezifischen CO₂-Emissionen von Elektrofahrzeugen. Ohne den zusätzlichen Ausbau von Erneuerbare-Energien-Anlagen liegen die Gesamtemissionen von Plug-In-Hybrid- und batterieelektrischen Pkw im Jahr 2030 16 % bzw. 17 % über dem Emissionsniveau eines konventionellen Benzin-Pkw. Durch den zusätzlichen Ausbau von Windenergieanlagen könnten die Emissionen gegenüber einem herkömmlichen Vergleichsfahrzeug deutlich gesenkt werden: um 97 % für batterieelektrische Pkw und um 65 % für ein Plug-In-Hybridfahrzeug. Die direkten Emissionen des Plug-In-Hybridfahrzeugs bleiben unberührt durch die Art der Strombereitstellung, da diese im konventionellen Fahrzeugbetrieb bei der Verbrennung von Flüssigkraftstoff entstehen.

Unter Vernachlässigung der direkten Effekte von Elektromobilität auf die Stromwirtschaft wird häufig auch die durchschnittliche CO₂-Intensität der Gesamtstromerzeugung für die Darstellung der Emissionsbilanz von Elektrofahrzeugen herangezogen. In diesem Fall würden sich die spezifischen Fahrzeugemissionen um 13 % (PHEV) bzw. 24 % (BEV) gegenüber einem konventionellen Vergleichsfahrzeug im Jahr 2030 verringern.

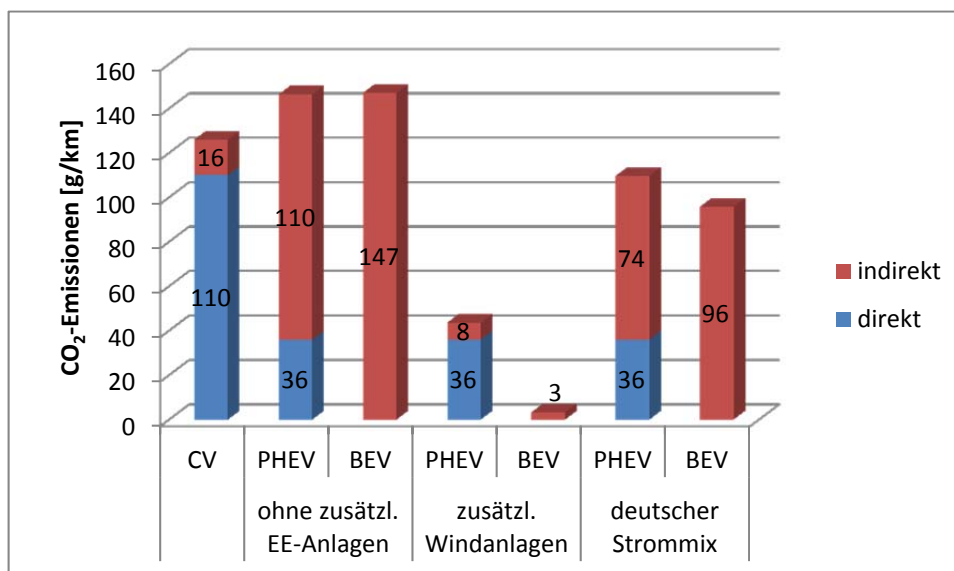


Abbildung 8: CO₂-Bilanz 2030 für unterschiedliche Stromerzeugungsoptionen, **mit** Lademanagement – Vergleich der spezifischen CO₂-Emissionen eines konventionellen Benzinfahrzeugs (CV) der Größenklasse "mittel" mit einem Fahrzeug mit Plug-In-Hybrid- (PHEV) bzw. batterieelektrischem Antrieb (BEV).

Zunächst legt der Vergleich der spezifischen Emissionen im optimalen Fall eines zusätzlichen Ausbaus von regenerativen Energien den Schluss nahe, dass batterieelektrische Fahrzeuge auf Fahrzeugebene den höchsten CO₂-Minderungsbeitrag bei der Substitution konventioneller Pkw erzielen können. Entscheidend für die Bestimmung der absoluten CO₂-Bilanz auf Fahrzeugebene ist jedoch neben den spezifischen Emissionen, die Berücksichtigung der tatsächlichen Pkw-Fahrleistung. Denn erst das Produkt aus spezifischen Fahrzeugemissionen und der Fahrleistung quantifiziert die absolute Höhe der CO₂-Emissionen.

Batterieelektrische Fahrzeuge zeichnen sich im Vergleich zu Plug-In-Hybridfahrzeugen durch eine um durchschnittlich etwa 40 % geringere Jahresfahrleistung aus. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass beim Einsatz eines batterieelektrischen Pkw anstelle eines konventionellen Fahrzeugs eine im Vergleich zum Plug-In-Hybrid-Pkw geringere Fahrleistung substituiert wird. In Abbildung 9 ist dieser Effekt für die jährlichen CO₂-Emissionen am Beispiel der beiden elektrischen Antriebstopen und ihrer jeweiligen Jahresfahrleistung für den Fall einer besonders emissionsarmen Energieerzeugung aus zusätzlichen Windanlagen illustriert. Zwar erreicht auch hier das batterieelektrische Fahrzeug gegenüber einem herkömmlichen Pkw – dank nahezu emissionsfreier Strombereitstellung – mit 97 % eine deutlich höhere relative CO₂-Minderung als das Plug-In-Hybrid-Fahrzeug (65 %). Die absolute CO₂-Einsparung pro Jahr liegt allerdings angesichts der höheren Fahrleistung im Falle des PHEV trotz eines konventionellen Fahranteils von 33 % mit 1.135 kg CO₂ um 13 % höher als für das batterieelektrische Fahrzeug (983 kg CO₂-Einsparung).

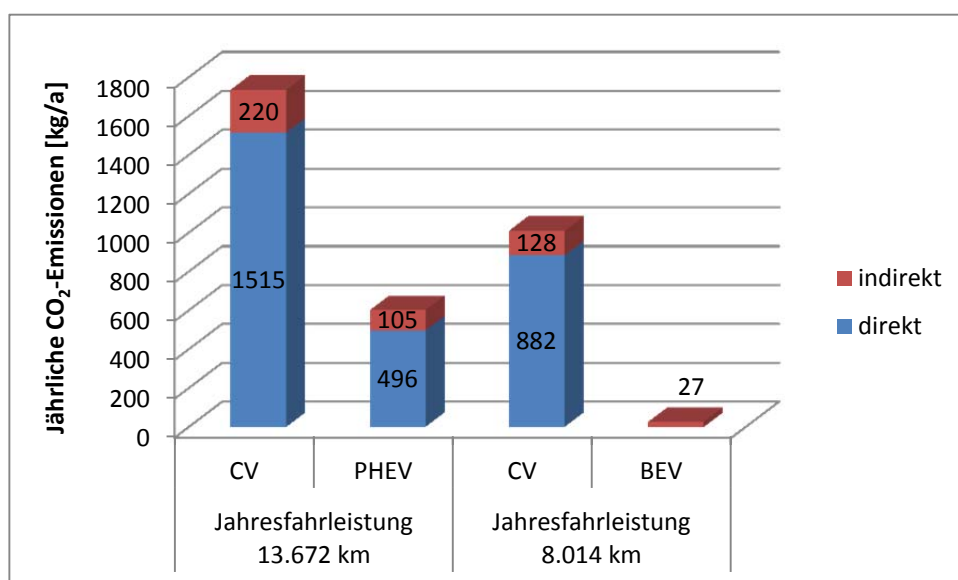


Abbildung 9: Vergleich der jährlichen CO₂-Emissionen eines konventionellen Benzin-Pkw (CV) mit einem Plug-In-Hybrid- (PHEV) bzw. batterieelektrischen Pkw (BEV) im Jahr 2030. (Emissionsfaktor der Stromerzeugung bei zusätzlichem Ausbau erneuerbarer Energien (Wind) und bei Lademanagement)

6.3 Ergebnisse zur CO₂-Bilanz im Kontext des deutschen Pkw-Bestands

Die Betrachtung der CO₂-Effekte von Elektromobilität im Kontext des deutschen Pkw-Gesamtbestands knüpft an die Analysen zur Markt- und Fahrleistungsentwicklung für Elektromobilität (Kapitel 4) an und berücksichtigt die zukünftige Effizienzentwicklung von Personenkraftwagen bis zum Jahr 2030 und kombiniert diese mit der jeweiligen CO₂-Intensität der Energiebereitstellung für konventionelle Kraftstoffe und Strom. Die Grundlage der Betrachtung ist der Vergleich einer Bestandsentwicklung ohne Elektromobilität mit dem in Kapitel 4 dargestellten Szenario Elektromobilität, in dem Plug-In-Hybridfahrzeuge und batterieelektrische Pkw zunehmend konventionelle Otto- und Diesel-Pkw substituieren.

Für das betrachtete Szenario Elektromobilität, welches bis zum Jahr 2020 einen Bestand von etwa 537.000 Elektrofahrzeuge (64.000 BEV/ 473.000 PHEV) und im Jahr 2030 rund 5,8 Millionen Fahrzeuge (780.000 BEV/ 5.080.000 PHEV) umfasst, werden bei der Bilanzierung der CO₂-Gesamteffekte auf den Pkw-Bestand zwei Energieerzeugungsoptionen berücksichtigt.

Neben einem Referenzfall ohne Elektromobilität wird der Effekt des Elektromobilitätsszenarios auf die Gesamtemissionen des Pkw-Bestands zum Einen für den Fall eines zusätzlichen Ausbaus regenerativer Energien (Windanlagen) sowie zum Anderen ohne entsprechenden Zubau von Erneuerbare-Energien-Anlagen betrachtet. In diesem Kontext sei nochmals erwähnt, dass entsprechend der Methodik der Strommarktbeurteilung, die CO₂-Intensität der Strombereitstellung sich jeweils auf die **zusätzliche** Stromerzeugung für Elektrofahrzeuge bezieht und nicht die mittleren Emissionen der Gesamtstromerzeugung darstellt.

Wie das in Abbildung 10 veranschaulichte Ergebnis der Emissionsberechnung zeigt, führt Elektromobilität unter diesen Umständen nur im Falle eines zusätzlichen Ausbaus von Kapazitäten zur regenerativen Stromerzeugung zu einem CO₂-Minderungseffekt. Andernfalls steigen die Gesamtemissionen sogar über die Referenzentwicklung ohne Elektromobilität.

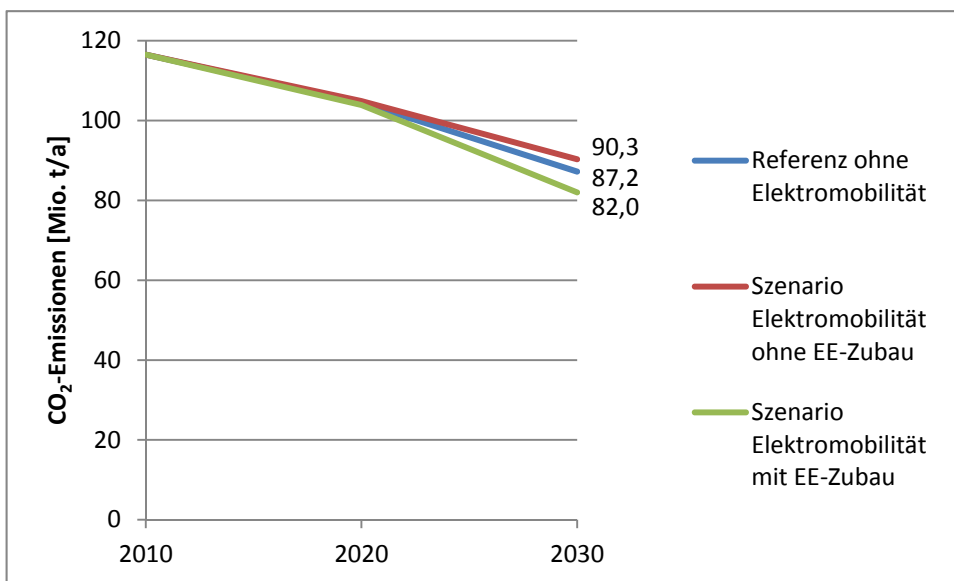


Abbildung 10: CO₂-Emissionen des Pkw-Bestands im Referenzfall ohne Elektromobilität und im Szenario Elektromobilität für unterschiedliche Stromerzeugungsoptionen

Ohne zusätzlichen Erneuerbaren-Energien-Ausbau würden die Gesamtemissionen im Jahr 2030 hingegen mit 3,1 Millionen Tonnen CO₂ um 3,6 % über dem Referenzfall liegen. Im Falle eines zusätzlichen Ausbaus von Erneuerbare-Energien-Anlagen sinken die Gesamtemissionen des Pkw-Bestands durch den verstärkten Einsatz von Elektrofahrzeugen dagegen um 0,6 Millionen Tonnen CO₂ (2020) bzw. 5,2 Millionen Tonnen (2030). Dies bedeutet gegenüber einem Referenzfall ohne Elektrofahrzeuge eine Minderung der CO₂-Emissionen des Pkw-Bestands in Deutschland um 0,6 % im Jahr 2020 und um 6,0 % im Jahr 2030.

Ökonomische Betrachtung der Speichermedien

Das Ladeverhalten beeinflusst die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen. Zum einen werden die Strombezugskosten vom Ladezeitpunkt bestimmt. So wäre es bei einer Ladesteuerung von Elektrofahrzeugen möglich, diese zu laden, wenn der Wind weht oder die Preise am Strommarkt niedrig sind. Zum anderen ist es denkbar, dass Elektrofahrzeuge durch intelligentes Lademanagement Systemdienstleistungen (Regelleistung) für den Energiesektor bereitstellen. Eine weitere Option ist das bidirektionale Lademanagement (V2G). Daher wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens OPTUM auch eine Analyse bezüglich einer ökonomischen Bewertung der verschiedenen Interaktionen mit dem Energiesektor durch Elektrofahrzeuge durchgeführt.

7.1 Lademanagement

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung von Elektrofahrzeugen ist der Endkundenpreis des Strombezugs ausschlaggebend. Nur ein Teil davon, nämlich der Strombezug am Großhandelsmarkt, kann jedoch durch Lademanagement beeinflusst werden. Ladezeitraum und Ladedauer orientieren sich zum einen an den Erfordernissen der Fahrzeugnutzung (Standzeiten, minimaler Füllstand zu Beginn der nächsten Fahrt usw.). Zum anderen wird die Beladung preisoptimiert gestaltet, so dass die Strombezugskosten in Abhängigkeit vom Strommarkt möglichst gering ausfallen.

Basierend auf historischen Preisen für die Jahre 2008 bis 2010 wurde eine Abschätzung vorgenommen, wie stark sich die Strombezugskosten für Elektrofahrzeuge durch eine Verlagerung in lastschwache Zeiten senken lassen. Je nach Fahrleistung der betreffenden Elektrofahrzeuge und in Abhängigkeit vom Verschiebezeitraum lassen sich 26 bis 101 € pro Jahr durch Lademanagement einsparen. Bezogen auf die jährlichen Stromkosten für ein Elektroauto machen die am Großhandelsmarkt mit den dargestellten Verlagerungen einsparbaren Beträge nur etwa 10 % aus. Vor dem Hintergrund der mit dem Lademanagement verbundenen Einschränkungen aus Nutzerperspektive ist die Attraktivität des Lademanagements aus heutiger Sicht als gering einzuschätzen.

Für die Jahre 2020 und 2030 führt ein Lademanagement für ein durchschnittliches Elektrofahrzeug zu jährlich Kosteneinsparungen von 26 bis 29 € (2020) bzw. 100 € (2030). Dies entspricht etwa 7 bis 8 % (2020) bzw. 19 bis 22 % (2030) der jährlichen Stromkosten, wenn ein Endkundenpreis mit ähnlicher Preisstruktur wie heute zugrunde gelegt wird. Damit ist wie unter heutigen Bedingungen die ökonomische Attraktivität des Lademanagements auch in den Betrachtungsjahren 2020 und 2030 eher gering.

7.2 Vehicle-to-grid (V2G)

Eine weitere Möglichkeit der Interaktion von Elektrofahrzeugen mit dem Strommarkt ist die bidirektionale Anbindung an das Stromnetz einschließlich einer möglichen Rückspeisung von Strom in das Netz (Vehicle-to-grid (V2G)). In welchem Umfang diese Möglichkeit zum Einsatz kommen könnte, hängt neben technischen Randbedingungen wie der Zyklenfestigkeit der Batterien oder der Realisierung der dafür notwendigen Netzinfrastruktur von der wirtschaftlichen Attraktivität der Rückspeisung des Stroms ab.

Grundsätzlich können bei einer bidirektionalen Anbindung von Elektrofahrzeugen die Einsparpotenziale des reinen Lademanagements genutzt werden. Darüber hinaus kann die Batterie während der Standzeit des Elektrofahrzeugs dazu genutzt werden, Strom aus dem Netz zu beziehen und diesen zu einem späteren Zeitpunkt wieder einzuspeisen (ohne also den Strom für den Fahrzeugbetrieb zu nutzen). Dadurch ergeben sich weitere Kosten und Erlöse auf dem Strommarkt.

Bedingt durch die hohen Kosten für die Batterieabnutzung und die Wirkungsgradverluste der Speicherung lässt sich die Rückspeisung von Strom mit V2G in den meisten betrachteten Szenarien jedoch nicht wirtschaftlich darstellen. Nur im Vergleich zu den sehr hohen Strompreisen im Jahr 2008 und bei Annahme sehr niedriger Kosten für die Batterieabnutzung sowie einer Erstattung der EEG-Umlage, der Stromsteuer, der Mehrwertsteuer sowie der Netznutzungsentgelte lassen sich Erlöse in der Größenordnung von bis zu 50 €/Jahr erzielen. Dabei ist anzumerken, dass diese Erlöse die Kosten für die Börsenanbindung sicherlich nicht decken werden.

7.3 Regelenergiemarkt

Potenziell kommt für Elektrofahrzeuge auch ein Einsatz auf dem Regelenergiemarkt in Betracht. Regelleistung wird dann benötigt, wenn unvorhergesehene Schwankungen bei Leistungsnachfrage oder -angebot im Netz entstehen, beispielsweise durch Kraftwerksausfall oder durch Änderung der Windeinspeisung, die kurzfristig ausgeglichen werden müssen. Der Ausgleich findet über regelfähige Kraftwerke (wie Gasturbinen oder Pumpspeicherkraftwerke, große konventionelle Kraftwerke wie Kohlekraftwerke tragen jedoch grundsätzlich auch zur Regelleistung bei), zum Teil aber auch durch regelfähige Lasten (wie beispielsweise Kühlhäuser) statt.

Positive Regelleistung ist dann erforderlich, wenn ein zusätzliches Stromangebot (oder eine verringerte Nachfrage) benötigt wird, beispielsweise durch kurzfristige Erzeugung von Strom in einem Pumpspeicherkraftwerk oder durch Nachfragereduktion in einem Kühlhaus. Umgekehrt bedeutet negative Regelleistung, dass das Leistungsangebot reduziert oder die Leistungsnachfrage erhöht werden muss.

Eine Teilnahme von Elektrofahrzeugen am Markt für Primärregelleistung und Sekundärregelleistung erscheint aufgrund der Präqualifikationsbedingungen nicht realistisch. Am Regelenergiemarkt erscheint insbesondere die Bereitstellung von negativer Minutenreserve in den Nachstunden interessant, weil hier die höchsten Preise realisiert werden können. Der Betreiber eines Elektrofahrzeuges könnte auf diese Weise einen Erlös von bis zu 80 € pro Jahr realisieren, müsste jedoch Nutzungseinbußen hinnehmen, weil er das Auto nachts nicht nutzen könnte.

7.4 Schlussfolgerungen

Grundsätzlich zeigt die Analyse der wirtschaftlichen Bewertung der verschiedenen Möglichkeiten der Interaktion mit dem Energiesystem, dass die Erlösmöglichkeiten durch Lademanagement, Rückspeisung in das Netz (V2G) und Teilnahme am Regelenergiemarkt beschränkt sind. Im optimistischsten Fall könnten Erlöse von 100 € (Lademanagement), 50 € (V2G) bzw. 80 € (Regelenergiemarkt) pro Jahr erzielt werden.

Damit verbunden sind jedoch zum einen technische und administrative Anforderungen für Steuerung bzw. für die Anbindung an Strom- und Regelenergiemarkt. Des Weiteren führt die Nutzung dieser Optionen zum Teil zu Einschränkungen für den Nutzer, da das Elektrofahrzeug nicht zu jedem Zeitpunkt zur Verfügung steht.

Grundsätzlich ist das Lademanagement technisch einfacher umzusetzen als die Rückspeisung bei V2G. Gleichzeitig hat das Lademanagement den Vorteil, dass es nicht zu zusätzlichen Kosten für die Batterieabnutzung und zu Speicherverlusten führt. Aus technischer Sicht ist Lademanagement also sinnvoller anzusehen als die Rückspeisung von Strom.

Auf den ersten Blick zeigt sich, dass insbesondere für Elektrofahrzeuge mit geringen Fahrleistungen die Bereitstellung von negativer Minutenreserve wirtschaftlich attraktiver ist als das Lademanagement. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass für die Bereitstellung der negativen Minutenreserve sehr viel aufwendigere Steuerungselektronik benötigt wird als für das Lademanagement.

Insgesamt stellt sich damit auf mittlere Sicht das Lademanagement als die wirtschaftlichste Option dar, Flexibilität für die Integration erneuerbarer Energien seitens der Elektrofahrzeuge bereitzustellen.

Die hier mit dem Modell PowerFlex durchgeführten Modellierungen lassen auch für die Jahre 2020 und 2030 keine Verbesserungen der Wirtschaftlichkeit des Lademanagements erwarten. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die künftige Preisentwicklung am Strommarkt mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist. Auf die Entwicklung der Erlösmöglichkeiten für Elektrofahrzeuge hat außerdem das zukünftige Marktdesign im Stromsektor Einfluss. So wird beispielsweise diskutiert, den Strommarkt um Kapazitätselemente zu ergänzen. Dies könnte eine weitere Erlösquelle darstellen und damit die Wirtschaftlichkeit der Flexibilitätsbereitstellung für Elektrofahrzeuge verbessern. Vor diesem Hintergrund wird empfohlen, ein regelmäßiges Monitoring (z.B. jährlich oder alle zwei Jahre) durchzuführen, das die Preisentwicklung an den Strombörsen, den Regelenergiemärkten und das Marktdesign untersucht und über den Zeitverlauf einen Wirtschaftlichkeitsindikator für die Bereitstellung von Flexibilitätsdienstleistungen durch Elektrofahrzeuge darstellt.

Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität

8.1 Hintergrund

Die erwartete und in Deutschland durch die Bundesregierung forcierte Marktentwicklung von Elektromobilität wird ohne Zweifel auch erhebliche Konsequenzen auf den Ressourcenbedarf wichtiger und zum Teil kritischer Metalle haben. Da bereits schon heute für eine ganze Reihe Metalle (z.B. Seltene Erden, Indium) durch Nachfragewachstum in anderen Branchen Versorgungsengpässe aktuell sind, hat das Bundesumweltministerium das Öko-Institut im Rahmen des Vorhabens „Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen – Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft – OPTUM“ beauftragt, auch die „Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität“ zu untersuchen.

Das Öko-Institut untersuchte in diesem Zusammenhang, unterstützt von den Partnern Daimler AG, Umicore und TU Clausthal, die folgenden Fragestellungen:

- » Welches sind die wesentlichen Rohstoffe, die in Elektroautos (bzw. Hybridfahrzeugen) verwendet werden?
- » Welcher mengenmäßige Bedarf an diesen Rohstoffen ist für das System Elektromobilität auf globaler Ebene bis 2030 zu erwarten?
- » Wie relevant sind die Umweltauswirkungen, welche mit der Gewinnung und der Weiterverarbeitung der entsprechenden Rohstoffe verbunden sind?
- » Wie hoch sind demgegenüber die Umweltbelastungen, die durch die Elektromobilität erwartet werden?
- » Wie ist der Stand des Recyclings der wesentlichen Metalle heute und wie sind die Perspektiven für die Zukunft?
- » Wie ist die Situation auf der Primärrohstoffseite, d.h. vorhandene Reserven und deren Reichweite, technische und politische Einflüsse auf die Versorgung?
- » Welche Auswirkungen wird der geplante globale Ausbau der Elektromobilität auf die Versorgungssituation und die zukünftige Preisentwicklung der benötigten Rohstoffe haben?
- » Welche Entlastungspotenziale liegen in der Reduzierung des spezifischen Metallbedarfs für definierte Komponenten oder welche alternativen Technologien können dämpfend auf den Rohstoffbedarf einwirken?

8.2 Vorgehen

Das Projektteam hat Antworten auf die obigen Fragen erarbeitet, indem aufbauend auf den spezifischen Kenntnissen der einzelnen Partner intensive Fachrecherchen inkl. Einzelinterviews bei externen Fachinstitutionen durchgeführt wurden. Wesentliches Element

war zudem die Präsentation und offene Diskussion von Zwischenergebnissen auf insgesamt drei Fach-Workshops mit Experten aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik.

Nach einer intensiven Vollrecherche bezüglich 56 Metallen wurden vom Projektteam nach Diskussion auf dem ersten Fach-Workshop zunächst 15 Metalle mit erster Priorität für die Elektromobilität eingestuft. Davon wurden Lithium und Kobalt nicht vertieft im Projekt behandelt, da sie bereits in anderen Projekten⁵ des BMU-Programms intensiv adressiert wurden. Ruthenium ist im Laufe des Projektes im Einvernehmen aller Beteiligten aus der Liste der prioritären Metalle herausgenommen worden. Die verbleibenden 12 prioritären Metalle, die im Projekt vertieft untersucht wurden, sind Neodym (Nd), Praseodym (Pr), Dysprosium (Dy), Terbium (Tb), Indium (In), Gallium (Ga), Germanium (Ge), Gold (Au), Silber (Ag), Kupfer (Cu), Platin (Pt) und Palladium (Pd).

Um den möglichen zukünftigen Bedarf durch die Elektromobilität an den prioritären Metallen zu quantifizieren, wurde vom Projektteam auf den globalen Marktszenarien von McKinsey (2009) für die Entwicklung der Elektromobilität aufgesetzt. Diese wurden verknüpft mit differenzierten Mengendaten der Metalle (1. Priorität) zu den wesentlichen Komponenten⁶ der unterschiedlichen Antriebstypen (Hybrid-, Plug-In-Hybrid-, Range-Extender-, batterieelektrisches und Brennstoffzellen-Fahrzeug) der Elektromobilität. Die detaillierten Daten für die Rohstoffbedarfe der jeweiligen Komponenten wurden vom Projektteam unter Auswertung aller verfügbaren Quellen und nach intensiver Diskussion mit den Experten der Fach-Workshops festgelegt.

Die spezifischen Szenarien basierten zunächst auf dem optimistischen Szenario von McKinsey für die Entwicklung der Elektromobilität (Basisszenario I). Varianten mit Einfluss auf den globalen Bedarf an Primärmetallen wurden durch

- » Zusätzliche Annahmen zur stärkeren Materialeffizienz (weniger Metalle pro Komponente): Innovationsszenario II
- » Aufbauend auf Innovationsszenario II zusätzliche Annahmen zum verstärkten Recycling: Recyclingszenario III
- » Aufbauend auf dem Recyclingszenario III zusätzliche Annahmen zur partiellen Substitution von Elektromotoren mit Permanentmagneten (Seltene Erden) durch alternative Motoren: Substitutionsszenario IV

erstellt.

Schließlich wurde das moderate McKinsey-Szenario bezüglich des Wachstums der Elektromobilität mit allen Annahmen des Substitutionsszenarios kombiniert.

⁵ LithoRec: <http://www.pt-elektromobilitaet.de/projekte/batterierecycling/lithorec>;

LiBRi: <http://www.pt-elektromobilitaet.de/projekte/batterierecycling/libri>

⁶ Erfasst wurden alle wesentlichen Komponenten wie Elektromotor, Leistungselektronik usw. In der Arbeit wurde die Komponente Batterie ausgeklammert, da die Batteriemetalle Lithium und Kobalt bereits in LiBRi und LithoRec ausführlich untersucht wurden und in LithoRec Gegenstand von Szenarien waren.

8.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der verschiedenen Szenarien ergaben für den globalen Bedarf an Primärmetallen bis 2030 für die Elektromobilität klare Tendenzen. Im Vergleich zur gesamten Primärproduktion der Metalle im Ausgangsjahr 2010 fielen vor allem die Seltenen Erden (Nd, Pr, Dy, Tb) sowie Gallium als besonders relevant auf. Am markantesten zeigte sich der Bedarfsanstieg der Elektromobilität bei Dysprosium. Hier entspricht der Bedarf für die Elektromobilität im Jahre 2030 im Basisszenario verglichen mit der heutigen Gesamtproduktion dieses Metalls 482 %. In den anderen Szenarien sind durch die unterstellten Maßnahmen zwar Dämpfungen des Bedarfsanstiegs festzustellen, aber mit 287 % (Innovationsszenario), 191 % (Recyclingszenario) sowie 71 % (Substitutionsszenario) ist trotz umfangreicher Maßnahmen für die Zukunft mit einem deutlich wachsenden Bedarf an Dysprosium für Elektromobilität auszugehen. Dies gilt auch für die Ergebnisse des moderaten Szenarios.

Vor dem Hintergrund der bereits heute bestehenden Versorgungsengpässe für Dysprosium, welches heute ausschließlich in China produziert wird, erhalten die Szenarioergebnisse eine hohe Relevanz. Einem knappen Angebot auf der Primärseite, das für die nächsten Jahre anhalten wird, steht ein stetig wachsender Bedarf für die Elektromobilität gegenüber. Darüber hinaus wächst auch die Nachfrage in weiteren Anwendungsbereichen der Neodym-Eisen-Bor-Magnete, die wiederum Dysprosium benötigen. Hier ist u.a. der wachsende Sektor der Windenergie zu nennen. Ähnliche Entwicklungen sind auch für die weiteren Seltenen Erden Metalle Neodym, Praseodym und Terbium zu konstatieren, allerdings ist die Situation bei Dysprosium unter einhelliger Einschätzung der beteiligten Experten besonders angespannt.

Die Primärproduktion von Metallen ist über die Schritte Förderung, Anreicherung und metallurgische Umsetzung häufig mit erheblichen Umweltbelastungen verbunden. Im Falle der Seltenen Erden gilt dies umso mehr, da die meisten Erzvorkommen mit radioaktiven Nukliden (Thorium usw.) belastet sind, die entsprechende Risiken für Mensch und Umwelt mit sich führen. Durch Recycling von Metallen kann in der Regel neben einem wichtigen Beitrag zur Reduzierung des Nachfragedrucks auf die Primärrohstoffe ein deutlicher Beitrag zur Netto-Umweltentlastung geleistet werden. Bis heute findet jedoch weltweit ein Recycling von Seltenen Erden Metallen wie Dysprosium noch nicht statt. Die stark angezogenen Rohstoffpreise sowie die teilweise prekäre Versorgungslage hat jedoch in jüngster Zeit Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen zum Recycling von z.B. Magneten, die Seltene Erden Metalle enthalten, angestoßen. Dies gilt ebenso für viele weitere der im Projekt identifizierten prioritären Metalle.

Aus den umfangreichen Ergebnissen des Projektes „Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität“, die in den vorangegangenen Abschnitten dokumentiert sind, hat das Projektteam von Öko-Institut, Umicore, Daimler AG und TU Clausthal, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik folgende wesentliche Schlussfolgerungen gezogen:

- » Die Versorgung mit **Seltenen Erden** – vor allem Dysprosium – ist besonders kritisch. Ressourceneffizienz und technologische Substitution weisen mittelfristig das größte Potenzial zur Eindämmung von Versorgungsengpässen auf. Recycling ist mittel- und langfristig eine wichtige Option zur Verringerung von Verknappungssituationen,

allerdings aufgrund der stetig steigenden Gesamtnachfrage und der langen Lebensdauer der Produkte in den nächsten Jahren mit eher geringen Effekten.

- » **Gallium** wird auch in vielen Anwendungsbereichen außerhalb der Elektromobilität (z.B. Photovoltaik, LED) eingesetzt. Es ist mit starken Bedarfszuwächsen zu rechnen. Kurzfristig nicht, aber langfristig könnte die Versorgung mit Gallium kritisch werden bei starkem Nachfragewachstum und fehlenden Gegenmaßnahmen (Ausbau der globalen Gewinnungskapazitäten für Gallium als Nebenprodukt aus dem Bayer-Prozess (Tonerdegewinnung) und realer Einstieg in das Post-consumer-Recycling).
- » **Indium** leistet keinen entscheidenden Beitrag für die Elektromobilität. Aber: Es gibt viele konkurrierende Anwendungsbereiche mit starken Wachstumsraten. Indium kommt nur als Minor Metal vor und muss daher stark im Auge behalten werden.
- » **Germanium** leistet keinen entscheidenden Beitrag für die Elektromobilität. Aber: Es könnten große Wachstumsraten in anderen Anwendungen (z.B. Glasfasertechnik, LED) auftreten und es fehlen grundlegende Informationen zu Germanium (das „Phantom“-Element) und dessen Bedarfsentwicklung.
- » Die **Edelmetalle Silber, Gold, Palladium und Platin** spielen ebenfalls eine Rolle in den Komponenten für die Elektromobilität; hier wäre vor allem Platin für Brennstoffzellenfahrzeuge wichtig. Umgekehrt kann durch die Entwicklung der Elektromobilität bzgl. vollelektrischer Fahrzeuge der Nachfragedruck auf Platin und Palladium durch den Entfall des Autoabgaskatalysators gemindert werden.
- » Die aktuelle kritische Versorgungssituation bei einigen **Seltenen Erden** ist ein warnendes Beispiel dafür, dass Engpässe trotz global hoher geologischer Reserven zumindest temporär auftreten können, wenn geopolitische Faktoren (nahezu ausschließliche Förderung in einem Land) mit einem rasanten Nachfragewachstum korrelieren. Hieraus gilt es Lehren für die Zukunft zu ziehen, um proaktiv rechtzeitig gegensteuern zu können (durch rechtzeitige Erkundung und Erschließung von Lagerstätten, Diversifizierung der Versorgung, Förderung des Recycling usw.).

Aus den Ergebnissen und Schlussfolgerungen heraus hat das Projektteam Handlungsempfehlungen abgeleitet, die auf dem Abschlussworkshop den beteiligten Fachakteuren zur Diskussion gestellt wurden. Es zeigte sich eine breite Übereinstimmung bzgl. der Empfehlungen. Nichtsdestotrotz sind wichtige Anregungen hinsichtlich der Handlungsempfehlungen aus dem Kreis der externen Akteure an das Projektteam herangetragen worden, die in die folgende Liste der Handlungsempfehlungen eingeflossen sind:

- » Hinsichtlich des drohenden „Flaschenhalses“ bei Seltenen Erden müssen parallel verschiedene Entlastungsstrategien gefahren werden:
 - » F&E bzgl. Verminderung von Seltenen Erden (v.a. Dysprosium) in Magneten für E-Motoren sowie bzgl. SE-freien E-Motoren
 - Zuständig: Bundesministerien für Förderprogramme sowie OEMs (Hersteller von Elektromotoren, Magnethersteller) und Wissenschaft hinsichtlich Innovation

- » Entwicklung von Recyclingtechnologien für Permanentmagnete aus verschiedenen Anwendungen
→ Zuständig: Bundesministerien für Förderprogramme sowie Recyclingwirtschaft und Wissenschaft
- » Förderung von umweltfreundlicher Primärförderung von SE (Standards!)
→ Zuständig: Bundesregierung und EU-Kommission im Rahmen internationaler Verhandlungen, Minenunternehmen im Bereich Seltener Erden
- » Förderung eines umweltverträglicheren Bergbaus zur Gewinnung von kritischen Metallen
 - » Große Potenziale zur besseren Ausschöpfung natürlicher Ressourcen bestehen in höheren Gewinnungsraten bei der Primärförderung und Aufbereitung vieler Metalle (z.B. Seltene Erden). Weiterhin bestehen für wichtige Minor Metals wie Indium Potenziale aus nicht genutzten Rückständen zum Teil stillgelegter Förderstandorte.
→ Zuständig: BGR und Institute im Bereich Bergbau und Aufbereitung für die Erkundung von Bergbaurückständen und technische Kooperationen und Knowhow-Transfer zur optimierten Förderung
- » Entwicklung von Recyclingstrategien und -technologien für das Recycling von Leistungselektronik aus Alt-Elektrofahrzeugen
 - » Rückgewinnung von Kupfer, Gallium, Edelmetallen usw.
→ Zuständig: Bundesministerien für Förderprogramme sowie Recyclingwirtschaft und Wissenschaft
- » Allgemeiner Forschungsbedarf
 - » Potenzialanalysen und Recyclingmöglichkeiten für die „normale“ Elektronik und sonstige Magnetanwendungen in zukünftigen Pkw aller Art bezüglich Edel- und Spezialmetallen inkl. Seltener Erden.
→ Zuständig: Bundesministerien für Förderprogramme sowie Recyclingwirtschaft und OEMs (Hersteller von Autoelektronik und Magneten)
- » Bzgl. Gallium, Indium und Germanium werden auch aus anderen Anwendungen deutliche Zuwächse erwartet: unklar ist z.Zt. ob durch technologische Revolutionen wie LED-Technik oder Photovoltaik (nach Fukushima) die Wachstumsraten und damit die Versorgungsrisiken noch unterschätzt werden:
 - » Untersuchungsbedarf bzgl. der mittel- und langfristigen Effekte auf die Elektromobilität und Entwicklung von Lösungsstrategien.
→ Zuständig: Bundesministerien für Förderprogramme

Zukunftsaussichten und weiterer F&E-Bedarf

Aus wissenschaftlicher Sicht besteht ein hohes Verwertungsinteresse an den Ergebnissen zur Akzeptanz, den Marktdurchdringungsszenarien, den Interaktionen mit dem Strommarkt und den resultierenden Treibhausgasemissionen. Es ist geplant, diese in den nächsten Jahren auf nationalen und internationalen Konferenzen zu präsentieren (z.B. auf dem 4. Deutsch-japanischen Umweltdialogforum im November 2011 in Tokyo). Auch werden Veröffentlichungen in Fachzeitschriften angestrebt.

Anhand der Ergebnisse der empirischen Erhebung kann die Wirkung von möglichen politischen Maßnahmen aufgezeigt werden (Sensitivitätsanalysen). Die Automobilindustrie erhält durch die Ergebnisse Hinweise, wie sie geeignete Zielgruppen ansprechen kann (Segmentierung der Neuwagenkäufer). Vor allem die qualitativen Ergebnisse (z. B. Informationsdefizite, Unsicherheit bezüglich der Umweltwirkung von Elektrofahrzeugen) sind für die Kommunikationspolitik von Umweltverbänden relevant.

Wesentliches Ergebnis des Forschungsvorhabens ist, dass in einem nächsten Schritt das System Elektromobilität im Rahmen weiterer Analysen bis zum Jahr 2050 betrachtet werden sollte, welche eine weitere Ausdifferenzierung der elektrischen Antriebstechnologien sowie die langfristige Marktdurchdringung in den Blick nehmen und im Kontext einer zunehmend von regenerativer Stromerzeugung dominierten Energiewirtschaft diskutieren. Aufbauend auf den Erkenntnissen des Forschungsvorhabens OPTUM wurde daher bereits ein Projekt des BMU mit dem Titel „Wissenschaftliche Unterstützung bei der Erarbeitung von Szenarien zum möglichen Beitrag der Elektromobilität zum langfristigen Klimaschutz“ vergeben.

Die Projektergebnisse zeigen die Restriktionen von Elektrofahrzeugen im Kontext des heutigen Mobilitätsverhaltens und der klassischen Pkw-Nutzung klar auf. Insbesondere die Einbettung von Elektromobilität in alternative Mobilitätskonzepte könnte daher in Zukunft große Potenziale für klima- und umweltverträglicheren Verkehr bergen. Veränderte Nutzungseigenschaften von Elektrofahrzeugen, die heute noch als Hemmnis für deren Markterfolg wahrgenommen werden, könnten gleichzeitig auch den Ausgangspunkt für neue Mobilitätskonzepte und eine veränderte „Mobilitätskultur“ der Zukunft darstellen und somit weitaus tiefgreifendere Auswirkungen auf die Mobilität von morgen haben als heutzutage noch angenommen wird. Auch hier besteht F&E-Bedarf, vor allem bezüglich einer möglichen Änderung im Mobilitätsverhalten, sprich welche Wege werden substituiert, wie lang sind diese und mit welchem Verkehrsmittel wurden sie vor der Nutzung von Mobilitätskonzepten zurückgelegt.

Des Weiteren hat das Forschungsvorhaben gezeigt, dass hinsichtlich des drohenden „Flaschenhalses“ bei Seltenen Erden parallel verschiedene Entlastungsstrategien gefahren werden müssen: F&E bezüglich Verminderung von Seltenen Erden (SE v.a. Dysprosium) in Magneten für E-Motoren sowie bezüglich SE-freien E-Motoren, die Entwicklung von Recyclingtechnologien für Permanentmagnete aus verschiedenen Anwendungen und die Förderung von umweltfreundlicher Primärförderung von SE.

Auch ist die Entwicklung von Recyclingstrategien und -technologien für das Recycling von Leistungselektronik aus Alt-Elektrofahrzeugen zur Rückgewinnung von Kupfer, Gallium, Edelmetallen usw. wesentlich.

Allgemeiner Forschungsbedarf besteht ferner zu Potenzialanalysen und Recyclingmöglichkeiten für die „normale“ Elektronik und sonstige Magnetanwendungen in zukünftigen Pkw aller Art bezüglich Edel- und Spezialmetallen inkl. Seltener Erden.

Um eine breite Wirkung zu erzielen und wichtige Diskussionen anzustoßen, werden die Projektpartner sowie das BMU die Projektergebnisse sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene auf diversen Wegen wichtigen Akteurskreisen vermitteln und präsentieren.

Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

Das Forschungsvorhaben OPTUM hat wesentliche Ziele des Förderprogramms von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität erfüllt. Es nimmt Bezug auf die in der Förderbekanntmachung adressierte, besondere wissenschaftliche Bedeutung einer ökologischen Gesamtbewertung von Elektromobilität. Im Rahmen des Vorhabens bildeten empirische Daten zur Nutzerakzeptanz und Attraktivität von Elektrofahrzeugen unter der Berücksichtigung der Integration von Elektromobilität in das Energiesystem die Grundlage für die Analyse der Einsparpotenziale klimarelevanter Emissionen. Die Ergebnisse des Vorhabens können die Bundesregierung bei ihrem Ziel unterstützen, Deutschland zum Leitmarkt für Elektromobilität zu entwickeln, da sie helfen, die Rahmbedingungen auch unter ökologischen Gesichtspunkten zu formieren und so die umweltpolitische Akzeptanz zu fördern. Wesentlicher Beitrag zu den förderpolitischen Zielen speziell des BMU sind die Aussagen von OPTUM zum möglichen Beitrag der Elektromobilität zum Klimaschutz, zur Integration der erneuerbaren Energien und zum Ressourcenschutz.

Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt, *Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2010. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2010*. Umweltbundesamt, 2011.
- [2] N. Richter, "Persönliche Email vom 04.08.2011: Daten aus TREMOD 5.22." Umweltbundesamt, 2011.
- [3] BVU, "Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025," no. 96, 2007.
- [4] Herausbergemeinschaft Verbraucheranalyse GbR, "Verbraucheranalyse 2010: Online-Auswertung der Daten der Verbraucheranalyse 2010," 2010. [Online]: <http://www.verbraucheranalyse.de/auswertung/online>. [21-Oct-2011].