

# Autos unter Strom



Ergebnisbroschüre erstellt im Rahmen des Projektes OPTUM  
»Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen –  
Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft«

## IMPRESSUM

Berlin, September 2011

### HERAUSGEBER

Öko-Institut e.V.

### BÜRO BERLIN

Schicklerstraße 5 – 7, 10179 Berlin

Telefon +49 (0) 30 – 40 50 85-380

Fax +49 (0) 30 – 40 50 85-388

### BÜRO DARMSTADT

Rheinstraße 95, 64295 Darmstadt

Telefon +49 (0) 6151 – 81 91-0

Fax +49 (0) 6151 – 81 91-133

### GESCHÄFTSSTELLE FREIBURG

Postfach 1771, 79017 Freiburg

Telefon +49 (0) 761 – 45 295-0

Fax +49 (0) 7 61 – 45 295-288

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

**PROJEKTPARTNER** Öko-Institut e.V. und das  
Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE)

**ANSPRECHPARTNERIN** Dr. Wiebke Zimmer,  
Öko-Institut — Ansprechpartner aller  
Projektbeteiligten befinden sich im Anhang

**TEXT UND REDAKTION** Dipl. Ing. Christa Friedl

**GRAFIK-DESIGN** Charlotte Driessen

**ILLUSTRATIONEN** Drushba Pankow

Gedruckt auf Recyclingpapier aus  
100% Altpapier

**Gefördert vom Bundesministerium für  
Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit**

# Autos unter Strom

**Ergebnisbroschüre erstellt im Rahmen des Projektes OPTUM**

**»Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen –**

**Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft«**



Aus Gründen der besseren Lesbarkeit werden in dieser Broschüre Begriffe wie »Autofahrer«, »Neuwagenkäufer«, »Wissenschaftler« etc. in der maskulinen Schreibweise verwendet. Grundsätzlich beziehen sich diese Begriffe aber auf beide Geschlechter.

---

## INHALTSVERZEICHNIS

### Kapitel 1

Was möchte diese Broschüre vermitteln?  
..... 6

### Kapitel 2

Klimaschutz und Verkehr:  
Lösung gesucht ..... 8

### Kapitel 3

Wie viel Elektro darf es sein?  
Die Fahrzeugkonzepte der Zukunft. .... 12

### Kapitel 4

Der Elektro-Pkw: Akzeptanz,  
Attraktivität, Alltagstauglichkeit ..... 16

### Kapitel 5

So fahren wir heute.  
Wie fahren wir morgen? ..... 22

### Kapitel 6

Wie sauber sind Elektroautos? ..... 28

### Kapitel 7

Ressourcen und Rohstoffe:  
Für die Zukunft planen ..... 38

### Kapitel 8

Mobilität für morgen.  
Zusammenfassung und Ausblick ..... 42

---

# Was möchte diese Broschüre vermitteln?

— **Individuelle Mobilität mit dem Pkw ist ein wesentlicher Bestandteil unserer heutigen Zeit.** Sie verspricht Flexibilität, vermittelt ein Gefühl von persönlicher Freiheit und macht für viele einen großen Teil der Lebensqualität aus.

Aber: Die fast uneingeschränkte Mobilität hat offenkundige Schattenseiten. Vor allem in großen Städten leiden viele Bewohner unter Lärm und Abgasen. Der alltägliche Verkehr verursacht zudem große Mengen an Kohlendioxid, das den Treibhauseffekt verstärkt und so den Klimawandel beschleunigt.

Vor diesem Hintergrund sind unsere heutigen Autos mit Verbrennungsmotor nicht zukunftsfähig – und dies nicht allein wegen Lärm, Ruß und CO<sub>2</sub>. In der Zukunft werden die geförderten Ölmengen die weltweit wachsende Nachfrage nach Rohöl kaum mehr decken können. Dadurch werden Öl und Kraftstoffe teurer als heute, das Tanken immer kostspieliger.

Keiner will und keiner kann das Auto verbieten. Aber die Mobilitätsbedürfnisse der Menschen können langfristig nur durch das Zusammenspiel verschiedener Alternativen befriedigt werden. Beim Pkw kann Elektromobilität eine solche Alternative darstellen. Elektroautos brauchen weder Benzin noch Diesel, sie emittieren lokal keine Abgase, sind im Betrieb sehr effizient und erzeugen im Idealfall kein Kohlendioxid.

Daher 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. In der »Nationalen Plattform Elektromobilität« arbeiten Experten aus Industrie, Wissenschaft, Verbraucher- und Umweltverbänden gemeinsam an Wegen, wie man in Deutschland den Strom auf die Straße bringen kann. Im Mai 2011 hat die Bundesregierung in ihrem »Regierungsprogramm Elektromobilität« die Mittel für Forschung und Entwicklung erhöht. Elektrofahrzeuge, die bis Ende 2015 zugelassen werden, sollen außerdem für 10 Jahre von der Kfz-Steuer befreit sein und Privilegien wie etwa freies Parken genießen. Denn eine Million Elektrofahrzeuge bis 2020 sind ein ehrgeiziges Ziel: 2011 waren nach Angaben des Kraftfahrtbundesamts bei einem Gesamtbestand von etwa 42 Millionen Fahrzeugen hierzulande 37.000 Hybridfahrzeuge und 2.300 Elektro-Pkw zugelassen.

Wie hoch die Umweltentlastung durch Elektrofahrzeuge sein kann und welche Fragen hierfür entscheidend sind, soll diese Broschüre erläutern. Denn: Ein Elektroauto hat zwar keinen Auspuff, emittiert also keine Abgase, da es elektrische Energie direkt in Antriebsenergie verwandelt und dafür weder Benzin oder Diesel noch Gas verbrennt. Das ist aber nur ein Aspekt. In der Vorkette, also bei der Erzeugung des zum Fahren verwendeten Stroms im Kraftwerk, entstehen durchaus Umweltbelastungen. Zum Beispiel kommt es darauf an, ob der benötigte Strom aus (zusätzlichen oder ansonsten ungenutzten) erneuerbaren oder aus fossilen Energien erzeugt wird. Wie stark elektrische Antriebe Umwelt und Klima tatsächlich entlasten, hängt darüber hinaus von weiteren Faktoren ab: von der Anzahl der Elektrofahrzeuge im Markt, von ihrer Fahrleistung und ihrem realen Stromverbrauch, und davon, ob Elektroautos herkömmliche Fahrzeuge ersetzen.

Im Forschungsprojekt OPTUM »Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen –

Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft« wurden diese Fragen erstmals umfassend untersucht. Diese Broschüre will die Ergebnisse des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderten Projekts einer breiten Öffentlichkeit zugänglich machen.

Experten aus dem Öko-Institut e.V. und dem Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) haben sich im Rahmen von OPTUM drei wesentlichen Fragestellungen gewidmet.

— **Wie groß ist die Akzeptanz für Elektrofahrzeuge?** Für eine realitätsnahe Befragung potenzieller Autokäufer entwickelten die Wissenschaftler drei konkurrierende Fahrzeugkonzepte, bei denen Preis, Emissionen, Kraftstoffkosten, Reichweiten und Ladedauer in einem breiten Spektrum variiert wurden. 1.487 Neuwagenkäufer urteilten dann in einer simulierten Kaufsituation, für wie attraktiv und alltagstauglich sie diese Fahrzeuge halten und welches Auto sie sich anschaffen würden.

— **Wie hoch ist ihr künftiges Marktpotenzial?** Um abschätzen zu können, wie stark Elektrofahrzeuge Umwelt und Klima entlasten können, muss klar sein, ob sie die alltäglichen Mobilitätsbedürfnisse überhaupt erfüllen können. Genutzt wurden hierfür die Daten »Mobilität in Deutschland« – einer Befragung zum Verkehrsverhalten von 26.000 Haushalten. Sie lieferte die Grundlage zur Berechnung eines theoretischen Marktpotenzials von Elektroautos.

— **Welche Vorteile für das Klima verspricht Elektromobilität?** Elektrofahrzeuge brauchen Strom. Wie sauber der getankte Strom tatsächlich ist, darüber entscheiden Stromangebot und

-nachfrage, aber auch Ladeverhalten und Ladezeitpunkt und das Zusammenspiel von erneuerbaren und fossilen Kraftwerken im Netz.

Im Kern sollte also herausgefunden werden, mit wie vielen Elektrofahrzeugen zu rechnen ist, wie diese Fahrzeuge genutzt werden und wie sich deren Nutzung unter Berücksichtigung des Ladens auf die Stromerzeugung und damit die Emissionen auswirkt. Da bei neuen Technologien die Frage nach zusätzlichen Rohstoffbedarfen eine ganz wesentliche ist, wurde in einem Teilprojekt von OPTUM weiterhin der folgende Aspekt betrachtet:

— **Könnten bei wichtigen Rohstoffen Versorgungsengpässe auftreten?** Es wurden die relevanten Rohstoffe identifiziert und auf Basis von globalen Marktdurchdringungsszenarien von Elektro-Pkw der zukünftige Rohstoffeinsatz für Elektromobilität und mögliche Recyclingpotenziale untersucht.

Aus den Ergebnissen zu den vorgenannten zentralen Fragestellungen wurden Handlungsempfehlungen abgeleitet. Aus Sicht der Wissenschaftler werden die künftigen gesetzlichen Rahmenbedingungen für das Klimaschutzpotenzial ganz entscheidend sein: klare Ziele für den Zubau neuer Kraftwerke für erneuerbare Energien, die Ausgestaltung des Emissionshandels, ambitionierte CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für Fahrzeuge, konkrete Klimaschutzziele für den Verkehrssektor. Nicht zuletzt: Elektromobilität braucht eine breite Akzeptanz und zugleich eine realistische Einschätzung ihrer Chancen und Potenziale für Umwelt- und Klimaschutz. Dazu will diese Broschüre einen Beitrag leisten.

# Klimaschutz und Verkehr: Lösung gesucht

— **Unsere alltägliche Mobilität ist vielerorts alles andere als nachhaltig und umweltverträglich:** Lärm, verstopfte Straßen und Innenstädte, Abgase mit Ruß und Stickoxiden und große Mengen an Treibhausgasen sind Kehrseiten des motorisierten Individualverkehrs, die jeder kennt. Zwar sind in Deutschland und Europa in punkto Schadstoffemissionen deutliche und bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen erste Fortschritte erzielt worden. Global gesehen ist eine Besserung aber kaum in Sicht, vor allem weil die Fahrzeugflotte stark anwächst. Weltweit gibt es heute fast eine Milliarde Kraftfahr-

zeuge, davon sind 700 Millionen Pkw. Diese Zahl wird sich nach Schätzungen der OECD bis 2030 voraussichtlich verdoppeln, vor allem in Schwellenländern wie China und Indien steigt sie seit Jahren rasant.

Deutschland will seine Treibhausgasemissionen bis 2020 um 40 Prozent gegenüber 1990 senken. Laut dem nationalen Inventarbericht konnten in den vergangenen 20 Jahren die Emissionen um 24 Prozent gesenkt werden, bis 2020 müssen also noch weitere 16 Prozent erreicht werden. Ein ambitioniertes Ziel, das nur erreicht werden kann, wenn alle relevanten Sektoren – Industrie, Haushalte, Energiewirtschaft, Verkehr – ihren Kohlendioxid-Ausstoß deutlich mindern. Wesentliche Sektoren haben bisher durchaus Erfolge vorzuweisen: Die Energiewirtschaft beispielsweise emittiert heute 20 Prozent, das verarbeitende Gewerbe gar rund 40 Prozent weniger als vor 20 Jahren.

Anders das Bild im Verkehrssektor. Die Kohlendioxid-Emissionen des Verkehrs haben sich zwischen 1960 und heute mehr als verdoppelt, verglichen mit 1990 sind sie um knapp acht Prozent gestiegen. Verantwortlich dafür ist im Wesentlichen der Straßenverkehr, der laut Umweltbundesamt im Jahr 2009 rund 178 Millionen Tonnen Kohlendioxid ausgestoßen hat und damit für 83 Prozent der Emissionen im Verkehrssektor stand.

Bislang gibt es weder in Deutschland noch in der EU konkrete Klimaschutzziele, die dem gesamten Verkehr auf Straße und Schiene, in der Luft und auf dem Wasser klare Emissionsminderungen vorgeben. Nach der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU muss der Anteil der regenerativen Energien am Gesamtenergieverbrauch des Verkehrs bis zum Jahr 2020 mindestens zehn Prozent betragen. Allerdings macht die Richtlinie keine Vorgaben, wie dieses Ziel erreicht werden soll.

Zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Pkw tragen vor allem die sogenannten Flottengrenzwerte bei: Im Jahr 2008 hat die EU Emissionsnormen für Neuwagen festgeschrieben, die die Hersteller zur Entwicklung von sparsameren Fahrzeugen verpflichten. Der durchschnittliche Kohlendioxid-Ausstoß von Neufahrzeugen muss demnach von 152 Gramm pro gefahrenen Kilometer (g/km) im Jahr 2010 spätestens bis 2015 auf 130 g/km gesenkt werden. Dieser Grenzwert soll bis 2020 auf 95 g/km verschärft werden.

## Effizienzfortschritte beim Verbrennungsmotor wurden lange Zeit durch höhere Fahrleistungen wieder ausgeglichen.

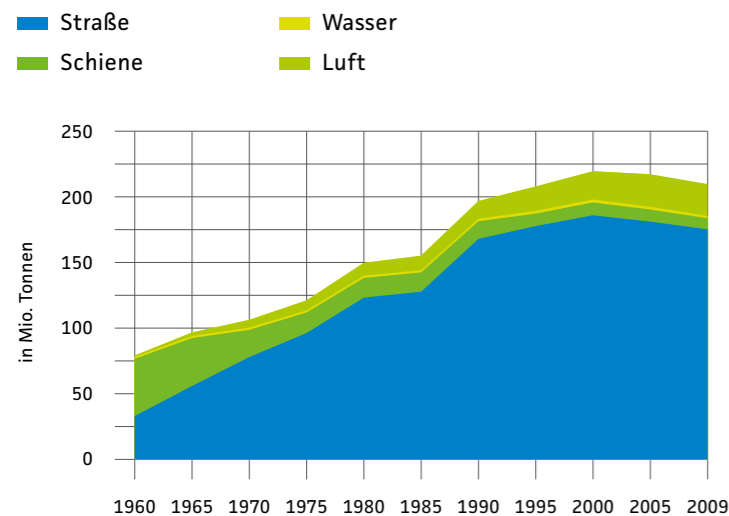
Verbrennungsmotoren, auch wenn sie noch so sparsam sind, werden auch zukünftig das Treibhausgas Kohlendioxid freisetzen. Hier gilt: Je mehr Kraftstoff ein Fahrzeug benötigt, umso mehr Kohlendioxid strömt aus dem Auspuff. Ohne Beimischungen von Biokraftstoffen entstehen pro Liter Benzin etwa 2,43 Kilogramm Kohlendioxid, pro Liter Diesel 2,65 Kilogramm und pro Kubikmeter Erdgas 2,04 Kilogramm.

Zwar sind heute Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor spritsparender und nutzen den Kraftstoff effizienter als noch vor zehn 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 verbrauchstarken Modellen bei deutschen Autokäufern ungebrochen. Zum anderen steigt die Verkehrsleistung, es wird also von Jahr zu Jahr mehr gefahren. Auch für die kommenden Jahre ist keine Trendwende in Sicht. Das Bundesverkehrsministerium geht in seiner letzten Verkehrsprognose davon aus, dass die Fahrleistung privater

Pkw bis 2025 um 16 Prozent höher liegen wird als 2004.

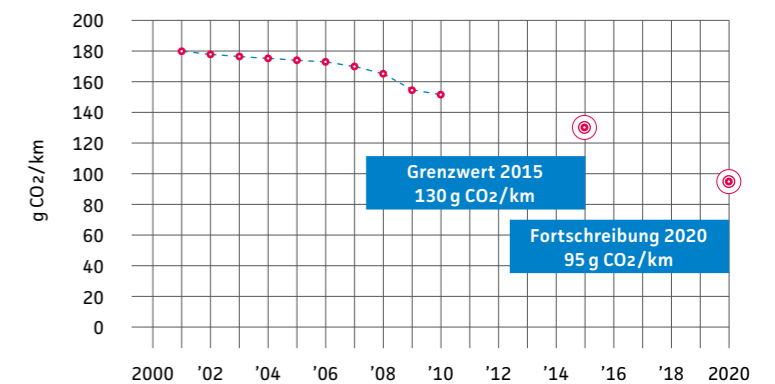
Verbrennungsmotoren haben trotz aller technischen Fortschritte mit maximal 40 Prozent einen relativ geringen Wirkungsgrad. Die im Diesel oder Benzin enthaltene Energie geht zu einem großen Teil als Wärme verloren. Elektrische Fahrzeugmotoren hingegen haben im Betrieb eine deutlich höhere Energieeffizienz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

QUELLE: TREMOD 5.22



**Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen 1960 bis 2009, inklusive Vorkette:** In Deutschland haben sich die direkten und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs seit 1960 mehr als verdoppelt. Den mit Abstand größten Anteil daran trägt der Straßenverkehr.

QUELLE: EU-MONITORINGDATEN

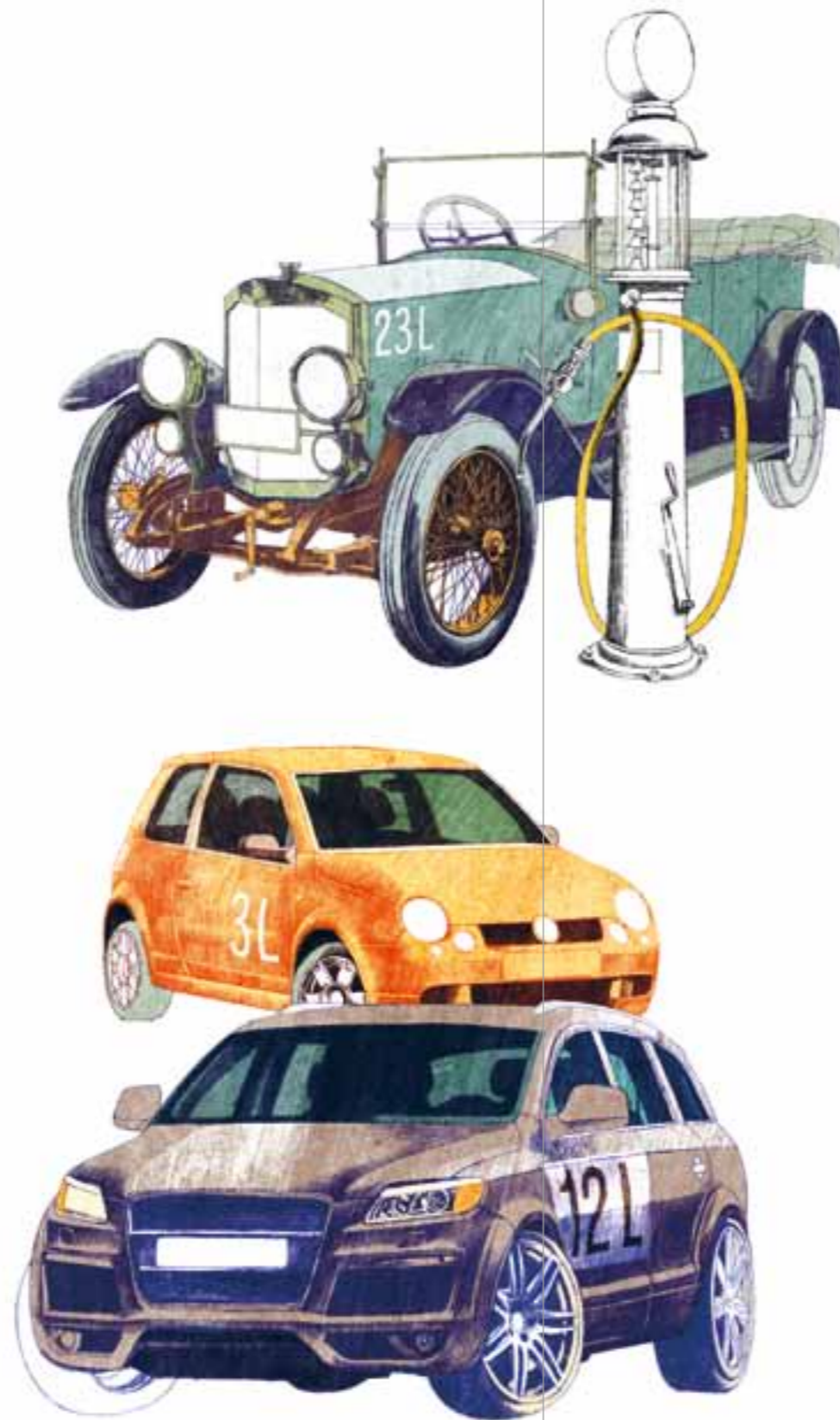


**CO<sub>2</sub>-Emissionen der in Deutschland neu zugelassenen Pkw:** Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor sind heute spritsparender und damit emissionsärmer als noch vor zehn oder 15 Jahren. Um die Flottengrenzwerte der EU für 2015 und 2020 zu erreichen, sind aber noch deutliche Anstrengungen seitens der Hersteller erforderlich.

Das klingt verlockend. Allerdings stellt die Elektromobilität auch eine große Herausforderung für Industrie, Forschung und Energiewirtschaft dar, neue Antriebe, Mobilitäts- und Ladekonzepte zu entwickeln. Elektroautos bedeuten zudem eine Herausforderung für den durchschnittlichen Autofahrer mit seinem heutigen »Benzinverstand«. Ein Auto, so sind wir es gewohnt, kann vielerorts und zu jeder Zeit innerhalb von wenigen Minuten aufgetankt werden. Elektrofahrzeuge benötigen dagegen in der Regel mehrere Stunden zum Laden und sie haben eine begrenzte Reichweite. Analysen im Rahmen von OPTUM zeigen zwar, dass die meisten Autofahrer in Deutschland im Alltag meist nur kurze Strecken zurücklegen und daher mit einem Elektro-Pkw gut zurecht kommen würden. Offen ist dennoch, wie sich Akzeptanz und Vertrauen in die neue Technik tatsächlich entwickeln und welche Alternativen Autofahrer für ihre längeren Fahrten nutzen werden.

Klar wird: Elektroautos können die Klimabilanz des Verkehrs nicht von heute auf morgen verbessern. Dafür steht die technische Entwicklung noch zu weit am Anfang und die potenziellen Absatzzahlen sind erst einmal zu gering. Elektro-Pkw werden in der Klimabilanz vermutlich erst nach dem Jahr 2030 deutlich spürbar sein – dann, wenn sich die Fahrzeuge in allen Größenklassen auf dem Markt etabliert haben und ein deutlicher Anteil der Benzin- und Dieselfahrzeuge durch Elektrofahrzeuge ersetzt sein wird.

So lange kann Klimaschutz aber nicht warten. Da Verbrennungsmotoren noch lange auf den Straßen dominieren werden, müssen konventionelle Antriebe noch deutlich energieeffizienter und verbrauchsärmer werden. Durch weitere Optimierung der Motoren, leichtere Werkstoffe und geringeren Luftwiderstand der Karosserien, aber auch einer Änderung im



Nachfrageverhalten hin zu leistungsärmeren und kleineren Pkw, kann sich der Kraftstoffverbrauch der konventionellen Autos um weitere 50 Prozent verringern.

Seit 2000 nehmen die Kohlendioxid-Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland leicht ab. Aktuelle Zahlen zeigen, dass sie 2009 um sechs Prozent unter dem Niveau von 2000 lagen. Der Grund dafür ist unter anderem eine Zunahme an sparsamen und effizienten Fahrzeugen und die Beimischung von Biokraftstoffen zu Benzin und Diesel. Diese erste, zaghafte Trendumkehr reicht jedoch bei weitem nicht aus, um den Klimaschutzziele gerecht zu werden.

Wirksamer Klima- und Umweltschutz im Verkehr beruht daher auf mehreren Säulen. Dazu gehören nicht nur neuartige elektrische Antriebe, sondern auch alternative Mobilitätskonzepte, die Auto, Bahn und öffentliche Verkehrsmittel auf kundenfreundliche Art und Weise koppeln. Wenn Klimaschutz ernst gemeint ist, müssen wir künftig unsere Autos sparsamer und intelligenter nutzen als heute. Wo immer möglich, muss Verkehr von der Straße auf die Schiene, Autoverkehr auf öffentliche Verkehrsmittel und das Fahrrad verlagert werden.

Effiziente Verbrennungsmotoren, Elektroautos mit Strom aus erneuerbaren Energien, Biokraftstoffe und integrierte Mobilität – nur durch das Zusammenspiel aller Optionen und Maßnahmen wird es möglich sein, den Verkehrssektor zum Schutz des Klimas auf eine zukunftsfähige Schiene zu lenken.

**Wirksamer Klimaschutz im Verkehr ist ein Gesamtpaket. Hierbei ist in den kommenden zwanzig Jahren vor allem auch eine verbesserte Effizienz konventioneller Pkw maßgeblich.**

# Wie viel Elektro darf es sein?

## Die Fahrzeugkonzepte der Zukunft.

—— **Früher hieß die Frage »Benziner oder Diesel«? Mehr Wahlmöglichkeiten hatte der Autokäufer in aller Regel nicht.** Wer sich in Zukunft ein neues Auto anschaffen will, hat die Qual der Wahl: Ein Modell mit konventionellem Antrieb? Einen Plug-In-Hybrid, dessen Batterie an der normalen Steckdose geladen werden kann? Oder soll es doch ein rein batterieelektrisches Fahrzeug sein, das seine Energie ausschließlich aus der Steckdose bezieht?

Aus den vielen möglichen Fahrzeugkonzepten wählten die Wissenschaftler für die Analysen im Projekt OPTUM konkrete Referenzfahrzeuge mit drei verschiedenen Antriebstechnologien: konventioneller verbrennungsmotorischer Antrieb (hier: Benzin), batterieelektrischer Antrieb und Plug-In-Hybrid. Für alle ist aus heutiger Sicht davon auszugehen, dass sie im Jahr 2020 – wie der Benzinler bereits heute – serienmäßig auf dem Markt sind, miteinander in Konkurrenz stehen und eine breite Modellpalette abdecken.

Entscheidend für den Markterfolg von Elektroautos sind unter anderem Reichweite, Ladedauer und Anschaffungskosten. Alle drei Faktoren hängen wesentlich von der Batterie ab. Die ersten serienmäßigen Elektroautos werden mit so genannten Lithium-Ionen-Batterien betrieben – Batterien, die man bisher nur im Miniformat in Mobiltelefonen, Notebooks oder Digitalkameras nutzt. Um ein schweres Fahrzeug 160 Kilometer weit zu bewegen, muss der Stromspeicher Höchstleistungen vollbringen. Nicht nur, weil ein durchschnittlicher Pkw über eine Tonne wiegt und die Batterie selbst ein erhebliches Gewicht hat, sondern weil der Akku auch Strom für Klimaanlage, Heizung und Bordnetz liefert. Daher sind die Batterien kostspielige und schwere Konstrukte.

Ziel der Batterieentwickler ist daher, innerhalb der nächsten Jahre die Speicherkapazität pro Kilogramm mindestens zu verdoppeln und die Kosten von heute rund 800 Euro pro kWh auf mindestens 280 Euro pro kWh drastisch zu reduzieren. Der Stromspeicher muss außerdem mindestens zehn Jahre lang zuverlässig seinen Dienst tun, darf durch zu lange Fahrpausen nicht altern und sich nicht unkontrolliert entladen. Ob es gelingt, bis zum Jahr 2030 durch steigende Produktionszahlen und technologischen Fortschritt alle technischen Mindestanforderungen zu erfüllen und zugleich die Kosten auf rund 250 Euro pro kWh zu senken,

ist unter Experten teilweise umstritten. Aber nur dann können sich Elektrofahrzeuge im Markt in nennenswerter Stückzahl etablieren und einen spürbaren Beitrag zur Minderung von Treibhausgasen leisten.

Bis zum Jahr 2020 werden nicht alle Antriebstypen in allen Größenklassen verfügbar sein. Zum Beispiel gehen viele Experten davon aus, dass reine Elektroautos auch im Jahr 2030 in der Mittelklasse nur wenig und in der Oberklasse noch nicht zum Einsatz kommen. Denn die Batterie für große Autos müsste sehr hohe Leistung bringen und wäre daher aus heutiger Sicht viel zu schwer und zu teuer. Plug-In-Hybridfahrzeuge, die mit einer deutlich kleineren Batterie auskommen, werden dagegen vermutlich bereits 2020 im gesamten Größenspektrum zu kaufen sein.

Für die Akzeptanz von konventionellen Pkw ist die Kraftstoffpreisentwicklung ganz entscheidend. Wie sich die Benzinpreise bis 2020 entwickeln werden, kann heute jedoch niemand präzise voraussagen. Die wesentlichen Szenarien zum Energiekonzept der Bundesregierung rechnen derzeit mit Kosten von 1,52 Euro pro Liter im Jahr 2020 und 1,69 Euro pro Liter im Jahr 2030. Für die Stromkosten werden für das Jahr 2020 21,7 Cent pro kWh angenommen.

Bei einem Preis von 1,52 Euro hätte ein durchschnittlicher Benzinler im Jahr 2020 dann Kraftstoffkosten von 8,21 Euro pro 100 Kilometer. Im Vergleich zu 2010 (Verbrauch 7,3 l/100 km und 1,40 Euro/l Benzin) wäre das Benzinfahrzeug im Betrieb also um 20 Prozent günstiger als heute. Und selbst wenn der Benzinpreis bis 2020 auf 2 Euro pro Liter ansteigen würde, lägen aufgrund der zu erwartenden Effizienzverbesserungen die Kraftstoffkosten pro 100 Kilometer nur um fünf Prozent höher als heute.



## Die OPTUM-Referenzfahrzeuge

Die Referenzfahrzeuge im Rahmen von OPTUM wurden so gewählt, dass sie jeweils ein durchschnittliches Verbrennungs- oder Elektrofahrzeug der Größenkategorien klein, mittel und groß repräsentieren. Die folgenden Fahrzeugbeispiele der Größenklasse mittel stehen stellvertretend für Kompaktklasse und Vans und orientieren sich in ihren technischen Eigenschaften an besonders häufig verkauften Modellen, die typisch für diese Größenklasse sind.

### Der Konventionelle

Das Auto mit Verbrennungsmotor meint in diesem Fall einen Pkw mit Otto-Motor – also ein Benzin-Fahrzeug. Im Jahr 2020 wird dieses Auto deutlich effizienter sein und gegenüber heute etwa 25 Prozent weniger Kraftstoff pro Kilometer verbrauchen.

### Das Benzin-Referenzfahrzeug im Jahr 2020:

- verbraucht 5,4 Liter Kraftstoff pro 100 km und emittiert 114 g CO<sub>2</sub>/km
- kostet 24.400 Euro (und damit etwa 2.500 Euro mehr als 2010)
- hat eine Motorleistung von 100 kW
- hat bei einem Benzinpreis von 1,52 Euro pro Liter Kraftstoffkosten von 8,21 Euro pro 100 km



### Das Elektroauto

Rein batterieelektrische Fahrzeuge unterscheiden sich am stärksten von heutigen Autos. Sie brauchen weder Kraftstofftank noch Kupplung, weder Auspuff noch Getriebe. Elektroautos fahren ohne Motorengeräusche, ohne direkte Emissionen und nutzen die Energie aus der Batterie besonders effizient.

Im alltäglichen Betrieb allerdings bringen Elektroautos Restriktionen mit sich. Ihre Reichweite pro Batterieladung ist begrenzt, die Ladezeiten betragen bei Ladung an einer normalen Haushaltssteckdose mehrere Stunden. Da die Batterien noch sehr hohe Kosten haben, sind Elektroautos deutlich teurer als Benziner oder Plug-In-Fahrzeuge.

### Das Elektro-Referenzfahrzeug im Jahr 2020:

- kann mit einer Batterieladung bis zu 160 Kilometer weit fahren.
- hat bei einem Strompreis von 0,22 Euro/kWh Kraftstoffkosten von nur 4,06 Euro/100 km und fährt damit zum halben Preis wie ein Benziner
- ist in seiner Anschaffung mit 32.000 Euro um rund 8.000 Euro teurer als ein vergleichbarer Benziner. Das liegt an den Batteriekosten in Höhe von 280 Euro/kWh (bei einer Batteriekapazität von 27 kWh).
- benötigt an der herkömmlichen Steckdose neun Stunden für eine Vollladung
- hat mit 85 kW eine etwas geringere Motorleistung als ein Benziner oder ein Plug-In-Hybrid (100 kW)

### Der Plug-In-Hybrid

Ein Hybrid kombiniert zwei Antriebe in einem Fahrzeug: Das Auto verfügt sowohl über einen Verbrennungs- als auch einen Elektromotor. Es kann dadurch sowohl auf herkömmliche Weise durch den Verbrennungsmotor als auch durch den Elektromotor angetrieben werden. Die Batterie wird durch Energierückgewinnung beim Bremsen aufgeladen. Vor allem im Stadtverkehr fährt es dadurch deutlich sparsamer. Das Besondere beim Plug-In-Hybrid: Die Batterie kann auch am Stromnetz geladen werden.

Wie alle Hybride fährt auch der Plug-In nur kürzere Strecken rein elektrisch. Erste Analysen zeigen, dass bei 20 bis 40 Kilometern pro Batterieladung ein Plug-In besonders kosteneffizient fährt, denn für diese Strecke reicht ein relativ kleiner Stromspeicher aus.

### Das Plug-In-Referenzfahrzeug im Jahr 2020:

- kann maximal 50 Kilometer rein elektrisch fahren
- ist im elektrischen Betrieb nahezu so effizient wie ein reines Elektroauto, im konventionellen Betrieb so effizient wie ein Benziner
- hat bei einem Benzinpreis von 1,52 Euro/l und einem Strompreis von 0,22 Euro/kWh Kraftstoffkosten von 5,60 Euro pro 100 Kilometer
- ist mit 27.700 Euro in der Anschaffung um rund 13 Prozent teurer als ein vergleichbarer Benziner. Dafür sorgen vor allem die Batteriekosten (280 Euro/kWh) und der komplexere und damit teurere Antrieb.



# Der Elektro-Pkw: Akzeptanz, Attraktivität, Alltagstauglichkeit

— **Was bewegt Autofahrer, auf ein Elektroauto umzusteigen?** Glaubt man den Umfragen, so ist ein nennenswerter Anteil von Autofahrern in Deutschland bereit, sich beim nächsten Kauf ein Elektrofahrzeug anzuschaffen. Denn das Elektroauto verspricht Autofahren ohne schlechtes Gewissen. Es ist effizient und bei niedrigen Geschwindigkeiten leise, erzeugt keine schädlichen Abgase und kann mit Strom betankt werden, den Wind und Sonne erzeugen. Allerdings äußern sich die potenziellen Käufer in diesen Umfragen zu Fahrzeugen, die es in Serie noch gar nicht gibt, die kaum jemand gesehen, geschweige denn gefahren hat und deren technische Eigenschaften noch gar nicht genau bekannt sind.

Es wundert also nicht, dass nur wenige Autofahrer realistische Vorstellungen von »ihrem« Elektroauto haben. Viele beispielsweise glauben, dass ein E-Pkw eine ähnlich hohe Reichweite haben wird wie ein Benziner oder Diesel und rund um die Uhr zur Verfügung steht. Tatsächlich werden reine Elektrofahrzeuge aus der Serienproduktion mit einer Batterieladung auf Basis heutiger Technologie wohl maximal 160 Kilometer weit kommen. Danach muss der Akku an der Steckdose zuhause oder an einer öffentlichen Station über mehrere Stunden wieder aufgeladen werden. Der durchschnittliche Nutzer ist heute zudem an Klimaanlage und Multimedia gewöhnt. Eine serienmäßige Ausstattung der Elektroautos mit diesem Komfort bedeutet also eine

geringere Reichweite. Denn bislang sind die Batterien noch so schwer und teuer, dass jedes überflüssige Kilogramm und jeder elektrische Zusatzverbraucher im Fahrzeug vermieden werden müssen, um akzeptable Reichweiten zu erzielen.

Elektroautos bescheren aber auch ein neues Fahrgefühl: Ein Elektromotor beschleunigt, anders als der Verbrennungsmotor, ohne Verzögerung. Ein kleiner Tipp auf das Gaspedal genügt und das Auto spricht sofort an. Das Drehmoment, also die Kraft, die zur Beschleunigung gebraucht wird, steht unmittelbar und nicht erst bei einer bestimmten Drehzahl zur Verfügung. Allerdings hängt die Reichweite des Fahrzeugs ganz entscheidend von der Fahrweise ab. Hohe Geschwindigkeiten und häufiges Beschleunigen schlucken viel Energie, die Reichweite pro Batterieladung sinkt deutlich. Das ist bei konventionellen Fahrzeugen ähnlich, fällt bei Elektrofahrzeugen wegen der grundsätzlich kürzeren Reichweite aber deutlich stärker ins Gewicht.

Wie kann man möglichst realitätsnah Akzeptanz und Attraktivität von elektrisch getriebenen Fahrzeugen in Erfahrung bringen? Und wie gut oder wie schlecht fällt die Bewertung von Elektroautos im Vergleich zu herkömmlichen Autos mit Verbrennungsmotor aus? Wie groß könnte das Marktpotenzial für Elektroantriebe im Jahr 2020 und 2030 sein, wenn alle großen Hersteller erste Serienmodelle auf dem Markt haben? Diesen Fragen gingen im Rahmen des Forschungsprojektes OPTUM Wissenschaftler des Instituts für sozial-ökologische Forschung (ISOE) auf den Grund.

**In der Befragung wählten potenzielle Käufer ihr neues Auto anhand unterschiedlicher Fahrzeugeigenschaften.**

Für ihre Befragung potenzieller Autokäufer nutzten die ISOE-Experten eine so genannte Conjoint-Analyse. Diese Art der Akzeptanzanalyse simuliert Kaufentscheidungen, wie sie auch in der Praxis tatsächlich stattfinden – die Befragten werden zum Beispiel immer auch mit den Kosten ihrer Entscheidung konfrontiert. Im Vorfeld entwickelten die Wissenschaftler einen Kriterienkatalog, der die wichtigsten Eigenschaften eines Fahrzeugs beschreibt: von den Anschaffungskosten über Motortyp und Motorleistung, Kraftstoff- bzw. Stromkosten bis hin zu Ladedauer, Reichweite und CO<sub>2</sub>-Emissionen. Diesen Kriterienkatalog erstellten sie für die Fahrzeugkategorien klein, mittel und groß und für drei unterschiedliche Fahrzeugtypen: ein Auto mit Verbrennungsmotor, ein Plug-In-Hybridfahrzeug und einen rein batterieelektrischen Pkw.

Das Auto von heute ist aber nicht das Auto von morgen. Anschaffungskosten, Strom- und Kraftstoffpreise und auch die technischen Eigenschaften werden sich innerhalb der kommenden zehn bis zwanzig Jahre deutlich verändern. Für die Conjoint-Analyse legten die Wissenschaftler daher ausgehend von heutigen Kosten und derzeitigen technischen Eigenschaften fest, wie sich diese Eigenschaften bis zum Jahr 2020 bzw. bis 2030 entwickeln könnten.

Der wesentliche Vorteil dieser Methode gegenüber herkömmlichen Umfragen: Das Set aus technischen und ökonomischen Parametern bildet auf einen Blick alle wesentlichen Eigenschaften eines Fahrzeugtyps ab. Die Befragten urteilen also nicht über Autos, von denen sie keine oder falsche Vorstellungen haben. Sie wägen vielmehr anhand von typischen und realitätsnahen Kriterien ab, welche Einflussgrößen bei einem Autokauf für sie persönlich wichtig sind und welche dagegen eher neben-

sächlich. Sie machen sich positive und negative Aspekte eines bestimmten Fahrzeugtyps bewusst und treffen gezielt ihre Entscheidung für das eine oder andere Auto.

Damit simuliert die Conjoint-Analyse den Autokauf als das, was er auch in der Realität ist: ein komplexer Abwägungsprozess über eine langfristige und kostspielige Anschaffung. Wer beispielsweise vor allem auf den Kaufpreis achtet, wird von den hohen Kosten eines Elektrofahrzeugs abgeschreckt. Er nimmt den hohen Preis aber womöglich in Kauf, wenn die Kraftstoffpreise und damit die Betriebskosten deutlich steigen. Wem vor allem die CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Autos wichtig sind, akzeptiert dafür unter Umständen die eingeschränkte Reichweite eines Elektroautos. Wer nur größere Autos fährt und das Fahrzeug vor allem für den Urlaub braucht, tendiert zum Verbrennungsmotor oder Plug-In-Hybrid.

**Szenario 2020: Je kleiner der gewünschte Neuwagen, umso mehr Käufer entscheiden sich für ein Elektroauto.**

Für ihre Analyse befragten die Wissenschaftler 1.487 Personen zwischen 18 und 82 Jahren, die sich in den kommenden zwei Jahren einen Neuwagen anschaffen wollen. Die Auswahl der Teilnehmer erfolgte als repräsentative Stichprobe: Vertreten waren Frauen und Männer, Jung und Alt, Autofahrer mit mehr und mit weniger Umweltbewusstsein, Vielfahrer und solche, die gern auch mal Busse und Bahnen nutzen. Die Befragung erfasste zudem Stadt- und Landbewohner, außerdem Nutzer, die dem Elektroauto positiv gegenüberstehen genauso wie Skeptiker.

Die 1.487 Personen der Gesamtgruppe wurden in einem ersten Schritt je nach der Prä-

ferenz für eine bestimmte Fahrzeuggröße den Kategorien klein, mittel und groß zugeordnet. Die Kategorie »klein« umfasste Minis und Kleinwagen, die »mittlere« Kategorie Kompaktklasse und Vans, in der Kategorie »groß« fanden sich Geländewagen und Fahrzeuge der Mittel- und oberen Mittelklasse.

Während der Befragung kombinierte der Computer die Eigenschaften der drei Fahrzeuge (Verbrennungsmotor, Plug-In-Hybrid, E-Pkw) innerhalb einer großen Spannweite immer wieder neu, um die möglichen Entwicklungen bei Preisen und Technik bis zum Jahr 2030 abzubilden. Bei den Kleinwagen lagen beispielsweise die Kraftstoff- bzw. Stromkosten zwischen zwei und 16 Euro pro 100 Kilometer, in der mittleren und großen Kategorie bei vier bis 20 Euro. Die Anschaffungskosten reichten von 9.000 Euro (Mini) bis zu 62.000 Euro in der oberen Mittelklasse. Die Ladedauer für Elektrofahrzeuge variierte in allen drei Fahrzeugkategorien zwischen fünf Minuten und acht Stunden. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen lagen zwischen fünf und 200 Gramm pro Kilometer. Anhand der Kosten und der vorgegebenen technischen Daten entschieden sich die Befragten jeweils für eines der drei Autos. Aus dieser Variation der Eigenschaften ermittelt der Computer, welche Aspekte die Kaufentscheidung besonders prägen.

Wie aber lässt sich hieraus nun die Akzeptanz für elektrisch betriebene und für konventionelle Fahrzeuge konkret vorhersagen? Dafür entwickelten die Wissenschaftler gemeinsam mit Vertretern aus Autoindustrie, Zulieferbetrieben und Energiewirtschaft jeweils ein Set von Eigenschaften, die im Jahr 2020 und im Jahr 2030 für das Auto mit Verbrennungsmotor, das Plug-In-Hybridfahrzeug und das Elektroauto wahrscheinlich typisch sein werden. Die Ergebnisse aus der Befragung wurden dann auf diese Fahrzeuge übertragen.

Das heißt, es wurden Marktanteile entsprechend dieser Eigenschaften berechnet, wobei in der Kategorie »groß« nur Pkw mit Verbrennungsmotoren und Plug-In-Hybride, aber keine reinen Elektroautos berücksichtigt wurden.

**Die Auswertung der Ergebnisse machte deutlich:**

— Im Schnitt würde sich – je nach Ausstattung und Eigenschaften – ein Sechstel bis ein Viertel der potenziellen Neuwagenkäufer für ein voll elektrisches Auto entscheiden.

— Für das Jahr 2020 gilt: Je kleiner das gewünschte Auto, umso mehr potenzielle Käufer entscheiden sich für ein reines Elektrofahrzeug. So würde bei den Minis jeder Vierte einen E-Pkw kaufen, bei den Kleinwagen knapp jeder Fünfte und in der mittleren Kategorie etwa 12 Prozent.

— Im Szenario 2030 wächst – wegen des technischen Fortschritts, der in der Untersuchung hinterlegt ist – in der Kategorie »mittel« der Anteil der Käufer, die sich für einen rein elektrischen Pkw entscheiden würden, von 12 auf 19 Prozent. Der Anteil der E-Pkw sinkt bei den Minis geringfügig um etwa ein Prozent und bei den Kleinwagen steigt er um drei Prozent.

— Bei Minis und Kleinwagen besitzen Verbrennungsmotor und Plug-In-Hybride im Jahr 2020 etwa gleich große Anteile. Im Jahr 2030 ist der Anteil der Plug-In-Hybride um etwa fünf Prozent größer. In der mittleren Kategorie würden sich in beiden Jahren mehr Autofahrer für einen Plug-In-Hybrid als für ein Auto mit Verbrennungsmotor entscheiden.

— In der Kategorie der größeren Fahrzeuge würde jeweils eine Mehrheit von 60 Prozent ein

Plug-In-Modell wählen, 40 Prozent der Befragten ein herkömmliches Auto.

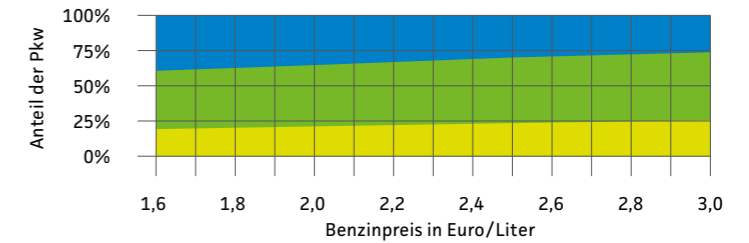
Aus den Kaufentscheidungen der 1.487 Befragten konnte errechnet werden, wie die Neuwagenkäufer auf bestimmte Entwicklungen reagieren.

Beispielsweise verwundert es nicht, dass Autofahrer empfindlich auf weiter steigende Benzinpreise reagieren. Bei einem Preis von 1,52 Euro pro Liter Benzin würden 40 Prozent der Kleinwagenkäufer ein Auto mit Verbrennungsmotor wählen, bei 2,50 Euro pro Liter nur noch 30 Prozent, bei 3,00 Euro pro Liter sinkt der Anteil auf 26 Prozent. Steigt der Strompreis, kommt es zu den folgenden Veränderungen: Kostet die Kilowattstunde 15 Cent, würden über 60 Prozent der Kleinwagenkäufer einen Plug-In-Hybrid oder ein Elektroauto kaufen, bei einer Verdopplung des Strompreises sind es immer noch 56 Prozent, bei 50 Cent für die Kilowattstunde noch 46 Prozent.

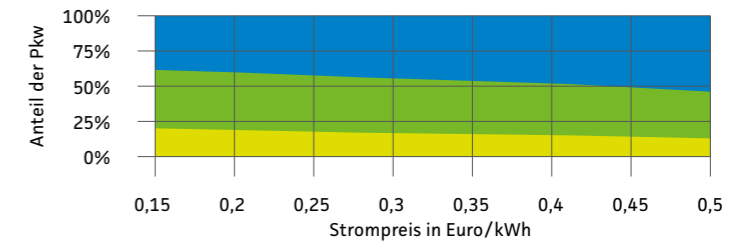
Eine Erhöhung der Reichweite pro Batterieladung führt erwartungsgemäß dazu, dass Elektrofahrzeuge attraktiver werden. Der Effekt ist aber nicht so bedeutend, wie häufig angenommen wird: Würde die Reichweite von 160 auf 300 Kilometer klettern, wechseln nur sechs Prozent der Kleinwagenkäufer zum Elektroauto, bei 500 Kilometern, also vergleichbar mit der Tankfüllung eines Benziners, knapp 10 Prozent. Gleichzeitig verringert sich der Anteil der Käufer, die sich für einen Pkw mit Verbrennungsmotor entscheiden, mit steigender Reichweite des Elektro-Pkw nur geringfügig. Der Anteil der E-Pkw steigt also in erster Linie auf Kosten des Anteils der Plug-In-Hybride. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Ladedauer: Sinkt sie von 7,5 Stunden auf nur noch fünf Minuten – was etwa der Zeit entspricht, die man an einer Zapfsäule zum Volltanken braucht –

■ Anteil konventioneller Pkw  
■ Anteil Plug-In-Hybrid  
■ Anteil Elektroauto

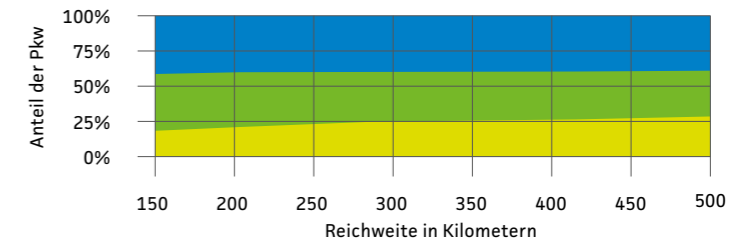
**Abhängigkeit vom BENZINPREIS**



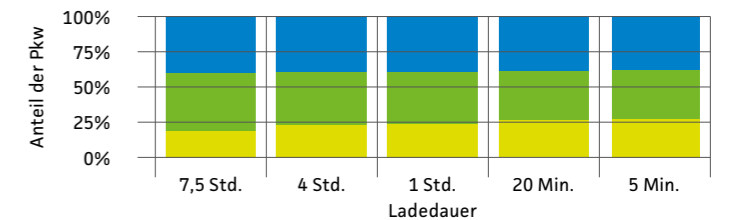
**Abhängigkeit vom STROMPREIS**



**Abhängigkeit von der REICHWEITE**



**Abhängigkeit von der LADEDAUER**



**Kaufentscheidung bei Kleinwagenkäufern 2020:** Die Akzeptanz batterieelektrischer und Plug-In-Hybrid Pkw ist hier in Abhängigkeit von Benzin- und Strompreis, Reichweite und Ladedauer dargestellt.

würden sieben Prozent der Kleinwagenkäufer vom Plug-In-Hybrid zum Elektroauto wechseln, vom konventionellen Pkw zum E-Auto aber nur zwei Prozent.

Erstaunlicherweise reagieren die potenziellen Käufer auch auf den Anschaffungspreis nicht so sensibel wie erwartet. So verringert sich der Anteil der Elektroautos in der Kategorie »klein« bei einer Preissteigerung von 2.000 Euro für das Elektrofahrzeug nur um knapp zwei Prozent. Das lässt darauf schließen, dass es einen Stamm von echten Elektroauto-Fans gibt, deren Hauptkriterium nicht der Preis ist. Und es bedeutet auch, dass die Betriebskosten, die beim Elektrofahrzeug deutlich geringer als beim konventionellen Pkw sind, für viele maßgeblich sind.

Die Sensitivitätsberechnungen zeigen auch, dass viele Autokäufer am liebsten an ihren Fahr- und Tankgewohnheiten festhalten: In dem theoretischen Fall, dass fünf Minuten Ladedauer ausreichen, um mit einer Batterieladung 500 Kilometer weit zu fahren, würden 41 Prozent der Kleinwagenkäufer ein reines Elektroauto wählen, nur noch 35 Prozent ein Auto mit Verbrennungsmotor.

### Mit dem Elektroauto zur Arbeit, mit dem Mietwagen in den Urlaub?

Und wie sieht nun der typische Käufer eines Elektrofahrzeugs im Jahr 2020 aus? Die Auswertung der Conjoint-Analyse gibt auch darauf Antworten. Käufer von Elektrofahrzeugen haben im Durchschnitt ein höheres Einkommen und ihr Umweltbewusstsein ist deutlich stärker ausgeprägt als beim Durchschnitt der befragten Neuwagenkäufer. Man würde vermuten, dass Käufer von Elektrofahrzeugen meist in Ballungsgebieten und Großstädten leben. Hier gibt es die typisch urban-ökologischen

Milieus und die Abhängigkeit vom eigenen Auto ist geringer als auf dem Land. Diese These fanden die Wissenschaftler nur zum Teil bestätigt. In der Fahrzeugkategorie »mittel« ist dieser Trend durchaus vorhanden, in der Kategorie »klein« dagegen nicht.

Eine andere, häufig geäußerte These wird dagegen sowohl in der Kategorie »klein« als auch in der Kategorie »mittel« durch die Daten gestützt: Vollelektrische Fahrzeuge werden eher dann gekauft, wenn noch ein weiterer Pkw mit Verbrennungsmotor im Haushalt vorhanden ist. Hieraus darf allerdings nicht geschlossen werden, dass Elektrofahrzeuge künftig in der Regel nur als Zweitwagen im klassischen Sinne genutzt werden. Denn mit Elektroautos könnten sich ganz neue Mobilitätsmuster ergeben: Das Fahrzeug mit begrenzter Reichweite, aber Lademöglichkeit in der Firma, könnte in Zukunft eher als Pendelfahrzeug für die immer gleichen Routewege eingesetzt werden. Das zweite Fahrzeug im Haushalt oder auch andere Verkehrsmittel dagegen dienen dann für längere Sonder- oder Spontanfahrten.

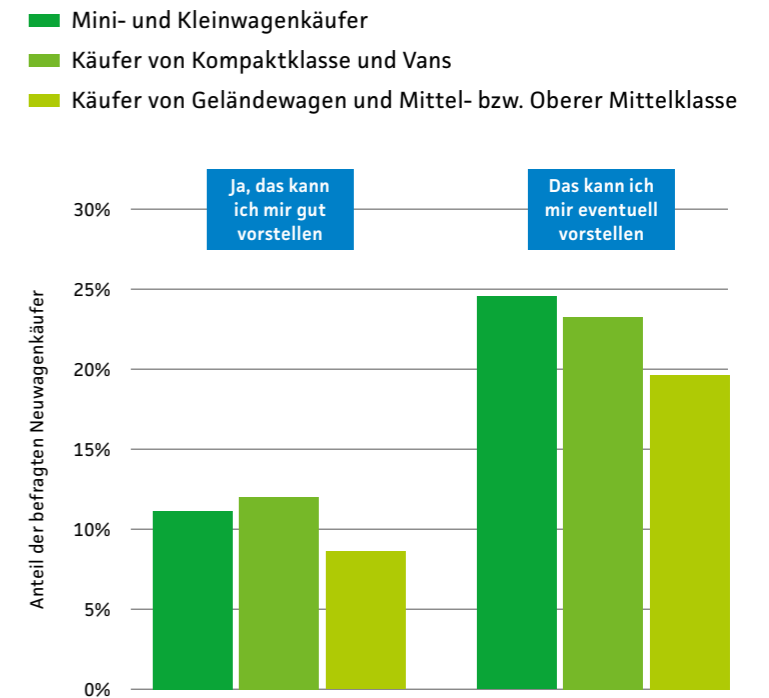
Potenzielle Käufer von Elektroautos sind nicht unbedingt festgelegt auf das Verkehrsmittel Auto. Sie sind eher aufgeschlossen gegenüber einem so genannten multimodalen Mobilitätskonzept. Dahinter steckt die einfache Idee, dass man für seine Wege verschiedene Verkehrsmittel kombiniert – Auto, Mietwagen, Bus, Zug, Fahrrad – und diese Verkehrsmittel spontan und flexibel beispielsweise auf seinem Smartphone bucht.

Das Resümee der Käuferanalyse im Projekt OPTUM: Trotz hoher Anschaffungskosten und technischer Einschränkungen, die Elektrofahrzeuge mit sich bringen, gibt es unter Autokäufern in Deutschland eine große Gruppe, die elektrische Antriebe attraktiv findet und sich

dafür entscheiden würde. Geschlecht und Alter spielen bei der Entscheidung für oder gegen Elektrofahrzeuge so gut wie keine Rolle, von Bedeutung ist allerdings das Umweltbewusstsein. Gewisse Einkommensunterschiede wurden zwar deutlich, sie wirken sich allerdings schwächer aus als erwartet.

Wesentlich für die Kaufentscheidung sind nicht nur die eigenen Lebensumstände, sondern auch die Wahrnehmung von Alternativen. Ob sich Befragte für ein Elektrofahrzeug entscheiden oder nicht, hängt auch davon ab, wie Autofahrer das Angebot an öffentlichen Verkehrsmitteln bewerten. Neuwagenkäufer, die es als umständlich einschätzen, für ihre gewöhnlichen Wege den öffentlichen Nahverkehr zu nutzen, wählen deutlich seltener einen Elektro-Pkw. Die Analysen verweisen außerdem auf einen interessanten neuen Trend: Längst nicht alle Befragten legen unter allen Umständen Wert auf ein eigenes Auto. Fast jeder Dritte könnte sich vorstellen, künftig nur noch mit (elektrischen) Car-Sharing-Fahrzeugen, Mietwagen, Bussen und Bahnen unterwegs zu sein und ist damit ein potenzieller Kunde für neue, innovative Mobilitätskonzepte.

QUELLE: OPTUM



**Kann ich mir vorstellen, kein Auto mehr zu besitzen und nur noch multimodale Mobilitätskonzepte zu nutzen?** Längst nicht alle befragten Autokäufer legen unter allen Umständen Wert auf ein eigenes Auto. Fast jeder Dritte könnte sich vorstellen, künftig nur noch mit (elektrischen) Car-Sharing-Fahrzeugen, Bussen, Bahnen und Fahrrad unterwegs zu sein.

# So fahren wir heute. Wie fahren wir morgen?

— **Das Gefühl, ständig mobil sein zu können, hat unseren »Benzinverstand« wesentlich geprägt.** Der Autofahrer von heute ist es gewohnt, dass sein Fahrzeug jederzeit so gut wie unbeschränkt zur Verfügung steht. Doch deckt sich der Wunsch nach uneingeschränkter Mobilität mit unserem Fahrverhalten im Alltag? Benötigen wir das eigene Auto tatsächlich so häufig und zu stets wechselnden Zeiten? Wie lange steht eigentlich ein Fahrzeug ungenutzt zuhause oder am Arbeitsplatz? Für Elektrofahrzeuge sind die Antworten auf solche Fragen entscheidend.

Um abschätzen zu können, wie groß das Marktpotenzial für reine Elektrofahrzeuge wirklich ist und in welchem Umfang sie Umwelt und Klima entlasten können, muss bekannt sein, wofür, wie oft und für welche Strecken Autofahrer im Durchschnitt ihr Fahrzeug brauchen. Dafür haben die Wissenschaftler des Öko-Instituts im Rahmen des Projektes OPTUM die Daten der Verkehrserhebung »Mobilität in Deutschland« (MiD) analysiert. Hier wurden im Jahr 2008 77.000 Personen aus 26.000 Haushalten zu ihrem alltäglichen Fahrverhalten befragt. Die Befragten gaben jeweils für einen bestimmten Stichtag Auskunft darüber, wann, wohin, wie oft und mit welchem Verkehrsmittel sie unterwegs waren. Da die Befragung über das ganze Jahr verteilt war, wurden Werkstage genauso erfasst wie Samstage und Sonntage und die Daten nicht durch Jahreszeit oder Wettereinflüsse verzerrt.

Auskunft über ihr Mobilitätsverhalten gaben zudem nicht nur die Fahrzeugbesitzer,

sondern alle Mitglieder eines Haushalts. Auf Grundlage der MiD-Daten konnte im Rahmen von OPTUM ein nahezu vollständiges Bild darüber entwickelt werden, wie Fahrzeuge in Deutschland im Alltag zum Einsatz kommen. Dieser Fokus auf das Fahrzeug und nicht auf einen einzelnen Nutzer ist für Elektroautos elementar, denn Elektro-Pkw bringen, wie bereits angesprochen, Einschränkungen bezüglich Reichweite und Ladezeit mit sich. Je stärker ein Nutzer auf ein Auto angewiesen ist, umso mehr machen sich diese Einschränkungen bemerkbar. Anders gesagt: Wie häufig, für welche Strecken und von wie vielen Nutzern das Auto im Alltag tatsächlich gebraucht wird, bestimmt mit darüber, ob ein reines Elektrofahrzeug als Ersatz für ein herkömmliches Auto mit Verbrennungsmotor überhaupt in Frage kommt.

## Die Auswertung der MiD-Daten ergibt ein überraschendes Bild:

— Wenn die Fahrzeuge bewegt werden, legen 80 Prozent der Fahrzeuge im Alltag weniger als 50 Kilometer an einem Tag zurück, 95 Prozent weniger als 100 Kilometer.

— Ein erheblicher Anteil der Fahrzeuge wird gar nicht genutzt: Am Werktag bleiben im Durchschnitt 37 Prozent der Autos in der Garage oder auf dem Parkplatz, am Samstag 44 Prozent, am Sonntag 63 Prozent.

— Werktags werden 31 Prozent der Fahrzeuge genutzt, um zur Arbeit zu fahren: 18 Prozent fahren weniger als 40 Kilometer zur Arbeit (hin und zurück), nur 13 Prozent pendeln 40 Kilometer und mehr am Tag.

— Auch am Samstag wird das Auto von vielen nur für kurze Strecken benötigt. 42 Prozent

fahren weniger als 40 Kilometer. Nur 14 Prozent brauchen das Auto am Samstag für längere Fahrten, bei denen sie im Durchschnitt rund 80 Kilometer zurücklegen. Der Rest der Fahrzeuge steht.

— Am Sonntag wird besonders wenig Auto gefahren. Knapp über 60 Prozent der Fahrzeuge werden gar nicht genutzt. 27 Prozent werden nicht weiter als 40 Kilometer gefahren, nur 10 Prozent nutzen den Sonntag für längere Fahrten.

— Fahrzeuge sind Steh-Zeuge: Am Arbeitsplatz steht das Auto rund acht Stunden ungenutzt, bei Einkaufsfahrten bleibt es zwei bis 2,5 Stunden geparkt, bei Tagesausflügen steht das Auto 3,5 bis fünf Stunden am Freizeitort, nachts bleibt es in der Regel 12 Stunden und länger ungenutzt.

Die Botschaft ist klar: Der Autoalltag könnte bereits heute gut mit Elektrofahrzeugen abgedeckt werden, trotz deren vergleichsweise geringen Reichweite und langen Ladezeiten. Denn der durchschnittliche Autofahrer in Deutschland benötigt sein Fahrzeug im Alltag in der Regel nur für kurze Strecken. Das gilt für Werkstage genauso wie für das Wochenende. Zudem bleibt innerhalb von 24 Stunden ausreichend Zeit, um das Auto zuhause an der Steckdose oder unterwegs an einer Ladesäule wieder aufzutanken.

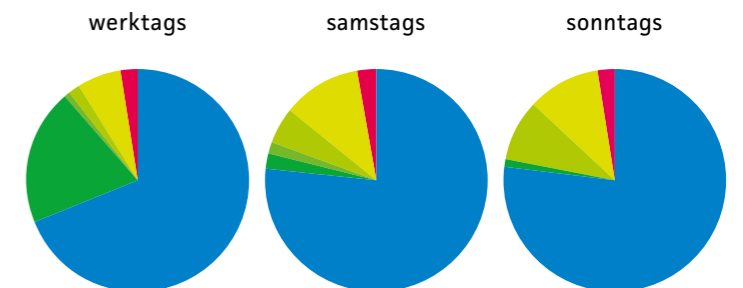
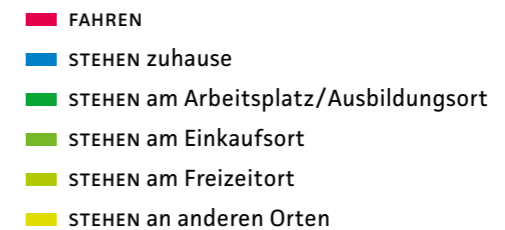
## Für wenige längere Fahrten müssten Besitzer von reinen Elektroautos auf Alternativen umsteigen.

Das Elektroauto muss kein typischer Zweitwagen sein, der als Ausweichfahrzeug oder für Ausnahmefahrten genutzt wird. Elektrofahr-

zeuge taugen vielmehr als Fahrzeuge für den Regelfall – für die kurze Strecke zur Arbeit, zum Einkaufen, zum Familienbesuch, zur Freizeitgestaltung.

Das heißt aber auch: Für die Nutzer von reinen Elektrofahrzeugen sind nicht die Alltagsfahrten ein Problem, sondern »Sonderfahrten« wie Ausflüge am Wochenende, längere Dienstreisen oder der Jahresurlaub. Auch darüber haben sich die Wissenschaftler des Öko-Instituts Gedanken gemacht. Sie haben anhand der Daten der MiD ermittelt, wie häufig es im Jahr vorkommt, dass die Reichweite eines Elektroautos mit 160 Kilometern pro Batterieladung für die geplante Fahrt nicht groß genug ist. Ergebnis: Im Durchschnitt würde ein solches Auto bei zwölf Einzelfahrten im Jahr auf der Strecke

QUELLE: MiD 2008/AUSWERTUNGEN IM RAHMEN VON OPTUM



**Unsere Fahrzeuge sind Steh-Zeuge:** Während eines Tages werden Autos die meiste Zeit geparkt – zuhause, am Arbeitsplatz, auf Parkplätzen beispielsweise beim Einkaufen. Ausreichend Zeit also, um die Batterie eines Elektroautos zu laden. Dargestellt ist der Durchschnitt über alle Fahrzeuge.

**Entscheidend für den Einsatz von Elektroautos ist die Akzeptanz für alternative Mobilitätsoptionen.**

bleiben, das heißt, für sechs längere Ausflüge jährlich stünde es nicht zur Verfügung.

Gleichzeitig gingen die Experten davon aus, dass die Nutzer von Elektrofahrzeugen acht solcher »Reichweitenüberschreitungen« (vier Hin- und vier Rückfahrten) im Jahr akzeptieren würden. Für diese acht längeren Strecken müssten sich die Autobesitzer also Alternativen überlegen – sie könnten beispielsweise einen Mietwagen nutzen oder mit dem Zug fahren. Die Berechnungen ergaben: Die Wahrscheinlichkeit, dass es bis zu acht Reichweitenüberschreitungen im Jahr kommt, liegt bei rund 20 Prozent. Mit anderen Worten: Die Wissenschaftler nehmen an, dass jeder fünfte Autofahrer damit klar käme, für maximal acht Fahrten im Jahr auf einen Mietwagen, auf die Bahn

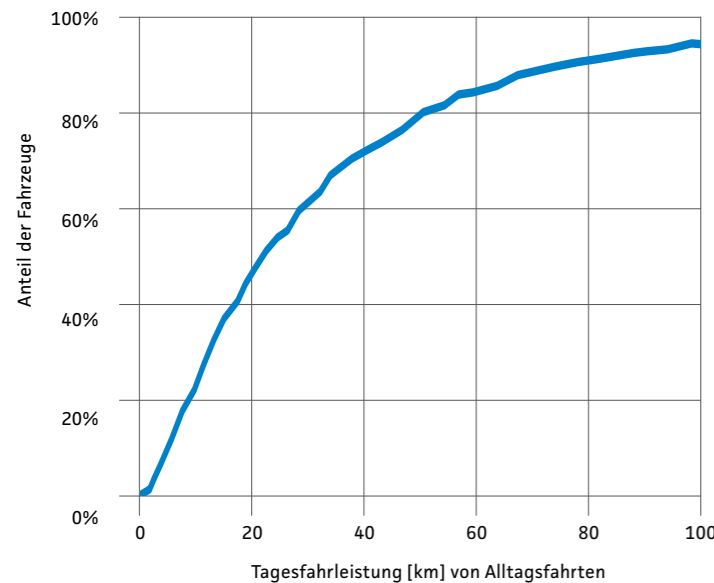
oder auf den Zweitwagen der Familie auszuweichen. Und ein solcher steht bei fast jedem dritten Haushalt in Deutschland zur Verfügung. Denn die Daten der MiD zeigen, dass heute 29 Prozent der Haushalte in Deutschland über zwei oder mehr Fahrzeuge verfügen.

**70 Prozent der Autofahrer können zuhause aufladen, 30 Prozent brauchen öffentliche Ladesäulen.**

Wie groß ist nun das maximale Marktpotenzial für Elektrofahrzeuge auf Basis der typischen Alltags-Mobilität? Dafür entwickelten die Wissenschaftler des Öko-Instituts für die Zeit bis 2030 Szenarien, die alle wesentlichen Randbedingungen zu einer plausiblen Kombination zusammenfassen: Welche Fahrzeuggröße ist typisch für den Autofahrer in Deutschland? Welche Strecke legt das Auto durchschnittlich am Tag zurück? Wo und wie lange wird es geparkt und abgestellt? Welche Reichweite und Ladedauer haben Elektrofahrzeuge in zehn bzw. zwanzig Jahren? Wie sind dann die Kosten für Batterie, Strom und Benzin?

Die Experten mussten für diese Szenarien einige Annahmen treffen. Beispielsweise setzten sie voraus, dass sich das Mobilitätsverhalten durch die Anschaffung eines Elektroautos nicht verändert und der Besitzer dieselben Strecken zur selben Uhrzeit zurücklegt wie mit einem konventionellen Pkw. Außerdem gingen sie davon aus, dass es auch im Jahr 2030 Fahrzeuge der Mittel- und Oberklasse noch nicht serienmäßig als reine Elektrofahrzeuge geben wird. Nicht zuletzt spricht vieles dafür, dass im Jahr 2020 noch längst nicht alle Nutzer von Elektrofahrzeugen für das regelmäßige Laden der Batterie Zugang zu einer Ladesäule haben – schätzungsweise maximal 30 Prozent der Pkw-Besitzer ohne eigenen Stellplatz auf dem

QUELLE: MID 2008/AUSWERTUNGEN IM RAHMEN VON OPTUM



Im Alltag sind die meisten Fahrten nicht länger als 40 Kilometer und bei 95 Prozent der Fahrzeuge liegt die Tagesfahrleistung unter 100 Kilometer. Der Autoalltag könnte daher bereits heute gut mit Elektrofahrzeugen abgedeckt werden.

Privatgrundstück werden regelmäßig an einer öffentlichen Ladesäule laden können. Lade-Bequemlichkeit ist ein wichtiger Aspekt: Wer zuhause in der Garage oder im Carport Strom tanken kann, hat es einfacher als Autofahrer, die unterwegs auf öffentliche Ladesäulen angewiesen sind.

Diese Annahmen sind – wie alle Szenarien zur Elektromobilität – mit vielen Unsicherheiten behaftet. Denn aus heutiger Sicht lässt sich nur abschätzen, wie sich Fahrzeuge, Infrastruktur, Energiemarkt und Akzeptanz innerhalb der kommenden zehn bis zwanzig Jahre tatsächlich entwickeln werden.

**Die Szenarien zeigen folgende Ergebnisse:**

— Reichweite und Ladedauer sind für die alltägliche Nutzung kein Hinderungsgrund für rein elektrische Fahrzeuge, solange über Nacht eine Lademöglichkeit zur Verfügung steht.

— Rund 70 Prozent der Autofahrer besitzen einen Stellplatz auf dem eigenen Grundstück, diese Haushalte können also einen eigenen Ladeanschluss installieren.

— Die restlichen 30 Prozent der Fahrzeugbesitzer haben keinen Stellplatz auf dem eigenen Grundstück und können daher nur an öffentlichen Ladesäulen und eventuell am Arbeitsplatz laden. Daher ist der Ausbau der öffentlichen Lade-Infrastruktur für diese Haushalte entscheidend.

— Das tatsächliche Fahrzeugangebot ist ausschlaggebend für das Marktpotenzial von Elektrofahrzeugen. Gibt es rein elektrische Fahrzeuge nicht nur als Kleinwagen, sondern auch in größeren Fahrzeugsegmenten, steigt das Potenzial erheblich.

— Die eingeschränkte Reichweite von rein elektrischen Fahrzeugen ist für längere Fahrten ein Problem. Verfügt der Haushalt über einen Zweitwagen oder akzeptieren die Nutzer das Umsteigen auf andere Verkehrsmittel, steigt das Marktpotenzial für rein elektrische Fahrzeuge.

Im Rahmen des Forschungsprojektes OPTUM haben die Wissenschaftler in einem nächsten Schritt Akzeptanz (siehe Kapitel »Akzeptanz, Attraktivität, Alltagstauglichkeit«) und das berechnete Marktpotenzial miteinander verknüpft. Bringt man die Analysen zur Deckung, wird deutlich, dass Akzeptanz und tatsächliches Mobilitätsverhalten gut ineinander greifen. Mit einer interessanten Ausnahme: Sowohl kleine Stadtfahrzeuge als auch größere Elektrofahrzeuge finden bei Autofahrern ohne eigenen Stellplatz und damit ohne Zugang zu einer eigenen Lademöglichkeit deutlich mehr Akzeptanz als bei Haus- und Garagenbesitzern. Ein Grund hierfür ist, dass diese so genannten »Laternenparker« eher in innenstadtnahen Bezirken wohnen, wo Stellplätze oder Garagen ein rares Gut sind. Dieser Personenkreis hat in der Regel ein ausgeprägteres Umweltbewusstsein als Eigenheimbewohner mit Stellplatz oder Garage.

**Die Zahl der Elektrofahrzeuge in Deutschland wächst bis 2020 nur langsam.**

Bis 2020 soll mindestens eine Million Fahrzeuge mit Elektroantrieb auf Deutschlands Straßen fahren, so die Pläne der Bundesregierung, bis 2030 dann sechs Millionen. Klar ist: Der Anteil von Plug-In-Hybriden und reinen Elektrofahrzeugen wird bis 2030 stetig zunehmen. Allerdings wird deren Zahl in den kom-



menden acht bis zehn Jahren nur langsam anwachsen. Grund dafür ist die Tatsache, dass sich ganz generell neue Technologien am Anfang auf dem Markt schwer tun: Die Industrie produziert eher kleine Stückzahlen zu vergleichsweise hohen Kosten, Käufer müssen in die neue Technologie erst Vertrauen gewinnen, die technischen Randbedingungen (bei Elektrofahrzeugen beispielsweise die Ladeinfrastruktur) sind zu Anfang nicht unbedingt optimal. Dies gilt besonders für langlebige Güter wie Autos, deren Produktions- und Vertriebsprozesse langjährig angelegt sind.

Das führt dazu, dass das theoretisch vorhandene Marktpotenzial für Elektrofahrzeuge nur mit Zeitverzögerung erschlossen werden kann. Experten sprechen von der so genannten Technologiediffusion: Nach einer sehr zögerlichen Anfangsphase (wenige Modelle treffen auf eine recht geringe Nachfrage) wächst die Nachfrage am Markt stark an (Elektroautos setzen sich durch) und flacht schließlich wieder ab (der Markt ist gesättigt).

2030 könnte das Bild dann so aussehen: Der Anteil der Elektrofahrzeuge an den neu zugelassenen Pkw steigt auf knapp 30 Prozent. Der Bestand an Elektrofahrzeugen wird auf knapp 5,9 Millionen anwachsen, davon wären 5,1 Millionen Plug-In-Hybride und 800.000 reine Elektroautos. Bei einer prognostizierten Gesamtzahl von 42 bis 45 Millionen Pkw in Deutschland machen die Elektroantriebe dann 13 bis 14 Prozent aus.

Dies ist das Ergebnis eines Szenarios, das im Rahmen von OPTUM berechnet wurde und das vor allem die Annahmen zu Kosten, Technologieentwicklung etc. aus dem Endbericht der »Nationalen Plattform Elektromobilität« fortschreibt, und das im Rahmen eines Stakeholderdialoges mit relevanten Experten aus Verkehrs- und Energiewesen diskutiert wurde.

Natürlich bergen diese Berechnungen Unsicherheiten. Keiner weiß, wie stark die Kraftstoffpreise künftig steigen. Unklar ist aus heutiger Sicht auch, wie sich die Batteriekosten tatsächlich entwickeln werden. Niemand kann ausschließen, dass Autohersteller früher oder später als geplant mit neuen Elektro-Modellen auf den Markt kommen.

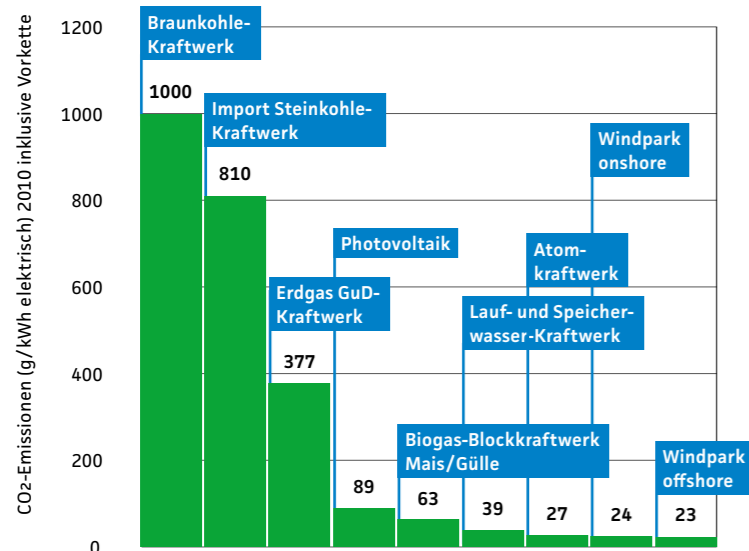
Die Bestandsentwicklung fundiert zu betrachten ist jedoch wesentliche Voraussetzung dafür, um den Beitrag von Elektromobilität zum Klimaschutz abschätzen zu können. Im Rahmen von OPTUM wurden daher verschiedene Szenarien zu unterschiedlichen Entwicklungen der wesentlichen Rahmenbedingungen durchgeführt, um mögliche Entwicklungspfade für Elektromobilität bis 2030 aufzuzeigen. Denn nur bei einer relevanten Anzahl von Elektrofahrzeugen werden diese tatsächlich zur CO<sub>2</sub>-Minderung im Verkehrssektor beitragen können.

**2030 könnten an der Elektromobilität reine Elektroautos einen Marktanteil von rund 13 Prozent haben, Plug-In-Hybride von knapp 87 Prozent.**

# Wie sauber sind Elektroautos?

— **Entscheidend für die Klimaverträglichkeit der Elektroautos ist, aus welchen Energieträgern der Fahrstrom gewonnen wird.** Der Strom aus der Steckdose ist stets ein Mix vieler Energieträger. 2010 lag in Deutschland der Anteil der Kohle an der Stromerzeugung bei 42 Prozent, Erdgas lieferte 13, Kernenergie knapp 23 Prozent. Bezogen auf den inländischen Verbrauch trugen die regenerativen Energien 17 Prozent bei, im ersten Halbjahr 2011 deckten sie erstmals 20 Prozent der Nachfrage.

QUELLE: GEMIS 4.7



**Die unsichtbaren Emissionen:** Strom aus der Steckdose verursacht ganz unterschiedlich viel Kohlendioxidemissionen bei seiner Herstellung im Kraftwerk. Kohlekraftwerke erzeugen hohe Emissionen, erneuerbare Energien dagegen nur wenige, die durch die Herstellung, die Entsorgung der Anlagen bzw. den Anbau von Biomasse entehen.

Der Mix der Energieträger bestimmt darüber, wie sauber der erzeugte Strom ist – bei Kohle und Erdgas gehören dazu im Wesentlichen die Emissionen bei der Produktion im Kraftwerk. Diese Mengen variieren stark: Bei der Erzeugung einer Kilowattstunde Strom aus Kohle wird beispielsweise mehr als doppelt so viel Kohlendioxid freigesetzt wie bei einer Kilowattstunde aus Erdgas. Ältere Kraftwerke arbeiten zudem mit deutlich geringerem Wirkungsgrad und haben daher generell höhere Emissionen pro erzeugter Kilowattstunde. Atomenergie verursacht im Vergleich zu Kohle und Erdgas zwar nur niedrige Treibhausgasemissionen, aber die hier verwendeten radioaktiven Stoffe können Menschen und Umwelt gefährden. Erneuerbare Energien emittieren durch die Herstellung und Entsorgung der Anlagen sowie durch den Biomasseanbau nur geringe Mengen an Treibhausgasen und verursachen keine Strahlenbelastung. Bei nachhaltiger Erzeugung ist erneuerbar erzeugter Strom deshalb vergleichsweise sauber.

Entscheidend für die Klima- und Umweltverträglichkeit der Elektroautos ist daher, in welchen Kraftwerken und aus welchen Energieträgern der Fahrstrom gewonnen wird. Echter Klimaschutz setzt voraus: Saubere Autos tanken sauberen Strom. Dies ist auch erklärtes Ziel der Politik. Im Regierungsprogramm Elektromobilität vom Mai 2011 heißt es: »Der zusätzliche Bedarf an elektrischer Energie in diesem Sektor ist durch Strom aus erneuerbaren Energien zu decken.«

Elektrofahrzeuge erhöhen die Stromnachfrage – und zwar immer dann, wenn der Besitzer sein Auto an die Steckdose oder die Ladesäule ankoppelt, um die Batterie zu laden. Wie viele Autos wann geladen werden und um wie viel die Nachfrage durch sie steigt, ist wesentlich für die Auswirkungen der Elektromo-

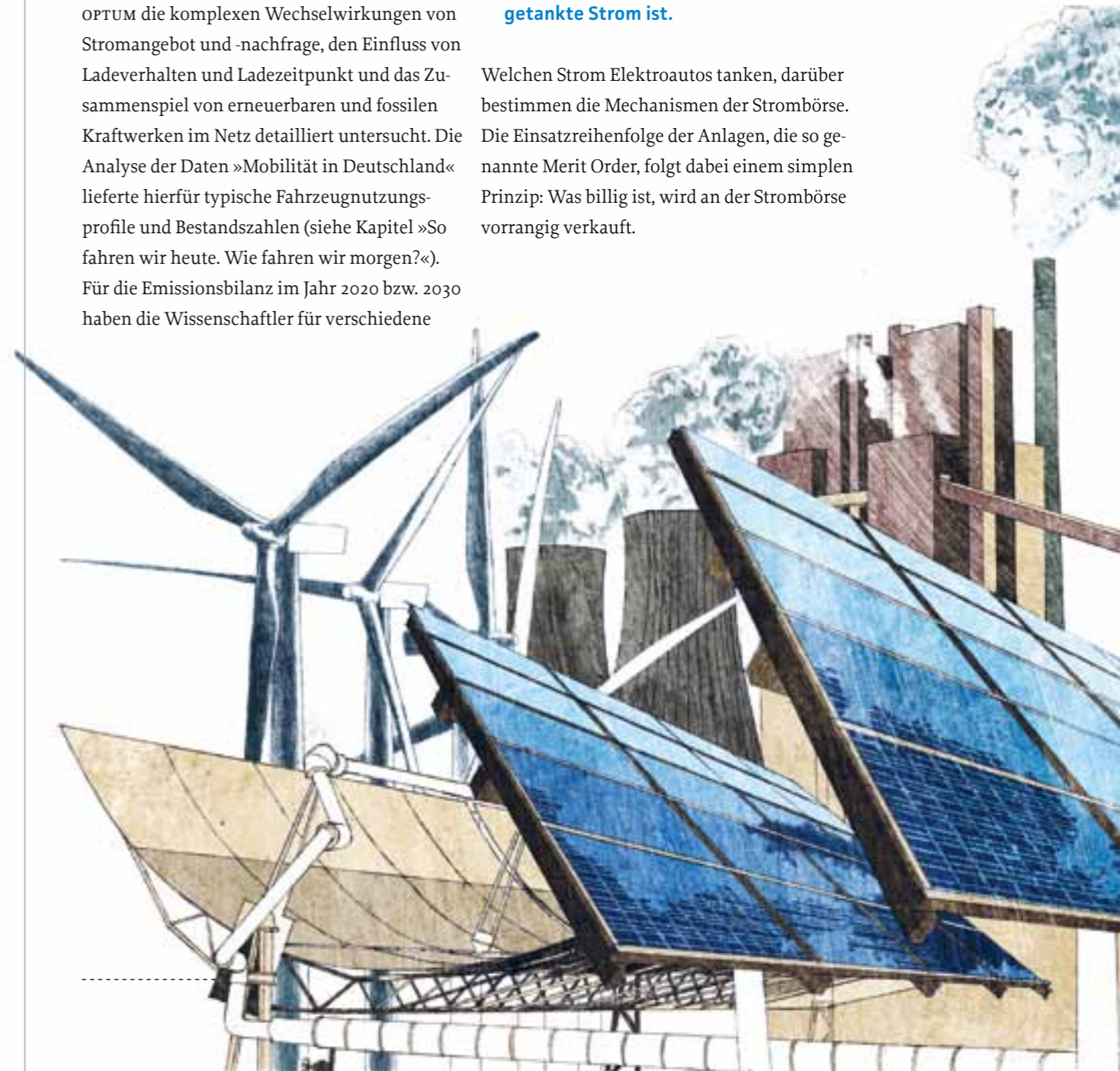
bilität auf den Strommarkt. Laden die meisten nur nachts? Oder eher tagsüber in der Tiefgarage am Arbeitsplatz? Wie viele laden unterwegs beim Einkaufen oder während des Sonntagsausflugs? Was passiert, wenn alle Autos gleichzeitig laden?

Diese Aspekte sind mitentscheidend für die Frage, welche Emissionen dem Fahrstrom für Elektrofahrzeuge zuzurechnen sind. Die Wissenschaftler haben daher im Rahmen von OPTUM die komplexen Wechselwirkungen von Stromangebot und -nachfrage, den Einfluss von Ladeverhalten und Ladezeitpunkt und das Zusammenspiel von erneuerbaren und fossilen Kraftwerken im Netz detailliert untersucht. Die Analyse der Daten »Mobilität in Deutschland« lieferte hierfür typische Fahrzeugnutzungsprofile und Bestandszahlen (siehe Kapitel »So fahren wir heute. Wie fahren wir morgen?«). Für die Emissionsbilanz im Jahr 2020 bzw. 2030 haben die Wissenschaftler für verschiedene

Szenarien 60 typische Fahrzeugnutzungsprofile abgeleitet, auf deren Basis ein computergestütztes Strommarktmodell mit dem Namen PowerFlex den Kraftwerkspark simulierte. So konnte ermittelt werden, welche Kraftwerke den zusätzlichen Strom für die Elektroautos erzeugen würden.

**Das Geschehen an der Strombörse bestimmt darüber, wie sauber der getankte Strom ist.**

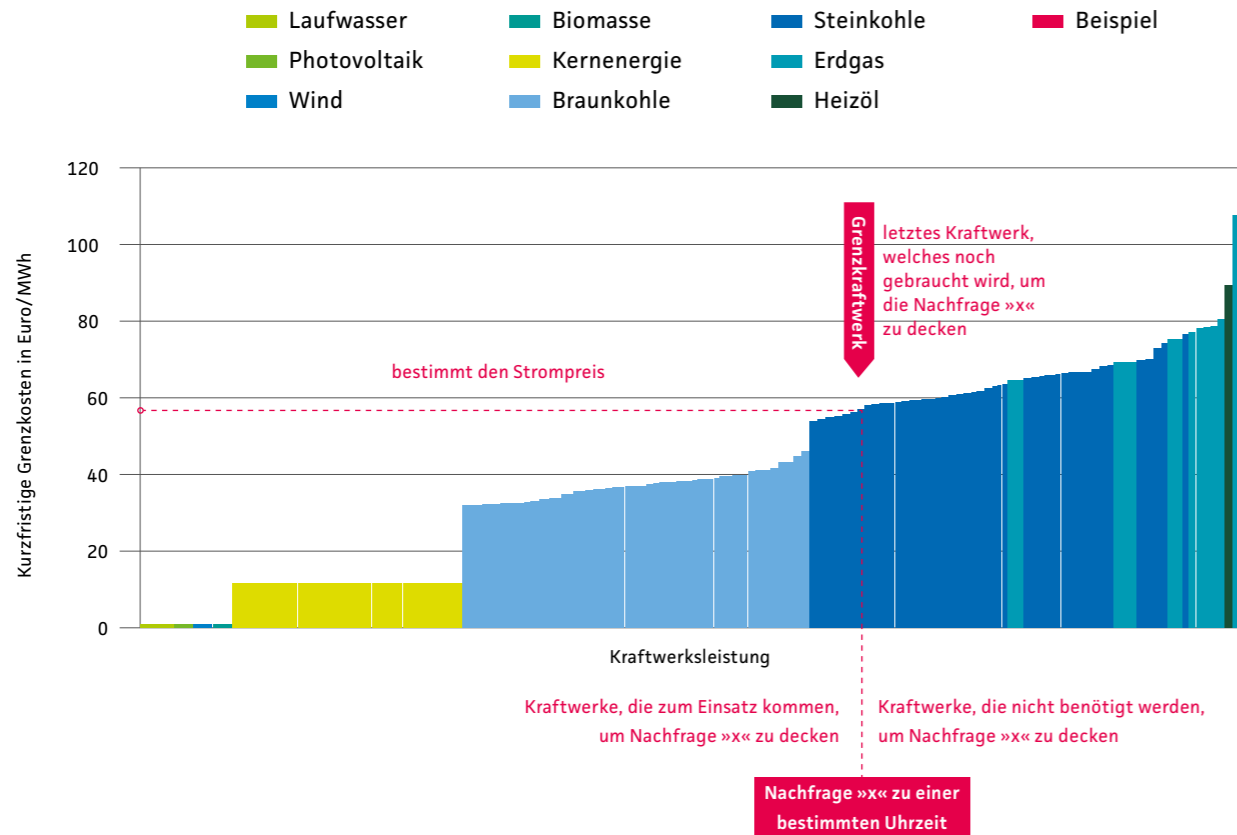
Welchen Strom Elektroautos tanken, darüber bestimmen die Mechanismen der Strombörse. Die Einsatzreihenfolge der Anlagen, die so genannte Merit Order, folgt dabei einem simplen Prinzip: Was billig ist, wird an der Strombörse vorrangig verkauft.



Die Energieversorger bieten Strom aus ihren zur Verfügung stehenden Kraftwerken zu einem bestimmten Preis an. An der Börse werden diese Gebote nach dem Preis sortiert: Am billigsten ist Strom aus Atom- und Braunkohlekraftwerken. Sie produzieren den größten Teil der so genannten Grundlast – also derjenigen

Strommenge, die rund um die Uhr als Sockelbedarf verbraucht wird. Je nachdem, wie groß der Stromverbrauch gerade ist, verändern sich Zahl und Art der Kraftwerke, die gebraucht werden, um die Nachfrage zu decken: Steigt der Verbrauch, beispielsweise vormittags oder am Abend, liefern vermehrt Steinkohlekraftwerke,

QUELLE: DARSTELLUNG ÖKO-INSTITUT



**Die Macht der Merit Order:** Welches Kraftwerk zu welchem Zeitpunkt ins Netz einspeist, hängt vom Preis des erzeugten Stroms ab. Strom aus erneuerbaren Energien, Braunkohle und Atomkraft ist am günstigsten, Gas- und Ölkraftwerke produzieren dagegen teuer. Die einzelnen Balken der schematischen Darstellung stellen die Kraftwerksblöcke in Deutschland

dar. Ganz links sind Kraftwerke mit geringen Betriebskosten wie etwa Wind- oder Solarkraft zu finden. Die Mischung von Kohle und Gas liegt in den unterschiedlichen Wirkungsgraden der Kraftwerke begründet. Ein modernes Gaskraftwerk hat dadurch trotz teurerer Brennstoffe geringere Betriebskosten als ein altes Steinkohlekraftwerk.

deren Strom teurer ist. Bei Verbrauchsspitzen werden Gaskraftwerke und Pumpspeicherkraftwerke zugeschaltet.

Beginnend mit den stets niedrigsten Betriebskosten werden also so lange Kraftwerke mit höheren Kosten zugeschaltet, bis die Nachfrage gedeckt ist. Das jeweils teuerste Kraftwerk, das noch benötigt wird, um die Nachfrage zu decken, bestimmt den Strompreis am Spotmarkt. Es ist das so genannte Grenzkraftwerk.

Seit 2010 wird auch Strom aus erneuerbaren Energien am Spotmarkt gehandelt. Photovoltaik-Anlagen und Windparks haben keine Brennstoffkosten. Deren Strom ist nach den Regeln der Merit Order also immer günstiger als Energie aus konventionellen Kraftwerken. Sie kommen am Strommarkt damit zuerst zum Zuge. Scheint mittags (zu Spitzenlastzeiten) viel Sonne, dann verdrängt Solarstrom teurere Gaskraftwerke. Bei kräftigem Sturm drängt Windstrom am unteren Ende der Merit Order in den Strommarkt und verdrängt die teuersten konventionellen Kraftwerke am oberen Ende. Dies kann bei geringer Stromnachfrage sogar dazu führen, dass mehr Windstrom zur Verfügung steht als die Netze aufnehmen können bzw. als konventionelle Kraftwerke drosselbar sind. In diesen Fällen wird Wind- oder Sonnenstrom abgeregelt oder exportiert. Insgesamt führt die Einspeisung von regenerativem Strom dazu, dass ein billigeres Grenzkraftwerk als letztes zur Deckung der Nachfrage genutzt wird. Die teureren werden nicht mehr gebraucht und der Strom ist in solchen Stunden besonders günstig.

**Durch gesteuertes Laden tanken Elektroautos mehr Strom aus erneuerbaren Energien, aber auch mehr Strom aus Kohle.**

Für die Frage, wie sauberen Strom ein Elektroauto tankt, ist entscheidend, welcher Strom für diesen neuen Verbraucher zusätzlich produziert werden muss. Zur Berechnung der Emissionen haben die Wissenschaftler daher verglichen, wie der Kraftwerkseinsatz mit und ohne Elektrofahrzeuge aussieht. Nach den Regeln des Strommarkts kommt für jede zusätzlich nachgefragte Kilowattstunde Strom an den Markt, der zu den jeweils nächst günstigsten Kosten produziert wird.

Im Jahr 2011 ist in Deutschland nachts das letzte, noch zur Lastdeckung benötigte Kraftwerk in der Regel ein Kohlekraftwerk. Daher sorgt ein Autofahrer, der 2011 regelmäßig nachts sein Elektroauto auflädt, dafür, dass der zusätzliche Strom für die Autobatterie aus dem nächst teureren Kohlekraftwerk kommt. Von emissionsfreiem Fahren kann dann also nicht die Rede sein. Das bedeutet: Wenn mit dem heutigen Kraftwerkspark geladen wird, sind Elektroautos nicht ökologischer als moderne sparsame Verbrennungsmotoren.

Doch was zeigt der Blick in die Zukunft? Insgesamt, so die Grundlage für die Strommarkt berechnungen, wird es im Jahr 2020 rund eine Million und im Jahr 2030 etwa sechs Millionen Elektrofahrzeuge geben. Gut zehn Prozent davon, das ergaben die Berechnungen zum Fahrzeugbestand, werden reine Elektrofahrzeuge sein, etwa 90 Prozent Plug-In-Hybride. Weiterhin wird berücksichtigt, dass es bis 2030 deutlich mehr grünen Strom im deutschen Netz geben wird als heute. In 20 Jahren, so das Leitszenario des Bundesumweltministeriums, wird Kohle nur noch 20 und Erdgas 15 Prozent des Strombedarfs decken. Bei den erneuerbaren Energien werden beispielsweise zehn Prozent durch Biomasse, durch Wasserkraft rund vier, durch Wind 33 und durch Photovoltaik zehn Prozent bereitge-

**Wenn mit dem heutigen Kraftwerkspark geladen wird, sind Elektroautos nicht klimafreundlicher als moderne Verbrennungsmotoren.**



stellt. Die regenerativen Energien würden nach diesem Szenario im Jahr 2030 also mehr als jede zweite Kilowattstunde des verbrauchten Stroms erzeugen.

Da Elektrofahrzeuge im Tagesverlauf neue Nachfragespitzen hervorrufen können, entwickeln Energieversorger verschiedene Modelle für eine automatische Steuerung – das Lademanagement. Durch preisgesteuertes Laden können Elektroautos dazu beitragen, die Nachfrage an die fluktuierende Stromproduktion aus Wind und Sonne besser zeitlich anzupassen. Damit können sowohl Nachfrage-Täler (Zeiten mit relativ geringem Stromverbrauch, zum Beispiel nachts und am Wochenende) aufgefüllt als auch der Anteil von sauberem Fahrstrom erhöht werden. Für ihre Berechnungen unterschieden die Wissenschaftler in OPTUM mehrere Szenarien: zum Beispiel das Laden der Batterie regelmäßig direkt nach dem Ende einer Fahrt – ohne Lademanagement – oder das Laden zu einem möglichst günstigen Zeitpunkt über ein preisgesteuertes Lademanagement.

Die Fahrten mit Lademanagement sind dieselben wie ohne Lademanagement und werden dem Rechenmodell im Rahmen von OPTUM vorgegeben. Das Lademanagement lädt dann, wenn der Strom besonders billig ist und sorgt dafür, dass der Batteriefüllstand für die geplanten Fahrten immer ausreicht. Außerdem unterschieden die Forscher zwischen dem ausschließlichen Laden am Abend und in der Nacht und dem Laden auch tagsüber, beispielsweise durch Lademöglichkeiten am Arbeitsplatz.

Klares Ergebnis ist: Eine Million Elektro-Pkw im Jahr 2020 sind im Stromgeschehen kaum spürbar. Ihr Verbrauch von weniger als 0,5 Prozent des Gesamtstromverbrauchs ist schlichtweg zu gering, um sich im Stromversorgungssystem stark bemerkbar zu machen. Die erste – noch sehr kleine – Flotte an Elektrofahr-

zeugen kann also das heutige Energieversorgungssystem ohne große Verwerfungen auffangen. Ihre Umweltauswirkungen wären daher gering.

Spannend wird es 2030, wenn die Zahl der Elektroautos in Deutschland deutlich angestiegen ist.

#### Hier zeigen die Berechnungen:

— Bei ungesteuerter Ladung stammt der für die Autos zusätzlich erzeugte Strom zu gut 40 Prozent aus Steinkohlekraftwerken, 20 Prozent liefern Braunkohlekraftwerke und knapp 20 Prozent kommen aus Erdgaskraftwerken. Nur knappe fünf Prozent des Fahrstroms stammen aus erneuerbaren Energien.

— Ein preisoptimiertes Lademanagement erhöht einerseits den Anteil erneuerbarer Energien am Fahrstrom, weil das Laden zum Teil in kostengünstige Zeiten mit bisher überschüssigem Wind- oder Solarstrom verschoben werden kann. Andererseits wird die Ladung auch in Stunden mit geringer Nachfrage verschoben, in denen der zusätzliche Strom aus tendenziell emissionsintensiveren Grundlastkraftwerken kommt. Mit einem Lademanagement steigt daher der Anteil der erneuerbaren Energien am Fahrstrom auf ein knappes Fünftel – gleichzeitig steigt aber auch der Anteil der Braunkohle auf 40 Prozent, zu Lasten des Erdgas- und des Steinkohlestroms.

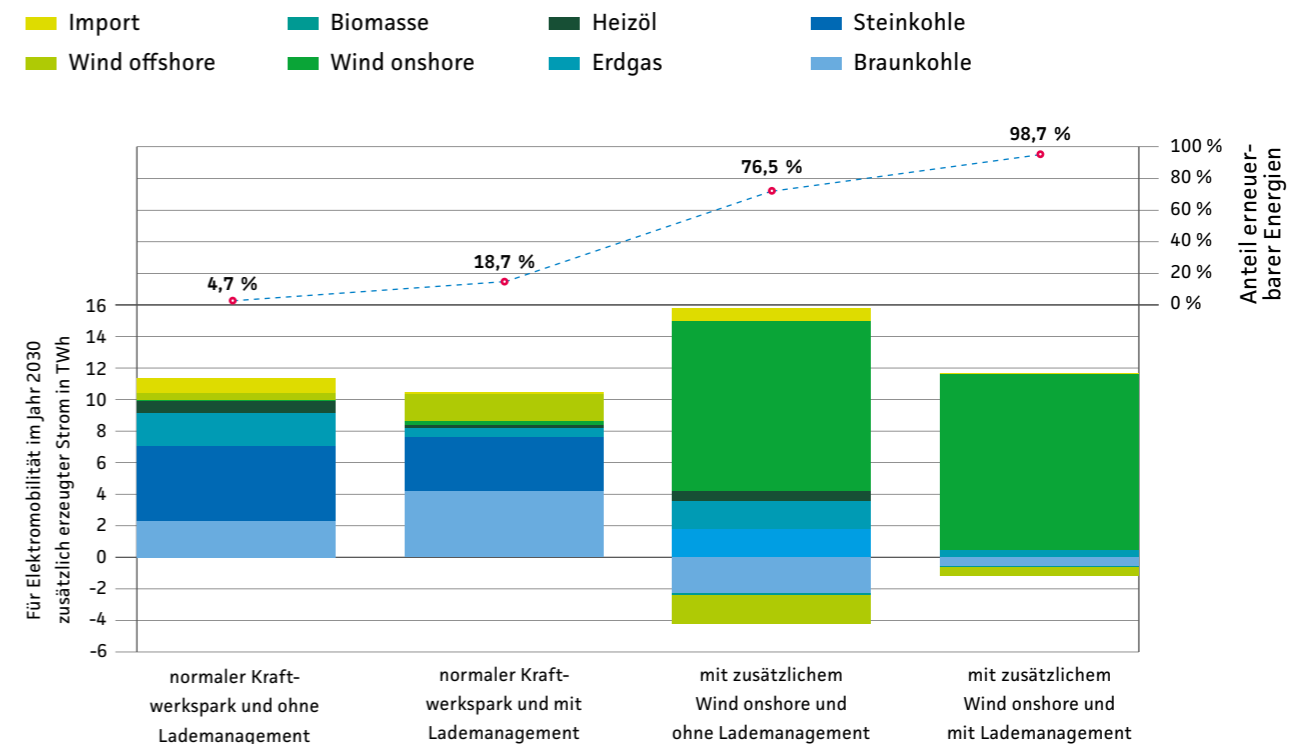
— Die Emissionen pro Kilowattstunde des zusätzlich erzeugten Stroms sind in allen Szenarien – mit und ohne Lademanagement – deutlich höher als die Emissionen pro Kilowattstunde der gesamten Stromerzeugung. Beim preisgesteuerten Laden wiegt der höhere Braunkohleanteil den höheren Anteil erneuer-

barer Energien auf, so dass die Emissionen pro Kilowattstunde in etwa gleich hoch sind wie ohne Lademanagement.

Um wirklich klimafreundlich zu fahren, ist deshalb der Zubau von erneuerbaren Anlagen nötig, die so viel Strom liefern, wie die Elektroautos im Jahr verbrauchen. Deshalb empfehlen die Wissenschaftler, dass mit steigender Elektromobilität zusätzliche Anlagen für grünen Strom gebaut werden. Dabei ist es unerheb-

lich, zu welchem Zeitpunkt der Strom aus diesen Anlagen ins Netz eingespeist wird. Denn übers Jahr gesehen wird genauso viel erneuerbarer Strom zusätzlich erzeugt, wie die Elektroflotte verbraucht – auch wenn nicht jedes einzelne Fahrzeug immer und überall mit grünem Strom betankt wird. Wesentlich ist, dass der Bau der Anlagen direkt an das Wachstum der Elektroflotte gekoppelt ist. Nur dann kann sich Elektromobilität zu einer emissionsarmen und klimaverträglichen Alternative entwickeln.

QUELLE: BERECHNUNGEN OPTUM



**Woher kommt der Fahrstrom?** Bei unverändertem Kraftwerkspark stammt ein Großteil des zusätzlich erzeugten Fahrstroms aus konventionellen Kraftwerken. Lademanagement erhöht den erneuerbaren Anteil aus bisher ungenutzten Solar- und Windstromspitzen, aber auch den Anteil an Kohlestrom. Mit zusätzlicher erneuerbarer Energie, zum Beispiel aus Windkraft, wird das Bild jedoch günstiger.

Deutlich wurde auch, dass ein preisgesteuertes Lademanagement sinnvoll ist. Dadurch kann sich die Nachfrage der Elektroautos dem fluktuierenden Angebot auf dem Strommarkt anpassen, Nachfragespitzen in besonders teuren Stunden – wenn Strom knapp ist – können vermieden werden.

### Die Elektro-Flotte im Jahr 2030 ist nur ein kleiner Puffer für überschüssigen Wind- und Solarstrom

Im Jahr 2030 gibt es deutlich mehr fluktuierende erneuerbare Energien im deutschen Netz als heute. Man würde deshalb erwarten, dass es viele Stunden mit geringer Nachfrage gibt, zu denen Wind- und Solarstrom im Überfluss vorhanden ist. Das Charmante daran: Dieser Strom wäre auf jeden Fall zusätzlich – und günstig. Würde die Ladung von Elektrofahrzeugen genau in solche Stunden verschoben, wäre der Fahrstrom also nicht nur grüner, sondern auch billiger. Gleichzeitig könnten flexibel ladende Elektroautos mithelfen, die Nachfrage dem fluktuierenden Angebot besser anzupassen und damit einen Beitrag zur Integration von Wind- und Solarstrom zu leisten.

Die Forscher haben untersucht, ob diese Vorstellung der Wirklichkeit entspricht, ob also die Überschüsse an Strom aus fluktuierenden erneuerbaren Energien gezielt durch Elektroautos genutzt werden könnten. Sie kamen zu überraschenden Resultaten: Wenn der Ausbau der Leitungsnetze bis 2030 so funktioniert, dass Netzengpässe kein Problem mehr darstellen, dann wird der fluktuierende erneuerbare Strom aus Wind und Sonne fast immer vollständig durch herkömmliche Verbraucher genutzt – auch ganz ohne Elektrofahrzeuge. Dieses Ergebnis stellt eine Untergrenze für den Überschuss an erneuerbaren Energien dar, weil

in der Realität durch Engpässe im Stromnetz gegebenenfalls mehr Wind- und Solarstrom ungenutzt bleiben könnte. In der Modellierung wurde das Stromnetz nicht abgebildet. Dies würde einer Welt entsprechen, in der bis 2030 die Stromnetze ausreichend ausgebaut werden, so dass Engpässe in den Leitungen so gut wie nie auftreten und der erneuerbare Strom immer zum Verbraucher transportiert werden kann.

In Zahlen: Von den rund 240 Milliarden Kilowattstunden Strom, die Wind und Sonne laut dem Modell insgesamt im Jahr 2030 erzeugen, werden nur knappe sechs Milliarden Kilowattstunden nicht durch inländische Verbraucher abgenommen – die nutzbaren Überschüsse für neue Verbraucher wie Elektroautos sind also sehr klein. Der Verbrauch von sechs Millionen Elektrofahrzeugen liegt, je nach elektrischer Fahrleistung der Plug-In-Hybridfahrzeuge, zwischen zehn und zwölf Milliarden Kilowattstunden. Rein rechnerisch könnte der erneuerbare Überschussstrom von knapp sechs Milliarden Kilowattstunden also gut die Hälfte des Strombedarfs der Elektroautos decken – vorausgesetzt, das Laden der Batterie wird in die Überschussstunden verschoben.

Preisgesteuertes Lademanagement führt laut Modellberechnungen dazu, dass ein Fünftel des Fahrstroms durch bisher überschüssigen grünen Strom gedeckt wird. Die bisher nicht genutzten Überschüsse können dadurch von knapp sechs Milliarden auf knapp vier Milliarden Kilowattstunden reduziert werden. Die Fahrzeuge werden in der Realität also das gesamte berechnete Potenzial an Überschussstrom nicht ausschöpfen können, da sich der Ladezeitpunkt nicht nur am Stromangebot und Strompreis orientiert, sondern vor allem auch daran, wann die Batterie für die nächste Fahrt vollgeladen sein muss.

Andererseits ist ein allen Ansprüchen genügender Netzausbau, wie hier unterstellt, nicht sicher vorherzusagen. Es kann effizienter sein, erforderliche Ausbauten dort zu reduzieren, wo Speicher oder flexible Abnehmer, wie Elektroautos, zur Verfügung stehen. Wenn die Elektrofahrzeuge sich also in der Nähe von Überschussproduzierenden Anlagen befänden, könnte ihr Beitrag zur Integration erneuerbarer Energien lokal auch größer sein.

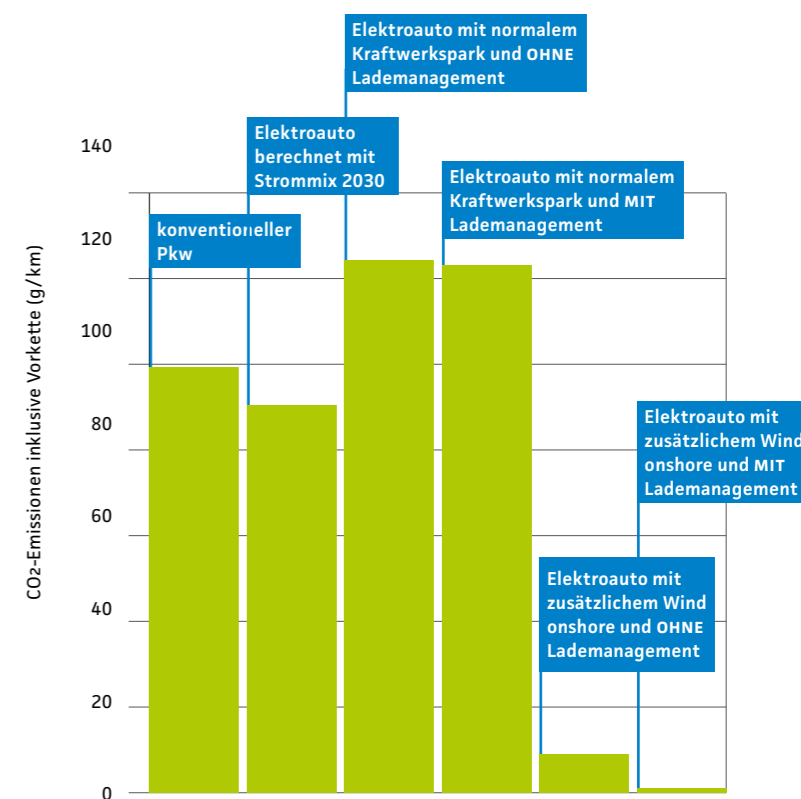
Für die gesamte inländische Integration der fluktuierenden erneuerbaren Energien zeigen die Modellrechnungen: Das Problem der nicht nutzbaren Windspitzen tritt auch im Jahr 2030 nur relativ selten auf und betrifft damit nur vergleichsweise kleine Mengen an Energie. Im alltäglichen Stromhandel würde dieser Überschuss auch nicht ungenutzt bleiben, sondern teilweise exportiert oder gespeichert. Elektrofahrzeuge mit Lademanagement können dazu beitragen, dass ungenutzte Überschüsse an grünem Strom verringert werden. Da das Laden aber nicht vollständig in die Stunden verschoben werden kann, in denen die Überschüsse zur Verfügung stehen, können die angenommenen sechs Millionen Fahrzeuge im Jahr 2030 nur einen kleinen Beitrag zur Integration der Überschüsse leisten.

Das Resümee liegt auf der Hand: Damit Elektromobilität sich tatsächlich zu einer klimaverträglichen Alternative entwickeln kann, muss die Versorgung der Fahrzeuge mit Elektrizität aus zusätzlichen erneuerbaren Energien gewährleistet sein. Die Nutzung von überschüssigen Windstrom-Spitzen alleine reicht nicht aus, um die Elektrofahrzeuge mit grünem Strom zu betanken. Für eine nachhaltige und ökologisch tragfähige Elektromobilität müssen zur Erzeugung von regenerativem Fahrstrom zusätzliche, neue Kraftwerke, zur Erzeugung erneuerbarer Energien gebaut wer-

den, die über die derzeitigen Ausbaupläne der Bundesregierung hinausgehen. Das setzt voraus, dass Automobilhersteller und Energieversorger bereits heute die Weichen dafür stellen und die Politik klare, ambitionierte und langfristige Ziele setzt. Ziele, die sicherstellen, dass ausreichend grüner, regenerativ erzeugter Autostrom zur Verfügung steht, damit Elektromobilität ihre Potenziale für Umwelt- und Klimaschutz auch wirklich realisieren kann.

**Klimaverträgliche Elektromobilität braucht zusätzliche Anlagen für grünen Strom.**

QUELLE: BERECHNUNGEN OPTUM



**CO2-Emissionen von kleinen Pkw inklusive der Strom- und Kraftstoffherstellung im Jahr 2030:** Wie sauber ein Elektroauto fährt, ist abhängig von den »getankten Emissionen«, also vom Kraftwerkspark und dem Lademanagement. Nur wenn der Fahrstrom aus zusätzlichen erneuerbaren Energien kommt, sind Elektro-Pkw emissionsarm.

## Exkurs: Emissionshandel

— **Der Emissionshandel ist ein Instrument, mit dem die EU ihre Treibhausgasemissionen mindern will.** Derzeit begrenzt der Emissionshandel den Kohlendioxidausstoß von rund 11.000 Anlagen in 30 europäischen Ländern – vor allem in der Stromerzeugung und in einigen Sektoren der Industrie, die nach Angaben der EU zusammen etwas mehr als die Hälfte der europäischen CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachen.

Über einen Handel mit so genannten Emissionsberechtigungen (Zertifikaten) will der Gesetzgeber einen ökonomischen Anreiz schaffen, den Ausstoß schädlicher Klimagase dort zu senken, wo es am effizientesten ist. Emittiert beispielsweise ein Kraftwerk weniger als es Emissionsberechtigungen hat, kann der Betreiber nicht benötigte Zertifikate am Markt verkaufen. Wenn seine Anlagen mehr emittieren als er Zertifikate besitzt, muss der Betreiber Zertifikate zukaufen oder seine Emissionen senken.

Im Verkehrssektor ist bislang vom Emissionshandel nur der Luftverkehr betroffen, hier müssen ab 2012 auch die Fluggesellschaften über Emissionsberechtigungen für den Betrieb ihrer Flugzeuge verfügen. Doch haben auch Elektroautos Auswirkungen auf den Zertifikatehandel, da der von ihnen genutzte Strom ebenfalls in den Emissionshandel fällt. Bedeutsam ist dies vor allem, wenn sie Strom aus konventionellen Kraftwerken tanken. Denn die Kraftwerke müssen für die Elektroflotte mehr Strom erzeugen – was mit mehr Emissionen verbunden ist – und benötigen dafür mehr Zertifikate. Allerdings sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromversorgung europaweit durch eine Obergrenze, das so genannte »Cap«, gedeckelt. Wenn die Kohlekraftwerke mehr (Fahr-)Strom für die Elektromobilität erzeugen würden, müssten die Kraftwerksbetreiber die dafür nötigen zusätzlichen Emissionsberechtigungen von anderen Anlagenbetreibern einkaufen. In der Summe blieben die CO<sub>2</sub>-Emissionen europaweit gleich hoch.

Allerdings erhöht dieser Mechanismus den Druck zur CO<sub>2</sub>-Minderung auf die emissionshandelspflichtigen Anlagen und führt bei diesen zu höheren Kosten. Mittelfristig ist zwar nur mit einer kleinen zusätzlichen Stromnachfrage durch Elektroautos zu rechnen, Kraftwerksbetreiber und Industrie müssten die zusätzlich entstehenden Emissionen durch den Fahrstrom aber an anderer Stelle einsparen.

Das Cap muss jedoch auch künftig weiter gesenkt werden, damit die EU ihre langfristigen Klimaschutzziele erreichen kann. Wächst gleichzeitig die Flotte an Elektroautos und tanken die Fahrzeuge vorwiegend Strom aus fossilen Energiequellen, wird der Preis für Zertifikate ansteigen. Emissionsminderungen, die eigentlich im Verkehrssektor stattfinden sollen, würden auf die Teilnehmer des Emissionshandels abgewälzt. Daraus erwächst die Gefahr, dass das Cap gelockert wird.

Die beste Lösung wäre daher, den Strom für Elektromobilität aus zusätzlichen erneuerbaren Energien zu beziehen. Denn Wind und Sonne haben keine direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen und benötigen keine Zertifikate. Ein Ausbau der Elektromobilität würde nicht zum Anstieg der Zertifikatspreise führen, auch ließe sich eine Lockerung des Cap durch das Mehr an Fahrstrom für eine wachsende Fahrzeugflotte nicht mehr rechtfertigen. Denn um langfristige Klimaschutzziele zu erreichen, muss das Cap weiter ambitioniert gesenkt werden – unabhängig vom Strombedarf der Elektroautos.



## Ressourcen und Rohstoffe: Für die Zukunft planen

### Der Umstieg vom Verbrennungsmotor auf elektrische Antriebe ist nicht nur eine Herausforderung für die Energieversorger.

Auch die gesamte Automobilwirtschaft steht vor der Aufgabe, ein völlig neues Fahrzeugkonzept zu entwerfen.

Elektrofahrzeuge funktionieren anders als Benzin- oder Dieselfahrzeuge. Sie brauchen weder Tank noch Auspuff, weder Katalysator noch Kupplung, weder Anlasser noch Lichtmaschine, oft nicht mal mehr ein Getriebe. Stattdessen benötigen Elektrofahrzeuge einen Motor, der sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Geschwindigkeiten hervorragende Leistung bringt. Sie benötigen eine möglichst kompakte Batterie mit hoher Energiedichte, ein integriertes Ladesystem und zahlreiche elektronische Bauteile, die das Aufladen, die Batterieleistung, den Antrieb der Räder und die Kühlung überwachen und regeln. Um die Reichweite zu maximieren, arbeiten die Hersteller zudem daran, die Karosserie der Fahrzeuge so leicht wie möglich zu gestalten, beispielsweise durch besonders leichte Stähle oder kohlefaserverstärkte Kunststoffe.

Hybridfahrzeuge, Plug-In-Hybride und rein elektrische Pkw erfordern also spezielle Bauteile und Komponenten, die bisher im Auto nicht vorkamen. Das gilt auch für Brennstoffzellen-Fahrzeuge, die im Rahmen der Ressourcenfrage mit betrachtet wurden. Damit all diese Bauteile optimal funktionieren, ist eine Vielzahl von Rohstoffen nötig. Darunter sind bekannte Metalle wie Kupfer, Gold und Silber. Die meisten aber sind so exotisch, dass

sie bisher nur Chemikern und Insidern ein Begriff waren: Neodym und Praseodym, Dysprosium und Terbium, Gallium und Germanium. Viele dieser Elemente gehören zur Gruppe der so genannten Seltenen Erden.

Rund ein Dutzend dieser besonderen Metalle und Mineralien ist für das Funktionieren von Elektroautos unverzichtbar. Dysprosium sorgt beispielsweise dafür, dass die Permanentmagnete im Elektromotor auch bei hohen Temperaturen noch funktionieren, aus Lithium werden Elektroden für die Autobatterien hergestellt, Gallium ist wichtig für essentielle elektronische Bauteile im Elektroauto.

Das Problem einer Vielzahl dieser speziellen Rohstoffe: Sie werden nur in wenigen Ländern der Welt gewonnen. Das wird deutlich am Beispiel der Seltenen Erden. In China lagern knapp 40 Prozent der bekannten Vorkommen, in den USA 13, in den Ländern der früheren Sowjetunion 20 Prozent. Und nur ganz wenige Länder fördern bislang Seltene Erden. Über 97 Prozent werden derzeit in chinesischen Minen gewonnen, weitere zwei Prozent in Indien. In Europa ist die Förderung von Vorkommen derzeit nicht wirtschaftlich.

### Bis 2020 könnten wichtige Rohstoffe für das Elektroauto knapp werden.

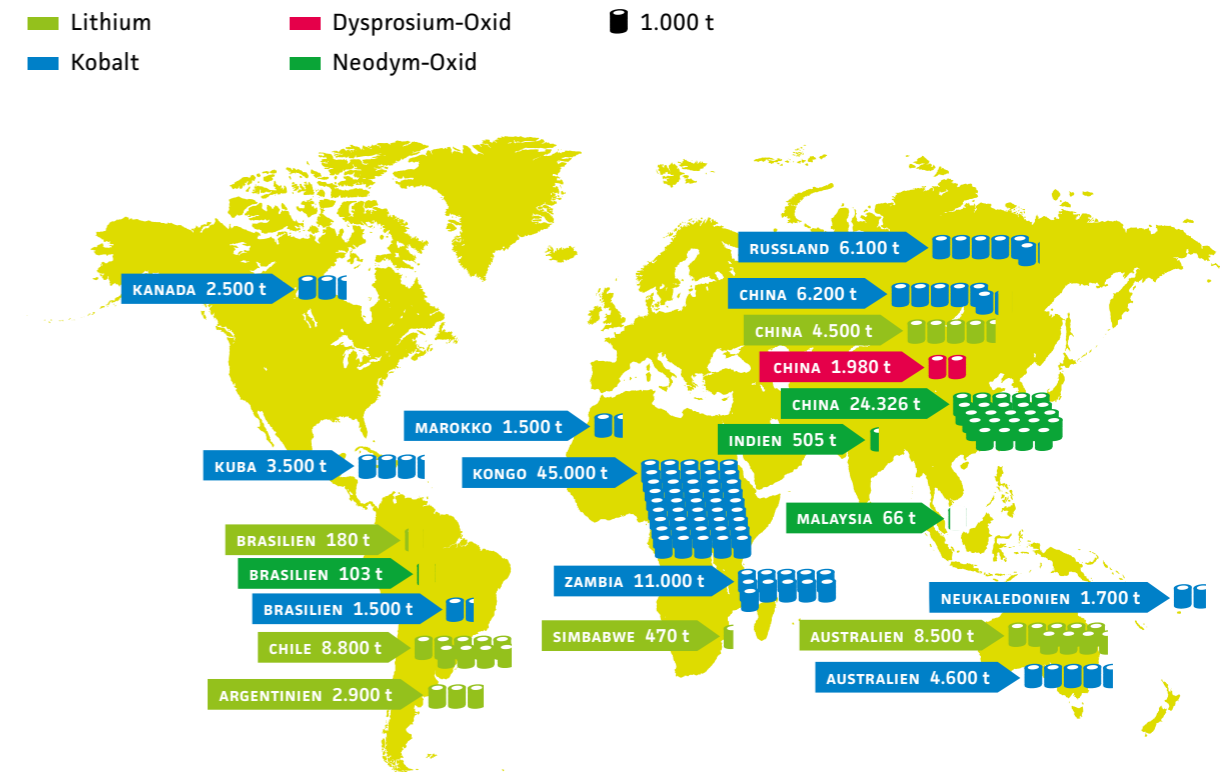
Das ändert nichts daran, dass die Nachfrage ständig wächst. Und mit der Nachfrage auch der Preis. Seit Sommer 2010 haben sich die Preise für einige Seltene Erden innerhalb eines Jahres um den Faktor zehn bis 15 vervielfacht. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover geht davon aus, dass sich dieser Höhenflug der Preise fortsetzt und dass bereits ab 2015 für einige der chemischen Elemente die Nachfrage höher sein wird als das Angebot. Auch die EU-Kommission hat

im Sommer vergangenen Jahres 14 knappe Metalle und Mineralien definiert, die für den europäischen Wirtschaftsraum besonders wichtig, aber schwer zu beschaffen sind. Darunter sind viele, die für Elektroautos relevant sind. Wenn in Deutschland die Elektromobilität langfristig herkömmliche Fahrzeuge ablösen soll, muss die Versorgung mit High-tech-Rohstoffen aus weit entfernten Regionen gesichert sein.

Ob das gelingt, hängt wesentlich davon ab, wie sich weltweit die Elektromobilität und damit die Nachfrage entwickelt. In einem Teilprojekt im Rahmen von OPTUM haben die Wissenschaftler daher insgesamt 13 für Elek-

trofahrzeuge relevante Metalle und wichtige Fahrzeugkomponenten, darunter Elektromotor, Leistungselektronik und Batterie, intensiv untersucht. Dabei gingen sie gemeinsam mit Experten der Firmen Umicore und Daimler AG sowie der Technischen Universität Clausthal mehreren Fragen nach: Wie werden sich Fördermengen und Nachfrage global entwickeln? Welche Mengen der Rohstoffe werden bis zum Jahr 2030 für Elektrofahrzeuge gebraucht? Können sich Deutschland und Europa von den Lieferländern unabhängiger machen, indem sie die begehrten Rohstoffe recyceln?

QUELLEN:  
USGS 2011, BGR 2011, ÖKO-INSTITUT



**Mineralienproduktion 2010 in Tonnen: Woher stammen die Rohstoffe?**  
Wichtige Metalle für Elektroautos werden ausschließlich außerhalb von Europa gewonnen.

**Politik und Industrie müssen heute schon die Weichen stellen für den Aufbau eines effizienten Recyclingsystems.**

In 20 Jahren wird es nach Schätzungen der Automobilindustrie weltweit ungefähr doppelt so viele Autos geben wie heute: rund 1,3 Milliarden. Die globalen Verkaufszahlen steigen von heute 61 Millionen auf 75 Millionen im Jahr 2020 und auf 90 Millionen im Jahr 2030. Um abzuschätzen, wie viel Autos davon weltweit künftig elektrisch unterwegs sein werden, nutzten die Wissenschaftler des Öko-Instituts Szenarien von McKinsey.

Bei einem schnellen Zuwachs an Elektro-Pkw und einem raschen Ausbau der notwendigen Lade-Infrastruktur fahren laut McKinsey im Jahr 2020 weltweit gut 20 Millionen Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb, also alle Arten von Hybriden bis hin zu vollelektrischen Fahrzeugen. Im Jahr 2030 wären es bereits 54 Millionen, also mehr als jeder zweite verkaufte Neuwagen. Im Rahmen von OPTUM haben die Wissenschaftler angenommen, dass die Flotte der Plug-In-Hybride im Jahr 2020 auch 45 Prozent Fahrzeuge mit Range Extender (Elektrofahrzeuge mit einem kleinen Verbrennungsmotor) und zehn Prozent Brennstoffzellenfahrzeuge umfasst, 2030 dann 40 Prozent Range Extender und 20 Prozent Brennstoffzellenfahrzeuge. Bei weniger günstigen Rahmenbedingungen wächst die Zahl der E-Pkw dagegen moderater, weil Verbrennungsmotoren ihren Platz behaupten. Dann fahren im Jahr 2020 rund 13 Millionen Neuwagen elektrisch, zehn Jahre später wären es 39 Millionen.

Für die Herstellung dieser elektrischen Fahrzeugtypen werden Seltene Erden und andere rare Rohstoffe benötigt. Die Analysen im Rahmen von OPTUM zeigen, dass die Seltenerdmetalle Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium, die für Permanentmagneten in den Elektromotoren essentiell sind, bis 2030 drastisch in der Nachfrage steigen werden. Bei Dysprosium und Terbium wird unter den getrof-

fenen Annahmen der Bedarf für Elektro-Pkw im Jahr 2030 höher liegen als die derzeitige gesamte globale Förderung. Auch bei Gallium – wichtig für Halbleiter in der Leistungselektronik – steigt die Nachfrage stark an. Allerdings können bei diesem Metall die produzierten Mengen leichter erhöht werden als bei Dysprosium und Terbium. Bei Platin und Palladium zeigen sich gegenläufige Effekte: Vollelektrische Autos benötigen keinen Autoabgaskatalysator und sparen so Platin und Palladium ein. Allerdings wird Palladium auch für Bauteile der Leistungselektronik benötigt, Platin ist außerdem ein wichtiger Bestandteil der Brennstoffzelle.

Die Wissenschaftler ziehen das Fazit, dass für die Elektromobilität künftig – und zwar bereits in naher Zukunft – vor allem die ausreichende Versorgung mit Dysprosium und Terbium als sehr kritisch eingestuft werden muss. Bei den Batteriemetallen Lithium und Kobalt ist aufgrund der begrenzten globalen Reserven von Kobalt die zukünftige Befriedigung der Nachfrage erheblich angespannter als bei Lithium. Langfristig wird die Nachfrage nach Kobalt die heute wirtschaftlich förderbaren Reserven übersteigen. Verschärft wird die Situation dadurch, dass ein großer Anteil der Vorkommen in Konfliktgebieten wie dem Kongo liegt.

**Konsequentes Recycling alter Bauteile kann die Versorgungslage entspannen.**

Um die Versorgungslage zu entspannen, sehen die Wissenschaftler mehrere Wege: Werden neue Vorkommen erschlossen, steigt das Angebot. Kalifornien und Australien haben angekündigt, eigene Minen in Betrieb zu nehmen, selbst in Grönland ist die Förderung von Sel-

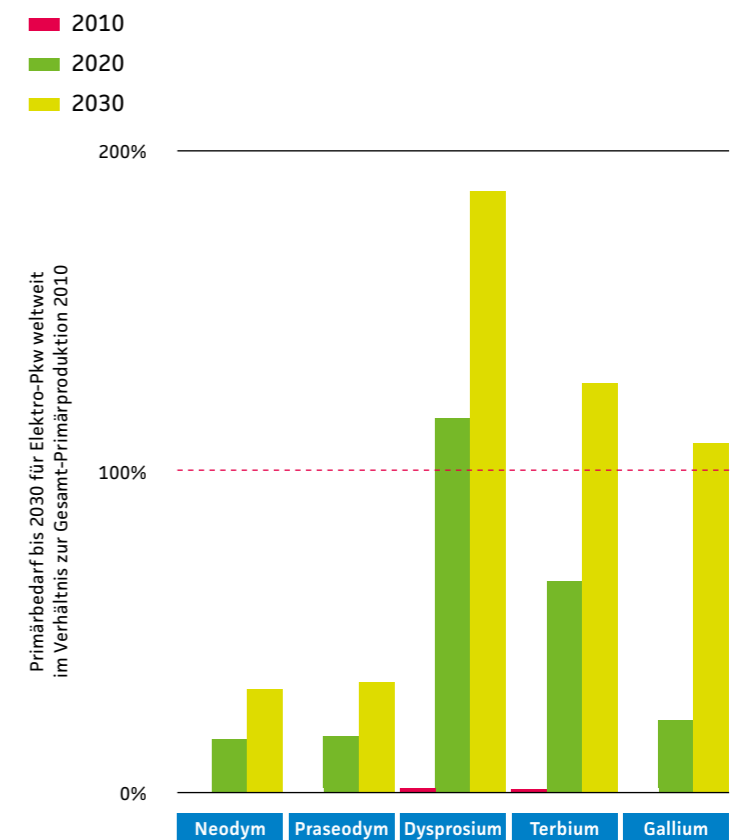
tenen Erden geplant. Ein Ausweg wäre auch die Entwicklung von Bauteilen und Komponenten, die mit weniger oder ganz ohne seltene Rohstoffe auskommen. Solche Entwicklungen brauchen allerdings viel Zeit und der Erfolg ist nicht garantiert. Denkbar wäre nicht zuletzt eine enge Kooperation zwischen Lieferländern und Abnehmern der Rohstoffe – beispielsweise, indem europäische Staaten im Gegenzug für die Rohstoffe ihr Know-how für umweltverträgliche Förderung und Aufarbeitung anbieten.

Wo Rohstoffe knapp oder besonders teuer sind, kommt Recycling ins Spiel. Die Rückgewinnung bestimmter Elemente aus alten Batterien oder Elektromotoren wäre daher auch bei der Elektromobilität eine Möglichkeit, die Abhängigkeit von Lieferländern zu lockern. Die ersten Erfahrungen aus dem BMU-Projekt LIBRI zeigen: Da die Industrie zurückgewonnenes Kobalt, Nickel und Kupfer großtechnisch schon heute wieder für neue Produkte nutzt, kann für diese Metalle der Recyclingkreislauf geschlossen werden. Außerdem wurde deutlich, dass die Rückgewinnung von Lithiumverbindungen aus der erhaltenen Schlacke technisch machbar ist und damit bei entsprechender Nachfrage eine Option für die Zukunft darstellt.

Dennoch: Recycling kann die Knappheit vieler Rohstoffe nur mildern, nicht beseitigen. Politik und Industrie müssen heute schon die Weichen stellen für den Aufbau eines effizienten Recyclingsystems. Denn voraussichtlich ist bereits ab 2015 mit stetig steigenden Rücklaufmengen an Lithium-Ionen-Batterien und anderen Bauteilen vor allem aus Hybridfahrzeugen zu rechnen. Das aber allein genügt nicht. Selbst bei optimistischen Annahmen zur Rückgewinnung und selbst bei steigender Materialeffizienz – wenn Batterie oder Elektromotor mit geringeren Mengen an seltenen Rohstoff-

fen auskommen – bleibt die Versorgungslage bei wichtigen Elementen kritisch. Von großer Bedeutung ist daher auch eine Innovationsforschung, die nach alternativen Rohstoffen sucht. Nicht zuletzt deshalb, weil auch andere Hightech-Produkte wie Windkraftanlagen, Sensoren, künstliche Gelenke oder Photovoltaikanlagen mit der Elektromobilität um die gleichen Rohstoffe konkurrieren.

QUELLE: BERECHNUNGEN OPTUM



**Die Nachfrage wächst:** Der Bedarf an Metallen und Seltene Erden wird bis 2030 stark ansteigen. Bei Dysprosium beispielsweise – verglichen mit der 2010 geförderten Menge – fast auf 200 Prozent. Die Grafik berücksichtigt bereits, dass bis dahin die Bauteile mit geringeren Rohstoffmengen auskommen und ein Teil der Rohstoffe recycelt wird.

# Mobilität für morgen.

## Zusammenfassung und Ausblick

—— **Mobilität ist ein Grundbedürfnis jedes Menschen und Voraussetzung für eine moderne Gesellschaft.** Unsere alltägliche Mobilität mit dem eigenen Fahrzeug ist derzeit aber weder umweltverträglich noch nachhaltig. Viele leiden unter Lärm und Abgasen, der Bau von Straßen und Parkraum versiegelt Flächen, vor allem aber ist der Verkehr eine der wesentlichen Quellen für klimaschädliche Treibhausgase. Die Kohlendioxid-Emissionen des Verkehrs haben sich zwischen 1960 und heute mehr als verdoppelt. Der Straßenverkehr war 2009 für 83 Prozent der Emissionen im Verkehrssektor verantwortlich.

Viele Autofahrer sind sich der brisanten Lage gar nicht bewusst: Unsere scheinbar unbegrenzte Mobilität ist von begrenzten Ressourcen abhängig. Zwar werden uns weder morgen noch übermorgen Benzin und Diesel ausgehen. Aber schon in absehbarer Zeit reicht das geförderte Rohöl nicht mehr aus, um die globale Nachfrage aller Sektoren zu decken. Folge: Die Kraftstoffpreise werden weiter steigen, die Abhängigkeit unserer täglichen Mobilität von knappen Ressourcen wird noch schärfer.

Dabei genügt es nicht, dass Verbrennungsmotoren immer sparsamer werden – die Effizienzvorteile werden durch die global stark wachsende Zahl der Fahrzeuge und weiter steigende Fahrleistungen quasi zunichte gemacht. Die Vision eines klima- und umweltverträglichen Verkehrs greift viel weiter: Wir brauchen ein hohes Maß an Mobilität für alle bei gleichzeitiger Minderung der negativen Folgen für Klima und Umwelt.

Elektromobilität kann ein wichtiges Element einer zukünftigen nachhaltigen Mobilität darstellen. Im elektrischen Fahrmodus brauchen Elektroautos weder Benzin noch Diesel, emittieren keine Abgase, sind effizienter im Betrieb als ein Verbrennungsmotor und erzeugen im Idealfall kein Kohlendioxid. Die Bundesregierung will bis zum Jahr 2020 mindestens eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen bringen, 2030 sollen es sechs Millionen sein.

Der Weg dorthin wird nicht einfach zu bewältigen sein: Elektromobilität ist eine Herausforderung für Forschung, Industrie und Energiewirtschaft, die neue Antriebe, Mobilitäts- und Ladekonzepte entwickeln müssen. Bis zum Jahr 2020 wird es noch nicht für alle Segmente und Kundenansprüche Elektroautos aus der Serienproduktion geben.



Auch wenn Stromtanken deutlich billiger ist als Benzin, stellt sich die Frage, wie sich die Kosten der derzeit noch viel zu teuren Batterien künftig entwickeln werden. Viele Bauteile benötigen zudem exotische Metalle und Seltene Erden, damit sie funktionieren – diese Rohstoffe werden aber außerhalb von Europa gewonnen, einige sogar in politisch eher instabilen Regionen. Wie schnell und in welchem Maße es den Entwicklungsingenieuren gelingt, die Kosten für Elektroautos zu senken oder Alternativen für knappe Rohstoffe zu finden, lässt sich aus heutiger Sicht nur schwer vorhersagen.

Elektroautos sind aber auch eine Herausforderung an den durchschnittlichen Autofahrer mit seinem heutigen »Benzinverstand«. Reine Elektrofahrzeuge benötigen im Normalfall mehrere Stunden zum Laden und haben eine begrenzte Reichweite – ihre Nutzung folgt anderen Gesetzmäßigkeiten als der normale Benziner oder Diesel. Daher ist auch die wichtige Frage, wie schnell sich Autofahrer mit Elektromobilität anfreunden werden, schwer zu beantworten. In den kommenden zwanzig Jahren werden rein batterieelektrische Autos daher – so die Ergebnisse des Forschungsvorhabens OPTUM – nur ein relativ kleines Segment besetzen. Als »Auto für jeden Zweck« hingegen haben Plug-In-Hybride mit ihrer »Benzinreserve« einen deutlichen Vorteil und werden aller Voraussicht nach einen größeren Teil des Anfangsmarktes stellen. Für Nutzer mit »Benzinverstand« können sie der Einstieg zur Elektromobilität sein.

Annahmen können nur bedingt die Realität abbilden und Modellierungen erfassen immer nur eine begrenzte Zahl von Einflussfaktoren. Das gilt auch für die Elektromobilität und das Forschungsprojekt OPTUM. Deutlich wurde dennoch, dass bis 2030 Elektromobilität – vor allem wegen der noch geringen Anzahl an Fahrzeugen – nur geringe Effekte auf den Strommarkt haben wird.

Wesentlich aber ist: Mit Elektroautos verschiebt sich die Energienachfrage vom Verkehrs- in den Stromsektor. Damit Elektromobilität klimaverträglich und emissionsarm ist, müssen die Rahmenbedingungen richtig gesetzt werden. Der wichtigste Aspekt dabei: Die Vergrößerung der Elektroflotte muss mit dem Bau zusätzlicher, neuer Anlagen für die Erzeugung von erneuerbarem Strom gekoppelt werden.

Auch ist Lademanagement unabdingbar, vor allem um neue und stärkere Nachfragespitzen zu vermeiden. Außerdem hilft das Lademanagement der Autos, die Nachfrage besser an ein Stromangebot anzupassen, das in Zukunft mit mehr Wind- und Sonnenstrom immer stärker fluktuieren wird. Klar wurde auch, dass Wind- oder Sonnenstromspitzen, die ansonsten nicht nutzbar wären, bei einem hinreichenden Netzausbau nur selten auftauchen, und dass sie nur einen Teil des Fahr-

stroms abdecken können, also nicht ausreichen, um alle Fahrzeuge mit grünem Strom zu versorgen.

Der Wechsel vom Verbrennungsmotor zum elektrischen Antrieb kann bei entsprechenden Rahmenbedingungen einen wichtigen Beitrag zur Emissionsminderung des Verkehrssektors leisten. Denn Elektromobilität eröffnet im Verkehrssektor neue Wege, eine Vielzahl an emissionsfreien Energieträgern einzusetzen. Der effizientere Einsatz von Energie ist eine Grundvoraussetzung für die Erreichung langfristiger Klimaschutzziele – auch hierfür ist Elektromobilität nicht die einzige, aber eine viel versprechende Option. Ambitionierte Klimaschutzziele erfordern aber ein wesentlich größeres Portfolio an Technologien und Maßnahmen.

Eine nachhaltige Mobilität ist unabhängig vom Verkehrsmittel. Elektromobilität kann diese Entwicklung voranbringen, indem sie Teil neuer intermodaler Verkehrskonzepte wird. Die Idee: Der Einzelne »nutzt« Verkehrsmittel aller Art, um möglichst schnell, günstig und bequem von A nach B zu kommen, er »besitzt« sie aber nicht mehr. Erfahrungen mit neuen Car-Sharing-Modellen zeigen beispielsweise, dass die Akzeptanz für solche Angebote durchaus vorhanden ist.

Unser Resümee: Kurz- bis mittelfristig wird Elektromobilität 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen liefern können. Für langfristigen Klimaschutz sind alternative Antriebstechnologien jedoch unverzichtbar – immer unter der Voraussetzung der Nutzung zusätzlicher erneuerbarer Energien. Hinzu kommt, dass die Einbettung von Elektromobilität in alternative Mobilitätskonzepte große Potenziale für klima- und umweltverträglicheren Verkehr bergen könnte. 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 angenommen wird.

Nur eine Kombination aus einer deutlichen Effizienzsteigerung der konventionellen Verkehrsmittel, alternativen Antrieben und Kraftstoffen wie der Elektromobilität in Verbindung mit einem veränderten Mobilitätsverhalten wird es ermöglichen, die langfristigen Klimaschutzziele zu erreichen und eine nachhaltige Mobilität in Zukunft zu sichern.

**ANSPRECHPARTNER FÜR DAS PROJEKT OPTUM**



**PROJEKTLEITUNG** Dr. Wiebke Zimmer, w.zimmer@oeko.de

**TECHNOLOGIEENTWICKLUNG** Florian Hacker, f.hacker@oeko.de

**MID-AUSWERTUNG** Peter Kasten, p.kasten@oeko.de

**STROMMARKTMODELLIERUNG** Charlotte Loreck, c.loreck@oeko.de

**RESSOURCEN** Dr. Matthias Buchert, m.buchert@oeko.de

**ÖFFENTLICHKEITSARBEIT** Mandy Schoßig, m.schossig@oeko.de



**MOBILITÄTSFORSCHUNG** Dr. Konrad Götz, goetz@isoe.de

**CONJOINT-ANALYSE** Georg Sunderer, sunderer@isoe.de





gefördert vom



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit