

Elektromobilität: Kurzfristigen Aktionismus vermeiden, langfristige Chancen nutzen

Wolf-Peter Schill
wschill@diw.de

Elektrische PKW-Antriebe bieten im Vergleich zu konventionellen Verbrennungsmotoren viele Vorteile, insbesondere geringere lokale Emissionen, eine höhere Energieeffizienz und eine geringere Mineralölabhängigkeit. Andererseits stellen Batterietechnik, Anschaffungskosten und Ladeinfrastruktur erhebliche Barrieren für eine schnelle Verbreitung von Elektrofahrzeugen dar. Der Energiebedarf denkbarer Elektrofahrzeugflotten könnte bei einer intelligent gesteuerten Aufladung bereits durch den bestehenden deutschen Kraftwerkspark gedeckt werden, ohne dass größere Preisverwerfungen auftreten.

Langfristig könnte mit dem Einstieg in die Elektromobilität ein zukunftsfähiger Technologiepfad eingeschlagen werden. Kurz- und mittelfristig sollten jedoch keine überzogenen Erwartungen gestellt werden, insbesondere hinsichtlich der Reduktion von Treibhausgas-Emissionen. Elektrofahrzeuge allein werden die aktuellen verkehrspolitischen Probleme nicht lösen. Sie können jedoch einen wichtigen Bestandteil eines nachhaltigen Verkehrskonzepts darstellen.

Vor dem Hintergrund wachsender Anforderungen der Klimaschutzpolitik und einer hohen Abhängigkeit von knappen fossilen Energieressourcen wird derzeit die Forschung, Entwicklung und teilweise auch Markteinführung elektrischer Fahrzeugantriebe in vielen Ländern aktiv vorangetrieben.¹ Die deutsche Bundesregierung hat im Jahr 2009 einen *Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität* vorgestellt, der technologie-, energie- und verkehrspolitisch motiviert ist. Darin wird das Ziel formuliert, bis zum Jahr 2020 einen Gesamtbestand von einer Million Elektrofahrzeugen zu erreichen und Deutschland zum *Leitmarkt Elektromobilität* zu entwickeln. Im Rahmen des Konjunkturpakets II werden zwischen 2009 und 2011 500 Millionen Euro für Forschung, Entwicklung und Marktvorbereitung in den Bereichen Batterieentwicklung, Fahrzeugkomponenten und Netzintegration bereitgestellt. Darüber hinaus laufen Feldversuche in acht deutschen Modellregionen, in denen Ladeverfahren, Praxistauglichkeit und Nutzerakzeptanz von Elektrofahrzeugen geprüft werden. Im Mai 2010 wurde bei einem Spitzentreffen von Regierungs- und Industrievertretern im Kanzleramt eine *Nationale Plattform Elektromobilität* mit sieben Arbeitsgruppen gebildet. Sie zielt unter anderem auf die Technologieführerschaft bei Schlüsselkomponenten und eine verbesserte branchenübergreifende Kooperation ab.

Verschiedene Formen der Elektromobilität

Grundsätzlich könnten alle elektrisch angetriebenen Verkehrsmittel mit dem Begriff *Elektromobilität* bezeichnet werden, also auch direkt mit dem Stromnetz verbundene Schienenfahrzeuge wie Nah- und Fernverkehrszüge, die bereits seit vielen Jahrzehnten weitgehend elektrifiziert sind. In der aktuellen Debatte

¹ Vgl. auch Schill, W.-P.: Elektromobilität in Deutschland – Chancen, Barrieren und Auswirkungen auf das Elektrizitätssystem. Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung, 2/2010.

wird der Begriff *Elektromobilität* jedoch hauptsächlich für den motorisierten Individualverkehr verwendet. Er beschreibt die Ergänzung oder die vollständige Substitution heutiger Verbrennungsmotoren durch einen elektrischen Antriebsstrang. Dabei werden unterschiedliche Antriebskonzepte vom leicht hybridisierten Verbrennungsmotor bis hin zum voll-elektrischen Fahrzeug unterschieden (Tabelle 1). Mikro-, Mild- und Voll-Hybridfahrzeuge ergänzen einen konventionellen Verbrennungsmotor mit elektrischen Antriebskomponenten und einer Batterie geringer Kapazität, beziehen ihre Antriebsenergie aber ausschließlich aus konventionellen Kraftstoffen. Plug-In-Hybridfahrzeuge bieten die Möglichkeit, die Batterie am Stromnetz aufzuladen, sodass ein Teil der Antriebsenergie durch Netzstrom gedeckt werden kann. Dagegen beziehen rein Batterie-elektrische Fahrzeuge ihre Energie ausschließlich aus dem Stromnetz. Fahrzeuge mit Wasserstoff-Brennstoffzellen fallen eher in einen Randbereich der Elektromobilität, da sie elektrische Antriebsenergie an Bord aus Wasserstoff erzeugen. Dieser Bericht konzentriert sich auf Batterie-elektrische Personenkraftwagen.

Vorteilhafte Eigenschaften elektrischer Antriebe

Ein wesentlicher Vorteil elektrischer Fahrzeugantriebe ist ihre weitgehende lokale Emissionsfreiheit von Luftschadstoffen, insbesondere hinsichtlich Stickoxiden und Feinstaub. Außerdem weisen sie geringere Lärmemissionen auf als Verbrennungsmotoren.² Dadurch werden Elektroautos für den innerstädtischen Verkehr und Umweltzonen besonders attraktiv. Allerdings können Luftschadstoffemissionen in teilweise erheblichem Umfang am Ort der Elektrizitätserzeugung entstehen. Dies gilt insbesondere für die Emission von CO₂. Bei Berücksichtigung eines *Well-to-Wheel*-Ansatzes und realistischer Fahrzyklen liegen die CO₂-Emissionen von Batterie-Elektrofahrzeugen jedoch bereits bei der Aufladung mit dem heutigen deutschen Strommix niedriger als bei vergleichbaren Autos mit Diesel- oder Benzinmotoren.³ Der heutige Strommix enthält noch einen großen Kohleanteil. Seine CO₂-Intensität wird in Zukunft insbesondere durch den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien sinken, was die Emissionsbilanz von Elektrofahrzeugen unmittelbar verbessert. In Hinblick auf die gesamten deutschen CO₂-Emissionen erfordert ein künftiger Ausbau der Elektromobilität und die damit verbundene zusätzliche Stromnachfrage allerdings einen

² Vgl. Pehndt, M. et al.: Elektromobilität und erneuerbare Energien. Heidelberg, Wuppertal, 2007.

³ *Well-to-Wheel* beschreibt die gesamte Prozesskette von der Primärenergiegewinnung bis zum sich drehenden Rad. Ausführliche Berechnungen in Erdmann, G.: CO₂-Emissionen von Batterie-Elektrofahrzeugen. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 59 (10), 2009, 66-71.

Tabelle 1

Elektrische Antriebskonzepte für Pkw

	Spezifische Charakteristika	Energiespeicherkapazität der Batterie in Kilowattstunden
Mikro- und Mild-Hybrid	Verbrennungsmotor mit elektrisch betriebenen Hilfsaggregaten oder elektrischem Hilfsantrieb.	weniger als 1
Voll-Hybrid	Doppelte Ausführung der Antriebsstränge: Verbrennungsmotor und elektrischer Antrieb. Rein elektrisches Fahren auf Kurzstrecken möglich.	1 bis 3
Plug-In-Hybrid	Wie Voll-Hybrid, aber mit größerer Batterie und Möglichkeit der Aufladung am Stromnetz. Rein elektrisches Fahren auf längeren Strecken möglich.	6 bis 15
Rein Batterie-elektrischer Antrieb	Rein elektrischer Antriebsstrang, Aufladung der Batterie am Stromnetz. Varianten: Zusätzlicher serieller Verbrennungsmotor (Range-Extender) oder Wechselbatterie.	15 bis 20 für Stadtautos, bis zu 60 für große Fahrzeuge
Elektromotor mit Wasserstoff-Brennstoffzelle	Elektrische Antriebsenergie wird an Bord aus Wasserstoff durch eine Brennstoffzelle erzeugt. Kopplung mit Batterie möglich.	Keine oder kleine Batterie

Quelle: Zusammenstellung des DIW Berlin.

DIW Berlin 2010

zusätzlichen Ausbau der erneuerbaren Energien – andernfalls würde die Verwendung erneuerbarer Elektrizität im Verkehrsbereich lediglich ihre Nutzung für andere elektrische Anwendungen ersetzen.

Neben den angesprochenen Emissionsvorteilen weisen elektrische Antriebe gegenüber Verbrennungsmotoren und auch gegenüber der Wasserstoff-Brennstoffzelle eine deutlich höhere Energieeffizienz auf. Bei einer *Well-to-Wheel*-Betrachtung beträgt die Energieeffizienz von Benzin- oder Dieselerverbrennungsmotoren nur 18 bis 23 Prozent. Dagegen erreichen elektrische Antriebe bereits mit dem heutigen deutschen Strommix einen Wert von rund 30 Prozent.⁴ Auch hier gilt, dass absehbare Effizienzverbesserungen im Kraftwerkspark künftigen Elektrofahrzeugen unmittelbar zugute kommen. Somit können Elektrofahrzeuge zur Schonung von Primärenergieressourcen beitragen.

Nicht zuletzt ermöglichen elektrische Fahrzeugantriebe die Nutzung einer breiten energetischen Ressourcenbasis. Konventionelle Verbrennungsmotoren sind weitgehend auf fossile Kraftstoffe angewiesen, die sich nur zu einem kleinen Teil sinnvoll durch Biokraftstoffe ersetzen lassen. Im Jahr 2007 wurde in Deutschland daher über 90 Prozent der Endenergie im Verkehrssektor durch Mineralöl bereitgestellt.⁵ Dagegen kann der Strom für Elektroautos aus praktisch allen Primärenergieträgern erzeugt werden, wodurch eine wirtschaftliche und politische Abhängigkeit von Ölimporten und damit verbundene makroökonomische Ungleichgewichte und Preisrisiken gemindert werden können.

⁴ Wietschel M., Dallinger, D.: Quo Vadis Elektromobilität? *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 58 (12), 2008, 8-16.

⁵ Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Berlin 2008.

Derzeit noch erhebliche Barrieren

Die Batterietechnik stellt derzeit die größte Hürde für eine schnelle Verbreitung elektrischer Fahrzeugantriebe dar. Im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen verfügen selbst fortschrittlichste Lithium-Ionen-Batterien über eine geringe Energiedichte.⁶ Daher erzielen sie selbst bei hohen Batteriegewichten nur vergleichsweise geringe Reichweiten. Es ist allerdings zu beachten, dass viele Nutzer im Alltag keine großen Strecken zurücklegen: Im Jahr 2004 war die Hälfte aller Wege der Erwerbstätigen zu ihrer Arbeitsstätte (Hinwege) kürzer als zehn Kilometer, rund 80 Prozent der Wege kürzer als 25 Kilometer und über 90 Prozent der Wege kürzer als 50 Kilometer.⁷ Die Reichweiten heutiger Elektrofahrzeuge würden daher bereits ausreichen, um einen Großteil der Wege des Berufsverkehrs abzudecken.

Die geringen Batteriekapazitäten erfordern, dass Elektrofahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Automobilen besonders leicht und effizient konstruiert und motorisiert sind. Vor diesem Hintergrund erscheint der anhaltende Trend zu immer schwereren und leistungsstärkeren Fahrzeugen höchst problematisch. Im Jahr 2008 lag die mittlere Motorleistung aller in Deutschland neu zugelassenen Pkw zwischen 81 und 90 kW (110–122 PS), während nur sieben Prozent der Neuzulassungen unter 50 kW (68 PS) aufwiesen und damit im Leistungsbe- reich alltagstauglicher Elektrofahrzeuge lagen.⁸ Dieses Marktumfeld beschränkt die Einführung sparsamer und effizienter Elektrofahrzeuge auf bestimmte Nischen. Die Nutzung eines Elektromobils als Erstfahrzeug von privaten Haushalten erscheint vor diesem Hintergrund unwahrscheinlich – eher bietet sich eine Nutzung als Zweitwagen oder als Flottenfahrzeug an. So könnten sich beispielsweise die Fahrzeugflotten von bestimmten Behörden, Lieferdiensten oder auch Car-Sharing-Anbietern für eine Elektrifizierung eignen.

Nicht nur hinsichtlich der Energiedichte von Lithium-Ionen-Batterien besteht weiterer Forschungsbedarf, sondern auch was Langlebigkeit, Temperaturunempfindlichkeit, Sicherheit und Recyclingfähigkeit betrifft. Die Verfügbarkeit des Batteriematerials Lithium dürfte dagegen auf absehbare Zeit keine ernsthafte Hürde darstellen, auch wenn die bisher bekannten Vorkommen stark auf Südamerika, insbesondere Chile, konzentriert sind.⁹

Eine weitere Schwäche der gegenwärtigen Batterie- technik sind ihre hohen Anschaffungskosten: Eine Batterie für ein Plug-In-Hybridfahrzeug mit einer Energiespeicherkapazität von zehn Kilowattstunden kostet derzeit 8 000 bis 10 000 Euro – soviel wie ein einfacher herkömmlicher Kleinwagen.¹⁰ Im Gegenzug entfallen bei Batterie-elektrischen Autos die Kosten für einen konventionellen Antriebsstrang. Auch die Kraftstoff- beziehungsweise Aufladekosten sind geringer. Daher hängt die Wirtschaftlichkeit von Elektroautos stark vom Nutzungsprofil und der Fahrleistung ab. Auf absehbare Zeit erscheinen vor allem solche Fahrzeuge rentabel, die kleine Batterien und relativ hohe Fahrleistungen aufweisen.¹¹

Die Schaffung einer ausreichenden Zahl von Lade- plätzen, die zudem vor Missbrauch und Vandalismus geschützt sein müssen, stellt eine infrastrukturelle Hürde dar. Diesem Problem könnte dadurch begegnet werden, dass private Elektrofahrzeuge am Wohnort der Fahrzeughalter über den bereits bestehenden elektrischen Haushaltsanschluss geladen werden, was jedoch nur möglich ist, wenn ein eigener Stell- platz zur Verfügung steht. Daneben bietet sich die Errichtung einer Ladeinfrastruktur beispielsweise für ortsgelundene Flottenfahrzeuge an. Ein flächende- ckender Aufbau von Ladestationen im öffentlichen Raum ist dagegen mittelfristig nicht absehbar. Bisher noch nicht gelöst ist auch die Frage der nationalen und internationalen Standardisierung der Lade-, Verbindungs- und Abrechnungstechnik.

Nicht zuletzt ist die Elektromobilität mit sozio-kultu- rellen Barrieren konfrontiert. Dabei ist im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen insbesondere eine geringere Flexibilität der Nutzbarkeit aufgrund niedriger Reichweiten und langer Ladevorgänge zu nennen. Auch wenn Ladezeiten durch höhere Ladeleistungen gesenkt werden könnten ist derzeit noch unklar, in- wiefern Fahrzeugnutzer derartige Einschränkungen tolerieren werden. Empirische Studien zeigen zudem, dass Verbraucher neuen und als unerprobt wahrge- nommenen Energietechnologien grundsätzlich skeptisch gegenüber stehen, insbesondere wenn sie sehr kapitalintensiv sind.¹²

⁶ Benzin hat eine Energiedichte von rund zwölf Kilowattstunden je Kilogramm. Derzeitige Lithium-Ionen-Akkus liegen ungefähr zwei Größenordnungen darunter.

⁷ Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Verkehr in Zahlen 2009/2010. Vol. 38, Hamburg 2009.

⁸ Kraftfahrt-Bundesamt: Fahrzeugzulassungen Neuzulassungen Motorisierung Jahr 2008. Flensburg 2009.

⁹ Vgl. Angerer, G. et al.: Lithium für Zukunftstechnologien: Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität. Karlsruhe 2009.

¹⁰ Hackbarth, A. et al.: Plug-in Hybridfahrzeuge: Wirtschaftlichkeit und Marktchancen verschiedener Geschäftsmodelle. Energiewirt- schaftliche Tagesfragen 59 (7), 2009, 60–63.

¹¹ Detaillierte Berechnungen bietet auch Biere, D. et al.: Ökonomi- sche Analyse der Erstanwender von Elektrofahrzeugen. Zeitschrift für Energiewirtschaft (2), 173–181.

¹² Sovacool, B., Hirsh, R.: Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition. Energy Policy 37 (3), 2009, 1095–1103.

Marktanteile von Elektrofahrzeugen auf längere Sicht gering

Grundsätzlich erneuert sich die deutsche Pkw-Flotte nur langsam: Während der gesamte Pkw-Bestand in Deutschland bei ungefähr 41 Millionen Fahrzeugen liegt, pendelte die Zahl der jährlichen Neuzulassungen in den letzten Jahren zwischen drei und vier Millionen. Somit würden selbst hohe Elektrofahrzeuganteile an den Neuzulassungen nur zu einer langsamen Marktdurchdringung führen. Hohe Neuzulassungsanteile sind jedoch aufgrund der genannten Barrieren noch nicht absehbar.

Existierende Szenarien zur künftigen Verbreitung von Elektrofahrzeugen variieren stark, da die Entwicklung von technischen, infrastrukturellen und ökonomischen Randbedingungen unsicher ist. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse einer Studie, die zwei verschiedene Entwicklungspfade bis zum Jahr 2050 entwirft.¹³ Im sogenannten *Dominanz-Szenario* wird der deutsche Pkw-Bestand bis 2050 nahezu komplett auf elektrische Antriebe umgestellt. Im *Pluralismus-Szenario*, das angesichts der diskutierten Barrieren realistischer erscheint, bleiben unterschiedliche Antriebsarten dauerhaft nebeneinander bestehen. Die Zahl der Plug-In-Hybride übersteigt die der reinen Batteriefahrzeuge noch auf lange Sicht – der Grund sind höhere erzielbare Reichweiten von Hybridfahrzeugen und ihr geringerer Bedarf an Ladeinfrastruktur. Auffällig ist zudem, dass die Flottendurchdringung von Elektrofahrzeugen selbst im optimistischen Szenario zunächst nur sehr langsam steigt.

Auswirkungen auf den Strommarkt: Mengen- und Preiseffekte bei gesteuerter Beladung moderat

Elektrofahrzeuge verursachen eine zusätzliche Stromnachfrage, die allerdings potenziell steuerbar ist. Der gesamte Energiebedarf künftiger Elektrofahrzeugflotten ist – gemessen an elektrizitätswirtschaftlichen Größen – relativ klein. So würde beispielsweise die in Deutschland angestrebte eine Million Elektroautos bei einer angenommenen Fahrleistung von 10 000 Kilometern pro Fahrzeug und einem Verbrauch von 20 Kilowattstunden pro 100 Kilometer einen zusätzlichen jährlichen Stromverbrauch von rund zwei Terawattstunden verursachen, der sich im Vergleich zum gesamten Jahresverbrauch von rund 600 Terawattstunden bescheiden ausnimmt.¹⁴

¹³ Wietschel M., Dallinger, D., a.a.O. Es handelt sich um eine der wenigen existierenden Studien zur langfristigen Entwicklung der Elektromobilität in Deutschland, die Aussagen zu den möglichen Anteilen unterschiedlicher Antriebsarten am gesamten Pkw-Bestand bis 2050 unter verschiedenen Randbedingungen trifft.

¹⁴ AG Energiebilanzen: Stromdaten Jahr 2009. Berlin 2010.

Tabelle 2

Szenarien zur Verbreitung der Elektromobilität in Deutschland

Bestand in Millionen Elektro-Pkw

	Pluralismus-Szenario			Dominanz-Szenario		
	2020	2030	2050	2020	2030	2050
Plug-In-Hybride	0,4	3,5	6,8	1,5	11,5	22,0
Rein Batterie-elektrische Fahrzeuge ¹	0,1	0,3	0,6	0,1	0,4	21,6
Zusammen	0,5	3,8	7,4	1,6	11,9	43,6
Kumulierter täglicher Strombedarf ² in Gigawattstunden	2,1	13,7	34,2	6,8	48,0	219,2
Kumulierte Anschlussleistung in Gigawatt	2,5	17,5	40,0	8,0	55,0	425,0

¹ Einschließlich Elektroroller und kleiner Stadt-Pkw.

² Unter der Annahme einer gleichmäßig über das Jahr verteilten Fahrzeugnutzung.

Quellen: Wietschel, M., Dallinger, D.; Berechnungen des DIW Berlin.

DIW Berlin 2010

Die Verbreitung von Elektro-Pkw schreitet nur langsam voran. Selbst im unwahrscheinlichen Dominanz-Szenario werden es bis 2030 kaum zwölf Millionen sein.

Während der *gesamte Energiebedarf* also auf absehbare Zeit das Elektrizitätssystem nicht überfordern wird, könnte bereits eine relativ geringe Zahl von Elektroautos aufgrund der vergleichsweise hohen Anschlussleistungen bei ungesteuerter Aufladung zu einer problematischen *Leistungsnachfrage* führen.¹⁵ Verschiedene Studien haben die Auswirkungen der Elektromobilität auf das Stromnetz unter der Annahme untersucht, dass Elektrofahrzeuge in nennenswerter Zahl im Berufsverkehr genutzt werden und dass die Fahrzeughalter sie nach Feierabend zum Laden an das Netz anschließen. Es zeigt sich, dass eine solche ungesteuerte Aufladung mit der ohnehin vorhandenen abendlichen Spitzenlast zusammenfallen würde, während der die freien Kraftwerkskapazitäten besonders gering sind.¹⁶ Nachts gibt es dagegen reichlich freie Kraftwerkskapazitäten. Eine Verlagerung der Aufladung in die Nachtstunden ist bereits bei einer kleinen Elektrofahrzeugflotte unabdingbar, um problematische Lastspitzen zu vermeiden. Eine solche zeitliche Lastverschiebung ist nicht nur zur Aufrechterhaltung der Netzstabilität notwendig, sondern auch ökonomisch sinnvoll, da bestehende Kraftwerks- und Netzkapazitäten effizienter ausgelastet werden können. Zudem sind die Großhandelspreise auf dem Strommarkt nachts deutlich niedriger als während der täglichen Nachfragespitzen.

Am DIW Berlin wurden mit einer erweiterten Version des Strommarktmodells ElStorM die Mengen- und Preiseffekte einer gesteuerten, kostenminimierenden Aufladung verschiedener Elektrofahrzeugflotten für

¹⁵ Leistung ist definiert als Energie pro Zeiteinheit. Energie wird in der Elektrizitätswirtschaft häufig in der Einheit Gigawattstunden angegeben, Leistung in Gigawatt.

¹⁶ Vgl. Blank, T. et al: Zusätzlicher Energie und Leistungsbedarf für Elektrostraßenfahrzeuge. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 58 (12), 2008, 50-52; sowie Birnbaum, K. et al.: *Elektromobilität: Auswirkungen auf die elektrische Energieversorgung*. BWK 61 (1/2), 2009, 67-74.

Erläuterungen zu den Modellrechnungen

Die Berechnungen wurden mit einer erweiterten Version des ElStorM Strommarktmodells durchgeführt. Im Modell maximieren Stromerzeuger ihren Gewinn, während die Kosten für die Fahrzeugaufladung minimiert werden. Das Modell bildet den deutschen Großhandelsmarkt in einer stündlichen Auflösung ab. Dabei liegt der Fokus auf dem derzeitigen konventionellen deutschen Kraftwerkspark, da dieser maßgeblich für die Preisbildung an der Strombörse ist. Die berücksichtigten Erzeugungstechnologien umfassen Braunkohle, Atomkraft, Steinkohle, Erdgas, Laufwasserkraftwerke, Öl sowie Pumpspeicherkraftwerke. Die Windkraft wird aus modelltechnischen Gründen nicht berücksichtigt. Die Windkrafteinspeisung ist derzeit gesetzlich reguliert und mit einer Mindestvergütung verknüpft, sodass sie auf die Marktergebnisse an der Strombörse nur einen geringen Einfluss hat. Zudem würde eine fluktuierende Windeinspeisung die Interpretation der Modellergebnisse erschweren.

Zu den vorgegebenen Modellparametern gehören die Stromerzeugungskapazitäten, variable Erzeugungskosten, eine elastische Referenznachfrage auf dem Großhandelsmarkt sowie ein täglich fixer Ladestrombedarf für Fahrzeuge, der annahmegemäß frei über den Tag verteilt werden kann. Zu den ermittelten Modellergebnissen

gehören die stündliche Stromerzeugung mit unterschiedlichen Technologien, stündliche Strompreise sowie das Timing der Fahrzeugaufladung.

Für eine typische Winterwoche (Referenzdaten vom Januar 2009) wurden vier verschiedene Modellläufe mit unterschiedlichen hypothetischen Elektrofahrzeugflotten durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Flottengrößen von 2, 12 und 44 Millionen Fahrzeugen angenommen, die im optimistischen *Dominanz-Szenario* in den Jahren 2020, 2030 und 2050 erreicht werden. Der kumulierte tägliche Ladebedarf sowie die Anschlussleistung der hypothetischen Fahrzeugflotten wurden aus dem beschriebenen Szenario abgeleitet. Da den Berechnungen der heutige konventionelle Kraftwerkspark zugrunde liegt, soll keine Prognose abgegeben werden, wie sich der Strommarkt in Zukunft entwickeln wird. Vielmehr wird untersucht, welche Effekte künftige hypothetische Elektrofahrzeugflotten im heutigen Strommarkt haben würden. Mittel- und langfristig wird sich die Kraftwerksstruktur erheblich verändern, insbesondere hinsichtlich des weiteren Ausbaus fluktuierender erneuerbarer Energien. Es bleibt zu untersuchen, wie sich dies auf künftige Elektromobilitäts-Szenarien auswirken wird.

eine beispielhafte Woche analysiert.¹⁷ Dabei wurden die hypothetischen Fahrzeugflotten der Jahre 2020, 2030 und 2050 des *Dominanz-Szenarios* zugrunde gelegt, die an der Obergrenze einer realistisch zu erwartenden Entwicklung liegen. Grundlegende Modellannahme ist, dass die für die Aufladung der Fahrzeuge zuständigen Akteure die stündlichen Preise an der Strombörse nutzen können und ihre Aufladekosten dadurch minimieren, dass sie die täglich günstigsten Perioden zur Aufladung nutzen. Das Modell stützt sich auf den derzeitigen konventionellen deutschen Kraftwerkspark, da dieser maßgeblich für die Preisbildung an der Strombörse ist. Die regulierte Einspeisung fluktuierender Windkraft wird nicht berücksichtigt (Kasten).

Die Modellergebnisse für die Beispielwoche (168 Stunden) zeigen, dass eine optimale Aufladung der Fahrzeuge in den Nachtstunden stattfinden würde (Abbildung). Selbst im Extremfall mit fast 44 Millionen Elektrofahrzeugen könnte die Aufladung beinahe komplett in Schwachlastperioden erfolgen.

Die zusätzliche Stromnachfrage könnte bei intelligent gesteuerter Aufladung somit bereits durch den heutigen Kraftwerkspark erzeugt werden, ohne dass zusätzliche Spitzenlastkraftwerke benötigt werden. Dementsprechend steigen die Strompreise gegenüber dem Referenzfall ohne Elektroautos in allen Fällen fast ausschließlich in den Schwachlastperioden, nicht jedoch in Spitzenlastzeiten. In den Fällen mit zwei und zwölf Millionen Elektroautos sind die Auswirkungen auf die Großhandelspreise bei kostenminimierender Aufladung gering. Dagegen steigt das Preisniveau im Extremfall mit 44 Millionen Elektrofahrzeugen in der Weise, dass es praktisch keine Schwachlastpreise mehr gibt.

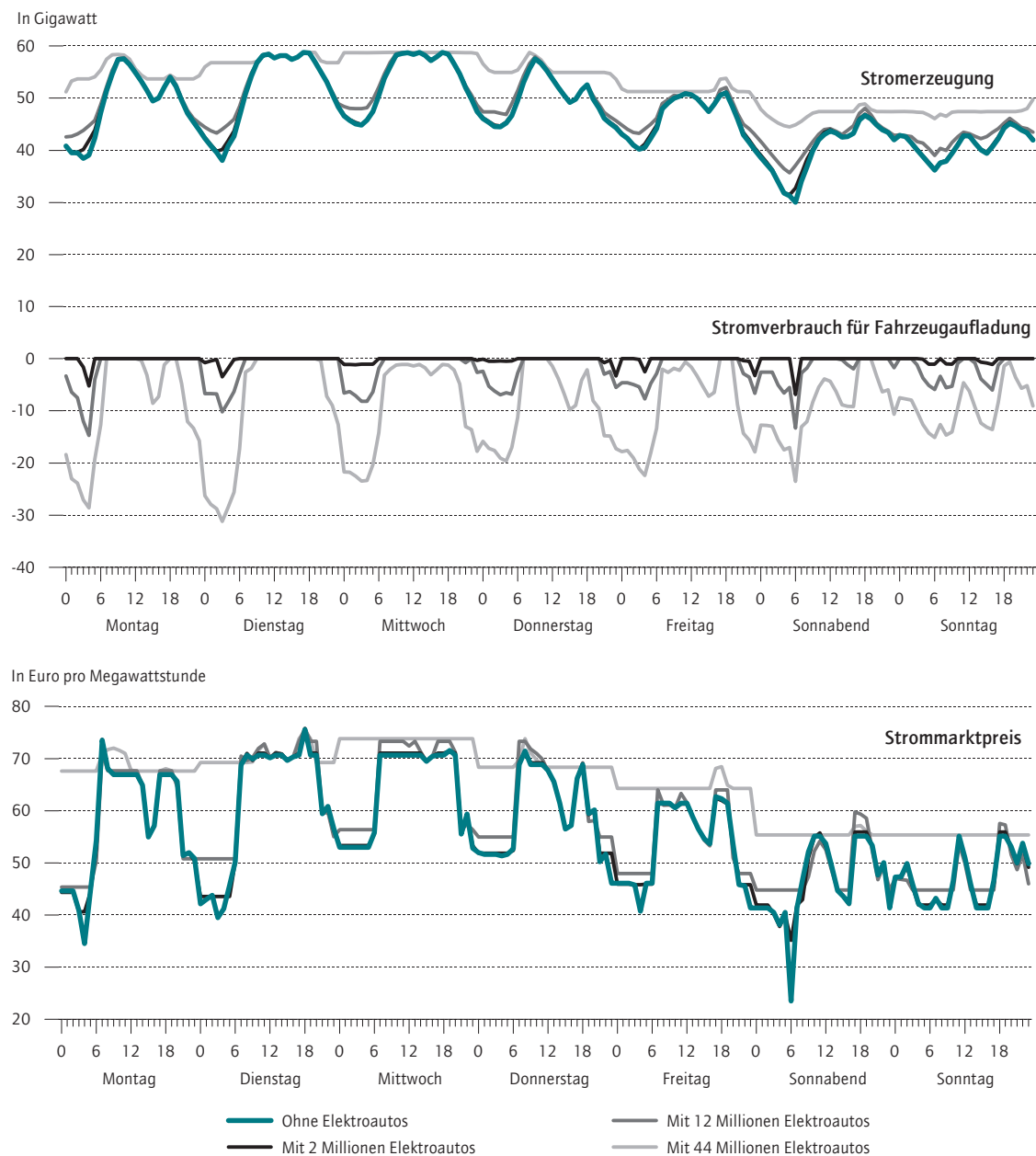
Die zusätzliche Stromnachfrage von Elektrofahrzeugen führt – ohne die Berücksichtigung erneuerbarer Erzeugungskapazitäten – vor allem zu einer höheren Auslastung von Kohlekraftwerken. Im Modelllauf mit zwölf Millionen Fahrzeugen wird der zusätzliche Strombedarf gegenüber dem Referenzfall ohne Elektrofahrzeuge zu fast 90 Prozent durch Stein- und Braunkohlekraftwerke gedeckt. Daher sollten bei der Berechnung fahrzeugbedingter CO₂-Emissionen derzeit die Emissionen von Kohlekraftwerken angenommen werden und nicht der durchschnittliche deutsche Kraftwerksmix.

¹⁷ Für eine Beschreibung des Basismodells siehe Schill, W.-P., Kemfert, C.: The Effect of Market Power on Electricity Storage Utilization: The Case of Pumped Hydro Storage in Germany. Diskussionspapier Nr. 947, DIW Berlin 2009.

Abbildung

Stromerzeugung, Fahrzeugaufladung und Strommarktpreise für verschiedene Elektrofahrzeug-Bestände

Wochenverlauf für eine Winterwoche 2009



Quelle: Berechnungen des DIW Berlin.

DIW Berlin 2010

Ein Bestand von zwölf Millionen Elektro-Pkw wäre problemlos über Nacht aufzuladen. Selbst bei einer nahezu vollständigen Elektrifizierung der deutschen Pkw-Flotte müssten bei einer gesteuerten Aufladung die Spitzenpreise nicht steigen.

Die Modellergebnisse zeigen, dass der Ladestrombedarf großer Fahrzeugflotten bereits mit dem heutigen konventionellen Kraftwerkspark gedeckt werden könnte. Dies wäre jedoch keine sinnvolle Strategie, wenn eine erhebliche Senkung der Treibhausgas-Emissionen angestrebt wird. Bei Verfolgung ambitionierter Klimaschutzziele muss eine bessere Auslastung oder gar der Neubau von Kohlekraftwerken unbedingt ver-

mieden werden.¹⁸ Stattdessen sollte parallel zum Ausbau der Elektromobilität der Ausbau der erneuerbaren Energien vorangetrieben werden.

¹⁸ Vgl. Kemfert, C., Traber, T.: Nachhaltige Energieversorgung: Beim Brückenschlag das Ziel nicht aus dem Auge verlieren. Wochenbericht des DIW Berlin Nr. 23/2010.

Weitere Möglichkeiten durch Vehicle-to-Grid

Eine Umsetzung des sogenannten *Vehicle-to-Grid*-Konzepts (V2G) verspricht die Erschließung erheblicher Synergien zwischen der Fahrzeugflotte und dem Elektrizitätssystem. Grundidee von V2G ist die Integration parkender Elektrofahrzeuge in das Stromnetz durch eine bidirektionale Verbindung, die – bei Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur – nicht nur ein gesteuertes Aufladen der Fahrzeugbatterie erlaubt, sondern auch eine bedarfsgerechte Rückspeisung gespeicherter Elektrizität ins Stromnetz.¹⁹ Dabei wird der Umstand ausgenutzt, dass die Fahrzeuge im Schnitt den weitaus größten Teil des Tages nicht in Bewegung sind. Bei einer flächendeckenden Umsetzung des V2G-Konzepts würde eine erhebliche zusätzliche Leistung im Stromnetz verfügbar: Würde nur ein Viertel der heute rund 41 Millionen Pkw in Deutschland elektrifiziert und mit einer Anschlussleistung von je 15 Kilowatt in das Netz integriert, so würde eine Gesamtleistung von über 150 Gigawatt erreicht, die für eine kurzfristige Leistungsabgabe oder Aufnahme zur Verfügung stünde und die derzeit installierte deutsche Kraftwerksleistung von rund 147 Gigawatt knapp überträfe. Den potenziell sehr hohen Anschlussleistungen künftiger Elektrofahrzeugflotten steht jedoch eine vergleichsweise geringe Speicherkapazität der Batterien gegenüber. Daher gilt das V2G-Konzept insbesondere für leistungsintensive und zeitkritische Anwendungen als vielversprechend. Dazu zählt insbesondere die Bereitstellung von Regelleistung, die benötigt wird, um kurzfristige Abweichungen zwischen der geplanten Stromerzeugung und der tatsächlichen Nachfrage im Stromnetz auszugleichen. Dagegen erscheint V2G für speicherintensive Anwendungen wie den Spitzenlastausgleich oder die Speicherung überschüssigen Windstroms aus heutiger Sicht eher ungeeignet.²⁰ Vor einer breiten Umsetzung des V2G-Konzepts müssen noch viele offene Fragen hinsichtlich Standardisierung und Betrieb der entsprechenden Infrastruktur sowie der Auswirkungen auf die Fahrzeugbatterien geklärt werden.

Fazit

In der Diskussion um alternative Fahrzeugantriebe ist in jüngster Zeit die Elektromobilität in den Fokus

gerückt. Sie weist gegenüber konventionellen Fahrzeugantrieben eine Reihe von Vorteilen auf, insbesondere eine weitgehende lokale Emissionsfreiheit, potenziell geringere CO₂-Emissionen, eine erhöhte Energieeffizienz sowie die Nutzung einer breiten energetischen Ressourcenbasis. Bei Nutzung heimischer erneuerbarer Energiequellen versprechen elektrische Antriebe nicht nur CO₂-Emissionsfreiheit, sondern auch die Unabhängigkeit von importierten fossilen Energieträgern. Zudem könnten bei einer intelligenten Einbindung von Elektrofahrzeugen in die Stromnetze Synergiepotenziale zwischen der Fahrzeugflotte und dem Elektrizitätssystem erschlossen werden. Allerdings bestehen erhebliche Hürden für eine schnelle und flächendeckende Verbreitung elektrischer Fahrzeugantriebe. Dazu zählen insbesondere die Grenzen der derzeitigen Batterietechnik sowie hohe Anschaffungskosten. Auch infrastrukturelle und sozio-kulturelle Barrieren sollten nicht unterschätzt werden.

Aufgrund der politischen Unterstützung in vielen Ländern und erheblicher Aktivitäten der Privatwirtschaft ist nicht zu erwarten, dass das Thema Elektromobilität – ähnlich wie vorher Brennstoffzellen und Biokraftstoffe – nur einen vorübergehenden *Hype* darstellt. Eine nennenswerte Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen erscheint jedoch erst langfristig realistisch. In Hinblick auf die identifizierten Hindernisse wird deutlich, dass elektrische Fahrzeuge in den nächsten Jahren lediglich in bestimmten Nischen eine gewisse Bedeutung erlangen werden. Dies wird auch am politischen Ziel von einer Million Elektrofahrzeugen bis zum Jahr 2020 deutlich, das in Hinblick auf die technischen und ökonomischen Hürden bereits ambitioniert erscheint: Eine solche Elektrofahrzeugflotte würde gerade einmal zwei Prozent des derzeitigen deutschen Pkw-Bestands ausmachen. Vor diesem Hintergrund sollte die Elektromobilität zwar als vielversprechender langfristiger Technologiepfad betrachtet werden, kurz- und mittelfristig jedoch nicht mit überzogenen Hoffungen und Erwartungen überfrachtet werden. Auch die Politik sollte nicht in kurzfristigen elektromobilen Aktionismus verfallen, sondern darauf abzielen, langfristig die richtigen Weichen zu stellen.

Aus technologiepolitischer Sicht erscheint insbesondere die Förderung von Forschung und Entwicklung unverzichtbar. Dabei sollte jedoch der Grundsatz der Technologieoffenheit verfolgt werden, da heute noch nicht absehbar ist, welche Antriebskonzepte sich dauerhaft durchsetzen werden. Elektrofahrzeuge sind aufgrund der genannten Barrieren derzeit noch nicht massenmarktauglich. Direkte Kaufanreize sollten daher allenfalls zu einem späteren Zeitpunkt erwogen werden. Die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften hat in diesem Zusammenhang kürzlich gefordert, Deutschland solle keinen *Leitmarkt*, sondern

¹⁹ Das V2G-Konzept wurde zuerst beschrieben von Kempton, W., Tomic, J.: *Vehicle-to-grid Power Fundamentals: Calculating Capacity and Net Revenue*. *Journal of Power Sources* 144 (1), 2005, 268–279.

²⁰ Vergleiche auch Lund, H., Kempton, W.: *Integration of Renewable Energy into the Transport and Electricity Sectors through V2G*. *Energy Policy* 36 (9), 2008, 3 578–3 587; sowie Andersson, S. et al.: *Plug-in hybrid Electric Vehicles as Regulating Power Providers: Case Studies of Sweden and Germany*. *Energy Policy* 38 (6), 2010, 2751–2762.

vielmehr eine Position als *Leitanbieter* zukunftsfähiger Elektrofahrzeugkomponenten anstreben.²¹ Die Politik könnte die Markteinführung von Elektroautos indirekt begünstigen, indem sie den Aufbau der Ladeinfrastruktur unterstützt oder Elektrofahrzeuge für öffentliche Fahrzeugflotten beschafft. In diesem Zusammenhang ist auch die künftige Besteuerung des Ladestroms zu prüfen. Die Tankstellenpreise für fossile Kraftstoffe enthalten einen hohen Energiesteueranteil (früher Mineralölsteuer), der auch mit der Finanzierung der Verkehrsinfrastruktur begründet wird. Es ist zu prüfen, inwiefern der Ladestrom für Elektrofahrzeuge in Zukunft ebenfalls einen solchen steuerlichen Beitrag leisten muss, oder ob er gegenüber fossilen Kraftstoffen dauerhaft steuerlich begünstigt werden sollte.

Aus energie- und umweltpolitischer Sicht sollten zunächst keine überzogenen Erwartungen an die Elektromobilität gestellt werden, insbesondere hinsichtlich ihres Beitrags zur CO₂-Minderung im Verkehrssektor. Da die deutsche Pkw-Flotte noch lange von konventionellen Fahrzeugen dominiert werden wird, dürfen Effizienzverbesserungen und CO₂-Minderungsmaßnahmen bei Verbrennungsmotoren keinesfalls vernachlässigt werden. Daneben sollten Erdgasfahrzeuge verstärkt gefördert werden, da diese relativ geringe CO₂-Emissionen aufweisen und künftig auch mit Bio-

gas betrieben werden könnten.²² In jedem Fall sollte der Einstieg in die Elektromobilität mit einem verstärkten Ausbau der erneuerbaren Energien einhergehen, damit ihre Verwendung im Verkehrsbereich nicht einfach ihre Nutzung für andere Anwendungen substituiert. Der potenzielle Beitrag von Elektrofahrzeugen zur Netzintegration fluktuierender erneuerbarer Energien sollte ebenfalls nicht überbewertet werden. Die Nutzung anderer Stromspeichertechnologien, nachfrageseitige Maßnahmen sowie der Netzausbau erscheinen hier zielführender.

Aus verkehrspolitischer Sicht ist klar, dass der Austausch von Verbrennungsmotoren durch elektrische Antriebe nicht die alleinige Lösung der bestehenden Probleme darstellen kann, beispielsweise in Hinblick auf Straßenverkehrsunfälle oder den fortschreitenden Flächenverbrauch. Daher sollte die Elektromobilität als Baustein eines umfassenderen, nachhaltigen Verkehrskonzepts verstanden werden, das über den motorisierten Individualverkehr hinausgeht. Auch bei einem Ausbau der Elektromobilität bleiben eine verkehrsvermeidende Stadtplanung und eine Verkehrsverlagerung hin zu umwelt- und ressourcenschonenderen Verkehrsträgern unverzichtbar. Insbesondere sollte die Attraktivität des öffentlichen Personenverkehrs, der im Schienenverkehr bereits seit langem elektrifiziert ist, weiter gesteigert werden.

²¹ Deutsche Akademie der Technikwissenschaften: Stellungnahme: Wie Deutschland zum Leitanbieter für Elektromobilität werden kann. München 2010.

²² Vgl. Engerer, H., Horn, M.: Erdgas im Tank für eine schadstoffarme Zukunft. Wochenbericht des DIW Berlin Nr. 50/2008.

JEL Classification:
L62, Q40, R40

Keywords:
Transportation,
Electric vehicles,
Electricity markets



Sechs Fragen an Wolf-Peter Schill

„Wir sollten von der Elektromobilität kurzfristig nicht zu viel erwarten.“

Wolf-Peter Schill,
Wissenschaftlicher
Mitarbeiter, Abteilung
Energie, Verkehr, Umwelt
am DIW Berlin

Herr Schill, Autos mit Verbrennungsmotor verschmutzen die Luft und verbrauchen fossile Brennstoffe. Mit Elektrofahrzeugen könnte das anders sein. Sind die Hoffnungen, die mit der Elektromobilität verbunden sind, berechtigt?

Langfristig sind die Hoffnungen durchaus berechtigt. Gerade die lokale Emissionsfreiheit ist ein eindeutiger Vorteil der Elektromobilität. Außerdem sind Elektroantriebe energieeffizienter als Verbrennungsmotoren und bieten die Möglichkeit, andere Primärenergieträger zu nutzen als Mineralöl. Wir sollten aber von der Elektromobilität kurzfristig nicht zu viel erwarten und sie nicht mit Hoffnungen überfrachten. Es ist schwierig, neue Industrien zu entwickeln oder größere Mengen erneuerbarer Energien durch Elektrofahrzeuge in das Netz zu integrieren. Langfristig aber bietet die Elektromobilität erhebliche Chancen und Potentiale.

Im Jahr 2020 sollen eine Million Elektroautos auf deutschen Straßen fahren. Halten Sie das für realistisch?

Ich halte es auf jeden Fall für möglich. Das hängt davon ab, welche Rahmenbedingungen gesetzt werden und wie sich die Technologie entwickelt. Ich halte es aber für schwierig, mittel- und langfristige Prognosen zielgenau abzugeben, da es viele Randbedingungen gibt, die wir heute noch nicht genau abschätzen können.

Es gibt völlig unterschiedliche Konzepte der Elektromobilität. Was sollte gefördert werden und was nicht?

Bei der Forschung und Entwicklung sollte man möglichst breit und technologieoffen fördern, da wir heute noch nicht sagen können, welches Konzept sich am Ende durchsetzen wird. Es wäre falsch, jetzt alles auf eine Karte zu setzen, so wie wir das früher zum Beispiel bei der Wasserstoff-Brennstoffzelle oder den Biokraftstoffen getan haben.

Wo soll denn der Strom für eine Million Elektroautos herkommen?

Wir haben in einer Modellrechnung gezeigt, dass bei einer gesteuerten Aufladung mit den bestehenden konventionellen Kraftwerken nicht nur eine Million, sondern wesentlich mehr Elektroautos täglich aufgeladen werden könnten. Die Menge des Stroms ist also nicht das Problem. Doch aus Klimaschutzgründen muss von Anfang an bedacht werden, wo der Strom herkommt. Zwar ist die CO₂-Intensität von Elektrofahrzeugen bereits jetzt geringer als die vergleichbarer Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Dennoch brauchen wir beim Ausbau der Elektromobilität einen zusätzlichen Ausbau der erneuerbaren Energien. Denn der im Straßenverkehr verbrauchte erneuerbare Strom steht nicht mehr für andere Anwendungen zur Verfügung.

Welche Auswirkungen hätten eine Million Elektroautos auf den Strompreis?

Bei einer intelligenten Aufladung, die weitgehend in nächtlichen Schwachlastperioden erfolgt, haben eine Million Elektroautos sehr geringe Auswirkungen auf den deutschen Strommarkt und den Strompreis. Werden die Fahrzeuge jedoch

ungesteuert geladen, im schlechtesten Fall während der abendlichen Spitzenlast, dann hätten wir größere Preisreaktionen und möglicherweise auch eine Gefährdung der Netzstabilität.

Die Elektromobilität ist auch für die deutsche Fahrzeugindustrie von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Wie sollte die Politik mit dem Thema weiter verfahren?

Die Deutsche Akademie für Technikwissenschaften hat hier gefordert, Deutschland solle keine Position als *Leitmarkt* für Elektromobilität anstreben, so wie das im nationalen Entwicklungsplan vorgesehen ist, sondern besser als *Leitanbieter* zukunftsfähiger Technologien und Fahrzeuge. Das würde ich unterstützen.

Der Ausbau der Elektromobilität erfordert einen zusätzlichen Ausbau der erneuerbaren Energien.

Das Gespräch führte
Erich Wittenberg.
Das vollständige
Interview zum Anhören
finden Sie auf
www.diw.de/interview