

Elektromobilität in Deutschland – Chancen, Barrieren und Auswirkungen auf das Elektrizitätssystem

von Wolf-Peter Schill

Zusammenfassung: Politik, Medien, Fahrzeugbauer und Energieunternehmen widmen der Elektromobilität derzeit große Aufmerksamkeit. Dieser Artikel beleuchtet technische Aspekte, Chancen und Barrieren elektrischer Fahrzeugantriebe und ordnet sie in einen Gesamtzusammenhang ein. Vorteile gegenüber klassischen Verbrennungsmotoren bestehen in geringen lokalen Emissionen, einer höheren Energieeffizienz, der Verbreiterung der energetischen Ressourcenbasis und der Möglichkeit zur Nutzung erneuerbarer Energien. Bei Umsetzung des *Vehicle-to-Grid*-Konzepts könnten zudem Synergien zwischen der Fahrzeugflotte und dem Elektrizitätssystem erschlossen werden. Die derzeit schlechte Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen stellt jedoch eine erhebliche Barriere dar. Daneben bestehen infrastrukturelle und soziokulturelle Hürden. Die Auswirkungen auf das Elektrizitätssystem sind differenziert zu betrachten: Während die mittelfristig benötigten Energiemengen bereits mit dem heutigen Kraftwerkspark darstellbar sind, können problematische Lastspitzen nur bei einer gesteuerten Aufladung vermieden werden. Kurzfristig sind in Deutschland von elektrischen Fahrzeugantrieben keine signifikanten CO₂-Einsparungen zu erwarten. Langfristig könnte durch ihre Einführung jedoch ein zukunfts-fähiger Pfad eingeschlagen werden, insbesondere wenn ein zusätzlicher Ausbau erneuerbarer Energien erfolgt. Die Einbettung individueller Elektromobilität in ein nachhaltiges Gesamtkonzept ist jedoch erforderlich.

Summary: Electric mobility has recently received much attention from politics, media, car companies and electric utilities. This article discusses technical aspects, chances and barriers of electric mobility. Compared to internal combustion engines, electric vehicles have several potential advantages: low local emissions, increased energy efficiency, a diversification of energy sources and the possibility of using renewable energy. In addition, there are synergies between the vehicle fleet and the electricity system, which might be realized by implementing the *Vehicle-to-Grid* concept. The low cost-effectiveness of electric vehicles is a major barrier. Moreover, there are infrastructural and socio-cultural obstacles. As for the impact on the electricity system, a differentiated view is necessary. In general, existing German power plants are capable of generating the additional electricity required by future e-mobility scenarios. Problematic peak loads however can only be avoided if vehicle loading is carried out in a controlled way. In the short run, it should not be expected that electric vehicles lead to significant reductions of German carbon emissions. Yet in the long run, electric mobility might provide a sustainable technology pathway, particularly if there is an additional expansion of renewable energy. Nonetheless, integrating electric vehicles in a sustainable overall mobility concept is required.

JEL Classifications: L62, Q40, R40
Keywords: Transportation, Electric Vehicles, Vehicle-to-Grid, Electricity, Germany

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund wachsender Anforderungen der Klimaschutzpolitik und einer steigenden Abhängigkeit von knappen fossilen Energieressourcen wird die Einführung alternativer Energieträger und neuer Antriebstechnologien für den motorisierten Individualverkehr bereits seit vielen Jahren diskutiert. Nachdem sich die Aufmerksamkeit in Deutschland in den späten 90er Jahren zunächst auf die Wasserstofftechnologie und in den frühen 2000er Jahren auf die Nutzung von Biokraftstoffen gerichtet hat, rückt die elektrische Antriebstechnik nun immer mehr in den Blickpunkt. Elektrofahrzeuge gelten vielen Experten aufgrund geringer lokaler Emissionen, einer hohen Energieeffizienz und der Möglichkeit zur Nutzung einer breiten energetischen Ressourcenbasis inklusive erneuerbarer Energien derzeit als aussichtsreichste Option für eine zukunftsfähige individuelle Mobilität.

Die Grundidee der Elektromobilität ist die Ergänzung beziehungsweise vollständige Substitution heutiger Verbrennungsmotoren durch einen Batterie-elektrischen Antriebsstrang. Dieses Konzept blickt bereits auf eine lange Geschichte zurück (vgl. VCÖ 2009). In den ersten Jahren des motorisierten Individualverkehrs zu Beginn des 20. Jahrhunderts waren elektrische Antriebe nicht ungewöhnlich. Verbrennungsmotoren setzten sich jedoch bald durch, da die gegenüber Batterien klar überlegene Energiedichte flüssiger Kohlenwasserstoffe deutlich größere Reichweiten ermöglichte. Später gab es mehrere Versuche, elektrische Antriebe wieder zu beleben, die aber aufgrund der geringen Leistungsfähigkeit und der hohen Kosten der verwendeten Batterien über Nischenanwendungen und Feldversuche nicht hinauskamen. Heute versprechen unter anderem neue Entwicklungen in der Batterietechnik einen baldigen Durchbruch für die Elektromobilität im Massenmarkt. In den letzten Jahren wurde die Wahrnehmung des Themas durch das erfolgreiche Hybrid-Modell Prius von Toyota und den voll elektrischen Roadster der jungen kalifornischen Firma Tesla entscheidend geprägt.¹ Inzwischen haben fast alle großen Autofirmen die Entwicklung hybridisierter oder voll elektrischer Fahrzeuge angestoßen (vgl. Lache et al. 2008).

Die Entwicklung der Elektromobilität wird in vielen Ländern politisch aktiv vorangetrieben, wobei nicht nur die Forschung und Entwicklung, sondern teilweise auch die Markteinführung von Elektroautos mit öffentlichen Mitteln gefördert wird (vgl. acatech 2010). Die größten Summen wurden zuletzt in den USA aufgebracht, wo im Konjunkturpaket des Jahres 2009 2,4 Milliarden US-Dollar für den Aufbau von Produktionskapazitäten für Batterien und elektrische Fahrzeugkomponenten reserviert wurden.²

Dieser Beitrag beleuchtet den technischen Hintergrund, die Chancen und die Barrieren der Elektromobilität und ordnet diese in einen verkehrs- und energiewirtschaftlichen Gesamtzusammenhang ein. Dabei stellt sich unter anderem die Frage, ob wir gegenwärtig nur einen vorübergehenden Elektro-Hype beobachten, oder ob die elektrische Antriebstechnik unsere Mobilität demnächst tatsächlich dauerhaft prägen wird. Außerdem wird eine Einschätzung getroffen, welchen Beitrag die Elektromobilität für ein nachhaltiges Energie- und Mobilitätskonzept leisten kann. Der Fokus liegt dabei auf dem motorisierten Individualverkehr.

¹ Siehe www.teslamotors.com/, zugegriffen am 17. September 2010.

² Nähere Informationen zum American Recovery and Reinvestment Act unter www.recovery.gov, zugegriffen am 17. September 2010.

Im Folgenden werden zunächst technische Aspekte der Elektromobilität dargestellt. Anschließend werden der verkehrswirtschaftliche Hintergrund in Deutschland, mögliche elektromobile Zukunftsszenarien und die aktuelle Marktentwicklung kurz skizziert. Abschnitt 4 diskutiert die potenziellen Vorteile der Elektromobilität im Allgemeinen, während Abschnitt 5 auf das *Vehicle-to-Grid*-Konzept im Besonderen eingeht. Danach werden die größten Risiken und Barrieren eines Übergangs zur Elektromobilität diskutiert. Abschnitt 7 thematisiert mögliche Auswirkungen der Elektromobilität auf das Elektrizitätssystem. Im abschließenden Fazit werden Schlussfolgerungen zu den Perspektiven der Elektromobilität und ihrer Nachhaltigkeit gezogen.

2 Technischer Hintergrund

2.1 Fahrzeugkonzepte

„Elektromobilität“ ist kein klar abgegrenzter Begriff. Ein weit gefasstes Konzept der Elektromobilität könnte grundsätzlich auch den elektrifizierten öffentlichen Personenverkehr einschließen. Im Folgenden wird der Begriff jedoch – wie in der aktuellen Debatte üblich – enger definiert und ausschließlich für den motorisierten Individualverkehr verwendet. Dabei werden unterschiedliche Antriebskonzepte vom leicht hybridisierten Verbrennungsmotor bis hin zum voll elektrischen Fahrzeug unterschieden. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über Vor- und Nachteile verschiedener elektrischer Antriebs- und Fahrzeugkonzepte mit-
samt den jeweils typischen Batteriegrößen.

Mild- und Mikro-Hybride, Voll-Hybride ohne Netzverbindung und Wasserstoff-Brennstoffzellen können lediglich den Randbereichen der Elektromobilität zugeordnet werden, da sie keine Netz-Elektrizität als Antriebsenergie nutzen. Daher konzentriert sich dieser Artikel im Folgenden auf Plug-In-Hybride (Plug-In Hybrid Electric Vehicles, PHEV) und rein Batterie-elektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicles, BEV), die ihre Antriebsenergie zumindest teilweise aus dem Stromnetz beziehen.

Wie in Tabelle 1 dargestellt, können Hybride gegenüber reinen Verbrennungsmotoren Effizienzvorteile aufweisen, die auf längere Betriebszeiten im optimalen Wirkungsgradbereich des Verbrennungsmotors zurückgehen. Sie hängen allerdings vom Einsatzgebiet und der Fahrweise ab. Gegenüber reinen BEV haben Hybride den Vorteil einer höheren Reichweite und der Nutzung existierender Tankstelleninfrastruktur. Ein Nachteil der Hybride-technik ist die doppelte Ausführung des Antriebsstrangs, die sowohl gegenüber reinen Verbrennungsmotoren als auch gegenüber BEV zu einer hohen technischen Komplexität, erhöhtem Gewicht und entsprechend erhöhten Kosten führt. Hybridantriebe werden oft als Übergangstechnologie hin zu reinen BEV betrachtet. Künftig könnten sich aber auch verschiedene Fahrzeugtypen für unterschiedliche Verwendungszwecke etablieren, zum Beispiel BEV für städtische Einsatzgebiete und Verbrennungsmotoren – gegebenenfalls in hybridisierten Varianten – für den Langstreckeneinsatz (vgl. Gilbert et al. 2007).

2.2 Batterieentwicklung

In den letzten Jahren waren Nickel-Metallhydrid-Akkus der gängigste Batterietyp für Hybride und reine Elektroautos (Lache et al. 2008). Die Lithium-Ionen-Batterie gilt aufgrund

Tabelle 1

Übersicht über verschiedene elektrische Antriebs- und Fahrzeugkonzepte

Typ und geläufige Bezeichnungen	Spezifische Charakteristika	Vorteile	Nachteile	Batteriekapazität in kWh
Mikro-Hybrid und Mild-Hybrid	Verbrennungsmotor mit elektrisch betriebenen Hilfsaggregaten bzw. elektrischem Hilfsantrieb.	Alle Vorteile von Verbrennungsmotoren; Verbrauchsminderung z. B. durch Rückgewinnung von Bremsenergie möglich.	Alle Nachteile von Verbrennungsmotoren; kein eigener elektrischer Antrieb, d. h. kein rein elektrisches Fahren möglich.	< 1
Voll-Hybrid (Hybrid Electric Vehicle, HEV)	Doppelte Ausführung der Antriebsstränge: Verbrennungsmotor und elektrischer Antrieb.	Alle Vorteile von Verbrennungsmotoren, dabei Erhöhung der Energieeffizienz möglich; rein elektrisches Fahren auf Kurzstrecken möglich.	Höhere Komplexität, höheres Gewicht und höhere Fahrzeugkosten durch doppelten Antriebsstrang.	1–3
Plug-In Hybrid (Plug-In Hybrid Electric Vehicle, PHEV)	Wie Voll-Hybrid, aber mit größeren Batterien und Möglichkeit der Aufladung am Stromnetz; bei bidirektionaler Verbindung auch Rückspeisung von Elektrizität in das Stromnetz möglich.	Wie Voll-Hybrid; zusätzlich Nutzung von Netzstrom als Antriebsenergie; Fahrzeuge stellen eine steuerbare Netzlast dar; Bereitstellung energiewirtschaftlicher Systemdienstleistungen möglich.	Wie Voll-Hybrid; Gewicht und Kosten gegenüber HEV noch einmal erhöht.	6–15
Rein batterie-elektrischer Antrieb (Battery Electric Vehicle, BEV)	Rein elektrischer Antriebsstrang; Aufladung am Stromnetz; Bei bidirektionaler Verbindung auch Rückspeisung von Elektrizität in das Stromnetz möglich; Varianten: zusätzlicher serieller Verbrennungsmotor (Range-Extender) oder Wechselbatterie.	Nutzung von Netzstrom als Antriebsenergie; hohe „Well-to-Wheel“ Energieeffizienz; Bereitstellung steuerbarer Netzlast sowie energiewirtschaftlicher Systemdienstleistungen möglich.	Große Batteriekapazitäten erforderlich mit entsprechendem Gewicht und Kosten; Relativ geringe Reichweite; Derzeit fehlende Ladeinfrastruktur.	15–20 für kleine Stadt-BEV, bis zu 60 für große BEV.
Elektromotor mit Wasserstoff-Brennstoffzelle	Elektrische Antriebsenergie wird an Bord aus Wasserstoff durch eine Brennstoffzelle erzeugt; Kopplung mit Batterie möglich.	Höhere Reichweite als BEV.	Hohe Kosten und technische Probleme bei Brennstoffzellen für den mobilen Einsatz; fehlende Wasserstoff-Infrastruktur; geringere Energieeffizienz als BEV.	Keine oder kleine Batterie.

Quellen: acatech (2010), Biere et al. (2009), Kempton und Tomic (2005), Sovacool und Hirsh (2009), Wietschel und Dallinger (2008).

ihrer hohen Energiedichte und anderer günstiger technischer Eigenschaften als bevorzugte Technologie für künftige Plug-In-Hybride und reine Elektroautos. Mittelfristig könnten jedoch andere Technologien wie beispielsweise Lithium-Luft-Batterien verfügbar werden (vgl. auch Tillmetz 2009).

Derzeit werden zwei unterschiedliche Batteriekonzepte für BEV diskutiert. Die meisten Fahrzeugbauer setzen darauf, die Batterie fest im Auto einzubauen und sie im parkenden Zustand an einer Ladestation aufzuladen. Ein alternatives Konzept sieht vor, die Batte-

rie austauschbar im Fahrzeug zu installieren, so dass sie an Tauschstationen schnell gewechselt werden kann. Die Firma Better Place hat ein Geschäftsmodell für ein solches Tauschsystem entwickelt. Dabei wird den Kunden ein Vertragsmodell angeboten, das Autonutzung und Ladegebühren enthält.³ Ein Vorteil des Tauschsystems ist die Verbesserung der Reichweite durch schnellen Akkuwechsel. Nachteile des Systems bestehen in der Notwendigkeit, geladene Wechselbatterien vorzuhalten und entsprechenden Logistikkosten. Außerdem ist eine Standardisierung der Fahrzeughäute notwendig, gegen die es erheblichen Widerstand aus der Automobilindustrie gibt (vgl. Steiger 2008).

2.3 Verbrauchswerte

In der Literatur werden für elektrische Fahrzeuge Verbrauchswerte von circa 15 kWh/100 km für Kleinwagen, 20 kWh/100 km für Mittelklasse-PHEV und 30 kWh/100 km für Kleintransporter genannt (Hackbarth et al. 2009).⁴ Der häufig zitierte Wert von circa 20 kWh/100 km für elektrische Kompakt- oder Mittelklassewagen wurde in den 90er Jahren in einem Praxis-Versuch auf Rügen mit einer Flotte umgerüsteter VW Golf ermittelt (Blank et al. 2008). Er wurde empirisch auch für neuere Batterie-elektrische Kleinwagen bestätigt (Erdmann 2009). Er entspricht einem Verbrauch von circa fünf bis sechs Litern Diesel- oder Ottokraftstoff pro 100 km (vgl. Pehndt et al. 2007, Erdmann 2009). Dieser Verbrauchswert scheint auch für künftige Elektrofahrzeuge in einer realistischen Größenordnung zu liegen, da die Ansprüche der Autokäufer an Komfort und Fahrleistungen seit dem Rügen-Versuch tendenziell noch gestiegen sind. Es wird argumentiert, dass neue, leichte und auf die Elektromobilität zugeschnittene Fahrzeugkonzepte den Verbrauch erheblich senken könnten (vgl. Steiger 2008). Allerdings müssen im Gegensatz zu konventionellen Antrieben auch der Stromverbrauch für Hilfsaggregate und die Fahrzeugheizung berücksichtigt werden.

3 Verkehrswirtschaftlicher Hintergrund und Szenarien

3.1 Motorisierter Individualverkehr in Deutschland

Im Jahr 2008 hatte der motorisierte Individualverkehr in Deutschland einen Anteil von 82,5 Prozent am Verkehrsaufkommen und einen Anteil von 79,6 Prozent an der Verkehrsleistung des motorisierten Personenverkehrs (BMVBS 2009).⁵ Er hat seit vielen Jahren eine besonders hohe Bedeutung für den Berufs- und Geschäftsverkehr. Im Jahr 2004 war die Hälfte aller Wege der Erwerbstätigen zu ihrer Arbeitsstätte (Hinwege) kürzer als 10 km, circa 80 Prozent der Wege kürzer als 25 km und über 90 Prozent der Wege kürzer als 50 km (BMVBS 2009). Zum Vergleich: Bei einem Verbrauch von 20 kWh/100 km erzielt ein Elektrofahrzeug mit einer 10-kWh-Batterie eine Reichweite von circa 50 km. Diese würde bereits ausreichen, um einen Großteil der Wege des Berufsverkehrs abzudecken.

3 Für weitere Informationen siehe www.betterplace.com, zugegriffen am 17. September 2010.

4 Biere et al. (2009) nennen Verbrauchswerte von 16 kWh/100 km für PHEV und BEV sowie 11 kWh/100 km für verbrauchsoptimierte, kleine Stadt-BEV. Gerbracht et al. (2009) rechnen ebenfalls mit einem mittleren Nettoverbrauch von 16 kWh/100 km.

5 Das Verkehrsaufkommen beschreibt die Zahl der beförderten Personen, wohingegen die Verkehrsleistung die Anzahl der Personen-Kilometer darstellt.

Der deutsche Pkw-Bestand beträgt derzeit ungefähr 41 Millionen Fahrzeuge. Die Zahl der jährlichen Neuzulassungen pendelte in den letzten Jahren zwischen drei und vier Millionen (BMVBS 2009). Bereits seit 1990 gibt es sowohl im Pkw-Bestand als auch bei den Neuzulassungen einen ungebrochenen Trend zu größeren Motorleistungen und höheren Spitzengeschwindigkeiten (Heymann et al. 2009). Im Jahr 2008 wiesen 99 Prozent aller Neuzulassungen eine Höchstgeschwindigkeit von über 140 km/h auf, mehr als die Hälfte sogar über 180 km/h (BMVBS 2009). Dieser Trend schafft ein schwieriges Umfeld für die Einführung kleinerer, leichter und effizienter Elektrofahrzeuge.

An den deutschen CO₂-Emissionen⁶ hatte der gesamte Straßenverkehr im Jahr 2007 mit circa 144 Millionen Tonnen CO₂ einen Anteil von ungefähr 17 Prozent (Umweltbundesamt 2009, eigene Berechnungen). Damit hat der Straßenverkehr nach der Energiewirtschaft den zweitgrößten Anteil an den gesamten deutschen CO₂-Emissionen.

3.2 Szenarien für die Elektromobilität

Derzeit existieren verschiedene Szenarien zur Abschätzung der Entwicklung der Elektromobilität sowohl in Europa als auch weltweit. Eine Übersicht bieten Frondel und Peistrup (2009) und sowie VCÖ (2009). In den meisten Szenarien bleiben Verbrennungsmotoren mittelfristig die wichtigste Antriebstechnik. Neben dem Batterie-elektrischen Antrieb wird der Wasserstofftechnologie teilweise ein großes Zukunftspotenzial zugeschrieben, das jedoch erst ungefähr ab 2030 erschlossen werden kann (vgl. Frondel et al. 2009). Aus heutiger Sicht kann allerdings keine fundierte Prognose abgegeben werden, welche relativen Marktanteile batterie-elektrische Antriebe und Wasserstoff-Brennstoffzellen langfristig erreichen werden.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über einige Elektromobilitätsszenarien für Deutschland. Blank et al. (2008) berechnen ein „pessimistisches“ und ein „optimistisches“ Szenario für das Jahr 2020 unter Berücksichtigung technischer Substitutionspotenziale in verschiedenen Nutzungsklassen. Biere et al. (2009) kommen unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Fahrzeugmodelle und infrastruktureller Randbedingungen zum Schluss, dass das ökonomische Gesamtpotenzial für Elektrofahrzeuge in Deutschland im Jahr 2020 ungefähr 32 Prozent des gesamten Fahrzeugbestands beträgt, wobei PHEV den größten Anteil ausmachen. Eine vollständige Realisierung dieses Gesamtpotenzials erscheint aber aufgrund langer Amortisationsdauern von bis zu zehn Jahren unwahrscheinlich. Wietschel und Dallinger (2008) stellen zwei Szenarien zur möglichen längerfristigen Entwicklung bis 2050 vor. In einem „Dominanzszenario“ werden reine Verbrennungsmotoren im Pkw-Bestand bis 2050 nahezu komplett durch HEV, PHEV und BEV ersetzt. In einem alternativen „Pluralismus-Szenario“ bleiben verschiedene Antriebssysteme dauerhaft nebeneinander bestehen, sodass PHEV und BEV nur deutlich geringere Marktanteile erreichen.

6 Ohne Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft.

Tabelle 2

Elektromobilitätsszenarien für Deutschland

	Jahr	Szenario	Elektrofahrzeugbestand in Millionen	Fahrzeugtyp	Anteil am Gesamtbestand in Prozent
Blank et al. (2008)	2020	„Pessimistisch“	0,84	PHEV und BEV	1,8
		„Optimistisch“	8	PHEV und BEV	17,4
Biere et al. (2009)	2020	Ökonomisches Gesamtpotenzial	13,4	PHEV und BEV	31,9
Wietschel und Dallinger (2008)	2020	„Pluralismus-Szenario“	0,4	PHEV	Keine Angaben
			0,09	Stadt-BEV & Elektroroller	
		„Dominanz-Szenario“	1,5	PHEV	
			0,09	Stadt-BEV & Elektroroller	
	2030	„Pluralismus-Szenario“	3,5	PHEV	
			0,27	Stadt-BEV & Elektroroller	
		„Dominanz-Szenario“	11,5	PHEV	
			0,15	BEV	
	2050	„Pluralismus-Szenario“	0,27	Stadt-BEV & Elektroroller	
			6,8	PHEV	
		„Dominanz-Szenario“	0,61	Stadt-BEV & Elektroroller	
			22	PHEV	
			21	BEV	
			0,61	Stadt-BEV und Elektroroller	

Tabelle enthält eigene Berechnungen.

3.3 Marktentwicklung

Gegenwärtig bedienen reine Elektrofahrzeuge noch Nischenmärkte, während die ersten Hybridfahrzeuge den Massenmarkt bereits erreicht haben. Im Hybridsegment sind derzeit japanische Hersteller führend, allen voran die Firma Toyota (vgl. Heymann et al. 2009). Weltweit ziehen jedoch andere Hersteller nach. Die deutsche Bundesregierung hat im Jahr 2009 einen „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ vorgestellt (Bundesregierung 2009). Darin wird das Ziel formuliert, Deutschland zum „Leitmarkt Elektromobilität“ zu entwickeln und einen Bestand von einer Million Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 zu erreichen. Nach einer Phase der „Marktvorbereitung“ bis 2011 und des „Markthochlaufs“ bis 2016 soll der „Volumenmarkt“ ab 2017 beginnen. Angesichts der derzeit schlechten Wirtschaftlichkeit elektrischer Fahrzeuge (siehe Abschnitt 6.2) wird außerdem geprüft, ob und inwieweit Kaufanreize für Elektrofahrzeuge geschaffen werden könnten (Bundesregierung 2009). Die deutsche Akademie der Technikwissenschaften (2010) empfiehlt dagegen, öffentliche Mittel ausschließlich für die Forschung und die Entwicklung marktfähiger Komponenten zu verwenden. Deutschland solle demnach weniger zum *Leitmarkt* als vielmehr zum *Leitanbieter* der Elektromobilität werden.

Derzeit laufen in Deutschland verschiedene Feldversuche mit Elektrofahrzeugen. Mehrere deutsche Hersteller, darunter BMW, Daimler und VW, führen in Partnerschaft mit Energieunternehmen Flottenversuche in ausgewählten Städten durch.⁷ Im Zuge eines Förderprogramms des Bundesverkehrsministeriums gibt es derzeit acht „Modellregionen Elektromobilität“ in Deutschland, zu denen auch Berlin-Potsdam gehört.⁸ Darüber hinaus werden im Rahmen des Konjunkturpakets II zwischen 2009 und 2011 500 Millionen Euro für Forschung, Entwicklung, Fertigungsprozesse und die Markt vorbereitung in den Bereichen Batterieentwicklung, Fahrzeugkomponenten und Netzintegration bereitgestellt (Bundesregierung 2009).

4 Chancen

4.1 Lokale Emissionen

Einer der offensichtlichsten Vorteile der Elektromobilität ist ihre lokale Emissionsfreiheit hinsichtlich klassischer verkehrsrelevanter Luftschadstoffe wie Stickoxide und Partikel, aber auch Kohlenwasserstoffe oder Kohlenmonoxid. Außerdem weisen Elektrofahrzeuge nur geringe Lärmemissionen auf (vgl. Pehndt et al. 2007). Dadurch sind Elektroautos besonders attraktiv für den Stadtverkehr und für Umweltzonen. Es ist allerdings zu beachten, dass Luftschadstoffemissionen, insbesondere auch CO₂-Emissionen, in teilweise erheblichem Umfang an den Ort der Elektrizitätserzeugung verlagert werden können.

Die Verminderung lokaler Luftschadstoffemissionen könnte für Ballungsgebiete in Entwicklungsländern eine noch größere Relevanz haben als für deutsche Städte, da dort oftmals nicht nur die Luftqualität besonders schlecht ist, sondern der motorisierte Individualverkehr vielfach auch von kleinen, leichten Fahrzeugen und Motorrollern geprägt ist, die sich besonders gut für die Elektrifizierung eignen.

4.2 Energieeffizienz und CO₂

Elektrische Antriebe weisen gegenüber Verbrennungsmotoren und auch gegenüber der Wasserstoff-Brennstoffzelle eine deutlich höhere Energieeffizienz auf. Insbesondere im Stadtverkehr ergeben sich erhebliche Verbrauchsvorteile. Bei einer *Well-to-Wheel*-Betrachtung (eine Gesamtbetrachtung von der Primärenergiegewinnung bis zum sich drehenden Rad) beträgt die Energieeffizienz von Benzin- oder Dieselsverbrennungsmotoren circa 18 bis 23 Prozent (Wietschel et al. 2008). Dagegen erreichen elektrische Antriebe bereits mit dem heutigen deutschen Strommix⁹ einen Wert von circa 30 Prozent, der durch Effizienzverbesserungen im Kraftwerkspark noch deutlich gesteigert werden kann (Wietschel et al. 2008). Die hohe Energieeffizienz der Elektromobilität bewirkt eine Schonung der Primärenergieressourcen und eine Senkung des CO₂-Ausstoßes. Bereits mit dem heutigen deutschen Kraftwerksmix liegen die CO₂-Emissionen von Batterie-Elektrofahrzeugen deutlich

⁷ Vergleiche acatech (2010) sowie Auto Motor Sport 2/2010 S. 15.

⁸ Weitere Informationen zu den Modellregionen unter www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Artikel/UI/modellregionen-elektromobilitaet.html, zugegriffen am 17. September 2010.

⁹ Im Jahr 2009 wurden ca. 24% der Bruttostromerzeugung durch Braunkohlen bereitgestellt, 23% durch Atomkraft, 20% durch Steinkohlen, 14% durch Erdgas und der Rest durch erneuerbare Energien und sonstige Energieträger (BMWi 2009).

niedriger als bei vergleichbaren Autos mit Verbrennungsmotoren (Erdmann 2009).¹⁰ Eine Senkung der CO₂-Intensität im Strommix führt unmittelbar zu weiteren Verbesserungen. Insofern können Elektroautos auch zur Einhaltung der flottenbezogenen CO₂-Grenzwerte der Europäischen Union beitragen.

4.3 Verbreiterung der Ressourcenbasis und Nutzung erneuerbarer Energie

In Deutschland wurde im Jahr 2007 über 90 Prozent der Endenergie im Verkehrssektor durch Mineralöl bereitgestellt (BMWi 2008). Eine solch weitreichende Abhängigkeit von einem endlichen, größtenteils importierten Energieträger kann zu versorgungstechnischen und politischen Problemen führen sowie makroökonomische Ungleichgewichte und Preisrisiken induzieren. Die Nutzung von Elektrizität im motorisierten Individualverkehr erlaubt eine erhebliche Verbreiterung der energetischen Ressourcenbasis, da Strom aus verschiedenen heimischen Energiequellen gewonnen werden kann. In den USA scheint die Reduzierung der strategischen Ölimportabhängigkeit sogar der entscheidende Grund für die Förderung der Elektromobilität zu sein.¹¹

Die Nutzung erneuerbarer Energiequellen für elektrische Antriebe ist besonders vorteilhaft, da erneuerbare Elektrizität in der Regel nicht nur im Inland erzeugt wird, sondern auch besonders geringe CO₂-Emissionen aufweist. Dabei bringt die Substitution von Mineralöl durch eine entsprechende Menge Windstrom allerdings keine höhere CO₂-Ersparnis (Pehndt et al. 2007) beziehungsweise nur eine geringfügig höhere CO₂-Ersparnis (Wietschel et al. 2008) als die sonst übliche Netzeinspeisung dieser Windstrommenge. Die Nutzung erneuerbarer Elektrizität könnte außerdem Biokraftstoffe teilweise ersetzen, deren Produktion häufig mit Problemen der Flächenknappheit und der Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion konfrontiert ist.

4.4 Mobilitätskosten

Eine einfache Beispielrechnung verdeutlicht, dass der Umstieg von konventionellen Treibstoffen auf elektrische Antriebsenergie zu geringeren Mobilitätskosten führen kann. Mit einem elektrischen Verbrauchswert von 20 kWh/100 km für ein Fahrzeug der Subcompact-Klasse (Erdmann 2009) und gegenwärtigen Haushaltspreisen für Strom von circa 0,20 Euro/kWh ergeben sich Energiekosten von 4 Euro/100 km. Ein vergleichbarer Benzin-Pkw mit einem Verbrauchswert von 6,21 Litern/100 km (Erdmann 2009) verursacht bei einem Spritpreis von circa 1,30 Euro/Liter mit circa acht Euro/100 km ungefähr die doppelten Kosten. Dabei ist zu beachten, dass ein solch drastischer Rückgang der variablen Kosten die Fahrzeugnutzer zu erhöhten Fahrleistungen motivieren könnte. Für eine genauere Abschätzung der elektrischen Mobilitätskosten sind künftige Ladestromtarife und ihre Besteuerung entscheidend (vgl. auch Wietschel et al. 2008).

10 Umfangreiche Well-to-Wheel Berechnungen für Energieverbrauch und CO₂-Emissionen unterschiedlicher Antriebs- und Kraftstoffarten werden vom Joint Research Center der Europäischen Union durchgeführt: <http://ies.jrc.ec.europa.eu/jec-research-collaboration/downloads-jec.html>, zugegriffen am 17. September 2010..

11 Siehe Presseerklärung des Weißen Hauses vom 19. März 2009, www.whitehouse.gov/the_press_office/President-Obama-Announces-24-Billion-in-Funding-to-Support-Next-Generation-Electric-Vehicles, zugegriffen am 17. September 2010.

5 Besondere Chancen durch *Vehicle-to-Grid*

5.1 Synergien zwischen Fahrzeugen und Elektrizitätssystem

Das *Vehicle-to-Grid*-Konzept (V2G, „Fahrzeug-zum-Netz“) wurde von Kempton und Tomic (2005a, 2005b) erstmals beschrieben. Seine Grundidee ist die Integration der Batterien parkender Elektrofahrzeuge in das Stromnetz durch eine physische Kabelverbindung, wodurch erhebliche Synergien zwischen dem Elektrizitätssystem und dem Fahrzeugpark erschlossen werden könnten (vgl. Sovacool et al. 2009). Amerikanischen Erhebungen zufolge werden Pkw im Schnitt weniger als fünf Prozent der Tageszeit gefahren. Darüber hinaus befinden sich zu jeder beliebigen Uhrzeit über 90 Prozent aller Fahrzeuge in einem geparkten Zustand, selbst während der Hauptverkehrszeiten (Kempton und Tomic 2005a, 2005b). Die Batterien elektrischer Fahrzeuge wären also die meiste Zeit des Tages ungenutzt, obwohl sie bei Anschluss an das Stromnetz wertvolle Systemdienstleistungen erbringen könnten. Rein batterie-elektrische Fahrzeuge eignen sich von allen elektrischen Fahrzeugtypen am besten für V2G, da sie über die höchsten Batteriekapazitäten und die höchsten Anschlussleistungen verfügen (Kempton und Tomic 2005a).

Am Beispiel der USA rechnen Kempton und Tomic (2005a,) vor, dass die Fahrzeugflotte im Vergleich zum Kraftwerkspark eine wesentlich geringere Nutzungsrate, aber eine höhere Gesamtleistung aufweist. Zudem sind Fahrzeuge darauf optimiert, häufige und große Lastwechsel durchzuführen, während viele Kraftwerke träge in ihrem Outputverhalten sind (Tomic et al. 2007). Wäre jeder vierte Pkw in den USA ein Elektrofahrzeug und mit einer Anschlussleistung von 15 kW mit dem Stromnetz verbunden, dann würde die kumulierte elektrische Leistung der Fahrzeuge die des gesamten Kraftwerksparks bereits übertreffen (Kempton und Tomic 2005a). In Deutschland ergibt sich ein ähnliches Bild: ein Viertel der heute circa 41 Millionen Pkw (BMVBS 2009) würde mit einer Anschlussleistung von 15 kW eine Gesamtleistung von über 150 GW erreichen, was die derzeit installierte deutsche Kraftwerksleistung von circa 147 GW¹² ebenfalls übertrifft.

Grundsätzlich verfügen Elektrofahrzeuge bei relativ hohen Anschlussleistungen über vergleichsweise geringe Speicherkapazitäten. Ein einfacher Vergleich belegt dies: Im Dominanz-Szenario von Wietschel und Dallinger (2008) beträgt die gesamte elektrische Leistung der Fahrzeugflotte in Deutschland im Jahr 2020 circa 5–11 GW und die gesamte Speicherkapazität 15–26 GWh. Das Verhältnis von Leistung (in GW) zu Speicherkapazität (in GWh) liegt im Mittel also bei circa 1 : 2,8. Im Vergleich dazu haben die derzeit in Deutschland installierten Pumpspeicherkraftwerke bei einer Gesamtleistung von ungefähr 6,4 GW eine kumulierte Speicherkapazität von ungefähr 40,3 GWh (Schill et al. 2009). Dies entspricht einem erheblich kleineren Verhältnis von Leistung zu Speicher von circa 1 : 6,3. V2G-Fahrzeuge bringen also eine beträchtliche zusätzliche Leistung in das Elektrizitätssystem ein; ihre zusätzliche Speicherkapazität sollte jedoch nicht überschätzt werden.

12 Stromdaten Jahr 2009, AG Energiebilanzen: www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=65, zu-gegriffen am 17. September 2010.

5.2 Systemdienstleistungen

Grundsätzlich könnten V2G-Elektrofahrzeuge unterschiedliche Funktionen im Elektrizitätssystem erfüllen. Dazu gehört die Glättung der Lastkurve durch das Füllen nächtlicher Nachfrageräler, wodurch die Vollaststundenzahl und damit die Wirtschaftlichkeit von Kraftwerken verbessert wird (vgl. Hackbarth et al. 2009). Dies ist in Deutschland insbesondere vor dem Hintergrund relevant, dass Nachspeicherheizungen, die diese Funktion bisher ausgeübt haben, derzeit abgeschafft werden (Frondel et al. 2009). Eine weitere Glättung der Nachfragekurve lässt sich durch Rückspeisung der in Fahrzeugbatterien gespeicherten Elektrizität in das Stromnetz in Spitzenlastzeiten erreichen. Außerdem könnten V2G-Fahrzeuge positive und negative Regelleistung¹³ bereitstellen. Darüber hinaus haben mehrere Studien auf einen möglichen positiven Beitrag von V2G zur Systemintegration fluktuierender erneuerbarer Energieerzeuger wie Sonnen- und Windkraft hingewiesen. Fahrzeugbatterien könnten dabei als Speicher für die Aufnahme zeitweise anfallenden Überschussstroms beziehungsweise als Backup genutzt werden (Wietschel et al. 2008). Nicht zuletzt könnten Elektrofahrzeuge netzunabhängige¹⁴ Reservekapazitäten für Notfälle bereit stellen. PHEV könnten theoretisch sogar eine Notfallversorgung übernehmen, indem sie Elektrizität aus Benzin oder Dieselkraftstoff erzeugen und über V2G in das Netz einspeisen. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die verschiedenen potenziellen V2G-Systemdienstleistungen, die Art der erforderlichen Netzverbindung und die absehbaren Engpass-Komponenten. Sie zeigt, dass sich die Strategien zur Bereitstellung unterschiedlicher Systemdienstleistungen teilweise gegenseitig ausschließen.

Eine intelligent gesteuerte monodirektionale Verbindung (nur Aufladen) ermöglicht bereits ein gezieltes Füllen von Nachfragerälern sowie die Bereitstellung negativer Regelleistung. Die übrigen Systemdienstleistungen erfordern nicht nur gesteuertes Laden, sondern auch eine bedarfsgerechte Rückspeisung von Elektrizität in das Netz. Dazu ist eine aufwändiger bidirektionale V2G-Verbindung erforderlich, die auch eine höhere Beanspruchung der Batterien mit sich bringt (vgl. acatech 2010).

Da Elektrofahrzeuge über vergleichsweise geringe Stromspeicherkapazitäten verfügen, erscheint das V2G-Konzept für speicherintensive Zwecke wie den Spitzenlastausgleich nur bedingt geeignet. Auch die V2G-Potenziale zum Ausgleich fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung sollten in der näheren Zukunft nicht überschätzt werden. Einerseits ist das Auftreten von Überschuss-Situationen saisonal und regional meist stark konzentriert. Andererseits sind die Batteriekapazitäten von Elektroautos zu gering, um stunden- beziehungsweise tagelange Windflauten auszugleichen, oder um gar saisonale Fluktuationen zu mindern. Dies verdeutlicht eine einfache Beispielrechnung: Im Jahr 2008 waren in Deutschland circa 24 GW Windenergieleistung installiert, die gesamte Windstromerzeugung betrug circa 40 600 GWh (BMU 2009). Selbst im Fall eines zügigen Ausbaus der Elektromobilität würde die gesamte Speicherkapazität der V2G-Flotte im Jahr 2020 nur ausreichen, um gut vier Stunden der durchschnittlichen Winderzeugung des Jahres 2008 aufzunehmen beziehungsweise ihr Fehlen auszugleichen. In einem theoretischen Extremfall, in dem alle Windenergieanlagen mit voller Leistung laufen (maximale Überschuss-

13 Um die Frequenz im Stromnetz konstant zu halten, muss die Elektrizitätserzeugung dem Verbrauch zu jedem Zeitpunkt exakt entsprechen. Zum Ausgleich zwischen planmäßiger Erzeugung und tatsächlicher Nachfrage wird Regelleistung eingesetzt in Form kurzfristig verfügbarer Erzeugungskapazität oder Netzlast.

14 Erzeugungskapazitäten, die unabhängig vom Stromnetz angefahren werden können, also auch im Fall eines flächendeckenden Stromausfalls verfügbar sind, werden als „schwarzstartfähig“ bezeichnet.

Tabelle 3

Übersicht über verschiedene V2G-Strategien

Systemdienstleistung	Strategie	Erforderlicher Netzanschluss	Engpass-Komponenten
Füllen von Nachfragetälern	Zeitgesteuertes Aufladen in Schwachlastperioden (das heißt nachts)	Monodirektional	Batteriekapazität
Bereitstellung von Spitzenlast	Nutzung der Batterie als Stromspeicher: Aufladen in Schwachlastperioden, Rückspeisung in das Netz in Spitzenlastzeiten	Bidirektional	Anschlussleistung, Batteriekapazität
Negative Regelleistung	Vorhaltung nicht geladener Batteriekapazität und Aufladen im Bedarfsfall	Monodirektional	Anschlussleistung
Positive und negative Regelleistung	Vorhaltung teilweise geladener Batteriekapazität; Aufladen oder Rückspeisung in das Netz im Bedarfsfall	Bidirektional	Anschlussleistung
Vorhaltung von schwarzstartfähigen Reserve- beziehungsweise Backupkapazitäten	Vorhaltung geladener Batteriekapazität beziehungsweise gefüllter Kraftstofftanks; Rückspeisung in das Netz im Bedarfsfall	Bidirektional	Anschlussleistung, Batteriekapazität
Speicherung von Überschussstrom aus erneuerbaren Energiequellen	Vorhaltung ungeladener Batteriekapazität und Nutzung als Stromspeicher im Fall von Überschusserzeugung	Bidirektional	Batteriekapazität

Quellen: Guille und Gross (2009), Kempton und Tomic (2005), Lund und Kempton (2008).

Situation), wäre die Speicherkapazität der V2G-Flotte bereits in weniger als einer Stunde erschöpft.¹⁵ Zudem müssen Fahrzeugbatterien vorrangig zur Bereitstellung von Antriebsenergie dienen und können daher nur in begrenztem Umfang für den Ausgleich erneuerbarer Über- oder Unterversorgung vorgehalten werden. Aufgrund der hohen Anschlussleistungen eignet sich das V2G-Konzept jedoch hervorragend für die leistungsintensive Bereitstellung von positiver und negativer Regelleistung. Dies ist auch hinsichtlich des Ausbaus fluktuierender erneuerbarer Energiequellen relevant, da dieser einen erhöhten Regelleistungsbedarf mit sich bringt (vgl. auch Kempton und Tomic 2005b).

5.3 Umsetzung und Geschäftsmodelle

Das Anbieten von V2G-Systemdienstleistungen könnte den Haltern von Elektrofahrzeugen Erlöse einbringen und somit die Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge verbessern, solange die Erlöse die zusätzlichen Kosten für Infrastruktur, Steuerung und Batterieabnutzung übersteigen. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund eines wachsenden Regelenergiemarkts (vgl. Blank et al. 2008). Kempton und Tomic (2005a, 2005b) berechnen die Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher V2G-Geschäftsmodelle in verschiedenen amerikanischen Strommarktsegmenten. Demnach ist die Bereitstellung von Grundlast beziehungsweise

15 Der Berechnung liegt das Dominanz-Szenario von Wietschel und Dallinger (2008) zugrunde. Die gesamte Speicherkapazität der im Jahr 2020 existierenden 1,5 Millionen PHEV beläuft sich auf 15-26 GWh, im Mittel also ca. 21 GWh. Die durchschnittliche stündliche Windkrafterzeugung im Jahr 2008 beträgt 40.600 GWh/8760h = 4,6 GWh. Im theoretischen Extremfall werden in einer Stunde 24 GWh Windstrom erzeugt.

Spitzenlast durch Elektrofahrzeuge nicht beziehungsweise nur bedingt Gewinn versprechend. Dagegen erscheint die Bereitstellung hochwertiger, zeitkritischer Systemdienstleistungen wie schnell verfügbarer Reservekapazitäten beziehungsweise Regelleistung höchst profitabel. Tomic und Kempton (2007) analysieren die Rentabilität der V2G-Regelleistungsbereitstellung für zwei tatsächlich existierende Pkw-Flotten und verschiedene Elektrizitätsmärkte in den USA. Demnach ist die V2G-Regelleistungsbereitstellung fast in jedem Fall profitabel. Andersson et al. (Im Erscheinen) führen eine ähnliche Betrachtung für den schwedischen und den deutschen Regelenergiemarkt durch, wonach in Deutschland ohne Berücksichtigung von Infrastrukturkosten circa 30 bis 80 Euro pro Fahrzeug und Monat erlöst werden könnten. Sowohl in den USA (vgl. Kempton und Tomic 2005a, 2005b) als auch in Deutschland (vgl. Andersson et al., im Erscheinen) könnte der Regelungsbedarf jedoch bereits durch eine relativ geringe Zahl von Elektrofahrzeugen gedeckt werden.

Guille und Gross (2009) haben einen Rahmen für eine mögliche Implementierung des V2G-Konzepts entwickelt. Dabei spielt der „Aggregator“, der verschiedene Fahrzeuge zu einer verteilten energiewirtschaftlichen Ressource bündelt und ihre Be- und Entladung steuert, eine entscheidende Rolle. Andersen et al. (2009) stellen ein Geschäftsmodell für einen „Electric Recharge Grid Operator“ vor, der ein intelligentes Ladenetz bereitstellt und für eine Koordination des Aufladens und der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien sorgt. Israel, Dänemark und Australien führen derzeit solche Modelle ein. Bei der Umsetzung des V2G-Konzepts bestehen jedoch aus heutiger Sicht noch erhebliche infrastrukturelle, institutionelle und organisatorische Hürden.

6 Risiken und Barrieren

6.1 Batterieentwicklung

Trotz jüngster Fortschritte ist die Batterietechnik derzeit noch das größte Hindernis für eine flächendeckende Verbreitung elektrischer Antriebe. Im Vergleich zu Verbrennungsmotoren und mineralölbasierten Kraftstoffen weisen selbst fortschrittlichste Lithium-Ionen-Batterien eine geringe Energiedichte, das heißt, eine geringe Reichweite und ein hohes Gewicht auf. Zudem werden an Fahrzeughäusern deutlich höhere Anforderungen als an Akkus aus dem Consumer-Elektronik-Bereich gestellt: Sie müssen sehr langlebig, zuverlässig und stoßunempfindlich sein, extreme Temperaturschwankungen aushalten (circa -30 bis $+80^{\circ}\text{C}$) und dürfen bei Straßenverkehrsunfällen keine Gefährdung darstellen (vgl. Tillmetz 2009). Um die Entwicklung leistungsfähiger Lithium-Ionen-Batterien in Deutschland zu beschleunigen, hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der 2007 gegründeten Innovationsallianz „Lithium-Ionen-Batterie – LIB 2015“ Fördermittel in Höhe von 60 Millionen Euro zur Verfügung gestellt. Ein Konsortium, bestehend aus den Firmen BASF, Bosch, Evonik, Li-Tec und Volkswagen, bringt weitere Forschungsmittel von 360 Millionen Euro ein.¹⁶

16 Weitere Informationen unter www.bmbf.de/de/11828.php, zugegriffen am 17. September 2010.

6.2 Wirtschaftlichkeit

Die Herstellungskosten von Lithium-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge liegen heute mit circa 800 bis 1 000 Euro pro kWh noch viel zu hoch für den Massenmarkt. Als Zielkosten werden 100 bis 300 Euro pro kWh angegeben (Hackbarth et al. 2009). Die Wirtschaftlichkeit von Hybridfahrzeugen wird dadurch weiter eingeschränkt, dass im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen Mehrkosten für den doppelten Antriebsstrang anfallen. Bei reinen Batterie-Elektroautos entfallen die Kosten für den konventionellen Antriebsstrang, dafür ist jedoch eine relativ große Batterie notwendig. Tabelle 4 gibt eine Literaturübersicht über die sich unter Berücksichtigung dieser Effekte ergebenden zusätzlichen Investitionskosten für unterschiedliche Fahrzeugtypen. Bei Mittelklasse-PHEV betragen sie derzeit rund 10 000 Euro. Es wird deutlich, dass die Mehrkosten entscheidend von der Größe und der Kostenentwicklung der Batterien abhängen (vgl. Biere et al. 2009).

Den höheren Anschaffungskosten von Elektromobilen stehen geringere „Kraftstoff“- beziehungsweise Betriebskosten gegenüber. Dennoch sind Elektrofahrzeuge heute im Allgemeinen noch nicht wirtschaftlich. Biere et al. (2009) ermitteln unter Berücksichtigung infrastruktureller Faktoren und der Fahrprofile verschiedener Nutzergruppen, dass die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen erheblich von der Fahrleistung und dem Anteil rein elektrischer innerörtlicher Fahrten abhängt. Als erstes werden demnach kleine, rein elektrisch betriebene Stadtfahrzeuge ab 2015 wirtschaftlich. Prädestinierte Erstnutzer sind Vollzeitbeschäftigte in Gemeinden unter 100 000 Einwohnern, in denen es gegenüber größeren Städten mehr geeignete Stellplätze und höhere Fahrleistungen gibt. Nach 2020 werden Plug-In-Hybride wirtschaftlich, erst nach 2030 dann auch größere rein batterie-elektrische Fahrzeuge. Den Berechnungen von Hackbarth et al. (2009) zufolge hängt die

Tabelle 4

Zusätzliche Investitionen für unterschiedliche elektrische Fahrzeugtypen gegenüber konventionellen Fahrzeugen (je Fahrzeug)

	PHEV	BEV	Stadt-BEV	Anmerkungen
(In Klammern jeweils die Batteriekapazität)				
Biere et al. (2009), eigene Berechnungen	11 113 Euro (14 kWh)	35 829 Euro (60 kWh)	12 112 Euro (20 kWh)	Im Jahr 2010, gegenüber Benzинmotoren
	11 543 Euro (14 kWh)	34 419 Euro (60 kWh)	10 962 Euro (20 kWh)	Im Jahr 2010, gegenüber Dieselmotoren
Hackbarth et al. (2009)	Kleinwagen: 2 010–8 010 Euro (1,5–9 kWh)	Keine Angaben	Keine Angaben	Batteriekapazität für elektrische Reichweiten von 10 bis 60 km
	Mittelklassewagen: 2 455–10 455 Euro (2–12 kWh)			
Lache et al. (2008)	8 000 US-Dollar (12 kWh)	11 000 US-Dollar (22 kWh)	Keine Angaben	Kostendaten aus den USA
Wietschel et al. (2008)	9 670 Euro (14 kWh)	Keine Angaben	7 929 Euro (20 kWh)	Im Jahr 2010, gegenüber Benzинmotoren
	2 673 Euro (14 kWh)		5 441 Euro (20 kWh)	Im Jahr 2030, gegenüber Benzинmotoren

Amortisationsdauer von Plug-In-Hybriden ebenfalls entscheidend von der Batteriegröße, den Kraftstoffpreisen und den Jahresfahrleistungen ab. Unter allen PHEV amortisieren sich diejenigen mit geringen rein elektrischen Reichweiten (circa 10 km) und hohen Jahresfahrleistungen am schnellsten.

6.3 Infrastruktur

Der Aufbau der Ladeinfrastruktur stellt ein weiteres Hindernis für die Elektromobilität dar. Grundsätzlich existiert – ähnlich wie beim Wasserstoffantrieb – eine „Dead-Lock-Situation“: Die Verbreitung einer neuen Antriebstechnik und der Aufbau einer entsprechenden Lade- beziehungsweise Betankungsinfrastruktur bedingen sich jeweils gegenseitig (Frondel et al. 2009). Allerdings kann bei der Elektromobilität teilweise auf bereits vorhandene Infrastruktur zurückgegriffen werden, zum Beispiel auf den Haushaltsstromanschluss und existierende Verteilnetze. Daher erscheint eine sukzessive Verbreitung von Elektro-Ladestationen im Vergleich zum Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur weniger problematisch. Dennoch ist die flächendeckende Bereitstellung von Ladeplätzen mit steuerbarer, „intelligenter“ Ladetechnik und Schutz vor Missbrauch und Vandalismus eine große Herausforderung. Die Infrastrukturstarken lassen sich minimieren, wenn Elektrofahrzeuge zunächst zu Hause und gegebenenfalls am Arbeitsplatz geladen werden. Die kostenintensive Errichtung einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur im öffentlichen Raum ist kurzfristig weder notwendig noch zu erwarten. Bisher ungelöst ist die Frage der nationalen und internationalen Standardisierung der Lade-, Verbindungs- und Abrechnungstechnik (vgl. acatech 2010).

Die relativ langen Ladezeiten stellen eine weitere Barriere dar. Bei einer üblichen Haushaltsanschlussleistung von 3 kW würde die Beladung einer 20-kWh-Batterie fast sieben Stunden dauern. Höhere Ladeleistungen von 15 kW (Biere et al. 2009), 30 kW oder noch mehr könnten dieses Problem lösen. Allerdings dürfte die flächendeckende Verbreitung solcher Ladeleistungen mittelfristig eine Verstärkung der örtlichen Verteilnetze erfordern (vgl. Gerbracht et al. 2009).

6.4 Lithium: Umwelteffekte und Ressourcen

Eine ökologische Gesamtbetrachtung der Elektromobilität sollte neben den möglichen Emissionsreduktionen auch die Umwelteffekte bei der Gewinnung, Verarbeitung und Entsorgung der für Batterien und Elektromotoren verwendeten Rohstoffe und Bauteile mit einbeziehen. Derzeit existieren noch keine vergleichenden Ökobilanzen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren und Elektrofahrzeugen über den gesamten Produktlebenszyklus.¹⁷

Die globalen Lithiumvorkommen sind grundsätzlich endlich und in wenigen Ländern konzentriert, sodass sich zukünftig Knappheiten und strategische Abhängigkeiten ergeben könnten. Im Jahr 2009 war Chile der größte Lithiumproduzent mit einem Anteil von über 40 Prozent an der weltweiten Förderung, gefolgt von Australien (25 Prozent), China (13

¹⁷ In diesem Zusammenhang ist das Forschungsprojekt UMBReLA zu nennen, das bis Herbst 2011 eine umfassende Umweltbewertung der Elektromobilität vornimmt: http://ifeu.de/index.php?bereich=ver&seite=projekt_umbrela, zugegriffen am 17. September 2010.

Prozent) und Argentinien (12 Prozent) (U.S. Geological Survey 2010). Die größten Vorkommen liegen mit großem Abstand in Chile mit circa 76 Prozent der derzeit bekannten weltweiten Reserven. Die Förderung des Jahres 2008 betrug lediglich 0,3 Prozent der weltweiten Reserven, die des Jahres 2009 bedingt durch die Wirtschaftskrise sogar nur 0,2 Prozent (U.S. Geological Survey 2010). Der weltweite Lithiumverbrauch zeigte zwischen 2004 und 2008 einen deutlich steigenden Trend (U.S. Geological Survey 2008). Ein weltweiter Umstieg auf batterieelektrische Fahrzeuge würde die Lithiumnachfrage noch einmal erheblich steigern. Daher sollte der Ausbau der Elektromobilität von Anfang an mit einer integrierten Lithium-Recyclingstrategie verknüpft werden. Wie bei anderen Rohstoffen gilt aber auch für Lithium, dass steigende Preise zur Entdeckung und Erschließung neuer beziehungsweise vormals nicht wirtschaftlicher Lithiumvorkommen führen werden. Daher ist selbst bei einer extremen Nachfrageentwicklung bis 2050 nicht mit einer Erschöpfung der Lithiumreserven zu rechnen (Angerer et al. 2009). Zudem werden mittelfristig Weiterentwicklungen in der Batterietechnik wie zum Beispiel die Lithium-Luft-Technologie erwartet, durch die der Lithiumeinsatz deutlich verringert werden könnte (vgl. U.S. Geological Survey 2008).

6.5 Soziokulturelle Barrieren

Neben den erwähnten technischen und infrastrukturellen Barrieren dürfen soziale und kulturelle Hürden nicht vernachlässigt werden. Sovacool und Hirsh (2009) argumentieren, dass soziotechnische Barrieren, gängige Geschäftspraktiken und politische Interessen für historische Transformationsprozesse im Energiebereich von größter Bedeutung gewesen sind und dass diese auch beim Übergang zur Elektromobilität berücksichtigt werden müssen. So tendieren Verbraucher dazu, Technologien abzulehnen, die sie als radikal, neu oder nicht ausreichend erprobt wahrnehmen – insbesondere wenn sie sehr kapitalintensiv sind, was bei Elektrofahrzeugen der Fall ist (Sovacool und Hirsh 2009). Fahrzeughalter könnten außerdem der spontanen und flexiblen Nutzung ihrer heutigen Automobile einen so hohen Wert beimesse, dass sie eingeschränkte Reichweiten oder Inflexibilitäten des Ladevorgangs nicht oder nur gegen eine finanzielle Entschädigung hinnehmen. Datenschutzrechtliche Aspekte sind ebenfalls zu beachten, da die bei Lade- und Abrechnungsvorgängen erhobenen Daten beispielsweise für die Erstellung von Bewegungsprofilen genutzt werden könnten. Darüber hinaus ist mit erheblichem Widerstand von Marktakteuren zu rechnen, die große und langfristig abzuschreibende Investitionen in die gegenwärtige Infrastruktur getätigt haben, beispielsweise die konventionelle Automobilwirtschaft und die Mineralölwirtschaft (Sovacool und Hirsh 2009). Nicht zuletzt erfordert der Einstieg in die Elektromobilität verstärkte Ausbildungsaktivitäten, wenn der absehbare Mangel an akademischen und nichtakademischen Fachkräften vermieden werden soll (acatech 2010).

Entscheidend für die Kundenakzeptanz von elektrischen Fahrzeugen dürften letztendlich die Kosten sein. Selbst wenn Elektrofahrzeuge durch ihre geringen Betriebskosten auf lange Sicht rentabler als konventionelle Fahrzeuge sind, so ist doch fraglich, ob Konsumenten bereit sind, die höheren Anschaffungskosten zu tragen. Empirische Untersuchungen zeigen, dass an Energieeffizienz-Investitionen überdurchschnittlich hohe Diskontraten angelegt werden (Hausman 1979). Konsumenten erwarten also, dass sich solche Investitionen in sehr kurzen Zeiträumen amortisieren, insbesondere wenn Unsicherheiten über künftige Kosten und Ersparnisse einbezogen werden (Thompson 1997). Turrentine und Kurani (2007) zeigen, dass Autokäufer die künftigen Treibstoffkosten bei der Kaufentscheidung

nicht systematisch berücksichtigen. Es ist allerdings noch unklar, welchen Effekt dies auf den Markterfolg künftiger Elektroautos hat. Der Beitrag von Elmer (2010) in diesem Heft beschäftigt sich eingehender mit diesen Fragestellungen.

7 Auswirkungen auf das Elektrizitätssystem

Die Auswirkungen der Elektromobilität auf das Elektrizitätssystem hängen einerseits von der Höhe des durch Elektrofahrzeuge induzierten zusätzlichen Elektrizitätsbedarfs ab, das heißt von der benötigten *Energiemenge*, andererseits vom Zeitpunkt des Aufladens, das heißt von der zusätzlichen *Leistungsnachfrage*.¹⁸

Der zusätzliche Elektrizitätsbedarf von Elektrofahrzeugen ist im Vergleich zu ihren hohen Anschlussleistungen relativ gering. Im Jahr 2008 betrug die Netto-Kraftwerkskapazität in Deutschland 147 GW und die Netto-Stromerzeugung circa 600 TWh, was einer durchschnittlichen Kapazitätsauslastung von knapp 47 Prozent entspricht.¹⁹ Selbst im optimistischen Dominanz-Szenario von Wietschel und Dallinger (2008), das einen vollständigen Umstieg auf zumindest teilelektrifizierte Antriebe vorsieht, beträgt die zusätzliche Stromnachfrage im Jahr 2050 lediglich 70–90 TWh. Dies entspricht gegenüber dem Jahr 2008 einer Steigerung der Gesamterzeugung von höchstens 15 Prozent beziehungsweise einer Steigerung der Kapazitätsauslastung auf knapp 54 Prozent. Vor diesem Hintergrund erscheint die Deckung der zusätzlichen Nachfrage künftiger Elektromobilitäts-Szenarien bereits mit dem heutigen Kraftwerkspark grundsätzlich darstellbar (vgl. Birnbaum et al. 2009, Gerbracht et al. 2009). Aus Klimaschutzgründen sollte die zusätzliche Stromnachfrage jedoch durch den zusätzlichen Ausbau erneuerbarer Energien gedeckt werden.

Hinsichtlich des Leistungsbedarfs künftiger Elektrofahrzeugflotten sind Zeitpunkt und Koordination des Aufladens entscheidend. Im Dominanz-Szenario von Wietschel und Dallinger (2008) beträgt die kumulierte elektrische Flottenleistung im Jahr 2020 bereits 5–11 GW.²⁰ Zusätzliche Lasten in dieser Größenordnung erfordern eine intelligente Steuerung der Aufladung, wenn erhebliche Auswirkungen auf Marktpreise und Netzstabilität verhindert werden sollen. Insbesondere darf die Elektrofahrzeugflotte nicht in Spitzenlastzeiten aufgeladen werden. Blank et al. (2008) simulieren eine ungesteuerte Aufladung unter der Annahme, dass im Jahr 2020 ungefähr acht Millionen Elektrofahrzeuge vorhanden sind, die jeweils fünf Minuten nach Fahrtende zum Laden an das Netz angeschlossen werden. Dabei entstehen zusätzliche Leistungsspitzen von bis zu 7 GW, die zeitgleich mit den bereits vorhandenen Spitzenlasten auftreten. Um diese Leistungsspitzen zu vermeiden, ist ein intelligentes Batteriemanagement unverzichtbar. Birnbaum et al. (2009) vergleichen die typische stündlich verfügbare Kraftwerkskapazität in Deutschland mit der zusätzlichen Last durch Elektrofahrzeuge bei unterschiedlichen Ladestrategien. Bei ungesteuerter Aufladung fällt die Lastspitze in den Zeitraum der geringsten freien Erzeugungskapazitäten am frühen Abend. Bereits bei einer Flotte von einer Million Elektrofahrzeugen erschöpft die zusätzliche Last von circa 2 GW beinahe die verfügbaren abendlichen Kapazitäten. Eine koordinierte, zeitgesteuerte, nächtliche Beladung dieser Fahrzeugflotte führt zwar zu

18 Energie wird in der Elektrizitätswirtschaft häufig in der Einheit MWh angegeben. Leistung ist definiert als Energie pro Zeiteinheit; sie wird daher häufig in MW angegeben.

19 Stromdaten Jahr 2009, AG Energiebilanzen: www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=65, zugriffen am 17. September 2010.

20 Im Jahr 2050 sind es sogar 400–450 GW, was die heutige und auch die künftige installierte Kraftwerksleistung erheblich übersteigt.

einer höheren Lastspitze von circa 4 GW, die jedoch in unproblematische Nachtperioden mit hoher Kraftwerksverfügbarkeit gelegt werden kann.

8 Fazit

Es gab in der Vergangenheit bereits mehrere gescheiterte Anläufe zur Verbreitung elektrischer Fahrzeugantriebe. Die in diesem Beitrag angeführten Fakten deuten jedoch darauf hin, dass das Thema Elektromobilität dieses Mal mehr als nur ein vorübergehender Hype ist. Einerseits gibt es entscheidende Fortschritte in der Batterietechnik; andererseits widmen Politik, Medien, Fahrzeuggäbler und Energieversorger der Elektromobilität eine größere Aufmerksamkeit denn je.

Zu den Vorteilen der elektrischen Antriebstechnik gehören im Vergleich zu konventionellen Verbrennungsmotoren wesentlich geringere lokale Emissionen, eine höhere Energieeffizienz, die Verminderung der Rohölabhängigkeit des Straßenverkehrs und die Möglichkeit der Nutzung erneuerbarer Energien. Zu den identifizierten Risiken und Barrieren gehören wirtschaftliche Aspekte, insbesondere batteriebedingt hohe Anschaffungskosten, infrastrukturelle Hemmnisse und soziotechnische Barrieren. Auch mit Hinblick auf begrenzte Reichweiten ist derzeit nicht absehbar, dass Elektrofahrzeuge den Verbrennungsmotor in naher Zukunft komplett ersetzen können. Die Verfügbarkeit von Lithium scheint dagegen auf absehbare Zeit kein limitierender Faktor zu sein.

Verschiedene Szenarien gehen davon aus, dass der motorisierte Individualverkehr mittelfristig noch durch konventionelle Antriebe geprägt sein wird. Der Einstieg in die Elektromobilität wird voraussichtlich in Ballungsräumen und bei Flottenfahrzeugen beginnen. Dabei werden Plug-In-Hybride eine wichtige Rolle spielen, da sie ohne abrupten Systemwechsel in die bestehende Versorgungsinfrastruktur eingebunden werden können und einen schrittweisen Aufbau der Ladeinfrastruktur ermöglichen. Da Autos hoch emotionale Produkte sind, und da Autokäufer nicht strikt rational entscheiden, sind die Erfolgchancen unterschiedlicher elektrischer Fahrzeugkonzepte im Massenmarkt derzeit jedoch noch nicht absehbar. Ihr umweltfreundliches Image und gute Fahreigenschaften könnten die Attraktivität elektrischer Fahrzeuge steigern. Althergebrachte Gewohnheiten, wahrgenommene Komfortverluste sowie hohe Anschaffungskosten könnten einen Durchbruch der Elektromobilität jedoch behindern.

Unter den gegebenen energiewirtschaftlichen Randbedingungen werden Elektrofahrzeuge auf absehbare Zeit nicht CO₂-frei sein. Derzeit würden Elektroautos vor allem zu einer höheren Auslastung von Mittellastkraftwerken führen, die in der Regel emissionsintensive Kohlekraftwerke sind. Dennoch weisen Elektrofahrzeuge selbst mit dem derzeitigen Strommix eine bessere CO₂-Bilanz auf als Verbrennungsmotoren vergleichbarer Leistung. Langfristig bestehen bei verstärkter Nutzung erneuerbarer Energien erhebliche Potenziale zur weiteren CO₂-Senkung. Die Stromnachfrage von Elektrofahrzeugen sollte daher möglichst durch einen zusätzlichen Ausbau der erneuerbaren Energien gedeckt werden. Aufgrund der langsamen Marktpenetration von Elektrofahrzeugen sind kurzfristig jedoch keine signifikanten CO₂-Einsparungen zu erwarten. Der Einstieg in die Elektromobilität sollte vielmehr eher als Einschlagen eines langfristig zukunftsfähigen Technologiepfades betrachtet werden. Kurz- und mittelfristig dürfen andere Maßnahmen zur Senkung der

CO₂-Emissionen im Straßenverkehr nicht vernachlässigt werden, insbesondere bei den noch auf absehbare Zeit vorherrschenden Verbrennungsmotoren.

Die Auswirkungen der Elektromobilität auf das Elektrizitätssystem müssen differenziert betrachtet werden. Die erforderliche zusätzliche Energienachfrage erscheint selbst bei einer sehr hohen Marktpenetration von Elektrofahrzeugen mit dem heutigen deutschen Kraftwerkspark grundsätzlich darstellbar. Dagegen könnten die absehbaren Lastspitzen bei ungesteuerter Beladung bereits bei einer relativ geringen Fahrzeugzahl zu erheblichen Problemen führen. Daher ist eine intelligente Ladesteuerung mittelfristig unvermeidlich, um problematische Spitzenlasten, Preisverwerfungen und eine Gefährdung der Netzstabilität zu vermeiden. Bei einer Umsetzung des *Vehicle-to-Grid*-Konzepts könnten Elektrofahrzeuge wertvolle Systemdienstleistungen für das Elektrizitätssystem bereit stellen, deren Bedeutung im Stromnetz in Zukunft tendenziell noch steigt. V2G eignet sich vor allem für die Bereitstellung von Regelleistung. Für speicherintensive Zwecke wie die Aufnahme von Überschussstrom aus erneuerbaren Energien erscheinen Elektrofahrzeuge dagegen weniger geeignet. Daher sollte der häufig diskutierte Beitrag der Elektromobilität zur zusätzlichen Systemintegration fluktuierender erneuerbarer Energien in das Stromnetz nicht überschätzt werden. Voraussetzung für V2G sind standardisierte Netzverbindungen und ein koordiniertes Batteriemanagement. Aus heutiger Sicht ist noch nicht geklärt, welche Marktakteure für den Aufbau der Infrastruktur und die Steuerung der V2G-Operationen zuständig sein sollten.

Welchen Beitrag kann die Elektromobilität zur Nachhaltigkeit des Verkehrssektors leisten? Auch wenn in diesem Rahmen keine umfassende Bewertung der sozialen, ökonomischen und ökologischen Dimensionen der Nachhaltigkeit vorgenommen werden kann, wird mit Hinblick auf die Potenziale zur Emissionsminderung und Ressourcenschonung deutlich, dass die Elektromobilität einen wichtigen Baustein eines nachhaltigen Mobilitätskonzepts darstellen kann. Sie muss dazu allerdings in ein weiter gefasstes, zukunftsfähiges Gesamtkonzept eingebunden werden, das über den motorisierten Individualverkehr hinaus geht. Auch wenn dieser heute teilweise unverzichtbar ist für den Berufsverkehr, für Freizeitaktivitäten und die Teilhabe am gesellschaftlichen Leben, so bringt er doch erhebliche Nachteile mit sich. Dazu zählen externe Effekte wie Unfälle, die Zerschneidung von Lebensräumen, der fortschreitende Flächenverbrauch, die ineffiziente Nutzung städtischen Raums, die Überlastung knapper Verkehrsinfrastruktur sowie Einschränkungen der Lebensqualität nicht motorisierter Verkehrsteilnehmer. Der bloße Austausch von Verbrennungsmotoren durch elektrische Antriebe ändert an diesen Problemen kaum etwas. Es kann daher nicht Ziel einer nachhaltigen Verkehrspolitik sein, die heutige Auto-Mobilität einfach auf Elektrofahrzeuge umzustellen. Vielmehr sollte die Notwendigkeit der Nutzung individueller motorisierter Verkehrsmittel so weit wie möglich vermindert werden. Dies lässt sich beispielsweise durch eine verkehrsvermeidende Stadtplanung und eine gesteigerte Attraktivität des öffentlichen Personenverkehrs erreichen, der heute bereits zu einem großen Teil elektrifiziert ist und entsprechende Effizienz- und Umweltvorteile mit sich bringt. Nicht zuletzt erscheinen elektrische Fahrzeuge aufgrund ihrer hohen Anschaffungskosten, ihrer leichten Bauweise und ihrer Reichweitenbeschränkung besonders geeignet für flexible und intermodale Fahrzeugnutzungskonzepte wie zum Beispiel Car-Sharing. Der Einstieg in die Elektromobilität bietet die Chance, den anhaltenden Trends zu immer höheren Motorleistungen zu durchbrechen und das heute häufig noch vorherrschende Leitbild des motorisierten Individualverkehrs zu überdenken, nach dem jeder Haushalt über mindestens ein Fahrzeug verfügen muss, das für möglichst alle Transportzwecke einsetzbar ist. An-

dererseits ist jedoch denkbar, dass Verbraucher durch das „grüne“ Image und die geringen variablen Kosten elektrischer Fahrzeuge zu erhöhten Fahrleistungen motiviert werden. Ein derartiger Rebound-Effekt sollte von Anfang an bedacht und möglichst vermieden werden.

Literaturverzeichnis

- acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (2010): *Stellungnahme: Wie Deutschland zum Leitanbieter für Elektromobilität werden kann*. Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag.
- Andersen, Poul H., John A Mathews und Morten Rask (2009): Integrating private transport into renewable energy policy: The strategy of creating intelligent recharging grids for electric vehicles. *Energy Policy*, 37, 2481–2486.
- Andersson, S. L., A. K. Elofsson, M. D. Galus, L. Göransson, S. Karlsson, F. Johnsson und G. Andersson (2010): Plug-in hybrid electric vehicles as regulating power providers: Case studies of Sweden and Germany. *Energy Policy*, 38 (6), 2751–2762.
- Angerer, Gerhard, Frank Marscheider-Weidemann, Matthias Wendl und Martin Wietschel (2009): *Lithium für Zukunftstechnologien: Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität*. Karlsruhe, Fraunhofer ISI.
- Biere, David, David Dallinger und Martin Wietschel (2009): Ökonomische Analyse der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen. *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 2, 173–181.
- Birnbaum, K., J. Linssen, P. Markewitz, D. Martinsen, S. Vögele, P. Froeschle und J. Wind (2009): Elektromobilität: Auswirkungen auf die elektrische Energieversorgung. *BWK* 61, 1/2, 67–74.
- Blank, Tobias, Wolfgang Mauch, Tomás Mezger und Ulrich Wagner (2008): Zusätzlicher Energie und Leistungsbedarf für Elektrostraßenfahrzeuge. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 58 (12), 50–52.
- BMU (2009): Erneuerbare Energien in Zahlen. Berlin, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).
- BMVBS (2009): Verkehr in Zahlen 2009/2010. Vol. 38. Hamburg Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- BMW (2008): Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen I. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi.
- BMW (2009): Stromerzeugungskapazitäten und Bruttostromerzeugung nach Energieträgern. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi.
- Bundesregierung (2009): Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Berlin, Bundesregierung.
- Elmer, Carl-Friedrich (2010): CO₂-Emissionsstandards für Personenkraftwagen als Instrument der Klimapolitik im Verkehrssektor – Rationalität, Gestaltung und Wechselwirkung mit dem Emissionshandel. *Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung*, 79 (2), 160–178.
- Erdmann, Georg (2009): CO₂-Emissionen von Batterie-Elektrofahrzeugen. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 59 (10), 66–71.
- Frondel, Manuel und Matthias Peistrup (2009): Das Automobil der Zukunft – ein Elektroauto? *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 59 (8), 64–67.
- Gerbracht, Heidi, Dominik Möst und Wolf Fichtner (2009): Elektromobilität – Auswirkungen auf das Energiesystem. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 59 (11), 66–69.

- Gilbert, Richard und Anthony Perl (2007): Grid-connected vehicles as the core of future land-based transport systems. *Energy Policy*, 35 (5), 3053–3060.
- Guille, Christophe und George Gross (2009): A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation. *Energy Policy*, 37 (11), 4379–4390.
- Hackbarth, André, Gregor Schürmann und Reinhard Madlener (2009): Plug-in Hybridfahrzeuge: Wirtschaftlichkeit und Marktchancen verschiedener Geschäftsmodelle. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 59 (7), 60–63.
- Hausman, Jerry A. (1979): Individual Discount Rates and the Purchase and Utilization of Energy-Using Durables. *The Bell Journal of Economics*, 10 (1), 33–54.
- Heymann, Eric und Meta Zähres (2009): *Automobilindustrie am Beginn einer Zeitenwende*. Frankfurt a. M., Deutsche Bank Research.
- Kempton, Willett und Jasna Tomic (2005a): Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue. *Journal of Power Sources*, 144 (1), 268–279.
- Kempton, Willett und Jasna Tomic (2005b): Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy. *Journal of Power Sources*, 144 (1), 280–294.
- Lache, Rod, Patrick Nolan, Dan Galves, Gaetan Toulemonde, Jochen Gehrke, Kurt Sanger, Vincent Ha, Rao Srinivas und Joel Crane (2008): *Electric Cars: Plugged In*. Deutsche Bank FITT Research.
- Lund, Henrik und Willett Kempton (2008): Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G. *Energy Policy*, 36 (9), 3578–3587.
- Pehndt, Martin, Ulrich Höpfner und Frank Merten (2007): *Elektromobilität und erneuerbare Energien*. Heidelberg, Wuppertal, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- Schill, Wolf-Peter und Claudia Kemfert (2009): *The Effect of Market Power on Electricity Storage Utilization: The Case of Pumped Hydro Storage in Germany*. DIW Discussion Paper. 947.
- Sovacool, Benjamin K. und Richard F. Hirsh (2009): 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), 1095–1103.
- Steiger, Wolfgang (2008): Elektrofahrzeuge – die Zukunft von Volkswagen? Fährt das Auto der Zukunft elektrisch? Berlin, Bündnis 90/Die Grünen Bundestagsfraktion.
- Thompson, Philip B. (1997): Evaluating energy efficiency investments: accounting for risk in the discounting process. *Energy Policy*, 25 (12), 989–996.
- Tillmetz, Werner (2009): Neue Technologien sollen Kraftstoff sparenden Autos zum Durchbruch verhelfen. *ew – das magazin für die energie wirtschaft*, 108 (17–18), 30–32.
- Tomic, Jasna und Willett Kempton (2007): Using fleets of electric-drive vehicles for grid support. *Journal of Power Sources*, 168 (2), 459–468.
- Turrentine, Thomas S. und Kenneth S. Kurani (2007): Car buyers and fuel economy? *Energy Policy*, 35 (2), 1213–1223.
- Umweltbundesamt (2009): *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2009*. Nationaler Inventarbericht Zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990–2007. Dessau, Umweltbundesamt.
- U.S. Geological Survey (2010): *Mineral commodity summaries 2010*. Washington, D. C., Geological Survey.
- VCÖ (2009): Potenziale von Elektro-Mobilität. Wien, VCÖ-Forschungsinstitut.
- Wietschel, Martin und David Dallinger (2008): Quo Vadis Elektromobilität? *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 58 (12), 8–16.