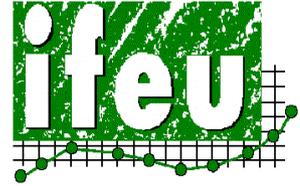


Wuppertal Institut
für Klima, Umwelt, Energie
GmbH



Elektromobilität und erneuerbare Energien

Arbeitspapier Nr. 5 im Rahmen des Projektes

„Energiebalance – Optimale Systemlösungen für Erneuerbare
Energien und Energieeffizienz“

sowie im Beratungsprojekt

„Beratungsleistungen sowie Erarbeitung von Stellung-
nahmen/Kurzgutachten für das Bundesumweltministerium zu
systemanalytischen und ökologischen Fragestellungen im
Zusammenhang mit der Fortentwicklung einer Gesamtstrate-
gie zum weiteren Ausbau erneuerbarer Energien“

Dr. Martin Pehnt, Dr. Ulrich Höpfner

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
Wilckensstr. 3
D-69120 Heidelberg

Frank Merten

Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie
Döppersberg 19
D-42103 Wuppertal

Heidelberg, Wuppertal, November 2007

Inhalt

| | |
|---|----|
| Inhalt | 2 |
| Einleitung | 3 |
| 1 Die zunehmende Elektrifizierung des motorisierten Individualverkehrs..... | 3 |
| 2 Umweltaspekte..... | 5 |
| 2.1 Umweltwirkungen vor Ort..... | 5 |
| 2.2 Klimagasemissionen..... | 5 |
| 2.3 Diversifizierung | 7 |
| 2.4 Kompatibilität mit dem Atomausstieg | 7 |
| 3 Wirtschaftlicher Kontext..... | 8 |
| 3.1 Energiewirtschaft | 8 |
| 3.2 Betankungs-Infrastruktur..... | 8 |
| 3.3 Vermiedene Kraftstoffkosten, Mineralölsteuer..... | 9 |
| 3.4 Kilometer-Kosten | 9 |
| 4 Elektromobilität und erneuerbarer Energien..... | 9 |
| 4.1 Wechselwirkung erneuerbare Energien und Elektromobilität | 9 |
| 4.2 Elektromobilität und der „Nachweis“ grünen Stroms | 10 |
| 4.3 Elektroautos als Last für zusätzlichen EE-Strom..... | 12 |
| 4.4 Elektroautos zur Integration erneuerbarer Energien..... | 12 |
| 5 Diffusion von Elektroautos in den Markt..... | 15 |
| 6 Literatur | 15 |

Einleitung¹

Elektromobilität ist zunächst eine Maßnahme, die die Effizienz des Antriebsstrangs – definiert über die erforderliche Endenergie pro Fahrdienstleistung – erhöht. Es sei vorausgeschickt, dass **sämtliche Effizienzmaßnahmen am Fahrzeug** (Leichtbau, Reduktion der Fahrwiderstände, Modellwechsel, etc.) **auch bei Elektroautos durchzuführen sind und diesen sogar in besonderem Maß zu Gute kommen**, weil dadurch der Bedarf an Batteriekapazität sinkt und sich dies überproportional auf Gewicht und Kosten auswirkt.

Dieses Arbeitspapier legt seinen Schwerpunkt auf die **Rolle eines zunehmenden Einsatzes von Elektrizität im Straßenverkehr** im Kontext einer zunehmend von erneuerbaren Energien geprägten Gesellschaft. Zur Erhaltung der räumlichen Flexibilität des Straßenverkehrs ist ein Speichern der elektrischen Energie im Fahrzeug notwendig. Hierbei gibt es grundsätzlich unterschiedliche Möglichkeiten:

- das Speichern der elektrischen Energie in einer Batterie in einem rein batteriebetriebenen Fahrzeug („**batteriebetriebenes Elektrofahrzeug**“);
- die Kombination aus Elektroantrieb und einem weiteren, in der Regel auf Verbrennungsmotoren basierenden Fahrzeug („**Hybridfahrzeug**“);
- die Kombination von Hybridfahrzeugen mit einer Anschlussmöglichkeit an das Stromnetz („**Plug-In Hybrid**“ (PHEV))
- und der Einsatz von **Wasserstoff**, der zuvor durch Elektrolyse erzeugt wurde, und über eine **Brennstoffzelle** zum Antrieb eines Elektromotors wieder verstromt wird oder auch direkt für die motorische Verbrennung genutzt wird.

Schwerpunkt dieses Papiers ist die Betrachtung des **Motorisierten Individualverkehrs (MIV)** und dessen Verbindung mit **Batteriefahrzeugen bzw. Fahrzeugen mit einem hohen Batterieanteil** (z. B. Plug-In Hybride).

1 Die zunehmende Elektrifizierung des motorisierten Individualverkehrs

Fortschritte in der Batterie-, Motoren- und Getriebetechnik, aber auch in der Informations- und Kommunikationstechnik lenken die Aufmerksamkeit wieder auf eine zunehmende Elektrifizierung der Fahrzeuge. Während Elektroautos mit nennenswerten Batterieanteilen bislang auf wenige Fahrzeuge bzw. auf das Segment der Elektroleichtfahrzeuge beschränkt waren, wird derzeit die Einsatzfähigkeit von Batterien mit hohen Speicherkapazitäten auch für herkömmliche Pkw untersucht.

Dabei wird unter dem Begriff „Hybrid-Antrieb“ der Verbrennungsmotor von einem Elektromotor unterstützt, um die Nachteile des Verbrennungsmotors, vor allem hinsichtlich des geringen Wirkungsgrades im Teillastbetrieb, zu reduzieren. Hier werden dann je nach Anteil dieser Unterstützung verschiedene Hybrid-Formen unterschieden: während bei **Mild Hybrids** in

¹ Im Zusammenhang mit der Diskussion um das Integrierte Energie- und Klimaschutzpaket wurde auch die Frage nach der Sinnhaftigkeit von Elektromobilität gestellt. BMU IG I 5 und KI III 1 baten daher IFEU und Wuppertal Institut, im Rahmen des Projekts „Energiebalance – Optimierte Systemlösungen für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz“, Arbeitspaket Technikradar, ein Arbeitspapier zu erstellen, das eine erste Einordnung der Elektromobilität im Kontext erneuerbarer Energien erlaubt.

typischen Fahrsituationen nur ein geringer Teil der Antriebsenergie über den elektrischen Antriebsstrang läuft, kann der Elektromotor beim **Voll-Hybrid**-Antrieb das Fahrzeug auch selbständig antreiben.

Somit bietet sich beim Voll-Hybrid-Antrieb die Möglichkeit, durch den Einbau einer vergrößerten Batterie bestimmte Strecken auch rein elektrisch zurück zu legen. Die Batterie kann über das Stromnetz (z.B. nachts in der Garage) geladen werden. Solche Fahrzeuge werden derzeit unter dem Begriff „Plug-In-Hybrid“ in der Fachöffentlichkeit verstärkt diskutiert. Bei einem PHEV-Antriebskonzept könnte also ein Teil der jährlichen Fahrleistung elektrisch erbracht werden, ohne dass der Nutzer Einschränkungen gegenüber einem konventionell angetriebenen Fahrzeug in Kauf nehmen müsste.

Bei der Betrachtung des tatsächlichen Nutzerverhaltens zeigt sich, dass der durchschnittliche Pkw-Fahrer an etwa 80 % der Tage eines Jahres weniger als 40 km zurücklegt. Diese Strecken machen in Summe mehr als die Hälfte der jährlichen Fahrleistung aus. Mit einem Plug-In-Hybrid-Fahrzeug, dessen Batterie eine Reichweite von 40 km erlauben würde, könnte mehr als die Hälfte der jährlichen Fahrleistung des durchschnittlichen Pkw-Fahrers rein elektrisch zurückgelegt werden. Das Vorhandensein eines Verbrennungsmotors sichert zugleich eine Abdeckung der Langstreckenfahrten.

Die großen **Fortschritte auf dem Batteriesektor** lassen eine solche Entwicklung realistisch erscheinen. Gesenkte Innenwiderstände beispielsweise reduzieren Ladeverluste und erlauben höhere Lade- und Entladeleistungen. In den letzten 10 Jahren hat es eine enorme Verbesserung vor allem im Bereich der Energie- und Leistungsdichte und der Sicherheitseigenschaften gegeben. Dies war auf den extrem hohen Bedarf von Batterien für Mobiltelefone und Notebooks und der damit verbundenen F&E zurückzuführen. Aufbauend auf den Fortschritten der Batterien für den Consumer Electronic Market (max. 50 Wh) hat man in der Zwischenzeit auch Batterien für Hybridfahrzeuge (1-2 kWh) entwickelt. Außerdem hat die Lebensdauer und Zyklenfestigkeit von Batterien erheblich zugenommen.²

Gleichwohl ist die Übertragung dieser Ergebnisse auf Plug-In-Fahrzeuggatterien (6-10 kWh) oder auf Fahrzeugantriebsbatterien (30 kWh) und Energiespeicherbatterien (> 10 kWh) auch weltweit in Bezug auf Kosten, Sicherheit und Lebensdauer ambitioniert.

Die **Batterietechnologie ist in Deutschland** seit Mitte der neunziger Jahre im Vergleich zu Brennstoffzellen zurückgefahren worden. Gründe dafür waren (Tillmetz und Garche 2007):

- technische, ökonomische und ökologische Defizite beim Elektrofahrzeug-Großversuch Rügen Beginn der 90er Jahre und damit der „Abschied“ vom Elektrofahrzeug in Deutschland;
- der Verkauf großer deutscher Batteriefirmen ins Ausland und
- eine starke Abnahme der Produktion mikroelektronischer Konsumgüter und damit des Bedarfs von Batterien und Batterie-F&E in Deutschland.

Die direkte Speicherung der elektrischen Energie in einer Traktionsbatterie führt zu einem höheren Gesamtwirkungsgrad als der Einsatz von Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen. Allerdings führt die (vor allem im Verhältnis zu flüssigen Kohlenwasserstoffen) relativ geringe Energiedichte von Batterien auch zu relativ geringen Reichweiten reiner Batteriefahrzeuge. Daher kommen diese primär für den städtischen Verkehr in Frage. Um die ganze

² Für einen ausführlichen Bericht über den technischen Stand der Batterietechnologie siehe (Kalhammer et al. 2007).

Palette der mobilen Anwendungen abdecken zu können, ist hier auch auf absehbare Zeit noch ein „Range Extender“ i.d.R. in Form eines Verbrennungsmotors erforderlich. Dagegen ermöglichen Fahrzeuge mit Brennstoffzelle auch bei langen Strecken einen rein elektrischen Antrieb.

Allerdings ist auch eine Kombination beider Antriebskonzepte denkbar. So könnte anstelle des Range-Extenders auf Verbrennungsmotor-Basis auch eine wasserstoffbetriebene Brennstoffzelle zum Einsatz kommen.

Sowohl Brennstoffzellen- wie auch Batteriefahrzeuge greifen auf identische oder vergleichbare Komponenten wie Batterien, Elektromotoren und elektrisch betriebene Peripherieaggregate zurück. F&E in diesen Bereichen kommt daher beiden Anwendungen gleichermaßen zu Gute. **Brennstoffzelle und Batterie stehen daher nicht in Konkurrenz zueinander, sondern ergänzen sich.**

2 Umweltaspekte

2.1 Umweltwirkungen vor Ort

Die heutigen und in der nächsten Dekade noch verbleibenden lokalen Umweltprobleme des Verkehrssektors in Deutschland bestehen in zu hohen Belastungen mit Partikeln, Stickstoffdioxid und Lärm (Höpfner). An dieser Belastung ist der Verkehr mit Verbrennungsmotoren zu einem wichtigen bis überwiegenden Teil beteiligt.

Der batterie-elektrische Betrieb von Pkw verursacht grundsätzlich keine lokal wirksamen luftgetragenen und verringerte Lärmemissionen. **Elektro-Pkw haben insoweit große ökologische Vorteile vor Ort** gegenüber den Verbrennungs-Pkw, die sich beispielsweise auch in Nutzervorteilen innerhalb von „Umweltzonen“ ausdrücken können. Die Gesamtbilanz der luftgetragenen Schadstoffemissionen durch den Betrieb der Elektro-Pkw ist allerdings von der ökologischen Qualität des genutzten Kraftwerksparks abhängig und in detaillierten Ökobilanzen zu untersuchen.

Zugleich gibt es **eine Reihe von Umweltwirkungen, die durch eine zunehmende Elektromobilität nicht adressiert** werden. Hierzu zählen: Lärmemissionen der außerstädtischen Fahrten, die stärker von Rollgeräuschen als von den Lärmemissionen des Motors geprägt sind (Kolke 1999); Zerschneidung unzerschnittener, verkehrsarmer Räume durch den Ausbau von Verkehrsadern; Verkehrssicherheit oder Aspekte des Verkehrsflusses (Stau).

2.2 Klimagasemissionen

Der Endenergieverbrauch eines Elektro-Pkw hängt von vielen Faktoren ab, die von der Art der Batterie und ihrem Eigenverbrauch über den Wirkungsgrad des Ladegerätes bis hin zu der Größe des Fahrzeuges, der gewählten Fahrtgeschwindigkeit, der Streckenführung (wegen der Bremsenergieerückgewinnung) und dem Nutzungsmuster (Fahrthäufigkeit, Fahrtenlänge, Standtage) reichen. Ein wesentlicher Verlustposten ist auch der Ladevorgang.

Der „Rügen-Versuch“ des BMBF bis Mitte der 90er Jahre zeigte, dass Elektro-Pkw der damaligen Golf-Klasse heute mit einem Endenergieverbrauch (d. h. ab Steckdose) von rund 20 kWh/100 km betrieben werden können.

Dieser Stromverbrauch entspricht einen gleich hohen fossilen Primärenergieverbrauch wie ein fossil betriebener Pkw mit ungefähr 5 bis 6 l Diesel-/Otto-Verbrauch je 100 km. Durch den Aufbau eines neuen Verbrauchssegmentes zeichnen Elektroautos allerdings auch verantwortlich für neue Kraftwerkskapazitäten.³ Für die nächsten Jahre ist vor allem ein großer Zubau an Steinkohlekraftwerken geplant. Ökobilanzen moderner Steinkohlekraftwerke quantifizieren die Treibhausgas-Emissionen pro kWh_{el} auf ungefähr 770 bis 840 g (Pehnt et al. 2007). Legt man 20 kWh/100 km zu Grunde, **liegen die Treibhausgas-Emissionen eines Elektroautos mit angenommener Steinkohlestrom-Aufladung gleich hoch wie die eines 5 bis 6 l-Benziners.**

Für eine genauere Analyse müssen neben den oben benannten Determinanten des Endenergieverbrauchs des Fahrzeuges weitere Aspekte berücksichtigt werden:

- die Laststruktur und der Zeitpunkt des Aufladevorgangs, da u. U. bei einer nächtlichen Aufladung auf Grund der Merit Order des Kraftwerksparks andere Kraftwerke in ihrer Betriebsweise betroffen sind durch ein zusätzliches Nachfragesegment; und
- Szenarien über den zeitlichen Verlauf des Zubaus.

Zu beachten ist außerdem bei der vergleichenden Bewertung des Endenergiebedarfs eines Elektroautos mit dem eines Benziners, dass

- die Ladeverluste beim elektrischen Tankvorgang mitunter beträchtlich sein können (10 bis über 30 %);
- je nach Nutzungsmuster Selbstentladungsvorgänge in der Batterie und Umgebungsbedingungen den Energiegehalt reduzieren können;
- der Verbrauchsvorteil des E- Mobils ist insbesondere im Innerorts-Verkehr ausgeprägt da die Verbrauchswerte hier meist geringer sind als außerorts.

Ausgehend von dieser neutralen (bzw. je nachdem leicht erhöhten (Braunkohle) bzw. reduzierten (gas-basierte Kraftwerke)) Treibhausgasbilanz können Elektro-Autos mit **regenerativem Strom** betrieben werden. Dann kommen zu dem emissionsfreien Betrieb vor Ort die Vorteile des (weitestgehenden) Wegfalls der fossilen Kraftwerksemissionen inkl. derer Klimagasemissionen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass durch den Einsatz im E-Auto **diese regenerative Elektrizität nicht mehr konventionelle, beispielsweise fossile Energiebereitstellung substituieren kann.**

Mit einer Kilowattstunde aus erneuerbarer Energie, die in einem Elektro-Pkw genutzt wurde und somit die Fahrleistung eines entsprechenden fossil betriebenen Pkw ersetzt, werden im Fahrzeug und der vorgelagerten Raffinerie rund 600 bis 800 g fossilen CO₂ substituiert, je nach Endenergieverhältnis und angenommenen Substitutionsbeziehungen auch mehr.

Diese Substitutionswirkung ist in Beziehung zu setzen mit der Einsparung, die durch erneuerbare Energien im Stromsektor erzielt werden können. Energiewirtschaftliche Analysen zeigen, dass beispielsweise eine zukünftige Offshore-Windkraftnutzung vor allem Steinkohlekraftwerke, bei hohen Zertifikatspreisen auch Gas-Kraftwerke substituieren. 1 kWh Offshore-Elektrizität kann über diesen Weg zwischen 600 und 800 g Treibhausgase vermeiden (Abbildung 1). **Durch Einsatz in Elektro-Pkw können erneuerbare Energien also ähnliche Treibhausgas-Minderungen erzielen wie bei einer direkten Einspeisung ins Stromnetz – nicht mehr, aber auch nicht weniger.** In Kapitel 4.1 wird darüber hinaus die

³ In Ökobilanzen spricht man hier von „marginalen“ oder (in Anlehnung an Grenzkosten) „Grenzkraftwerken“.

Frage behandelt, in wie weit eine **zusätzliche** erneuerbare Stromerzeugung möglich erscheint. Solche Betrachtungen gelten auch bei hohen Anteilen erneuerbarer Energien, solange es noch sinnvoll substituierbare fossile Kraftwerke gibt.

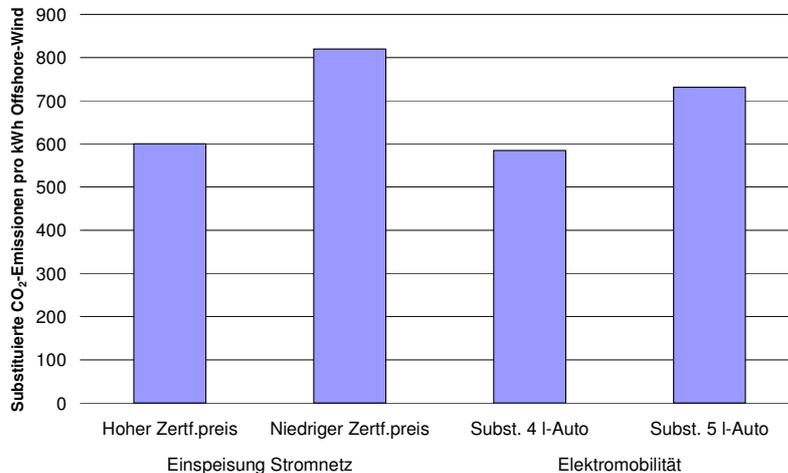


Abbildung 1: Substitutionswirkung von einer kWh aus Wind Offshore bei Einspeisung ins Stromnetz und Nutzung im Elektroauto (eingesparte Netto-CO₂-Emissionen)

Annahmen: Einspeisung ins Stromnetz einschließlich vorgelagerter Ketten; bei Strom zusätzlich berücksichtigt: Regelenergieaufwendungen, Netzausbau etc. Zertifikatspreis hoch: 40 €/t CO₂; niedrig: 10 €/t). Elektromobilität: Elektroauto Verbrauch 20 kWh/100 km inkl. Wirkungsgrad Ladevorgang; Substitution eines Diesel mit 4 bzw. 5l/100 km (Quelle Einspeisung: Pehnt et al. 2007)

Zusammenfassend ist die Klima-**Argumentation** also **zweistufig**: **Selbst wenn Kohlekraftwerke zum Einsatz gelangen, macht man in Bezug auf die Klimabilanz keinen Rückschritt – und erschließt zugleich andere Vorteile der Elektromobilität (lokale Umweltwirkungen, Lärm, Diversifizierung etc.). Dann ist es im zweiten Schritt möglich und notwendig, den Einsatz von erneuerbaren Energien zusätzlich zum EEG-Ausbau voranzubringen** (siehe dazu Kapitel 4).

2.3 Diversifizierung

Der Verkehrssektor ist zu über 95 % vom Energieträger Rohöl abhängig (BMW i 2007). 22,5 Mio Tonnen Ottokraftstoff und 28,5 Mio. Tonnen Dieselmotorkraftstoff wurden im Jahr 2006 in Deutschland konsumiert (Schiffer 2007).

Eine Elektrifizierung ermöglicht hier den Rückgriff des Verkehrssektors auch jenseits des schienen- oder oberleitungsgebundenen Verkehrs auf sämtliche der Stromerzeugung zur Verfügung stehende Energieträger, sowohl konventionelle wie auch erneuerbare. Damit geht eine wesentliche Verbreiterung der Rohstoffbasis einher.

2.4 Kompatibilität mit dem Atomausstieg

Die **Zeitachse des Strombedarfs von E-Autos** wird vorgegeben durch die Geschwindigkeit der Technologieentwicklung, die Marktdurchdringung und den Hybridisierungsgrad. Die Frage des möglichen und sinnvollen Zeitpfads für Elektromobilität wird maßgeblich auch durch die Batteriekosten und den Ausbau der Produktionskapazität für Batterien geprägt.

Selbst **bei 1 Millionen Voll-Elektrofahrzeuge**, eine Zahl, die realistischerweise nicht vor 2020 erreicht werden würde, **ergibt sich ein Verbrauch von lediglich 2 TWh**, d. h. 1/300 des gesamtdeutschen Stromverbrauchs. Dies ist wichtig, wenn es um die **Kompatibilität einer Elektroauto-Strategie mit dem Ausstieg aus der Atomenergie geht**. Dennoch muss sichergestellt werden, dass dieser – wenn auch geringe – zusätzliche Strombedarf vorrangig mit erneuerbaren Energien gedeckt wird (siehe dazu Kapitel 4).

3 Wirtschaftlicher Kontext

3.1 Energiewirtschaft

Der Stromsektor ist geprägt von einem zwar geringen, aber kontinuierlichen Wachstum des Strombedarfs und einem erheblichen Zubaubedarf an Kraftwerkskapazität. Geplant sind zur Deckung des zukünftigen Kapazitätsbedarfs neben den EEG-induzierten erneuerbaren Energieanlagen vor allem Steinkohlekraftwerke, ferner Gaskraftwerke und einige Braunkohlekraftwerke; fast alle ohne Kraft-Wärme-Kopplung.

Neue Stromverbraucher zeichnen daher auch und insbesondere für diese Zubau-Kraftwerke verantwortlich. Das im Rahmen des Aktionsprogramms Energieeffizienz diskutierte Verbot von Nachtspeicher- und Elektrodirektöfen ist ein Beispiel für eine Maßnahme, Nachfrage-segmente (Wärmesektor) aus dem Strommarkt zu eliminieren, um den Zubaubedarf an klimaintensiven Kohlekraftwerken zu drosseln. **Daher ist die Einführung von Elektro-Pkw als zusätzliches stromkonsumierendes Segment besonders intensiv zu prüfen.**

Die Einführung von Elektromobilität wird aus energiewirtschaftlicher Perspektive vor allem dann auf Akzeptanz stoßen, wenn die Fahrzeugausführungen und der Netzanschluss wirtschaftlich sind, die kilometerbezogenen Strompreise im Vergleich zu den Kraftstoffpreisen günstig bleiben und sichergestellt ist, dass der zusätzlich entstehende Strombedarf auch mit *zusätzlichen* erneuerbaren Energie-Anlagen gedeckt wird.

Zugleich entsteht **für die Stromversorger ein neues Absatzsegment**, das über den oberleitungsgebundenen Verkehr hinaus den Absatz von Elektrizität auch im Verkehrssektor steigert, insbesondere in Situationen mit niedriger Last (**Nacht-Aufladung**). Daher kann Elektromobilität auch dazu beitragen, die Wirtschaftlichkeit bestehender (und neu geplanter!) Kraftwerke durch eine Erhöhung der Volllaststunden zu verbessern.

3.2 Betankungs-Infrastruktur

Ein Nachladen von Batterien ist bei Plug-in HEVs (PIHEV) und Full-Elektrofahrzeugen notwendig. Das Nachladen der Batterien wird meist über Nacht mit geringen Stromstärken erfolgen. Ein Schnellladen erfordert Batterien mit hoher Ladeleistung, die auch bei HEV-Batterien gefordert wird. Neben der Batterie muss auch die Infrastruktur für Schnellladungen z.B. an Parkplätzen entwickelt werden, insbesondere Ladegeräte für sehr hohe Leistungen. Für PHEV ist allerdings die erforderliche Ladeleistung für kleine Radien wesentlich niedriger als für reine Elektroautos.

Ein Aufbau eines Netzes an Ladestationen ist zunächst räumlich konzentriert und in Abstimmung mit geplanten Feldtests vorzunehmen, um den investiven Aufwand zu minimieren. Für den weiteren Ausbau ist das Nutzerverhalten entscheidend – hier ist zu untersuchen, wo die

für EV-Anwendungen zur Verfügung stehenden Fahrzeuge am ehesten aufgeladen werden und wie die Bedingungen für eine häusliche Aufladung sind.

Der Aufbau einer **Tankinfrastruktur und akzeptable Tankzeiten** sind **wesentlich für eine hohe Akzeptanz** der Fahrzeuge. Dabei sind die Kosten für den Aufbau einer (zunächst räumlich konzentrierten, dann flächendeckenden) Ladeinfrastruktur noch zu beziffern.

3.3 Vermiedene Kraftstoffkosten, Mineralölsteuer

Durch die (Teil-)Betankung mit Strom wird der Einsatz von Benzin oder Diesel vermieden. Geht man bei der Golf-Klasse von einem Verbrauch von 6 l/100 km und einem Kraftstoffpreis von 1,20 € aus, so liegt die Zahlungsbereitschaft je km bei 7,2 ct/km. Da bei dieser Fahrzeugklasse mit Elektroantrieb etwa 0,2 kWh/km benötigt werden, ergibt sich daraus eine Zahlungsbereitschaft je kWh Strom von 36 ct. (zum Vergleich: 18 ct/kWh bei Haushaltsstrom).

Diese Differenz ergibt sich allerdings vor allem durch die hohe Mineralölsteuer bei Benzin, die anteilig deutlich höher ist als die Steuerabgaben auf Strom. Dementsprechend ist mit dem Einsatz von Strom ein entsprechender Mineralölsteuerausfall verbunden.

3.4 Kilometer-Kosten

Um aus den oben genannten Aspekten – Stromverbrauch, Batteriekosten, Mehrkosten bei der Fahrzeuginvestition, Infrastrukturkosten, Stromkosten in Abhängigkeit von der Lastsituation – kilometerbezogene Kosten auszurechnen, sind detaillierte Modellrechnungen mit teilweise noch unbekanntem Kostenkomponenten durchzuführen. Diese Rechnungen sind im Rahmen dieses Arbeitspapiers nicht möglich. Der Aufbau eines solchen Kostenmodells unter Einbezug verschiedener Teilmodelle erscheint aber wesentlich für eine Quantifizierung der zukünftigen Kosten eines solchen Elektroauto-Pfades.

4 Elektromobilität und erneuerbarer Energien

4.1 Wechselwirkung erneuerbare Energien und Elektromobilität

Die Wechselwirkungen zwischen erneuerbaren Energien und Elektromobilität lassen sich i. w. auf vier Ebenen beschreiben (Abbildung 2):

- der Einsatz erneuerbarer Elektrizität stellt den Fahrstrom für Elektroautos bereit und steht damit nicht mehr zur Einspeisung in das Stromnetz zur Verfügung;
- Elektroautos als Last für zusätzlichen (ggf. „überschüssigen“) erneuerbaren Strom;
- Elektroautos als Quelle für *Regelleistung* und ggf. *Energiespeicherkapazität*⁴;
- der Einsatz erneuerbarer Elektrizität kann u. U. (je nach Kraftstoffstrategie) den Einsatz von Biokraftstoffen substituieren und damit Anbauflächen für den Ernährungssektor, die Nutzung im stationären Sektor oder die stoffliche Nutzung freimachen.

⁴ Zum Unterschied zwischen Leistung und Energie siehe Kapitel 4.4.

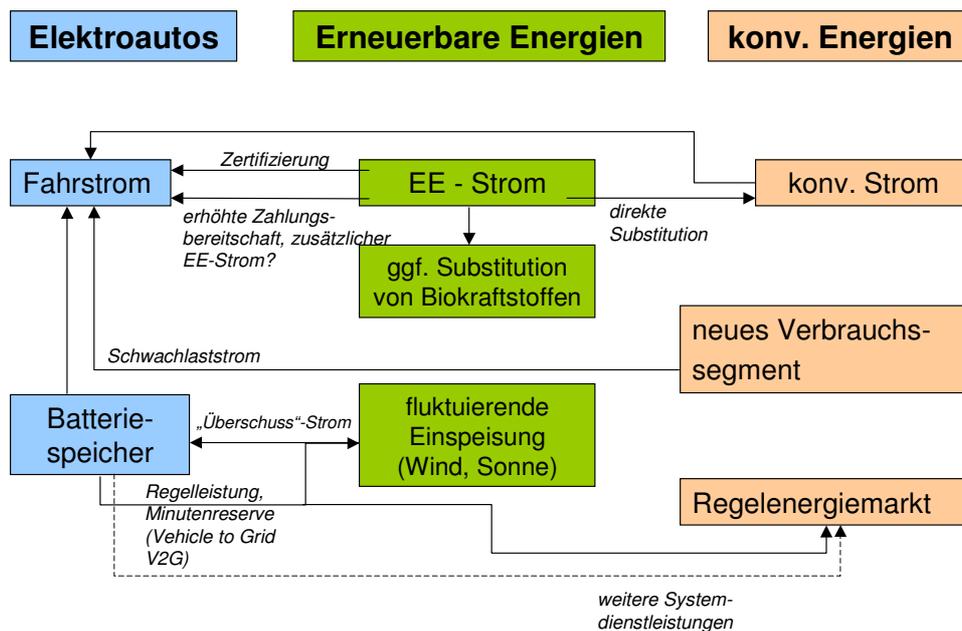


Abbildung 2: Wechselwirkung zwischen erneuerbaren Energien und Elektromobilität

4.2 Elektromobilität und der „Nachweis“ grünen Stroms

Wie in Kapitel 2.2 dargestellt, entsteht bei Elektrofahrzeugen, selbst wenn sie mit konventioneller Elektrizität geladen werden, i. d. R. kein Klimamalus; zugleich werden die anderen ökologischen Vorteile mit erschlossen. Dies sollte aber in einer Gesellschaft, die sich ambitionierte Klimaziele gesteckt hat, nicht ausreichend sein. Es sollte also eine kausale Kopplung von Elektromobilität und erneuerbaren Energien unter größtmöglicher **Zusätzlichkeit der EE-Stromerzeugung** geben. Dabei ist zu beachten, dass es oftmals auch zu **Rebound-Effekten** kommt, welche die Zusätzlichkeit dieser Maßnahmen mindern.⁵

Eine Möglichkeit der Verbindung von Elektro-Mobilität mit erneuerbaren Energien ist die elektrotechnische „**Leitungsführung**“ in einer Art, dass nur eine Versorgung mit erneuerbaren Energien möglich ist, z. B. der Direktanschluss einer Fahrzeugflotte an einen Offshore-Windpark. Eine solche unmittelbare Verbindung ist aber i. d. R. volkswirtschaftlich ineffizient und eignet sich nur für Pilot- oder Leuchtturmprojekte, wo es auf einen zusätzlichen Marketingeffekt ankommt.

Sinnvoller ist der Nachweis von **zertifiziertem Grünen Strom** in Kombination mit Tankstellen-Zertifikat. Als **Voraussetzung für beispielsweise die Gewährung eines Förderprogramms für Elektromobilität** könnte der jährliche Nachweis des Bezugs von zertifiziertem Ökostrom gefordert werden (dazu Stromzähler im Fahrzeug erforderlich). Besondere Bedeutung hat dann das **Zusätzlichkeitskriterium** des Ökostroms (über die durch das EEG induzierten Strommengen hinaus). Hier sind die verschiedenen Ökostrom-Label unterschiedlich gut geeignet, diese Zusätzlichkeit zu gewährleisten.

Um eine optimale Systemintegration von Elektromobilität zu erreichen, wäre drittens eine **kommunikationstechnische Vernetzung** mit Übertragungs- und/oder Verteilnetzbetreibern

⁵ Beispielsweise ein Anstieg der Fahrleistung, weil jetzt „ökologisch verträglich“ betankt wird. Zum Rebound-Effekt gibt es eine Reihe von Untersuchungen im Rahmen der Nutzung grünen Stroms, aber nach Kenntnis der Autoren nicht in Bezug auf Elektromobilität.

möglich. Hier könnten zusätzlich zum Nachweis von Ökostrom-Bezug Elektroautos das Signal für bevorzugte Ladezeiten erhalten, beispielsweise in Starkwindzeiten oder Netzbelastungssituationen. Dies ist besonders wichtig, da die Elektro-PKW vor allem den Anforderungen der Nutzer (fahrbereit) entsprechen müssen und daher eben auch Strom-Verbraucher sind. Solche Anreize können beispielsweise über flexible Tarife (sog. Price response) gesetzt werden.

Ein solches Signal muss allerdings nicht kausal auf Energieanlagen auf Basis erneuerbarer Energieträger zurückgehen, sondern könnte auch die allgemeine Netzsituation (Ausfall großer Lasten oder konventioneller Kraftwerke etc.) berücksichtigen.

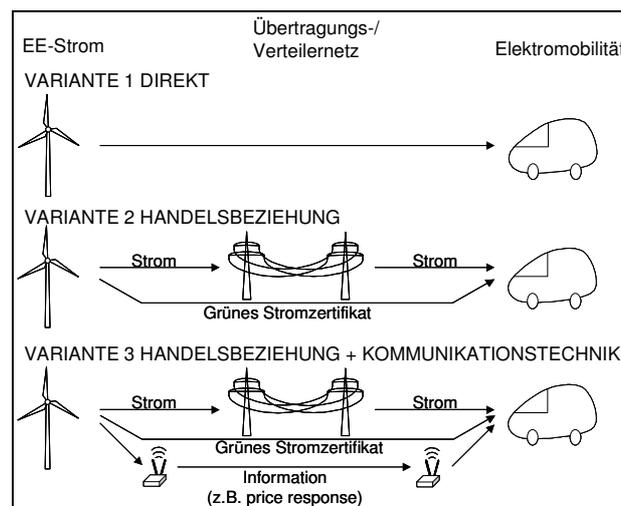


Abbildung 3: Vernetzungsmöglichkeiten von EE und Elektromobilität

Die Kombination aus einem mengenmäßigen Nachweis über Handelsbeziehungen mit zusätzlichen Lastmanagement-Anreizen würde die Treibhaus-/Ressourcenvorteile mit den Netz-Integrationsvorteilen von erneuerbaren Energien koppeln.

Ein physikalischer Herkunftsnachweis (**das „erneuerbare Elektron“**) ist nicht notwendig.⁶

Zur Ansteuerung und Regelung der Fahrzeuge ist eine Kommunikationstechnologie erforderlich (z. B. auf Basis des Mobilfunknetzes), die folgende Aufgaben erfüllt:

- Übermittlung fahrzeugspezifischer Informationen (Standort, Speicherstand, Prioritätseinstellungen⁷)
- Abrechnungsinformationen (Verknüpfung von Tarifen und Ladevorgängen)
- Ggf. Strompreissignale (bei zeitvariablen Tarifen), auf Grundlage derer die Fahrzeugelektronik einen Ladevorgang in den Weg leiten kann.

Grundsätzlich **stehen diese Technologien zur Verfügung** bzw. werden im Rahmen der Entwicklungsarbeiten für Smart Metering und andere verwandte Märkte entwickelt.⁸

⁶ Hier gilt ja, wie auch in der Ökostrom-Diskussion, das Modell des Sees (Stromnetz), in den Bäche unterschiedlicher Qualität einspeisen. Für die Wasserqualität (THG-Emissionen der Strombereitstellung) ist letztendlich die bilanztechnische Summe aus den Verunreinigungen der Bäche entscheidend, nicht die Qualität des einzelnen Wassermoleküls.

⁷ Beispielsweise könnten Fahrer Prioritäten einstellen, wann, wie weit etc. eine Batterie ge- bzw. (bei V2G ent-) laden werden soll.

⁸ Siehe z. B. das Eenergy-Programm des BMWi.

4.3 Elektroautos als Last für zusätzlichen EE-Strom

Elektro-Pkw mit integrierter „Steckdose“ für den direkten Anschluss an das Stromnetz (PHEV) können auf verschiedene Weisen zu einer Verbesserung der EE-Integration beitragen. Zunächst stehen sie grundsätzlich als zusätzliche Lasten zum einen für die Abnahme von „Grundlast“-strom zur Verfügung. Dies ist insbesondere für die Betreiber von Kraftwerken mit potenziell hohen Volllaststunden zur Steigerung ihrer Wirtschaftlichkeit von Interesse. Sie können aber auch zur **Speicherung von „überschüssigem“ EE-Strom** eingesetzt werden. Hierzu ist allerdings zunächst zu bestimmen, was genau unter überschüssigem EE-Strom zu verstehen ist. Zum einen kann es sich um EE-Strom handeln, der aufgrund begrenzter Netzkapazitäten nicht abtransportiert bzw. verteilt werden kann und der im Fall eines Erzeugungs- bzw. Einspeisemanagement durch eine Abregelung der Anlagen nicht erzeugt werden kann. Nennenswerte Mengen sind hier nur regional begrenzt und bei weiterem Ausbau der Windenergie an Land zu erwarten. Eine Größenordnung möglichen „Überschuss-Stroms“ wurde in (Wietschel et al. 2006) abgeleitet: „Die hier durchgeführten Simulationen haben ergeben, dass bei einer installierten [Windanlagen-] Kapazität in der Nordseeregion von 38 GW bzw. 48 GW und einer unterstellten Grundlast knapp 7,1 % bzw. 17,3 % der regional produzierten jährlichen Windenergie vom Stromnetz nicht mehr abgenommen werden können.“

In diesem Fall müssten die Elektro-PKW zur Speicherung direkt bei den Einspeisern (vor allem Windkraftparks) angeschlossen werden, was aus logistischen und mengenmäßigen Gründen nicht sinnvoll sein wird (mit Ausnahme von marketingorientierten Pilotprojekten). Zum anderen kann es sich um eine Überspeisung des Bilanzkreises handeln (mehr Einspeisung als Nachfrage). In diesem Fall könnten Elektro-PKW als Speicher für den Ausgleich des Bilanzkreises eingesetzt werden.

4.4 Elektroautos zur Integration erneuerbarer Energien

Grundsätzlich kann von den Batterien der Elektro-Pkw auch Strom ins Netz zurückgespeist werden. In den USA werden derartige Szenarien ausführlich diskutiert – siehe Modellierungen der University of Delaware unter den Termini „**Vehicle to Grid**“, **V2G**. Dazu bedarf es ausführlicher Betrachtungen und vor allem des Aufbaus einer entsprechenden Infrastruktur. Bereits relativ wenige, netzgekoppelte Elektro-PKW können zur **lokalen Verbesserung der Netz- bzw. Spannungsqualität** herangezogen werden, in dem sie bei Bedarf als Senke und als Quelle zu- oder abgeschaltet werden. Sie können auf diese Weise auch direkt zum lokalen Lastausgleich beitragen und damit die Belastung der vorgelagerten Netzebenen sowie den notwendigen Einsatz von Regelreserven reduzieren helfen. Dies wird besonders vor dem Hintergrund steigender Anteile von EE- bzw. EEG-Anlagen im Niederspannungs- und Mittelspannungsnetz und damit ggf. steigender Bedeutung von Erzeugungsmanagement in diesen Netzebenen relevant.

Sehr viele Elektro-PKW können ferner prinzipiell zu einem **virtuellen Regelkraftwerk** zusammenschaltet werden. Dieses kann dann sowohl allgemein als auch mit besonderem Bezug zur fluktuierenden Stromerzeugung aus EE eingesetzt werden. Ein Ersatz konventioneller Regelkraftwerkskapazitäten ist somit denkbar. Hierbei ist allerdings deutlich zu unterscheiden zwischen den rein technischen Möglichkeiten der verschiedenen Elektro-PKW einerseits und den systemtechnischen Möglichkeiten für ihre zuverlässige und adäquate Integration in das bestehende System bzw. für die Anpassung des bestehenden Systems ande-

rerseits. Letzteres stellt aus heutiger Sicht eine erhebliche Hürde dar, da **das jetzige System** und die Abläufe **nicht für die dezentrale Bereitstellung von Netzdienstleistungen ausgelegt** und konzipiert ist.

Aufgrund der bereits integrierten Speicher können Elektro-PKW ab einer gewissen Durchdringungsrate (kritischen Masse) zur Aufrechterhaltung einer lokalen Notstromversorgung (**Inselnetzbildung**) beitragen. Sie können somit eine sehr wichtige Funktion im Sinne einer regionalen Energie- und Leistungsautonomie übernehmen und dabei von vorhandenen dezentralen EEG-Anlagen profitieren, da diese selber nicht netzbildend sind, sondern immer ein „Netz“ (Frequenz und Spannung) benötigen. Angesichts der tendenziell sehr hohen Ausbaudynamik von EEG-Anlagen in der Nieder- und Mittelspannungsebene besteht hier allerdings bereits bald ein dringender Handlungs- und Lösungsbedarf (siehe Schmiege 2007). Eine marktübliche Einführung von Elektro-PKW wird hierfür zu lange dauern, so dass vorher bereits andere Lösungen gefunden werden müssen.

Allerdings muss die Netz-/Systemintegration erneuerbarer Energien insgesamt in einem Zusammenspiel aus Vernetzung der Erzeugung, Lastmanagement, Speichern und flexiblerer Betriebsweise konventioneller Kraftwerke erfolgen.

Es ist nicht zielführend, einseitig auf Speichertechnologien zu setzen. Vielmehr gibt es große noch unerschlossene Lastmanagement-Potenziale und Möglichkeiten, durch die Betriebsweise des Kraftwerksparks und die Vernetzung vieler EE-Anlagen untereinander die Einbindung von EE auch bei höheren Anteilen zu gewährleisten. Wesentliche Speicherpotenziale werden erst bei deutlich höheren Durchdringungen fluktuierender EE erforderlich, also nach 2020 (Abbildung 4).

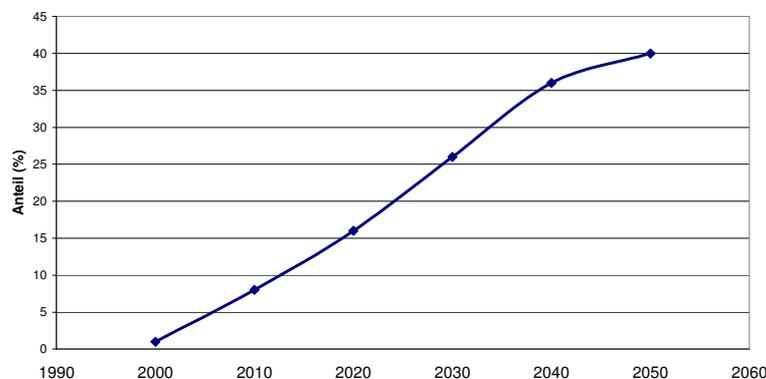


Abbildung 4: Anteil fluktuierender Energieträger an der Brutto-Stromerzeugung im BMU-Leitszenario 2007 (Nitsch 2007)

Elektroautos speichern wenig *Energiemenge* in ihrer Batterie – die zur Einspeicherung bzw. Entladung zur Verfügung stehende Menge wird zudem durch die erforderliche Restmenge für die Fahrten, die maximal zulässige Tiefentladung, die erlaubte Zyklenzahl und das Energiemanagement begrenzt. Aber ihre kumulierte Anschlussleistung ist insgesamt hoch.

1 Millionen Elektroautos können lediglich 10 GWh an elektrischer Energie aufnehmen, wenn man 10 kWh/Fahrzeug zu Grunde legt. Dies **entspricht wenig mehr als der Speicherinhalt eines großen Pumpspeicherkraftwerks** (Goldisthal: 8,5 GWh). Hingegen liegt das Speicherpotenzial von Druckluftspeichern insgesamt bei rd. 3 TWh, also drei Größenordnungen höher.

Während also das **Energiespeicherpotenzial von Elektroautos nicht überschätzt werden darf**, ist das **Angebot** von Elektroautos an möglicher **Regelleistung groß**. Die 1 Millionen Fahrzeuge könnten theoretisch 3 GW an positiver/negativer Regelleistung bereitstellen (Annahme: Anschlussleistung 3 kW⁹). Dies ist knapp die Hälfte der gesamten installierten Pumpspeicher-KW-Leistung (6,7 GW_{el}).

Unter Berücksichtigung der verschiedenen Arten an Regelleistungsreserven und Elektro-PKW ergeben sich sehr verschiedene Potenziale und Anforderungen im Sinne von verfügbaren Fahrzeugen für den Einsatz von Elektro-PKW als Baustein eines virtuellen Regelkraftwerks, wie sie in der **Tabelle 1** exemplarisch für bestehende und prototypische Elektro-PKW dargestellt sind. Demnach würden für den Einsatz im Bereich der Minutenreserve am wenigsten Elektro-PKW benötigt, da hier bereits relativ niedrige Blockgrößen auf dem Markt angeboten werden können. Zudem wird die jeweils verfügbare Anschlussleistung des Netzes in vielen Fällen, insbesondere bei Kapazitätssteigerung der Batterien, die wesentliche Grenze für die verfügbare, netzgekoppelte Leistung der Elektro-PKW sein. Als vorteilhaft für die Minutenreserve erweist sich außerdem, dass die tatsächlich abgerufene Leistung nur 1 % der vorgehaltenen Minutenreserve beträgt (Deutsche ÜNB in (Wietschel und al. 2007)). Damit wird die Batteriezyklenzahl reduziert.

Tabelle 1: Potenzielle Regelreservebeiträge verschiedener Elektro-PKW-Prototypen und daraus resultierender minimal verfügbarer Elektro-PKW-Bestand

| Elektro-PKW-Typen | Primärregelung (Sekundenreserve) ¹⁾ | Sekundärregelung (Rotierende Reserve) ²⁾ | Tertiärregelung (Minutenreserve) ³⁾ | Stundenreserve |
|--|--|---|--|----------------|
| Batterie: Toyota RAV4 EV | ≤ AL* 8.334 Fz. | ≤ AL* 8.334 Fz. | ≤ 7,0 kW 143 Fz. | – |
| Plug-in Hybrid: DaimlerChrysler Sprinter | ≤ 8,8 kW 11.364 Fz. | ≤ 2,2 kW 45.500 Fz. | ≤ 2,2 kW 455 Fz. | – |
| Brennstoffzelle: Prodigy P2000 | – | ≤ AL* 8.334 Fz. | ≤ AL* 84 Fz. | – |

* Individuelle Anschlussleistung für den jeweiligen Elektro-PKW (Annahme: 12 kW, da meldepflichtige Anschlussgrenze im Niederspannungsnetz)

¹⁾ Für eine Einsatzdauer ≤ 15 min. und eine minimale Blockgröße von 100 MW;

²⁾ Für eine Einsatzdauer ≤ 60 min. und eine minimale Blockgröße von 100 MW

³⁾ Für eine Einsatzdauer ≤ 60 min. und eine minimale geforderte Blockgröße von 1 MW

Quelle: nach Kempton und Tomic 2005; eig. Berechnungen

Wenn V2G-Fahrzeuge in Flottenanwendungen oder in räumlich konzentrierten Anwendungen an das Netz angeschlossen werden, **kann es** durchaus **vorkommen, dass die Kapazitäten des lokalen Netzes nicht ausreichend sind** (Wietschel et al. 2007). Bei einer ver-

⁹ Begrenzt durch die Anschlussleistung; in der Praxis sind auch deutlich höhere Anschlussleistungen denkbar, siehe z. B. Dreiphasenanschluss.

stärkten V2G-Nutzung muss daher die Netzeinbindung der Fahrzeuge insbesondere auf Niederspannungsebene beachtet werden. Der Aufbau eines Netzes an Ladestationen muss schrittweise erfolgen.

4.5 Substitution von Biokraftstoffen

Durch die Einführung erneuerbarer Elektrizität werden – **je nach Anerkennung grünen Stroms im Rahmen der Biokraftstoff-Zielsetzung** und Steuerung der Stoffströme durch Steuererleichterung, Beimischungspflicht und Einspeisetarifen – u. U. Anbauflächen für nachwachsende Rohstoffe frei, die dann anstelle des Biokraftstoff-Sektors klimaeffizienter in den Sektoren Stoffliche Nutzung und Stationäre Nutzung (v. a. KWK) oder für andere agrarische Zwecke eingesetzt werden können. Auch solche Effekte sind ganzheitlich zu betrachten.

5 Diffusion von Elektroautos in den Markt

Ein gemeinsamer **Feldtest, der technologieoffen den Einsatz von stark elektrisch geprägten Fahrzeugen erprobt und „Elektromobilität“ mit Leben füllt, aber zugleich einen verfrühten Technologie-Enthusiasmus vermeidet**, ist in Abstimmung der Akteure der Automobil- und Zulieferindustrie, Energieversorger und Netzbetreiber und der Ministerien durchzuführen.

Neben intensiver Batterie- und Fahrzeugforschung muss Begleitforschung die Akzeptanz, Ökobilanz, energie- und verkehrswirtschaftliche und -politische Sinnhaftigkeit der Elektromobilität begleiten und technologische Benchmarks formulieren. Auch gilt es, verschiedene formale Aspekte zu untersuchen, beispielsweise die Berücksichtigung von Plug-in-Anteilen bei Prüfzyklen oder die Anrechnung auf die ACEA-Selbstverpflichtung, sowie die Verbindung mit anderen verkehrsleitenden Maßnahmen (Ausnahmen von einer Parkraumbewirtschaftung oder Fahrrestriktionen, etc.).

Beispielsweise müssen Ökobilanzen darstellen, dass trotz vermehrter ökologischer Aufwendungen für die Herstellung der Fahrzeuge deutliche Umweltentlastungen auftreten. Fragen der Rohstoffverfügbarkeit und der Akzeptanz eines Fernzugriffs auf Speicherkapazitäten sind zu klären.

6 Literatur

BMWi (2007): Energiedaten. Nationale und internationale Entwicklung. Berlin, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.

U. Höpfner Verkehr und Umwelt - Herausforderungen. Broschüre im Auftrag des Bundesumweltministeriums. Download www.bmu.de. Heidelberg, ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung.

F. R. Kalhammer, B. M. Kopf, D. H. Swan, V. P. Roan und M. P. Walsh (2007): Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology. Report of the ARB Independent Expert Panel 2007. Sacramento.

R. Kolke (1999): Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastungen. Brennstoffzellenfahrzeuge. Abschlußbericht. Berlin, Umweltbundesamt.

J. Nitsch (2007): Leitstudie 2007: "Ausbaustrategie Erneuerbare Energien". Stuttgart, im Auftrag des Bundesumweltministeriums.

M. Pehnt, H. Hertle, B. Kauertz, B. Franke, H. Grosscurth und S. Bode (2007): Steinkohlekraftwerk Hamburg-Moorburg. Studie im Auftrag des Bundes für Umwelt und Naturschutz. Heidelberg, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg e. V., arrhenius Institut für Energie- und Klimapolitik.

H.-W. Schiffer (2007): "Deutscher Energiemarkt 2006." *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 57(32-42).

W. Tillmetz und J. Garcke (2007): Auf dem Weg zu einer Batteriestrategie für Deutschland. Ulm, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung.

M. Wietschel et al. (2007): Trends und Szenarien zur Entwicklung der Energietechnologien. Studie im Auftrag der Forschungs- und Entwicklungsabteilung der RWE AG. Karlsruhe, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung.

M. Wietschel, U. Hasenauer, N. J. Vicens, M. Klobasa und P. Seydel (2006): "Ein Vergleich unterschiedlicher Speichermedien für überschüssigen Windstrom" *Zeitschrift für Energiewirtschaft* 30: 103-114.