

acatech DISKUTIERT

> ELEKTROMOBILITÄT

POTENZIALE UND WISSENSCHAFTLICH-
TECHNISCHE HERAUSFORDERUNGEN

REINHARD F. HÜTTL
BERND PISCHETSRIEDER
DIETER SPATH (Hrsg.)

Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl
Dr.-Ing. E.h. Bernd Pischetsrieder
Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2010

Geschäftsstelle
Residenz München
Hofgartenstraße 2
80539 München

Hauptstadtbüro
E-Werk
Mauerstraße 79
10117 Berlin

T +49(0)89/5203090
F +49(0)89/5203099

T +49(0)30/206309610
F +49(0)30/206309611

E-Mail: info@acatech.de
Internet: www.acatech.de

ISBN 978-3-642-16253-4/e-ISBN 978-3-642-16254-1

DOI 10.1007/978-3-642-16254-1

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten waren und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Koordination: Dr. Jens Pape

Redaktion: Dr. Holger Jens Schnell

Layout-Konzeption: acatech

Konvertierung und Satz: Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS,
Sankt Augustin

Einbandgestaltung: WMX Design GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

springer.com

acatech DISKUTIERT

> ELEKTROMOBILITÄT

POTENZIALE UND WISSENSCHAFTLICH-
TECHNISCHE HERAUSFORDERUNGEN

REINHARD F. HÜTTL
BERND PISCHETSRIEDER
DIETER SPATH (Hrsg.)

INHALT

> VORWORT	7
> EINLEITUNG Dieter Spath/Bernd Pischetsrieder	11
> ELEKTROMOBILITÄT – ELEMENTE, HERAUSFORDERUNGEN, POTENZIALE Holger Hanselka/Michael Jöckel	21
> MOBILITÄTSKONZEPTE DER ZUKUNFT UND ELEKTROMOBILITÄT Weert Canzler	39
> NEUE MATERIALIEN FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT: POTENZIAL UND STELSCHRAUBEN Joachim Maier	63
> HERAUSFORDERUNGEN IM BEREICH FAHRZEUGKONZEPTE UND ELEKTRISCHE ANTRIEBSSYSTEME Herbert Kohler	75
> AUTORENVERZEICHNIS	85

> VORWORT

Am 3. Mai 2010 fand in Berlin der erste nationale Elektromobilitäts-Gipfel auf Einladung von Bundeskanzlerin Angela Merkel statt. acatech war daran nicht unbeteiligt und hat seither über Henning Kagermann die an diesem Tag ins Leben gerufene Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) maßgeblich mitgeprägt.

Der tägliche Blick in die Medien zeigt, dass neben der Bundesregierung auch Wissenschaft und Wirtschaft dem Thema Elektromobilität große Aufmerksamkeit widmen. Der erste Grund dafür ist zweifellos der Wunsch nach einer Reduzierung der CO₂-Emissionen im Verkehr und einer stärkeren Nutzung regenerativer Energieträger. Der Verkehrssektor in Deutschland ist für ein Viertel des Energieverbrauchs verantwortlich und trägt mit einem knappen Fünftel in nicht unerheblichem Umfang zum Ausstoß von Treibhausgasen bei. Regenerative Energieträger könnten hier Entlastung bringen. Der geplante Ausbau des Beitrags insbesondere der Windenergie zur Stromversorgung ist allerdings zentral an den Ausbau einer intelligenten Infrastruktur geknüpft. Elektrofahrzeuge könnten sogar ein Teil davon werden, indem sie als mobile Speicher regenerativer Energiequellen zur Verfügung stehen und die heute vorhandenen Schwankungen der Netze ausbalancieren helfen.

In weiten Teilen der Welt stellt sich die Situation in Sachen CO₂-Reduzierung allerdings weniger optimistisch dar. Gerade in den Schwellenländern nimmt der Verbrauch fossiler Energieträger rasant zu. Die massive staatliche Förderung der Elektromobilität etwa in China folgt dennoch anderen Kriterien als bei uns: Es geht um die Vorherrschaft in neuen Märkten. Daraus entsteht ein hoher Wettbewerbsdruck, den wir auch in Deutschland spüren. Der zweite Grund für das gegenwärtig enorme Interesse an der Elektromobilität in Deutschland sind daher die Wertschöpfungsmöglichkeiten oder besser gesagt: die Verantwortung der Politik, Wertschöpfungspotenziale für die deutschen Unternehmen auch in Zukunft zu sichern und nicht den Anschluss an die weltweite Entwicklung zu verlieren.

Aber: Sind wir schon so weit, was die Leistung der Energiespeicher und Netze angeht? Welche Schwachstellen weist unsere Energieinfrastruktur auf? Was wissen wir heute zuverlässig über die Wünsche und tatsächlichen Verhaltensweisen der Kunden? Dies sind wichtige Fragen, welche neben der Wirtschaft vor allem die Wissenschaft

herausfordern – die Akademien zumal. Und acatech als Deutsche Akademie der Technikwissenschaften an vorderster Stelle.

Der Akademietag, den wir in diesem Jahr zum dritten Mal durchgeführt haben, ist neben dem Senatsempfang und der Festveranstaltung einer der Höhepunkte im Leben unserer Akademie. Vielleicht ist er der Höhepunkt in wissenschaftlicher Hinsicht. Denn mehr als jede andere acatech Veranstaltung dient er dem Dialog der Mitglieder zu einem übergeordneten Thema.

Dass dieser Dialog in unserer Zeit wichtiger denn je ist, erleben wir täglich. Nicht zuletzt die aktuellen Diskussionen um den Weltklimarat IPCC verdeutlichen die Relevanz eines kritischen wissenschaftlichen Diskurses über sicheres, aber eben auch unsicheres Wissen. Dies gilt für die Zukunft der Energieversorgung und die Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel, die im Mittelpunkt des zweiten Akademietags vor einem Jahr standen. Aber auch für die Elektromobilität, die manchem gegenwärtig als ein „Hype“ erscheinen mag.

Zweifellos birgt ein solcher „Hype“ große Chancen. Der acatech Senatsempfang im Juni 2009 griff das Thema als Möglichkeit einer ressourcensparenden Mobilität mit hoher Wertschöpfung gerade für eine Exportnation auf. Auf Initiative des Senats hat die Akademie daraufhin eine auch in den Medien viel beachtete Stellungnahme zu den Chancen und offenen Fragen der Elektromobilität verfasst und diese im Januar 2010 in Stuttgart durch Dieter Spath und Bernd Pischetsrieder vorgestellt. Der Kerngedanke unserer Stellungnahme war die Förderung von FuE im Bereich Batterietechnik und anderen Feldern, nicht die Schaffung staatlicher Kaufanreize wie etwa im Ausland.

Wenn acatech dieses Thema eine Woche vor dem Gipfel mit der Bundeskanzlerin in den Mittelpunkt des Akademietags 2010 gestellt hat, so schließt sich thematisch der Kreis zum vergangenen Jahr. Wir sind davon überzeugt, dass die Elektromobilität eine nationale Aufgabe ist, die kein Unternehmen, keine Branche, keine Wissenschaftsdisziplin und kein Ministerium allein bewältigen kann. Die Akademie kann dabei als eine neutrale Plattform fungieren, welche die besten Köpfe aller Bereiche zusammenbringt.

Eine solche Aufgabe umfasst mehr als die Verbesserung zum Beispiel der Batterietechnik oder bestimmter Materialeigenschaften. Wir brauchen – wie auch bei anderen gegenwärtigen Herausforderungen – eine systemische Perspektive, die die Akzeptanz- und Nutzerforschung bzw. die ökonomischen und rechtlichen Rahmenbedingungen mit in den Blick nimmt. Wir müssen zudem wegkommen vom Denken in traditionellen Fächergrenzen und neue, zeitgemäße Ausbildungsangebote schaffen, die nachhaltig für Technik begeistern.

Die Mitglieder unserer Akademie ermuntere ich, sich intensiv an der Arbeit in unseren Themennetzwerken und im Rahmen neuer Akademie-Formate wie dem Innovationsdialog mit der Bundesregierung zu beteiligen. Wir brauchen die Expertise und intellektuelle Unabhängigkeit herausragender Vertreter der Wissenschaft – nicht nur

bei diesem Thema, sondern bei vielen anderen Aufgaben der wissenschaftsbasierten Politikberatung, die vor uns als Deutscher Akademie der Technikwissenschaften liegen.

In diesem Sinne wünsche ich Ihnen eine anregende Lektüre des vorliegenden Bandes, der die Beiträge des Akademietags 2010 vereint.

Ihr
Reinhard F. Hüttl
Präsident acatech

> EINLEITUNG

DIETER SPATH/BERND PISCHETSRIEDER

1 ELEKTROMOBILITÄT – EIN TECHNOLOGIE MIT HISTORIE UND ZUKUNFT

Rund 40 Prozent aller Fahrzeuge fahren elektrisch. Ein Zustand, der aus heutiger Sicht noch in weiter Ferne liegt, war vor über 100 Jahren bereits Realität. Um 1900, einige Jahre nach der Erfindung des Automobils, wurden Fahrzeuge durch unterschiedliche Antriebskonzepte angetrieben. Die drei wichtigsten waren Dampftrieb, Elektroantrieb und der Benzinmotor. Durch die überlegene Energiedichte und eine kostengünstige sowie scheinbar unendliche Verfügbarkeit des Energieträgers Öl entwickelte sich der Verbrennungsmotor zum dominanten Antriebskonzept. Der Einsatz von Elektrofahrzeugen beschränkte sich im Verlauf des 20. Jahrhunderts auf wenige Nischenanwendungen.

Der verbrennungsmotorbasierte Antriebsstrang ist dem Elektroantrieb auch heute noch technisch und ökonomisch überlegen. Die Randbedingungen ändern sich jedoch. Die Verknappung des fossilen Brennstoffs Öl und die stetige Verschärfung der CO₂-Emissionsziele in Verbindung mit einer starken Zunahme individueller Mobilität im asiatischen Raum und vielen weiteren Regionen der Welt stellen den Verbrennungsmotor als die dominante Antriebstechnologie in Frage. Trotz des Optimierungspotentials, welches auch nach über 120-jähriger Entwicklung noch im Verbrennungsmotor liegt, ist diese Technologie immer mit lokalen Schadstoff- und Lärmemissionen verbunden. Die Notwendigkeit der Reduktion von Treibhausgasen verbunden mit einem steigenden Urbanisierungsgrad wird in Zukunft einen Technologiewechsel vom Verbrennungsmotor zum elektrischen Antrieb attraktiv machen. Dieser Technologiewechsel bedeutet jedoch weit mehr als das Austauschen des Antriebsstranges, Elektromobilität ist ein komplexes Themengebiet mit unterschiedlichen Dimensionen.

2 DIE acatech STELLUNGNAHME „WIE DEUTSCHLAND ZUM LEITANBIETER FÜR ELEKTROMOBILITÄT WERDEN KANN“

acatech hat sich des Themas Elektromobilität, welches Industrie und Politik gleichermaßen betrifft, angenommen und in einer Stellungnahme Herausforderungen identifiziert und Handlungsempfehlungen formuliert.¹ Im Mittelpunkt steht dabei die Sensibilisierung für die Zielsetzung, Deutschland zum *Leitanbieter der Elektromobilität* zu machen. Klarer noch als hinter der Ausrichtung auf einen *Leitmarkt Elektromobilität* weist diese

¹ acatech 2010.

Zielsetzung in Richtung einer nachhaltigen Gestaltung der elektromobilen Wertschöpfungskette durch eine Fokussierung auf Forschung und Entwicklung. Die wesentlichen Inhalte der acatech-Stellungnahme werden im Folgenden kurz aufgegriffen.

> 2.1 Grundzüge zukünftiger Mobilität

Um Prognosen über die Entwicklung der Elektromobilität geben zu können, ist es wichtig, sie im Gesamtzusammenhang heutiger und *zukünftiger Mobilität* zu betrachten. Für elektrisch betriebene Fahrzeuge stellt sich die Herausforderung, sich erfolgreich in die durch den Verbrennungsmotor geprägten Mobilitätsmuster zu integrieren. Eine Übereinstimmung zwischen Anforderungen der Nutzer und den Möglichkeiten von Elektrofahrzeugen ergibt sich vor allem in urbanen Regionen, in denen häufig Kurzstrecken gefahren werden und die Voraussetzungen für eine flächendeckende Ladeinfrastruktur gegeben sind. Die urbane Mobilität wird daher auf absehbare Zeit stark die Entwicklung der Elektromobilität beeinflussen.

Auf sämtlichen Kontinenten der Erde nimmt die Urbanisierung zu, in Europa, Nord- und Südamerika leben heute bereits mehr als 70 Prozent aller Menschen in Städten. Auch deutsche Städte erfahren einen Bevölkerungszuwachs, die Attraktivität urbaner Regionen ist gestiegen. Dieser zunehmende Urbanisierungsgrad resultiert in einer Bündelung von Verkehrsströmen aus und in die Städte. Das Auto trägt dabei auch in urbanen Gebieten meist die Hauptlast des Verkehrs, Stadtbewohner wollen trotz der Verfügbarkeit des ÖPNV individuell mobil sein.

Um die zunehmende Verkehrsbelastung zu beherrschen, muss Mobilität zukünftig systemisch betrachtet werden. Eine verstärkte intermodale Verknüpfung von Individualverkehr und ÖPNV bietet Integrationsmöglichkeiten für Elektrofahrzeuge, ebenso ist zukünftig eine bedarfsorientierte Mischnutzung unterschiedlicher Verkehrsträger mit Verbrennungs- oder Elektromotor denkbar. Integrierte Mobilitätskonzepte müssen neben unterschiedlichen Verkehrsmitteln und Antriebstechnologien vor allem auch städtebauliche Aspekte mit einbeziehen, welche durch die Gestaltung der Stadtstruktur in direkter Wechselwirkung mit der urbanen Mobilität steht.

> 2.2 Elektrische Mobilitätssysteme (Antriebe)

Neben der Batterietechnologie stellt der *elektrifizierte Antriebsstrang* die entscheidende technische Neuerung im Vergleich zum verbrennungsmotorbasierten Fahrzeug dar. Elektrische Antriebskonzepte beinhalten sowohl rein batterieelektrische Fahrzeuge, unterschiedliche Ausführungen von Hybriden, als auch den Brennstoffzellen-Antrieb. Dem Hauptvorteil der lokalen Emissionsfreiheit und Lärmreduktion stehen dabei noch einige Nachteile im Vergleich zum Verbrennungskraftfahrzeug gegenüber, welche die Akzeptanz des Nutzers gefährden: Heutige Energie- und Leistungsdichten von Batterien begrenzen bei vertretbarem Preis und Gewicht die Fahrzeugreichweite auf 100-200 Kilometer.

Tiefe Temperaturen, Zusatzverbraucher (Klimatisierung, Heizung) sowie der Einsatz auf geografisch stark profilierten Strecken reduzieren die Reichweite zusätzlich. Getrieben durch die Herstellungskosten des Batteriesystems sind die Anschaffungspreise batterieelektrischer Fahrzeuge deutlich höher als die herkömmlicher Fahrzeuge. Dem gegenüber steht der große Vorteil der lokalen Emissionsfreiheit und Geräuscharmheit, der gerade in urbanen Gebieten Lärm- und Schadstoffbelastungen senken und somit Lebensqualität steigern kann.

Eine zentrale Herausforderung sind somit die Nachteile bezüglich Reichweite, Anschaffungspreis und Ladedauer, welche Elektrofahrzeuge mit sich bringen, die den Vorteilen elektrischer Mobilität für die Allgemeinheit gegenüberstehen. Gelingt es, den kollektiven Vorteil in persönliche Vorteile (beispielsweise durch Privilegien im Stadtverkehr oder intelligente Zusatznutzen von Elektrofahrzeugen) zu übersetzen und so die derzeitigen Nachteile zu kompensieren, ist ein wichtiger Schritt in der Elektrifizierung der Mobilität vollbracht.

Für die Automobilbranche gilt es außerdem den Spagat zwischen der Optimierung konventioneller Antriebe und der Investition in die Entwicklung elektrischer und hybrider Antriebskonzepte zu bewältigen. Während Forschung und Entwicklung im Bereich neuer Antriebe notwendig ist, um sich in diesem Zukunftsmarkt gut zu positionieren, liegt auch in der Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors noch großes Potential zur Verbrauchs- und Emissionsreduzierung.

> 2.3 Chemische Energiespeicher (Batterieforschung)

Das Batteriesystem als größtes und teuerstes Bauteil des elektrischen Antriebsstrangs ist die Schlüsselkomponente der Elektromobilität, die *Batterietechnologie* wird maßgeblich die zukünftige Entwicklung batterieelektrischer Fahrzeuge bestimmen. Leistungsparameter des Batteriesystems (Energiedichte, Leistungsdichte, Zyklenfestigkeit) übersetzen sich direkt in solche des Elektrofahrzeugs (Gewicht/Reichweite, Antriebsleistung, Lebensdauer). Der Batteriepreis von heute ca. 1000 Euro/kWh bestimmt außerdem maßgeblich den Preis des Gesamtfahrzeugs und nimmt mit 30-40 Prozent den größten Wertschöpfungsanteil ein.

Der Aufbau von Kompetenzen in der Batterieforschung und -entwicklung ist daher von großer Bedeutung für den Automobilstandort Deutschland. Der Rückstand zu führenden Ländern der Batterieforschung wie den USA, Korea, Japan und Israel muss rechtzeitig aufgeholt werden, um für zukünftige Fahrzeuggenerationen nicht von Importen dieser wichtigen Fahrzeugkomponente abhängig zu sein. Neben der Weiterentwicklung der heute verwendeten Technologien (Nickel-Metallhydrid und Lithium-Ion) ist auch Grundlagenforschung zu neuen elektrochemischen Speichersystemen (z.B. Lithium-Sauerstoff, Lithium-Schwefel, Zink-Sauerstoff) erforderlich, um deren Potential zur Entwicklung einer neuen Batteriegeneration realistisch einschätzen zu können.

Eine radikale Verbesserung der Energiedichte von Traktionsbatterien, etwa nach dem Vorbild des Mooreschen Gesetzes in der Halbleitertechnologie, ist aufgrund der natürlichen Grenzen des Periodensystems der Elemente jedoch nicht zu erwarten.

Um elektrisch betriebene Fahrzeuge erfolgreich zu kommerzialisieren, müssen die hohen Batteriepreise durch entsprechende Fahrzeugkonzepte und Geschäftsmodelle wirtschaftlich tragbar integriert werden. Eine Möglichkeit dafür ist die schrittweise Elektrifizierung des Antriebsstrangs über hybride Antriebskonzepte, die mit kleineren Batterien auskommen. Durch Skaleneffekte und die kontinuierliche Weiterentwicklung der Batterietechnik kann die Batteriekapazität, und damit die rein elektrische Reichweite, kontinuierlich erhöht werden. Darüber hinaus bietet die Kombination aus hohen Batteriekosten und (derzeit) geringen Stromkosten die Möglichkeit zur Integration in innovative Geschäftsmodelle, welche die Total-Cost-of-Ownership-Bilanz der Fahrzeugnutzung an den Nutzer weitergeben.

> 2.4 Infrastrukturen der Stromversorgung

Neben der Technologie auf Fahrzeugebene hängt die Entwicklung der Elektromobilität von der *Infrastruktur* zur Bereitstellung von Energie ab. Dazu kann zum Teil auf die bestehende Anschlussleistung in Eigenheimen zurückgegriffen werden, in denen Elektrofahrzeuge auf privaten Stellplätzen und Garagen über Nacht geladen werden können. Zusätzlich ist allerdings der Aufbau einer Ladeinfrastruktur im öffentlichen und halböffentlichen Raum notwendig, deren Integration in städtische Strukturen, Parkhäuser und Firmenparkplätze auch Stadtplaner, Architekten, Bauindustrie sowie Städte und Kommunen betrifft. Zur informationstechnischen Verknüpfung von Ladestationen mit Fahrzeugen, Nutzern und Energieversorgern, welche z.B. ein sicheres Lademanagement und die Nutzeridentifikation und Abrechnung von Strom sicherstellt, bedarf es außerdem der entsprechenden Datenübertragung und -verarbeitung. Elektromobilität bedingt also die Vernetzung von Automobilindustrie, Energiewirtschaft, Informations- und Kommunikationstechnologie und öffentlicher Hand, die bisher weitgehend unabhängig voneinander agiert haben.

Untersuchungen zeigen, dass das Stromnetz in Deutschland dem anfänglichen Nachfragezuwachs durch die Ladung von Elektrofahrzeugen gewachsen sein wird. Um allerdings parallel die Nutzung und Netzeinspeisung erneuerbarer Energien auszubauen und das variierende Angebot von Windenergie durch geschicktes Lademanagement von Elektrofahrzeugen auszugleichen, muss das Netz jedoch intelligenter werden. Die im Zusammenhang mit Vehicle-to-Grid (V2G) Konzepten häufig beschriebene Nutzung von Fahrzeugbatterien als Energiespeicher wird dabei höchstens langfristig umgesetzt werden können. Eine eher ungünstige Aufwand-Nutzen-Bilanz sowie die ungeklärten Auswirkungen des häufigen Auf- und Entladens auf die Batteriebensdauer sprechen derzeit gegen eine Umsetzung. Monodirektionale V2G-Ansätze, bei denen lediglich der

Ladevorgang zeitlich sowie in der Ladeleistung gesteuert wird, versprechen dagegen einen deutlich höheren Nutzen bei geringerem technischen Aufwand.

Eine zentrale Herausforderung stellt der Aufbau einer öffentlichen Ladeinfrastruktur dar. Diese wird einerseits vom Nutzer erwartet und kann als wichtige Voraussetzung betrachtet werden, durch die Eliminierung der Range-Anxiety (Angst, mit entladener Batterie liegen zu bleiben) die Nutzerakzeptanz zu erhöhen. Andererseits haben Flottenversuche in den 90er Jahren deutlich gezeigt, dass der an öffentlichen Ladestationen umgesetzte Strom bei weitem nicht ausreicht, um die hohen Installations- und Betriebskosten zu decken. Belastbare, und möglicherweise branchenübergreifende Geschäftsmodelle müssen etabliert werden, die eine öffentliche Ladeinfrastruktur auch über die Anschubfinanzierung durch Pilotprojekte hinaus wirtschaftlich tragbar zur Verfügung stellen.

> 2.5 Standardisierung und Normung

Eng verbunden mit dem Thema Ladeinfrastruktur und Voraussetzung für deren erfolgreichen und nachhaltigen Aufbau sind Fragestellungen der *Normung* und *Standardisierung*. Eine nutzerfreundliche, sichere und flächendeckend kompatible Verbindung der Elektrofahrzeuge mit dem Energienetz ist ein entscheidender Erfolgsfaktor für die Diffusion der Elektromobilität. Für die Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Energienetz ist auf der einen Seite, zumindest europaweit, die Festlegung auf einen einheitlichen Stecker notwendig. Akteure aus Energiewirtschaft und Automobilindustrie treiben in gemeinsamen Gesprächen Standardisierungsinitiativen voran, dennoch bestehen international derzeit mehrere Ansätze zur Wechsel- und Gleichstromladung, welche auf unterschiedlichen Steckern, Spannungen und Ladeprotokollen beruhen.

Neben der Standardisierung der Steckverbindung zwischen Fahrzeug und Ladestation müssen für ein sicheres und kompatibles Laden auch Kommunikation und Datenaustausch einheitlich geregelt werden, sowohl in Bezug auf das Kommunikationsprotokoll und die Art der übertragenen Daten, als auch auf den Übertragungsweg. Eine besondere Herausforderung besteht dabei darin, den richtigen Zeitpunkt für die Festlegung auf eine Technologie zu finden. Eine zu späte Standardisierung hat die Etablierung von Inselösungen zur Folge, deren Vereinheitlichung mit hohem finanziellen und zeitlichen Aufwand verbunden sein wird. Eine zu frühe Festlegung auf eine Technologie könnte jedoch die Berücksichtigung relevanter wissenschaftlicher Erkenntnisse und weiteren technologischen Fortschritts verhindern. Aufgrund der Vielzahl an Energieversorgern in Europa muss für eine flächendeckende Diffusion von Elektrofahrzeugen außerdem ein europaweites Abrechnungssystem (Roaming) für die Nutzung öffentlicher Ladestationen geschaffen werden. Erkenntnisse aus den Modellregionen Elektromobilität in Deutschland sowie aus internationalen Modellversuchen liefern wichtige Erkenntnisse, welche in den Normungs- und Standardisierungsprozess der Ladeinfrastruktur mit einfließen können.

> 2.6 Wertschöpfung

In der Technologie des verbrennungsmotorbasierten Antriebstrangs ist die deutsche Automobilindustrie weltweit führend. Im Jahr 2008 wurden in Deutschland ca. 6 Millionen Autos hergestellt, damit bildet die Automobilindustrie eine tragende Säule der Volkswirtschaft. Mit ca. 5,4 Millionen Arbeitsplätzen, die direkt oder indirekt mit der Automobilindustrie in Zusammenhang stehen, ist Deutschland damit auch in hohem Maße abhängig von dieser Schlüsselindustrie.

Die automobilen *Wertschöpfungsarchitektur* steht mit der Diffusion der Elektromobilität vor tiefgreifenden Veränderungen. Durch die Integration neuer Komponenten und Technologien werden auch neue Akteure in den Markt drängen, der Wegfall des klassischen Antriebsstrangs stellt deren Hersteller vor die Herausforderung, verlorene Wertschöpfungsanteile mit neuen Produkten zu ersetzen. Die Batterie als neues und kostenintensivstes Bauteil wirft die Frage auf, welche Fertigungstiefe die Automobilhersteller zukünftig anstreben werden. Der Wegfall des hochkomplexen Verbrennungsmotors bietet möglicherweise für Tier-1 Zulieferer die Gelegenheit, mit ihrer vorhandenen Systemkompetenz selbst Fahrzeughersteller zu werden.

Während sich Automobilhersteller und Zulieferer bereits ausgiebig mit der Entwicklung elektrifizierter Modelle beschäftigen, fehlt in den tieferen Wertschöpfungsstufen häufig noch eine Strategie zur Unternehmensausrichtung auf die Elektromobilität. Eine gezielte Förderpolitik, die besonders mittelständischen Unternehmen die Gelegenheit gibt, in Forschung und Entwicklung zu investieren, ist ein wichtiger Beitrag zu einem nachhaltigen Wirtschaftswachstum und zum Aufbau von Schlüsselkompetenzen im Bereich Elektromobilität. Derartige Fördergelder würden vermutlich weit weniger zu einer nachhaltigen wirtschaftlichen Entwicklung führen, wenn sie in Form von Kaufanreizen für Elektrofahrzeuge als Marktförderung ausgegeben würden. Daher muss es vorrangiges Ziel sein, Deutschland mehr noch als zu einem Leitmarkt, zu einem Leitanbieter der Elektromobilität zu machen.

> 2.7 Ausbildung

Grundlage einer sukzessiven Ausrichtung der automobilen Wertschöpfungskette hin zur Elektromobilität ist die *Ausbildung* und *Qualifikation* der beteiligten Mitarbeiter. In sämtlichen Bereichen, angefangen bei der Batterieforschung über die Forschung und Entwicklung auf Komponenten- und Systemebene, Produktion, Vertrieb, Reparatur und Wartung sowie Recycling bedarf es qualifizierter Fachkräfte. Diese können zum Teil durch Weiterbildungsmaßnahmen und Zusatzausbildungen gewonnen werden. Speziell im Bereich Wartung, Reparatur und Sicherheit, also in KFZ-Werkstätten, bei KFZ-Prüfstellen und Rettungsdiensten müssen Mitarbeiter durch Fortbildungen auf die Besonderheiten und Gefahren der Mittel- und Hochspannung vorbereitet werden. Voraussetzung für eine dauerhafte und erfolgreiche Entwicklung und Sicherung elektromobiler

Wertschöpfungsanteile in Deutschland ist jedoch zusätzlich eine exzellente universitäre Forschung und Ausbildung, besonders in den Bereichen Maschinenbau, Elektrotechnik, IKT, (Elektro-)Chemie, Produktionstechnik sowie integrativer Bereiche wie Mechatronik und Systemtechnik.

Neben der Ausbildung von Fachkräften können Universitäten und Forschungsinstitute auch durch ihre Forschung einen wichtigen wissenschaftlichen Beitrag zur Entwicklung der Elektromobilität leisten, der in die Wirtschaft transferiert werden kann. Public-Private-Partnerschaften, wie z.B. das Forschungszentrum Leistungselektronik als Kooperation der Bosch-Gruppe, der Hochschulen Stuttgart und Reutlingen und des Landes Baden-Württemberg, fördern diesen Ansatz aktiv.

Im zentralen Feld der Batterieforschung, wie auch für die Elektromobilität im Ganzen, ist es wichtig, mehr noch als bisher Forschung „systemisch“ zu betreiben, sowohl fächerübergreifend zwischen den einzelnen Disziplinen der Ingenieur- und Naturwissenschaften, als auch zwischen Grundlagenforschung und Produktion. Förderungen wie die Innovationsallianz LIB 2015, welche die Kooperation von Forschungseinrichtungen und Industrie entlang der gesamten Batteriewertschöpfungsarchitektur unterstützt, sind ein wichtiger Schritt in diese Richtung. Im internationalen Vergleich und im Zeichen des Aufholbedarfs Deutschlands auf diesem Gebiet besteht jedoch noch großer Handlungsbedarf auf dem Gebiet der Batterieforschung.

3 DER acatech AKADEMIETAG MIT THEMENSCHWERPUNKT ELEKTROMOBILITÄT

Neben der vielbeachtete Stellungnahme hat sich acatech auch in Form des diesjährigen Akademietages am 27. April 2010 mit dem Thema Elektromobilität auseinandergesetzt. Dieser Tagungsband des Akademietags zur Elektromobilität setzt die beiden Schwerpunkte „Mobilität der Zukunft“ und „Technologie elektrifizierter Fahrzeuge“.

> 3.1 Schwerpunkt Mobilität der Zukunft

Holger Hanselka und Michael Jöckel untersuchen dazu im ersten Beitrag die Herausforderungen, denen sich die Mobilität zukünftig stellen muss. Als wichtigste Wandlungstreiber werden die weltweit zunehmende Urbanisierung und die Verknappung fossiler Brennstoffe in Verbindung mit steigenden Emissionen durch deren Verbrennung ausgemacht; alternative Antriebskonzepte können einen wichtigen Beitrag zur Lösung dieser Probleme leisten. Den besten Wirkungsgrad der erneuerbaren Energieträger verspricht im Vergleich zu Biokraftstoffen und Wasserstoff die direkte Nutzung von Strom aus regenerativer Erzeugung für den elektrischen Antrieb. Anhand der „Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität“ beschreiben Hanselka und Jöckel die thematische Breite des Themas und die daraus resultierende Notwendigkeit, Elektromobilität im systemischen Zusammenhang zu erforschen und die deutsche Wirtschaft im Aufbau dieser Systemkompetenz zu unterstützen sowie die Kommunikation aller relevanten Akteure aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft zu unterstützen.

Ein wichtiger Erfolgsfaktor für die Entwicklung der Elektromobilität ist die Akzeptanz, auf welche Elektrofahrzeuge beim Nutzer stoßen. In welchem Verhältnis das Automobil zum Nutzer bzw. zur Gesellschaft im Allgemeinen steht, untersucht Weert Canzler in seinem Beitrag. In einer sich versachlichenden Wahrnehmung des Automobils und steigender Nutzung intermodaler Verkehrsangebote sieht Canzler Chancen für Elektrofahrzeuge. So könnte gerade die Ladezeit als eine der Schwachstellen heutiger Elektrofahrzeuge die Chance zur Integration in intermodale Mobilitätsangebote bieten. Deutliche Verschiebungen in der Wertschöpfungskette können sich ergeben, falls Automobilhersteller zukünftig Mobilität anbieten oder Energieversorger mit Verkehrsunternehmen und Automobilherstellern kooperieren, um gemeinsame Mobilitätsangebote zu entwickeln. Vor dem Hintergrund der vermehrten Integration erneuerbarer Energien, veränderter Fahrzeug- und Mobilitätskonzepte und eines sich ändernden Mobilitätsverhaltens sieht Canzler besonders Energieversorger, Automobilindustrie und öffentlichen Verkehr großen Veränderungen ausgesetzt.

> 3.2 Schwerpunkt Technologie elektrifizierter Fahrzeuge

Voraussetzung für die Entstehung neuer Mobilitätsangebote ist die Entwicklung der Technologie, allen voran der Batterietechnologie. Joachim Maier gibt dazu einen Einblick in die aktuelle Batterieforschung. Ausgehend von der Wirkweise elektrochemischer Zellen werden, als Grundlage für zukünftige Innovationen auf diesem Gebiet, Status-Quo und Potential der Materialentwicklung beleuchtet. Leichte Modifikationen in der Zellchemie der Batterie durch Änderungen der elektrochemischen Eigenschaften können laut Maier zu enormen Verbesserungen führen. Auch das Einbringen zusätzlicher Grenzflächen, also die Änderung der Zellgeometrie, sowie die Verwendung von Komposit-Materialien birgt noch großes Potential. Untersucht werden außerdem Methoden der Nanostrukturierung und die dadurch erzielte Verbesserung der elektrochemischen Prozesse. Die zukünftig zu erwartende Erhöhung der Energiedichte elektrochemischer Systeme sieht Maier als begrenzt an. Dennoch prophezeit er der Elektrochemie im Allgemeinen eine stark zunehmende Bedeutung.

Die Entwicklung des Gesamtsystems Elektrofahrzeug und die Integration der Batterietechnologie beschreibt Herbert Kohler. Dabei bestimmt das rein batterieelektrische Fahrzeug, gemeinsam mit dem Brennstoffzellenantrieb, für Kohler auf lange Sicht die automobiler Zukunft. Auf dem Weg dorthin birgt jedoch laut Kohler auch die Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors noch großes Optimierungspotential, die Entwicklung von hybriden Antrieben verbindet beide Technologien. Voraussetzung für eine wettbewerbsfähige Entwicklung ist eine starke Modularisierung des Elektrischen Antriebsstrangs, welche den Einsatz und die Zusammenstellung einzelner Komponenten in unterschiedlichsten Fahrzeugen ermöglicht. Als erfolgskritische Rahmenbedingungen für die erfolgreiche Entwicklung der Elektromobilität werden der Aufbau einer Wasser-

stoff- und Ladestrominfrastruktur, der Ausbau erneuerbarer Energien, eine fortschreitende Standardisierung sowie eine Ausweitung staatlicher Forschungsförderungen gesehen.

LITERATUR

acatech 2010

acatech (Hrsg.): Wie Deutschland zum Leitanbieter für Elektromobilität werden kann (acatech bezieht Position, Nr. 6), Heidelberg u.a.: Springer Verlag 2010.

> ELEKTROMOBILITÄT – ELEMENTE, HERAUSFORDERUNGEN, POTENZIALE

HOLGER HANSELKA/MICHAEL JÖCKEL

1 EINLEITUNG

Begrenzte Ressourcen, die CO₂-Debatte und der Schutz unserer Umwelt sind beherrschende Themen in der öffentlichen Diskussion. Es ist mittlerweile Konsens, dass der effiziente Umgang mit Energie eine der vordringlichsten Herausforderungen der Zukunft darstellt.

Von der Gebäudetechnik bis hin zum Personen- und Güterverkehr – in allen Bereichen des täglichen Lebens stehen erhebliche Umwälzungen bevor. Ein brandaktuelles Thema ist die Elektromobilität. Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen arbeiten hier Hand in Hand an der Verwirklichung rein elektrisch betriebener Fahrzeuge sowie der notwendigen Infrastruktur.

Auch die Fraunhofer-Gesellschaft hat die Wichtigkeit des Themas seit Langem erkannt. Neben vielen weiteren Initiativen wurde vor Kurzem das Verbundprojekt „Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität“ gestartet. In diesem Projekt arbeiten 33 Fraunhofer-Institute daran, den Wandel zu einer nachhaltigen All-electric Economy wirkungsvoll zu unterstützen.

In diesem Beitrag wird zuerst die Frage beleuchtet, welche wesentlichen Faktoren die Mobilität der Zukunft beeinflussen. Ausgehend hiervon werden ausgewählte alternative Antriebskonzepte im Sinne ihrer jeweiligen Potenziale und Grenzen gegenübergestellt. Es wird gezeigt, dass die Elektromobilität insbesondere vor dem Hintergrund der stetig zunehmenden Urbanisierung eine Basis für zukünftige Lösungsstrategien darstellen kann. Im zweiten Teil stehen aktuelle Arbeiten und Ergebnisse des Verbundprojekts „Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität“ im Fokus.

2 ELEKTROMOBILITÄT – POTENZIALE UND HERAUSFORDERUNGEN

> 2.1 Anforderungen an die Mobilität der Zukunft

Einer der heutigen und zukünftigen Mega-Trends ist zweifelsohne die Urbanisierung. Eine steigende Anzahl von Menschen verlegt ihren Wohnsitz direkt in Städte oder deren direkte Umgebung. Stellvertretend für viele weitere Studienergebnisse kann das Ausmaß der zu erwartenden Entwicklung aus den folgenden Aussagen abgeschätzt werden:

- Im Jahr 2050 werden wahrscheinlich mehr als 9 Milliarden Menschen die Erde bevölkern.¹
- Es wird erwartet, dass die Bevölkerung in Städten von 3,4 Milliarden in 2009 auf 6,3 Milliarden in 2050 ansteigt.²
- Gab es bis 1975 nur drei Megacities in der Welt – New York, Tokio und Mexico City –, werden bis 2025 voraussichtlich bis zu 29 Megacities entstehen.³

Das Thema „Mobilität in großen Städten“ wird somit in Zukunft eine steigende Bedeutung erlangen. Damit verbunden ist aber natürlich der Wunsch nach einer lebenswerten urbanen Umwelt, idealerweise frei von Verkehrslärm, Fahrzeugabgasen und Feinstaub.⁴ Besuche in bestehenden (Mega-)Cities machen deutlich, dass hier signifikanter Verbesserungsbedarf besteht, dessen Relevanz sich mit steigender Urbanisierung noch wesentlich stärker artikulieren wird.

Neben der zu reduzierenden, lokalen Emission von Fahrzeugen spiegeln noch weitere Aspekte wider, dass für die Mobilität der Zukunft neue Konzepte zwingend erforderlich sind. Zum einen ist die angestrebte Verringerung von Treibhausgasen zu nennen. Dem Personen- und Güterverkehr kommt in diesem Zusammenhang ein nicht zu vernachlässigender Anteil an Emissionen zu. Des Weiteren ist zu erwarten, dass der Preis von Rohöl – aufgrund zunehmender Nachfrage und des prognostizierten Peak-Oil⁵ – einen ansteigenden Trend aufweisen wird (siehe Abb. 1). Diese Randbedingungen sprechen dafür, dass der traditionelle Ansatz, Fahrzeuge mit fossilen, ölbasierten Energieträgern zu betreiben, in Zukunft mehr und mehr durch alternative Antriebskonzepte ergänzt oder ersetzt wird.

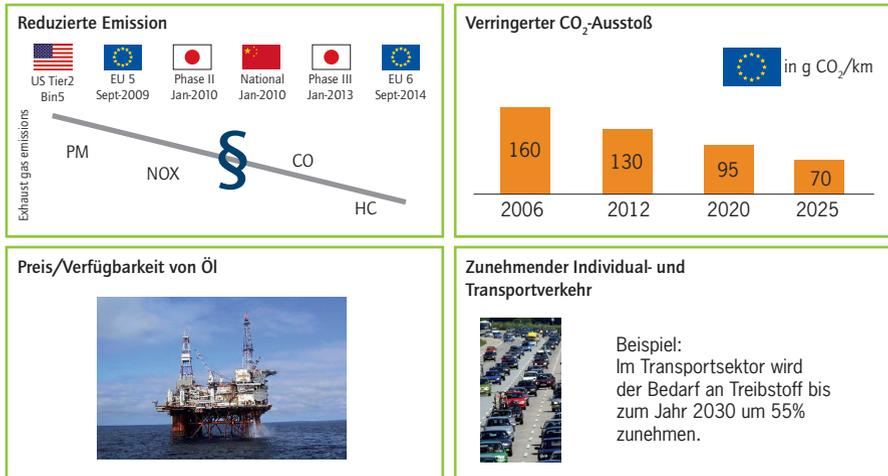
¹ UN 2010.

² UN 2010.

³ UN 2009.

⁴ Vgl. Lange 2008.

⁵ Vgl. Hubbert 2010.

Abb. 1: Herausforderungen für die Mobilität der Zukunft⁶

> 2.2 Alternative Antriebskonzepte

Welche Alternativen existieren zur heutigen Verbrennung von Diesel und Benzin und wie stehen die Chancen für deren Verbreitung? Die Nutzung weiterer fossiler Quellen – wie zum Beispiel Erdgas – stellt kurz- und mittelfristig eine denkbare Option dar. Bezogen auf die CO₂-Bilanz sind mit diesen Lösungen keine signifikanten Reduktionspotenziale zu erwarten. Des Weiteren stellt die Endlichkeit aller fossilen Ressourcen langfristig eine natürliche Einsatzgrenze dar.⁷ Anzustreben ist vielmehr die verstärkte Nutzung von regenerativen Energiequellen, welche wiederum in regenerative Kraftstoffe und Energien unterteilt werden können.

Beispiele für regenerative Kraftstoffe sind Bio-Diesel oder -Ethanol, biogene Gase, Synfuels oder auch Wasserstoff. Prinzipiell sind alle diese Kraftstoffe zur direkten Verbrennung in Motoren geeignet, jedoch ist der Einsatz von Wasserstoff zurzeit bevorzugt in Brennstoffzellen vorgesehen.

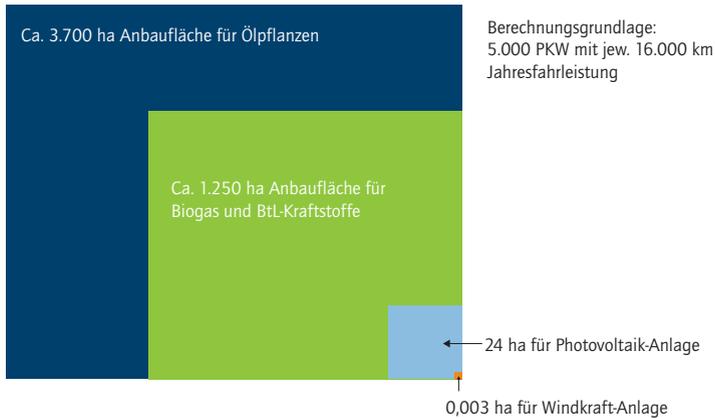
Zur Herstellung pflanzenbasierter Kraftstoffe werden beispielhaft Verfahrensansätze auf der Basis von Algen erforscht. Im Rahmen industriell verfügbarer Prozesse werden heute aber in der Regel sogenannte Energiepflanzen verarbeitet. Dem Vorteil der guten CO₂-Bilanz steht hier vor allem die benötigte Anbaufläche entgegen (siehe Abb. 2). Hierdurch sind Konkurrenzzenarien mit dem Anbau von Lebensmitteln

⁶ Vgl. Grotendorst 2009.

⁷ Vgl. Postner/Sieber 2008.

nicht auszuschließen. Daneben bleibt natürlich auch die Herausforderung der zu reduzierenden lokalen Emission durch den weiterhin verwendeten Verbrennungsmotor ungelöst.

Abb. 2: Vergleich des Flächenbedarfs zur Bereitstellung ausgewählter regenerativer Kraftstoffe und Energien⁸



Der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger für Fahrzeugantriebe wurde insbesondere in der jüngeren Vergangenheit intensiv erforscht. Die entwickelten Brennstoffzellen weisen heute eine Größe auf, welche den Packaging-Anforderungen gerecht wird und die (crash-) sichere Integration in die Fahrzeuge realisierbar macht. Insbesondere aufgrund des hohen Energiebedarfs für die Herstellung und den Transport von Wasserstoff stellt sich jedoch die Energiebilanz suboptimal dar. Fraunhofer-Forscher gehen überschlägig von folgenden Gesamtwirkungsgraden (Well to Wheel) für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge aus:

- Deutschland-Strommix:
Batterie-PKW $\eta \approx 30$ Prozent, Brennstoffzellen-PKW $\eta \approx 15$ Prozent
- 100 Prozent Erneuerbaren-Strom:
Batterie-PKW $\eta \approx 75$ Prozent, Brennstoffzellen-PKW ≈ 38 Prozent

Verbesserte Wirkungsgrade sind somit durch den direkten Einsatz regenerativer Energien in Form von elektrischem Strom erreichbar, wodurch der energieintensive Umweg über den Energieträger Wasserstoff entfällt.

⁸ Vgl. Schulze 2009.

Regenerativ erzeugter Strom wird heute bevorzugt durch Wind-, Sonnen- und Wasserkraftanlagen gewonnen. Viele durchgeführte Studien zeigen, dass der zu erwartende Mehraufwand an benötigter elektrischer Energie durch eine zunehmende Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen überschaubar ist: Ein beispielhaft angenommener Marktanteil von 15 Prozent steigert den Strombedarf um weniger als 5 Prozent.⁹ Um Abendlastspitzen zu vermeiden und damit einer Überlastung von Orts-Trafos entgegenzuwirken sowie den gegebenenfalls nötigen Neubau von Spitzenlastkraftwerken zu umgehen, prognostizieren Fraunhofer-Forscher aber, dass ab 1-2 Millionen Elektrofahrzeugen bereits eine Steuerung der Ladung erfolgen muss.

> 2.3 Elektromobilität von der Vergangenheit bis zur Zukunft

Es wird in der heute stattfindenden Debatte zur Elektromobilität sehr oft vergessen, dass elektrisch betriebene Fahrzeuge bereits in der Pionierzeit des Automobil- und Fahrzeugbaus eine wesentliche Rolle spielten. Als prominentes Beispiel sei an dieser Stelle der Lohner-Porsche genannt, welcher erstmals auf der Weltausstellung in Paris im Jahr 1900 ausgestellt wurde – wobei natürlich angemerkt werden muss, dass bereits lange vor der Jahrhundertwende elektrisch betriebene Fahrzeugprototypen erprobt wurden. Der Lohner-Porsche hatte eine Höchstgeschwindigkeit von ca. 50 km/h, wobei mit der eingesetzten, 410 kg schweren Bleibatterie eine Reichweite von 50 Kilometer realisiert werden konnte. Weiterhin ist sicherlich erwähnenswert, dass Ferdinand Porsche schon damals einen Vorderradantrieb auf Basis von Radnabenmotoren konstruierte.

In der Folge setzten sich jedoch verbrennungsgetriebene Fahrzeuge durch, da sich mit diesen eine höhere Reichweite bei geringerem Gesamtgewicht und reduziertem Kostenaufwand realisieren ließ. Viele Autoren gehen davon aus, dass vor allem mit der Erfindung der Zündkerze im Jahr 1902 die Verbreitung von Verbrennungsmotoren entscheidend beschleunigt wurde.

Bis vor wenigen Jahren waren Elektrofahrzeuge der breiten Öffentlichkeit primär durch Applikationen für spezielle Anforderungen bekannt. Ein typisches Beispiel hierfür sind Carrier in Flughafengebäuden, wobei sich in dieser Anwendung sehr sinnbildlich der Aspekt der lokalen Emission widerspiegelt. Des Weiteren wurden mehrfach Entwicklungen für elektrisch betriebene PKW vorgestellt, welche jedoch den Status der Klein(st)serie nicht überwinden konnten oder von Beginn an für Nischenmärkte konzipiert wurden. So trat die Elektromobilität im Bereich des Individualverkehrs durchaus punktuell und kurzzeitig ins Rampenlicht, konnte sich jedoch auf dem Fahrzeugmarkt nicht in relevanter Stückzahl nachhaltig etablieren.

Die Aussichten für Elektrofahrzeuge haben sich in der jüngeren Vergangenheit wesentlich verbessert. Unter anderem getrieben durch strengere Emissionsvorschriften und den prognostizierten Trend zu steigenden Ölpreisen findet zur Zeit ein deutlich erkennbarer Paradigmenwechsel statt. Umweltschutz und Energieeffizienz nehmen in der öffent-

⁹ Woyke 2009.

lichen Wahrnehmung einen zunehmenden Stellenwert ein – eine Entwicklung, die natürlich auch direkten Einfluss auf die Gestaltung zukünftiger Fahrzeuggenerationen nimmt. Aktuelle Studien zeigen, dass die Bereitschaft der Kunden, Mehrinvestitionen für „Green Technology“ zu tätigen, noch in vergleichsweise geringem Umfang ausgeprägt ist.¹⁰ Gleichzeitig ist klar erkennbar, dass die Leistungsfähigkeit und der Komfort heutiger Automobile als Referenz herangezogen werden. Die Entwicklung von Elektrofahrzeugen für kommende Massenmärkte muss sich deshalb am gültigen Hightech-Standard orientieren und gleichzeitig wirtschaftlich darstellbar sein. Hierbei wird es auch darauf ankommen, die Total Cost of Ownership stärker in den Fokus zu rücken, um den auch mittelfristig zu erwartenden höheren Kaufinvestitionen der Elektromobile die in der Regel günstigeren Betriebskosten gegenüberzustellen. Hierbei sind natürlich auch alternative Geschäftsmodelle denkbar, die bis hin zum Kauf von „Mobilität“ durch den Kunden reichen können. Dieser würde dann beispielhaft – analog zu heutigen Mobilfunkverträgen – gegen eine monatliche Grund- und/oder Laufleistungsgebühr ein Fahrzeug gestellt bekommen. Der Fantasie sind hier aus heutiger Sicht keine Grenzen gesetzt.

Warum stellen wir uns also nicht kurzfristig auf rein elektrisches Fahren um und was sind die Herausforderungen auf dem Weg zur elektromobilen Gesellschaft? Die Bandbreite der Themen umfasst sicherlich zum einen die Reichweite, Lebensdauer und Kosten der benötigten Batterien sowie eine geeignete Lade-Infrastruktur und effiziente Abrechnungskonzepte. Zum anderen gilt es, leistungsfähige und haltbare elektro-mechanische Komponenten (weiter) zu entwickeln. Die Zuverlässigkeit und (Crash-) Sicherheit der kommenden Fahrzeuggenerationen ist in diesem Zusammenhang als gleichwertig mit den Faktoren Komfort und Preis einzuordnen.

Letztendlich steht aber der Kunde im Mittelpunkt – für ihn müssen attraktive Produkte in ausreichender Stückzahl verfügbar sein. Primär gilt es deshalb wie schon zuvor skizziert, die Kosten für Elektrofahrzeuge auf ein Niveau abzusenken, welches vom Markt akzeptiert wird. Fahrzeugtaugliche Batteriezellen auf Li-Ion-Basis werden heute mit Kosten von mehr als 800 Euro pro kWh taxiert. Experten gehen davon aus, dass im Bereich von 250-300 Euro pro kWh eine Grenze der darstellbaren Serienkosten liegt. Hierdurch erscheint es denkbar, dass der Li-Ion-Batteriemarkt zukünftig durch Leasing- oder Mietkonzepte charakterisiert sein könnte. Dies kann sich natürlich grundlegend ändern, wenn neue Speichertechnologien Beyond Lithium-Ion zur Serienreife gebracht werden.

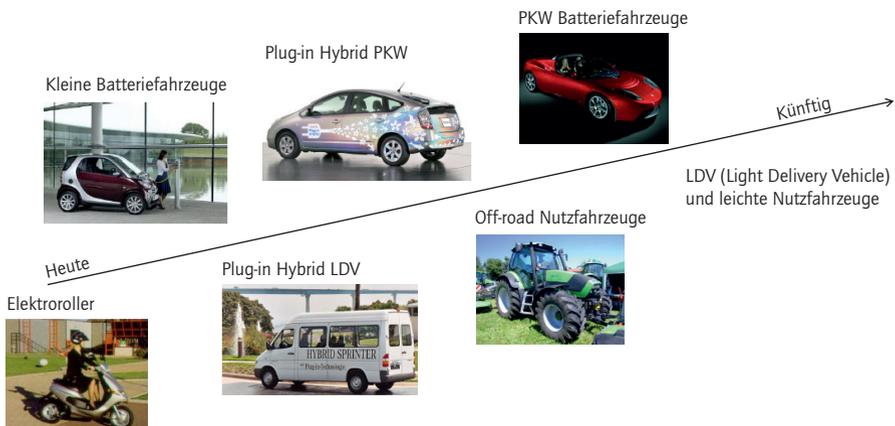
Auf jeden Fall wird die Frage nach fahrzeugeitig fest installierten Batterien auf der einen Seite und Wechselsystemen auf der anderen Seite die öffentliche Diskussion noch längere Zeit beherrschen. Kritiker der Wechselsysteme führen die hohen Logistik- und Lagerkosten für Wechselbatterien sowie Haftungsfragen an, während die Befürworter den kompletten Austausch der Energiespeicher an Servicepoints als einzige Möglichkeit sehen, den Fragen der Reichweitenbeschränkung wirkungsvoll zu begegnen. Die

¹⁰ Vgl. Spath 2010.

Fraunhofer-Gesellschaft wird als neutraler Forschungs-Dienstleister konzeptionell beide Wege analysieren und entsprechende Studien bereitstellen, um zukünftig die „richtigen“ Entscheidungen zu treffen.

Im Sinne der zukünftigen „Art of Mobility“ muss die gesamte Breite der motorisierten Fahrzeuge vom Elektrofahrrad und dem leichten Elektroroller über das Elektroauto bis hin zum schweren Nutzfahrzeug betrachtet werden (siehe Abb. 3). Unter diesem Blickwinkel erscheint ein zweistelliger Marktanteil von Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 machbar, für 2030 ist eine 50-prozentige Durchdringung als realistisch anzusehen. Die Elektrifizierung des Verkehrs wird hierbei eindeutig von urbanen Bereichen ausgehen und sich dann nach und nach auch auf die ländlichen Gebiete ausbreiten. Hierzu passt der Trend zu Megacities, bei denen die Vermeidung lokaler Fahrzeug-Emission höchste Priorität haben wird. Elektromobilität wird in diesem Umfeld der wichtigste Impulsgeber für lebenswertes Urban Life sein.

Abb. 3: Spektrum der Elektromobilität¹¹



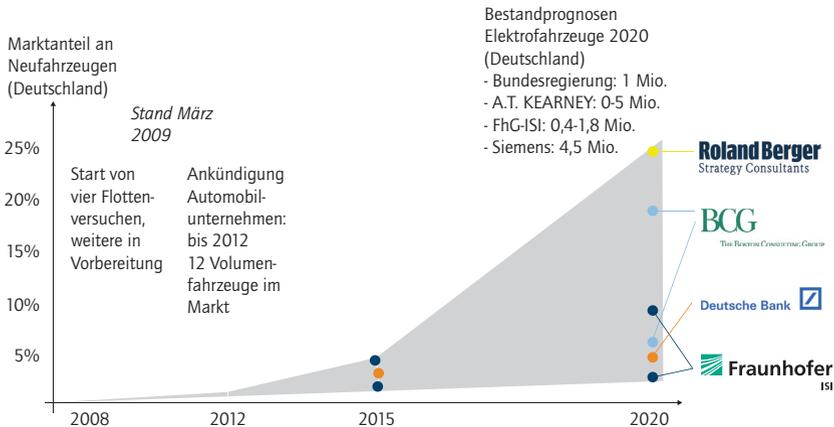
Was sind also die Erfolgsfaktoren der Elektromobilität in Deutschland und Europa? Es ist sicherlich unabdingbar, mithilfe von Forschungsinitiativen die notwendigen Schlüsseltechnologien und Kompetenzen zu erarbeiten. Die Bundesregierung hat sich mit der Verabschiedung des „Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität“ richtungsweisend positioniert. Alle wesentlichen Akteure haben somit eine grundlegende Planungssicherheit. Aus den Mitteln der Konjunkturprogramme wurden maßgebliche Projekte in der Industrie, an den Hochschulen und Forschungseinrichtungen sowie in den Regionen etabliert. Es gilt nun, die Partner zu vernetzen und die Gestaltung nachhaltiger Lö-

¹¹ Wietschel 2009.

sungen voranzubringen. Sicherlich sind die nationalen Forschungs-Budgets im Vergleich zu China und den USA vergleichsweise gering – einen wesentlichen Erfolgsfaktor wird aber die Effizienz der Umsetzung darstellen. Zielsetzung der Bundesregierung ist eine Flotte von einer Millionen Elektro-PKW bis zum Jahr 2020 (siehe Abb. 4).

Mit besonderer Aufmerksamkeit werden auch die Wirkungen von Fördermaßnahmen in Ländern wie zum Beispiel China zu beobachten sein. Die großflächigen Subventionen und Marktanreizprogramme werden hier mit großer Sicherheit zu einer überproportionalen Verbreitung von Elektrofahrzeugen führen. Schon aktuell ist der Trend zur „Erst-Mobilisierung“ von Regionen unter anderem über Elektrofahrräder zu beobachten.

Abb. 4: Marktpenetrationsszenarien für Deutschland (nur PKW) – Vergleich von Studienergebnissen¹²



Von der Seite der Fahrzeughersteller birgt die Elektromobilität einige Herausforderungen, aber auch eine Fülle neuer konstruktiver Gestaltungsmöglichkeiten. So kann der Bauraum, welcher im verbrennungsgetriebenen Fahrzeug für den traditionellen Antriebsstrang benötigt wird, im Elektromobil teilweise oder sogar vollständig entfallen oder anderweitig genutzt werden. Dem vollständigen Verzicht auf mechanische oder hydraulische Lenk- und Antriebs- bzw. Bremselemente stehen zurzeit nur noch Fragen der Sicherheit und Systemzuverlässigkeit entgegen. Diese technologischen Hürden sind jedoch mit gezielten Forschungsinitiativen zu meistern, sodass die Vision der reinen Drive by Wire-Konzepte umsetzbar erscheint. Fahrzeuge der Zukunft werden deshalb nicht nur technologisch, sondern auch in Form und Design den Wandel zur Elektromobilität widerspiegeln. Dem Gestaltungsspielraum sind hier (fast) keine Grenzen gesetzt, was viele aktuelle Konzeptstudien bereits eindrucksvoll beweisen.

¹² Vgl. Wietschel 2009.

Neben der reinen Fahrzeug-, Antriebs- und Batterietechnik sind natürlich auch energie-wirtschaftliche Fragestellungen zu lösen. Diese beginnen direkt an der „Quelle“, denn ein Elektrofahrzeug wird nur so umweltfreundlich wie die Herkunft seines geladenen Stroms sein. Optimalerweise kommt deshalb regenerative Energie zum Einsatz, wie sie heute schon in zunehmendem Umfang in die Netze gespeist wird. Mit steigendem Anteil der regenerativen Stromanteile nimmt aber auch die Fluktuation der zur Verfügung stehenden Energie zu. Um die heute bestehenden Speicherkraftwerke zu ergänzen, adressieren aktuelle Forschungsarbeiten gezielt stationäre Speicher- und Pufferlösungen, wie zum Beispiel das Einbringen von Druckluft in unterirdische Höhlen oder weiterentwickelte Redox-Flow-Batterien.

Gleichzeitig werden Konzepte diskutiert, die in Zukunft vorhandenen Speicherkapazitäten der Elektrofahrzeuge für die Energiespeicherung zu nutzen – gerade Autos sind bekannterweise für einen großen Anteil des Tages „Stehzeuge“. Elektromobile könnten also ein Teil des Stromnetzes werden und Fluktuationen mithilfe eines Teiles ihrer Batteriekapazität abpuffern.

Die Herausforderungen dieses Ansatzes sind sowohl logistisch als auch technologisch geprägt. Es ist zu berücksichtigen, dass die Lebensdauer der Batterie durch zusätzliche Zyklen der Stromzufuhr und -entnahme beeinflusst wird. Die maximal mögliche Pufferenergie, welche ein Fahrzeug bereitstellt, muss somit sinnvoll begrenzt werden. Auf der logistischen Seite gilt es, zu jedem Zeitpunkt ein jeweils optimales Setup der Strombereitstellung zu finden.

Alleine der skizzierte Auszug an Aspekten der Elektromobilität macht deutlich, dass die elektromobile Zukunft als ein komplexes System zu verstehen ist und als solches entwickelt werden muss. Die Fraunhofer-Gesellschaft hat deshalb im Mai 2009 das Verbundprojekt „Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität“ initiiert, um das volle Spektrum an Potenzialen interdisziplinär und abgestimmt zu beleuchten.

3 FRAUNHOFER SYSTEMFORSCHUNG ELEKTROMOBILITÄT

Mit der „Systemforschung Elektromobilität“ verfolgt die Fraunhofer-Gesellschaft das Ziel, den Wandel zu einer nachhaltigen All-electric Economy wirkungsvoll zu unterstützen. Die Besonderheit des Fraunhofer-Ansatzes ist es, alle Wertschöpfungsstufen der Elektromobilität zu betrachten und aufeinander abgestimmt zu erforschen – ausgehend von der Energieerzeugung über den Transport und die Verteilung der Energie durch die Stromnetze, die Schnittstellen zwischen Stromnetz und Fahrzeug, die Energiespeicherung bis hin zu neuen Fahrzeugkonzepten mit einer neuen Infrastruktur sowie Nutzungs- und Abrechnungskonzepten (Abb. 5).

Abb. 5: Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität



Die für den Systemforschungsansatz notwendigen Kompetenzen sind in der Fraunhofer-Gesellschaft in einmaliger Weise vorhanden – mehr als 30 Institute bringen ihre Expertise in das Vorhaben ein (siehe Abb. 6).

Abb. 6: Teilnehmende Institute

Teilnehmende Institute

Aachen	ILT
Berlin	IPK, IZM, FIRST
Bremen	IFAM
Darmstadt	LBF
Dortmund	IML
Dresden	IFAM-DD, IKTS, IVI, IWS
Duisburg	IMS
Erlangen	IIS, IISB
Freiburg	EMI, ISE, IWM
Golm	IAP
Halle	PAZ/IWM-H
Ilmenau	IOSB/AST
Itzehoe	ISIT
Kaiserslautern	ITWM
Karlsruhe	ISI
Magdeburg	IFF
München	ESK
Oberhausen	UMSICHT
Pfinztal	ICT
Saarbrücken	IZFP
Stuttgart	IBP, IAO, IGB, IPA
Würzburg	ISC



→ 33 Institute an 22 Standorten

Die Initiative ist so angelegt, dass die deutsche Wirtschaft kurzfristig auf eine sehr umfassende Systemkompetenz zurückgreifen sowie eine mit neuen Produkten aufgestellte Branche, neue Geschäftsmodelle und neue Märkte für sich erschließen kann. Das Gesamtprojekt wird von Prof. Dr. Ulrich Buller, Mitglied des Fraunhofer-Vorstandes und zuständig für den Bereich Forschungsplanung, geleitet und durch Prof. Dr. Holger Hanselka, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF in Darmstadt, koordiniert. Die Geschäftsstelle wird durch Dr. Michael Jöckel, wissenschaftlicher Mitarbeiter und Gruppenleiter am Fraunhofer LBF, betreut. Das Vorhaben wird im Rahmen des Konjunkturprogramms II mit 30 Millionen Euro durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF gefördert (Förderkennzeichen 13N10597 – 13N10600).

Das Gesamtprojekt gliedert sich in vier Schwerpunkte mit jeweils nachgeordneten Teilprojekten, welche wiederum Verbundvorhaben von mehreren Fraunhofer-Instituten darstellen. Alle nachfolgenden Grafiken und Bilder stammen von Fraunhofer-Instituten, welche im Rahmen der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität mitwirken.

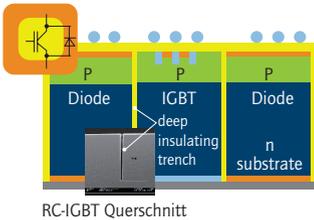
> 3.1 Schwerpunkt „Energieerzeugung, -verteilung und -umsetzung“

Die Arbeiten in diesem Schwerpunkt, unter der Leitung von Dr. M. März, Fraunhofer IISB, umfassen den gesamten Energiepfad von der Erzeugung elektrischer Energie über deren Verteilung bis hin zur Umsetzung in mechanische Energie im Fahrzeug. Die beiden Teilprojekte des Schwerpunkts „Energieerzeugung und Netzintegration“ (Leitung: Dr. G. Ebert, Fraunhofer ISE) sowie „Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik“ (Leitung: Dr. März) sind dabei eng verzahnt. Ein wesentlicher Fokus liegt auf der Schnittstelle zwischen dem öffentlichen Stromversorgungsnetz und Elektrofahrzeugen sowie auf den leistungselektronischen Systemen für das elektrische Energiemanagement im Fahrzeug und den elektrischen Fahrantrieben. Unter anderem werden hierbei folgende Themen adressiert:

- Identifikation und Abrechnung mobiler Verbraucher
- bidirektionale Anbindung von Fahrzeugen an das Stromversorgungsnetz und die dafür erforderlichen Leistungswandler und Energiemessgeräte
- optimierte Betriebsführung von Fahrzeugen als Netzteilnehmer
- Leistungsmodul mit hoher Zuverlässigkeit und Funktionalität
- elektromagnetische Verträglichkeit im Bordnetz von Elektrofahrzeugen
- elektrische Achsantriebe mit integrierter Leistungselektronik

Mit innovativen Technologien sollen Wirkungsgrad, Sicherheit, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit der elektronischen Systeme deutlich gesteigert werden. Abb. 7 zeigt beispielhaft die Spezifikation des robusten Leistungsmoduls.

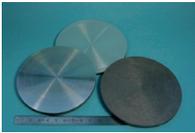
Abb. 7: Entwicklung eines robusten Leistungsmoduls



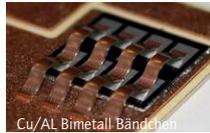
RC-IGBT Querschnitt

Auszüge: Fachlicher Fokus

- Rückwärts-leitfähiger IGBT (1200V RC-IGBT)
- Robuste Aufbau-, Verbindungs- und Substrattechnologien
- Halbbrückenmodule (600V/400A und 1200V/200A)
- SOI-Gatetreiber IC in 0.35µm CMOS-Technologie
- Direkte Flüssigkeitskühlung (Wasser/Glykol)



Low-CTE Werkstoff aus AlSi + natürlichem Graphit



Robuste Aufbau- und Verbindungstechniken

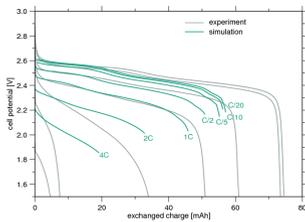
**> 3.2 Schwerpunkt „Energiespeichertechnik“**

Grundvoraussetzung für jede Zukunftsvision der Elektromobilität ist ein zuverlässiges, effizientes, kostengünstiges und langlebiges Speichersystem. Lithiumbatterien mit ihren spezifischen Eigenschaften – vor allem hohe Energie und Leistungsdichten sowie hohe erreichbare Lebensdauern – stellen eine mögliche Basis für derartige Systeme dar. Allerdings gibt es sowohl auf der Material- als auch auf der Systemebene noch eine Reihe von offenen Fragen, welche im Schwerpunkt „Energiespeichertechnik“, geleitet von Dr. J. Tübke, Fraunhofer ICT, bearbeitet werden.

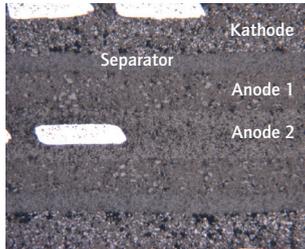
Für die erfolgreiche Akzeptanz von elektrisch betriebenen Fahrzeugen spielt die Speicherung und Bereitstellung der elektrischen Energie im Fahrzeug eine entscheidende Rolle, insbesondere für Reichweite und dynamisches Fahrverhalten. Mit dem Teilprojekt „Materialentwicklung“ (Leitung: Dr. G. Neumann, Fraunhofer ISIT) werden diese Aspekte im Verbund einer Vielzahl von Instituten adressiert, welche mit ihren jeweiligen Kernkompetenzen unter anderem die Weiterentwicklung der Anoden-, Kathoden-, Separator- und Elektrolytmaterialien vorantreiben (siehe Abb. 8).

Im zweiten Teilprojekt „Batteriesysteme“, geleitet von Dr. M. Vetter, Fraunhofer ISE, werden innovative Batteriesysteme aufgebaut und für den Einsatz in die zwei Demonstratorfahrzeuge (siehe unten) angepasst. Generell sind in Fahrzeugen die Anforderungen an Sicherheit und Zuverlässigkeit sowie nicht zuletzt das elektrische Anforderungsprofil an das Batteriesystem sehr hoch. Die Beherrschung des erforderlichen Energieinhaltes und der Leistung unter extremen Umgebungseinflüssen erfordert eine deutlich verbesserte Sicherheit der Batterien nicht nur auf der Ebene der Batteriechemie, sondern auch des Batteriesystems. Dazu werden insbesondere das Batteriemanagement, das Kühlsystem sowie die Aufbau- und Verbindungstechnik weiter entwickelt.

Abb. 8: Inhalte des Teilprojekts „Materialentwicklung“



Erste Simulationsergebnisse im Vergleich zu Messungen



Hybride Anodenstruktur

Auszüge: Fachlicher Fokus

- Simulation und Zellentwicklung

- Angepasster Zellbau, Simulation und Messplätze zur Gewinnung von elektrischen und thermischen Daten in einem Projekt vereint zu
- Entwicklung von Batteriemodellen
- simulationsgestützte Material- und Prozessentwicklung
- applikationsbezogenes Zelldesign

- Hybridelektrodenstrukturen zur gleichzeitigen Optimierung von Leistungs- und Energiedichte

- LIB-Supercap-Konzepte
- „Sandwich“-Strukturen

- Separator-/Festelektrolyt-Konzepte

- Gelifizierung/Hybridpolymere/ionenleitende Gläser
- Ziel: Leitfähigkeit > 1 mS/cm

> 3.3 Schwerpunkt „Fahrzeugkonzepte“

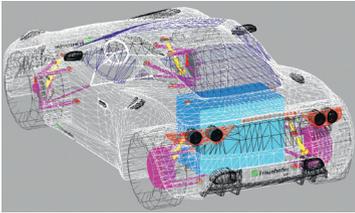
Ziel der Arbeiten im Schwerpunkt „Fahrzeugkonzepte“, geleitet von Prof. Dr. M. Busse (Fraunhofer IFAM), ist die Bündelung der Kompetenzen der Fraunhofer-Institute zur Weiterentwicklung bestehender Fahrzeugkonzepte und die Erarbeitung funktionsfähiger Lösungen, deren Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit im Demonstrationsfahrzeug „FrECCO“ (vgl. „Technische Systemintegration“) nachgewiesen wird.

Der Schwerpunkt gliedert sich hierbei in vier Teilprojekte:

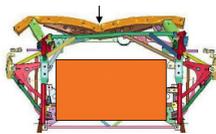
- neue Antriebskonzepte durch den Einsatz von Radnabenmotoren (Leitung: F.-J. Wöstmann, Fraunhofer IFAM)
- Integration von betriebsfesten und crashsicheren Batterien in Leichtbaustrukturen für Elektrofahrzeuge (Leitung: Dr. T. Hollstein, Fraunhofer IWM)
- Wechselsysteme für den halb oder vollautomatisch ablaufenden Wechsel von Batterien in Elektrofahrzeugen (Leitung: Dr. G. Hörcher, Fraunhofer IPA)
- Aufbau eines Leistungszentrums „Gesamtfahrzeugprüfstände“ (Leitung: M. Wallmichrath, Fraunhofer LBF)

Abb. 9 zeigt beispielhaft Inhalte des Teilprojekts „Batterieintegration“.

Abb. 9: Inhalte des Teilprojekts „Batterieintegration“



Batterie im virtuellen Fahrzeug



Rahmen nach Heckaufprall

Auszüge: Fachlicher Fokus

- Masse Batteriepack ca. 320 kg
- gewichtsoptimierte Tragstruktur
- handhabungsgerechtes (Ein- und Ausbau) Batteriepack
- Analyse der Batterieanordnung auf das Fahrverhalten
- Intrusionsschutz
- Simulierter Lastfall nach ECE 34: Heckaufprall, starre Wand 1100 kg, 10 m/s
- Gewährleistung eines deformationsfreien Raums für die Batteriesicherheit

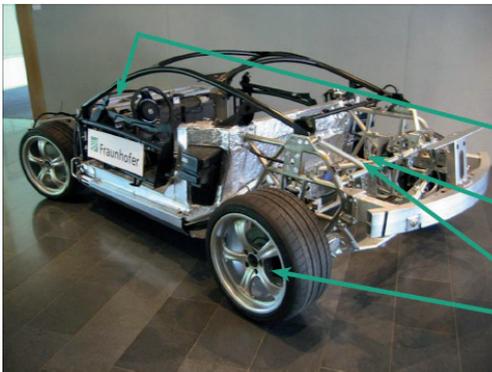
> 3.4 Schwerpunkt „Technische Systemintegration und gesellschaftspolitische Fragestellungen“

Die Integration elektrisch betriebener Fahrzeuge in heutige Verkehrs- und Produktionssysteme stellt die Systemkonzeption und Implementierung vor große Herausforderungen. Vor diesem Hintergrund hat der vierte Schwerpunkt der Fraunhofer-Systemforschung Elektromobilität unter der Leitung von Prof. Dr. M. Wietschel, Fraunhofer ISI, zum Ziel, im Dialog mit der technischen Entwicklung Marktchancen, aber auch Hemmnisse der Elektromobilität in Deutschland zu identifizieren, Forschungs- und Entwicklungsergebnisse im System „Gesamtfahrzeug“ zu demonstrieren sowie die Etablierung interdisziplinärer Partnerschaften zu unterstützen.

Innerhalb der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität wird die technische Systemintegration im Wesentlichen anhand von zwei Demonstratoren umgesetzt. Mit der „AutoTram“ wird der Bereich des öffentlichen Nahverkehrs adressiert, während der „FrECCO“ (Fraunhofer E-Concept Car Typ 0) in Gestalt eines PKW die Anwendung Individualverkehr abbildet. Die dahinterstehenden Teilprojekte werden durch Dr. M. Klingner (Fraunhofer IVI) und Prof. Dr. M. Busse (Fraunhofer IFAM) geleitet. Mit den Demonstratoren soll die grundsätzliche Machbarkeit der in den weiteren Schwerpunkten entwickelten Prototypen nachgewiesen sowie deren Funktion und Zuverlässigkeit im System bewertet werden. Sie schaffen eine gemeinsame Arbeitsplattform für die beteiligten Institute und demonstrieren die neuen Konzepte gegenüber Industrie, Politik und Öffentlichkeit.

Abb. 10 zeigt beispielhaft die Systemintegration anhand des Demonstrators „FrECCO“, dessen Basisplattform auf dem Artega GT aufbaut.

Abb. 10: Demonstrator „FrECCO“ – Fraunhofer E-Concept Car Typ 0



Fraunhofer- Komponenten (Auszug)

- Energieerzeugung, -verteilung und -umsetzung:

Ladegerät

- Energiespeichertechnik:

Batteriesystem

- Fahrzeugkonzepte:

Crashsichere Batterieintegration

Radnabenmotor mit integrierter Leistungselektronik



Der zweite wesentliche Aspekt des Schwerpunktes sind die gesellschaftspolitischen und wirtschaftlichen Fragestellungen, welche die elektromobile Zukunft impliziert. Ein zentrales Thema ist, welche neuartigen verkehrswirtschaftlichen Konzepte sich sowohl für den motorisierten Individualverkehr als auch für den innerstädtischen Lieferverkehr aus der neuen Technologie entwickeln lassen. Dabei ist die Kundenakzeptanz ein kritischer Schlüsselfaktor für den Markterfolg der Elektromobilität. Ein wesentlicher Treiber der Elektromobilität sind die erwarteten Umweltvorteile, von der Reduzierung der Treibhausgase über die Minderung der Feinstaubemissionen bis hin zur Lärmreduzierung. Bei einem weltweiten Boom der Elektromobilität ergeben sich jedoch auch Risiken der Verfügbarkeit seltener Metalle für Batterien und Leistungselektronik, wobei mögliche Engpässe und Substitutionsstrategien aufgezeigt werden.¹³ Die genannten Themen werden im Teilprojekt „Gesamtkonzepte und Gestaltungsoptionen“ unter der Leitung von Dr. C. Doll, Fraunhofer ISI, behandelt.

¹³ Vgl. zum Beispiel Angerer et al. 2009/2009a.

Des Weiteren wird der Übergang von Verbrennungsmotoren hin zu Elektroantrieben mit ganz neuen Fahrzeugkonzepten die bisher etablierten Zuliefer- und Fahrzeugherstellerstrukturen spürbar verändern. Daher widmet sich ein weiteres Teilprojekt „Wertschöpfungsarchitekturen und Geschäftsmodelle“, geleitet von F. Rothfuss, Fraunhofer IAO, Untersuchungen mit der Fragestellung, wie die Industrie auf die sich verändernden Wertschöpfungsstrukturen im internationalen Wettbewerb vorzubereiten ist und welche Strategien zielführend sind.

Eine wichtige Rolle im Sinne der Verstärkung der Projektergebnisse spielen das Forum Elektromobilität, geleitet von K. Okulla, Fraunhofer-Gesellschaft, und der Verein Forum Elektromobilität e.V. Zum einen wird mit dem Forum Elektromobilität in den Räumlichkeiten des Spreepalais in Berlin eine physische Begegnungsstätte, zum anderen eine interaktive Ausstellung zum Thema Elektromobilität geschaffen. Der Verein, welcher im August 2009 gegründet wurde, verfolgt im Einzelnen die folgenden Zielstellungen:

- Vorantreiben alternativer Antriebstechnologien und -konzepte für einen schnellen Markteintritt
- Schaffung eines Leitmarktes für Elektromobilität in Deutschland
- Bündelung relevanter Kompetenzen auf dem Gebiet der Elektromobilität
- Unterstützung des Aufbaus von Systemkompetenz für die deutsche Wirtschaft im Bereich der Elektromobilität
- Förderung der bundesweiten Kommunikation aller relevanten deutschen Akteure aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft
- Aufbau und Bereitstellung einer strategischen Marketingplattform

Mit diesem Fokus strebt der Verein unter anderem den Aufbau von Systemkompetenz für die deutsche Wirtschaft an und treibt den wissenschaftlichen Diskurs zur Weiterentwicklung der Elektromobilität auf allen technischen Ebenen voran.

Mit der Systemforschung Elektromobilität verfolgt die Fraunhofer-Gesellschaft somit einen ganzheitlichen Systemansatz, welcher alle wesentlichen ingenieurs-, betriebs- und gesellschaftswissenschaftlichen Aspekte beinhaltet. Die teilnehmenden Institute sind davon überzeugt, dass sie – aufbauend auf den Projektergebnissen – im Rahmen von Transferprojekten mit ihren Industriepartnern die notwendige technologische Wende hin zur Elektromobilität nachhaltig mitgestalten und beschleunigen können. Die bisherigen Zwischenergebnisse, welche unter anderem auf der Hannover Messe 2010 große Beachtung in Wissenschaft und Industrie fanden, sind äußerst positiv und bestätigen insbesondere die Notwendigkeit des Systemansatzes.

4 FAZIT

Die elektromobile Zukunft wird in vielerlei Hinsicht herausfordernd, birgt aber umfangreiche Potenziale. Ein großer Anteil der erzielbaren Vorteile wird erst durch Betrachtungen im Kontext des Gesamtsystems bewert- und greifbar. Aufgrund seiner vielschichtigen und interdisziplinären Industrie- und Forschungslandschaft hat Deutschland hervorragende Chancen, im Zukunftsmarkt Elektromobilität eine gewichtige Rolle zu spielen und diesen Markt maßgeblich zu gestalten.

5 LITERATUR

Angerer et al. 2009

Angerer, Gerhard et al.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien – Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Studie, hrsg. vom Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI und dem Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung IZT, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2009.

Angerer et al. 2009a

Angerer, Gerhard et al.: Lithium für Zukunftstechnologien – Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität. Studie, hrsg. vom Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe, 2009.

Dorbritz et al. 2008

Dorbritz, Jürgen: BEVÖLKERUNG – Daten, Fakten, Trends zum demographischen Wandel in Deutschland. Studie, hrsg. vom Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung in Zusammenarbeit mit dem Statistischen Bundesamt, Wiesbaden, 2008.

Grotendorst 2009

Grotendorst, Jörg: Erfolgsfaktor Batterie (1. Deutscher Elektro-Mobil-Kongress, veranstaltet vom nova-Institut für Ökologie und Innovation, Bonn 2009), Hürth, 2009.

Hubbert 2010

Hubbert, Jürgen: Zusammenfassung der Tagungsinhalte (Auto-Motor-Sport-Kongress, Stuttgart, 15.04.2010), Stuttgart, 2010 (beziehbar über www.ams-kongress.de).

Lange 2008

Lange, Karlheinz: Handeln gegen Feinstaub. Studie, hrsg. vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Referat Öffentlichkeitsarbeit, Berlin, 2008.

Lucas et al. 2008

Lucas, Rainer et al.: Kupfereffizienz – unerschlossene Potenziale, neue Perspektiven. Studie, hrsg. vom Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Wuppertal, 2008.

Postner/Sieber 2008

Postner, Andreas/Sieber, Willi: Peakoil – die internationale Diskussion und die Auswirkungen auf der Vorarlberg. Studie, hrsg. vom Österreichischen Ökologie-Institut, Bregenz, 2008.

Rempel et al. 2009

Rempel, Hilmar et al.: Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen – Kurzstudie 2009, hrsg. von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Referat für Schriftenpublikationen und Öffentlichkeitsarbeit. Hannover, 2009.

Schulze 2009

Schulze, Dag: Elektromobilität als Chance für den kommunalen Klimaschutz (1. Deutscher Elektro-Mobil-Kongress, veranstaltet vom nova-Institut für Ökologie und Innovation, Bonn, 2009), Hürth, 2009.

Spath et al. 2010

Spath, Dieter et al.: Strukturstudie BWe mobil – Baden-Württemberg auf dem Weg in die Elektromobilität. Studie, hrsg. vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Wirtschaftsförderung Region Stuttgart GmbH (WRS) und Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Stuttgart, 2010.

UN 2009

UN, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (Hrsg.): World Population Prospects – The 2008 Revision, Executive Summary, New York, 2009.

UN 2010

UN, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (Hrsg.): World Urbanization Prospects – The 2009 Revision, Highlights, New York, 2010.

Wietschel 2009

Wietschel, Martin: Energiewirtschaftliche Perspektive der Elektromobilität

Woyke 2009

Woyke, Wolfgang: Elektromobilität– Chancen und Herausforderungen für Energiedienstleister (1. Deutscher Elektro-Mobil-Kongress, veranstaltet vom nova-Institut für Ökologie und Innovation, Bonn, 2009), Hürth, 2009.

> MOBILITÄTSKONZEPTE DER ZUKUNFT UND ELEKTRO-MOBILITÄT

WEERT CANZLER

1 AUTOMOBILE GESELLSCHAFT UND NEUE MOBILITÄTSTRENDS

„Automobilität“ bedeutet Selbstbeweglichkeit. Sie ist damit wie geschaffen für moderne, sich dynamisch individualisierende Gesellschaften. Das Auto ist ebenso ein bedeutendes Wirtschaftsgut und ein praktisches Verkehrsmittel. Die sozialwissenschaftliche Mobilitätsforschung nimmt über die funktionalen Eigenschaften des Automobils hinaus auch dessen kulturelle Bedeutung und gesellschaftliche Aneignung in den Blick¹. In empirischen Forschungsvorhaben zur Nutzung und zur Rolle des Autos für die Alltagsbewältigung hat sich gezeigt: Das Auto erweitert individuelle Möglichkeitsräume und erhöht zugleich den sozialen Mobilitätsdruck. Durch seine hohe Nutzungsflexibilität bietet das Auto gegenüber allen anderen Verkehrsmitteln mehr und neue Optionen. Nicht nur, dass sich der Aktionsradius mithilfe des Autos in aller Regel deutlich erweitert. Auch Wegeketten lassen sich meistens einfach miteinander verknüpfen. Ist die Verfügbarkeit über ein Auto jedoch der Normalfall, steigt auch der Druck, das damit mögliche Maß an räumlicher und zeitlicher Flexibilität individuell zu erbringen. Das Automobil ist in den entwickelten modernen Gesellschaften in den Status der Zugehörigkeit zur ‚Zweiten Natur‘ eingerückt – und hat hierüber Exklusivität eingebüßt.

Die Erfolgsgeschichte des Automobils ist jedoch ambivalent. Es stiftet vielfältigen Nutzen und erweitert den Möglichkeitsraum für seine Nutzer. Die nicht-intendierten Folgen der Automobilisierung sind ebenfalls immens. Dazu gehören die externen Effekte, von den Umweltbelastungen über Zeitverluste durch Staus bis zu den Verkehrstoten und den verlärmten Stadtstraßen. Auch bei den Autofahrern selbst passiert etwas. Das Artefakt Automobil wirkt im Zuge seiner Aneignung durch die Nutzer auf das Alltagsverhalten zurück. Hinter dem Rücken der Autonutzer schleifen sich Aktionsmuster und Handlungsrouitinen ein, die ohne eine Autoverfügbarkeit gar nicht hätten entstehen können. Weil der Raumwiderstand sinkt, sind auf der einen Seite viele Ziele schneller und leichter zu erreichen und auf der anderen Seite geraten neue Ziele überhaupt erst in den Blick. Persönliche Handlungsspielräume werden oft auf diese Weise ausgeweitet, zugleich steigt, meistens gar nicht bewusst, die Abhängigkeit vom Auto.

¹ Vgl. ausführlich Canzler/Knie 1998 und Buhr et al. 1999.

Das Auto profitiert von modernen individuellen Bedürfnissen nach Eigenzeiten und Eigenräumen². Durch Blech und Glas von der Umwelt getrennt und geschützt, beherrschen der Autofahrer und die Autofahrerin die eigene unmittelbare Umgebung. So sichern sie Intimität im offenen Verkehrsraum. Sie bestimmen im Übrigen selbst, wann sie sich ans Lenkrad setzen und losfahren. Hinzu kommt vor allem bei Pendlern das Phänomen des „third place“: Das Auto ist ein oft entspannender Ort zwischen Arbeitsplatz und Wohnung. Ein dritter Ort, der im wahrsten Sinne des Wortes Abstand schafft und zugleich den Übergang von der beruflichen, zumindest teilöffentlichen in die private, von anderen Rollenerwartungen geprägte Welt erleichtert.

Die sozialwissenschaftliche Mobilitätsforschung zeigt aber auch: Eine ökonomisch-rationale Verkehrsmittelwahl ist selten; Routinen bestimmen vielmehr das Verkehrsverhalten³. Eine Individual- und Kollektivkosten abwägende Entscheidung, das Verkehrsmittel Automobil zu nutzen oder nicht – und stattdessen auf ein anderes Verkehrsmittel auszuweichen –, ist die Ausnahme und nicht die Regel. Üblicherweise wird unterstellt, dass eine Kalkulation von Kosten und Zeitaufwand über die Wahl der Verkehrsmittel entscheidet. Die Alltagspraxis sieht anders aus. Oft wird das Auto, weil es einfach „da ist“, benutzt. Diese routinemäßige Nutzung entlastet den Einzelnen von der Notwendigkeit, immer wieder aufs Neue über seine Wahl des Verkehrsmittels nachdenken und abwägen zu müssen. Kein Verkehrsmittel ist für die Reduktion von Transaktionskosten im Alltag so gut geeignet wie das Automobil.

Kognitive Dissonanzen sind unter Autofahrenden weit verbreitet und zugleich werden die Kosten des Autofahrens verzerrt wahrgenommen. Was die Umweltpsychologie in mannigfaltiger Weise kennt, trifft auch beim Autofahren oft zu: Gerade weil die meisten Autonutzenden wissen, dass sie die Umwelt schädigen, finden sie gerne und fantasie reich Erklärungen, warum ausgerechnet in ihrem konkreten Fall entweder keine Alternative bestehe oder aber das Maß der Schädigung zu vernachlässigen sei. Alle Rechtfertigungen haben gemeinsam, dass sie im Sinne der Überwindung kognitiver Dissonanzen „funktionieren“ und entlastend wirken. Besonders deutlich ausgebildet ist die kognitive Dissonanz in Bezug auf die Wahrnehmung der Kosten des Autofahrens. Durchschnittlich werden nur etwa die Hälfte der Autokosten überhaupt wahrgenommen, meistens sind es allein die out of Pocket-Kosten, also die Aufwendungen für das Tanken, Parkgebühren und Wagenpflege, die bei Befragungen erinnert werden. Unregelmäßige Kostenanteile des privaten Autofahrens wie Steuern und Versicherung sowie der große Posten des Wertverlustes werden in aller Regel in die Kostenaufstellung nicht eingerechnet.

² Knie 1997.

³ Heine et al. 2001 und Projektgruppe Mobilität 2004.

> 1.1 Gefährdete Selbstbeweglichkeit auf fossiler Basis

Diese die Verbreitung und alltägliche Nutzung des – privaten, bisher fossil betriebenen – Automobils stabilisierenden Faktoren dürfen nicht unterschätzt werden. Sie wurden in etlichen Prognosen vom nahenden Ende des automobilen Zeitalters ignoriert oder gar gelehnet. Allerdings ist das Auto, wie wir es kennen, in Turbulenzen geraten. Die Stichworte lauten: Begrenzung der Dynamik des Klimawandels, Ende des „billigen Öls“ und Raumkonkurrenzen in der verdichteten Stadt⁴.

Es sind vor allem die im Verhältnis zu anderen Verursachern von Emissionen von Treibhausgasen wie den Industrieunternehmen oder den privaten Haushalten seit Jahren steigenden Anteile des motorisierten Individualverkehrs an den CO₂-Emissionen, die den Druck erhöhen, zu geringeren Verbräuchen und strengeren Emissionsgrenzwerten zu gelangen. Dem allgemeinen Trend der Dekarbonisierung wird sich auch der Verkehr nicht entziehen können. In der jüngsten Vergangenheit wurden beinahe alle Fortschritte in der Motoreffizienz und überhaupt im spezifischen Energieverbrauch des Autos durch zusätzliches Gewicht und höhere Antriebsleistungen wettgemacht – die Durchschnittsverbräuche sind nur geringfügig gesunken, die CO₂-Emissionen entsprechend kaum weniger geworden. Und das rasante Wachstum des Fahrzeugbestandes hat alle Einsparungen absolut sowieso wieder zunichte gemacht.

Das Öl, die Basis des bisherigen Autoverkehrs, ist eine endliche Energiequelle. Sicher ist ebenso, dass die Ära des einfach zu fördernden Öls in den klassischen Öregionen vorbei ist. Riskante Tiefseebohrungen werden nötig, um neue Ölfelder auszu-beuten. Zwar können – ironischerweise in Folge des Klimawandels – neue Vorkommen im nördlichen Russland und auch unter den abschmelzenden Polkappen erwartet werden, aber erschlossen sind sie noch keineswegs. Vor diesem Hintergrund sind die Folgen der künftigen Ölnachfrage schwer zu kalkulieren, doch billiger wird das Öl mittel- und langfristig nicht werden. Entscheidend für die künftige Nachfrage bei den fossilen Ressourcen ist, ob, in welcher Geschwindigkeit und in welcher politischen Begleitung sich die nachholende Modernisierung und damit die nachholende Motorisierung in den Schwellenländern Asiens und Südamerikas fortsetzen wird.

Ein weiterer begrenzender Faktor ist der Raumverbrauch des motorisierten Individualverkehrs: Die automobilen Ausstattung der Haushalte in den Boomregionen Chinas, Indiens oder auch Brasiliens hat noch gar nicht richtig begonnen, da zeigt sich schon ein gravierender Platzengpass. Wohin mit den vielen Autos? Mehr Straßen und Tunnel, Tiefgaragen, Autobahnkreuze im bebauten Stadtraum und Parkplätze in engen Stadtwegen erfordern oft einen enormen Aufwand oder stoßen auf den Wider-

⁴ Ausführlich in: Deutsche Bank Research 2009 und Canzler/Knie 2009.

stand der Bevölkerung. Weltweit werden Megacities als dichte Siedlungsräume weiterhin zunehmen. Das Auto für jede und jeden passt dort oft einfach nicht hinein oder seine Anschaffung unterliegt bekannten rigiden Regeln, etwa eines Nachweises eines privaten Parkplatzes wie in Tokio oder einer Besetzungspflicht bei Innenstadtfahrten von mindestens drei Insassen wie in Singapur.

Insgesamt ist damit zu rechnen, dass Mobilität im Zeichen der Dekarbonisierung der industriellen Produktion und ihrer Verkehrsabläufe (wieder) zu einer sozialen Frage wird⁵. Steigen die variablen Kosten des Autofahrens, sind zwei Konsequenzen wahrscheinlich. Zum einen dürfte das low Cost-Segment im Fahrzeugangebot stärker werden. Insbesondere Anbieter aus China und Indien werden voraussichtlich in diesen Markt drängen. Auch im öffentlichen (Fern-)Verkehr werden mehr kostengünstige Angebote entstehen, beispielsweise beim Fernbusverkehr. Zum anderen werden alle Optionen an Bedeutung gewinnen, die eine bessere Auslastung von Autos versprechen. Das sind nicht zuletzt private Fahrgemeinschaften, gewerbliche Mitfahrzentralen, online per Anhalter-Trips etc. Auch das Carsharing und der öffentliche Nahverkehr werden profitieren; allerdings ist auch hier mit überdurchschnittlichen Kosten- und damit Preiserhöhungen zu rechnen.

Neben der sozialen Dimension gerät auch das Stadt-Land-Verhältnis erneut in den Brennpunkt⁶. Belastet werden vor allem die entfernungsintensiven Siedlungsweisen. Die Kosten der Haushalte für Verkehrsleistungen werden auf dem Land signifikant stärker steigen als in verdichteten Städten. Ob und in welchem Maße der Nahraum an Attraktivität gewinnen wird, ist ebenso offen wie die Frage, ob sich Gemeinschaftsverkehre verstärken und auf Dauer etablieren werden. Widersprüchliche Trends treffen aufeinander. Die Individualisierung bleibt ein Basistrend moderner und sich modernisierender Gesellschaften. Sie verliert allerdings einen wichtigen Unterstützer der letzten Jahrzehnte, nämlich einen sukzessiv sinkenden Raumwiderstand. Wenn umgekehrt die Raumüberwindung durch höhere Kosten schwerer wird, ist auch möglich, dass es zu einer vermehrten Virtualisierung des physischen Verkehrs kommt. Dies setzt allerdings die Versorgung auch ländlicher Regionen mit leistungsfähigen Datenverbindungen sowie die Fähigkeit und Bereitschaft ihrer Bewohner, diese auch für Teleinteraktion und -services zu nutzen, voraus.

Rückwirkungen des Endes des „billigen Verkehrs“ und des sich erhöhenden Raumwiderstandes sind darüber hinaus auch auf die soziale Mobilität zu erwarten. Historisch waren physische und soziale Mobilität eng miteinander verbunden. Sozialer Aufstieg hat mit Bildung und Wissen, aber auch mit der Bereitschaft und der Möglichkeit zu tun, den Ort zu wechseln und somit den „eigenen Horizont zu erweitern“. Der Arbeitsmarkt ist längst ein überregionaler, Berufschancen und Ausbildungsstätten sind im nationalen und zunehmend im internationalen Raum verteilt. Umgekehrt sind die Arbeitsmarkt-

⁵ Welzer/Leggewie 2009.

⁶ Vgl. acatech 2006.

sektoren am meisten gefährdet, deren potenzielle Beschäftigte am unflexibelsten, das heißt am wenigsten mobil sind. Es ist daher eine Frage mit hoher empirischer und politischer Dringlichkeit, welche Folgen eine Einschränkung physischer Mobilität für die soziale Mobilität hat. Letztlich ist es von zentraler gesellschaftspolitischer Relevanz, wie eine hohe soziale Mobilität unter Bedingungen restriktiver physischer Mobilität gesichert sein kann.

> 1.2 Veränderungen in der Verkehrsnachfrage

In Anbetracht dieser Gefährdungen der Selbstbeweglichkeit moderner Gesellschaften interessiert nicht zuletzt die Frage, ob und wie die Verkehrsnachfrage sich verändert. Zumindest in den früh industrialisierten und seit langem motorisierten westlichen Gesellschaften dürfte der demografische Wandel in den nächsten Jahrzehnten einen starken Einfluss ausüben. Neben dämpfenden Effekten auf die Verkehrsleistung insgesamt, unter denen voraussichtlich auch der öffentliche Verkehr stark leiden wird, sind auch qualitative Änderungen in der Verkehrsnachfrage zu erwarten. Zu diesen qualitativen Veränderungen gehören der symbolische Bedeutungsverlust des Autos und damit eine Entemotionalisierung des Verhältnisses zum Auto, aber auch die Abkehr vom Dogma der hohen Reichweite und überhaupt eine Erosion des Modells des Universalfahrzeugs. Auch wenn es weiterhin populäre Autorennen, vielbesuchte Autoausstellungen und eine verbreitete Auto(technik)begeisterung geben wird, spricht viel für eine zunehmende „Versachlichung“ des Verhältnisses zum Auto.

> 1.2.1 Bröckelnder Mythos

Zwar ist eine offene Autofeindschaft ein reines Randphänomen. Doch gibt es Anzeichen für eine breite gesellschaftliche Neubewertung des Autos. Schleichend vollzieht sich in den schon weitgehend motorisierten Ländern eine „Entzauberung“ des Automobils. Das Auto hat als Statussymbol und als Instrument des demonstrativen Konsums ernst zu nehmende Konkurrenz erhalten. Mobiltelefone und Computer eignen sich ebenso als soziale Distinktionsmerkmale. Die Formel „Je größer das Auto, desto größer der Prestigegehalt“ gilt bereits seit Längerem nur noch eingeschränkt. Vor allem die Jüngeren entwickeln ein offenbar „selbstverständliches Verhältnis“ zum Auto: Für sie ist das Auto zwar ein alltägliches Verkehrsmittel mit hoher Verfügbarkeit, jedoch weniger ein Status- und Prestigeobjekt als in den Vorgängergenerationen. Hier ist offenbar ein Generationeneffekt zu beobachten, der zugleich in Stadt und Land unterschiedlich stark ausfällt. Während im ländlichen Raum das Auto nach wie vor das „Mobilitätsversprechen“ ist und oft keinerlei Alternativen bestehen, ist die Situation in der verdichteten Stadt eine gänzlich andere. Insgesamt hat sich in den jüngeren Generationen, die in aller Regel mit dem Auto aufgewachsen sind, ein oft pragmatisches Verhältnis zum Auto entwickelt.

Einige Indizien unterstreichen diesen Befund:

- Die Führerscheinquote in Deutschland sinkt erstmalig seit Jahrzehnten: Bei den unter 26jährigen fiel sie von 90,6 Prozent im Jahr 2000 auf 75,5 Prozent im Jahr 2008⁷.
- Junge Kunden gehen der Autoindustrie verloren: 2009 waren nach KBA-Statistik nur noch 7 Prozent der Neuwagenkäufer unter 30 Jahre alt, 1999 waren es noch 14 Prozent⁸.
- Internet und Mobiltelefonie übernehmen oftmals die Statusfunktion: Das Auto verliert nach verschiedenen neueren Jugendstudien seine emotionale Sonderstellung. Eine „neue Rationalität“ bei den 18-25jährigen gegenüber dem Auto ist das Ergebnis einer Online-Befragung „Jugend und Automobil 2010“⁹.

> 1.2.2 Multimodalität ist verbreitete soziale Praxis

Ein weiterer Ausdruck der Erosion der automobilen Hegemonie sind die Verschiebung der modal Split-Anteile zum Fahrrad¹⁰ und die Erfolge von public Bike-Angeboten in vielen Städten in Deutschland und europaweit. Der Fahrradanteil am Verkehrsaufkommen hat in erster Linie dort stark zugenommen, wo er bislang gering war. Außerdem wird das Fahrrad wesentlich häufiger als das Auto mit anderen Verkehrsmitteln kombiniert¹¹.

Insgesamt zeigt sich: In Städten und Ballungsräumen ist die multimodale Verkehrspraxis verbreitet¹². Die Fahrradnutzung ist davon schon immer ein wichtiger Bestandteil gewesen. Zusätzliche Angebote wie öffentliche Fahrradvermietssysteme und Kurzzeitvermietung von Autos im Carsharing stellen weitere Optionen dar. Multimodale Zielgruppen sind für Verkehrsunternehmen schon deshalb besonders interessant, weil sie über eine überdurchschnittliche Kaufkraft verfügen¹³.

Konzepte intermodaler Mobilitätsdienstleistungen könnten davon profitieren, dass die Verknüpfung verschiedener Verkehrsmittel bereits längst verbreitete Praxis ist. Allerdings ist zu bedenken, dass kombinierte Verkehrsangebote einfach, routinefähig und zuverlässig sein müssen. Nur transaktionskostenarme Mobilitätsdienstleistungen können so attraktiv sein, dass sie gegenüber dem privaten Auto als Alternative eine Chance haben.

⁷ Zumkeller 2010 und Kraftfahrtbundesamt 2010.

⁸ Vgl. Rees 2010.

⁹ Bratzel 2010.

¹⁰ Vgl. Infas/DIW 2009 und Ahrends 2009.

¹¹ Aurich/Böhmer 2009.

¹² Siehe Fußnoten 7 und 10.

¹³ Vgl. InnoZ 2009. Diese Zielgruppe der kaufkräftigen Multimodalen ist mittlerweile auch im Visier der klassischen Autovermietfirmen, die mittlerweile alle ein eigenes Kurzzeitvermietungsangebot mit und ohne Clubmitgliedschaft machen (zum Beispiel Sixti, Avis-Club).

> 1.3 Reichweite kein Vetoargument (mehr) gegen alternative Antriebe

Lange Zeit lautete bei Autobauern und Fachjournalisten das Argument, dass eine Reichweite von 500 Kilometern und mehr für die Akzeptanz von Autos unerlässlich sei. Dieses „Reichweitenargument“ hatte gleichsam einen Vetostatus. Es wurde gerne und oft gegen alle Alternativen zum Verbrennungsmotor ins Feld geführt. Doch ist der Alltagsverkehr durch eine hohe Nahraumorientierung geprägt. In allen Verkehrserhebungen finden sich die empirischen Hinweise, die zeigen: 100 Kilometer Reichweite sind eigentlich ausreichend für eine alltägliche Autonutzung. Wir wissen schon länger aus Verkehrsdatenerhebungen, dass 95 Prozent aller Wege unter 50 Kilometer liegen¹⁴. Erste Erfahrungen aus den E-Smart- und E-Mini-Versuchen belegen: Die eingeschränkte Reichweite ist für die Pilotkunden kein Problem; wichtiger ist vielmehr die Verlässlichkeit, dass die erwartete bzw. angezeigte Reichweite auch tatsächlich erreicht wird. Hilfreich ist dafür eine „Restenergieanzeige“, die exakte Prozentangaben macht und damit für Kalkulierbarkeit sorgt. Hier scheint sich ein Nutzungsmuster zu wiederholen, wie es beim Mobiltelefon schon länger zu beobachten ist. Die Nutzerinnen und Nutzer wissen um die eingeschränkte Reichweite; sie schreckt sie nicht davon ab, Leasingverträge abzuschließen, deren Höhe mindestens auf dem Niveau vergleichbarer Fahrzeuge mit konventionellem Antrieb liegen. Von der begrenzten Reichweite der E-Mobile wird jedoch erwartet, dass sie tatsächlich und auch unter widrigen Witterungsbedingungen zur Verfügung steht.

Bereits in früheren Versuchen mit E-Mobil-Testflotten wurden Erfahrungen gesammelt, die vor allem eines zeigen: Nutzer von Elektroautos stellen sich schnell auf die Leistungseinschränkungen der Fahrzeuge ein¹⁵. Dahinter steht die empirische Erkenntnis aus vielen techniksoziologischen Studien, dass sich der Umgang von Nutzerinnen und Nutzern mit Techniken während des Gebrauchs ändert. Nicht die Erwartungen an eine Technik dominieren deren Nutzung, sondern vielmehr bestimmen deren faktische Möglichkeiten und Grenzen den Umgang mit der Technik. In Befragungen und mithilfe von teilnehmender Beobachtung konnte bei vielen Nutzern von Elektrofahrzeugen eine Lernkurve rekonstruiert werden. Man hat sich oft auf die Beschränkungen des batteriebetriebenen Elektrofahrzeugs eingestellt und im Alltag lebbare und „passende“ Nutzungsweisen ausgebildet. Dies war in der Vergangenheit meistens umso schwieriger, weil außer privaten Lademöglichkeiten nur sehr selten öffentlich zugängliche Ladestationen vorhanden waren.

¹⁴ Vgl. Infas/DIW 2003 und Fußnote 10.

¹⁵ Vgl. Knie et al. 1999.

Die Veränderung im Verhältnis zum – im Vergleich mit der Rennreiselimousine mit Verbrennungsmotor nur eingeschränkt nutzbaren – Elektroauto lässt sich an seinem Bedeutungswechsel über die Zeit ablesen: Viele Fahrerinnen und Fahrer eines Elektroautos haben dieses zunächst als Zweitwagen betrachtet. Im Laufe der fortdauernden Nutzung wurde es jedoch zum faktischen Erstwagen. Seine angenehmen Fahreigenschaften, die Vorteile der Geräuschlosigkeit, die wohlwollende Aufmerksamkeit der Umwelt: All das hat viele Elektroautonutzer dazu gebracht, sukzessive öfter zu fahren, das E-Mobil in Alltagsroutinen einzubauen und es damit zum Erstwagen zu machen¹⁶.

Schließlich zeigt sich aus den bisherigen Erfahrungen aus den E-Mobility-Praxistests: die Pilot-Nutzer und -Nutzerinnen schätzen das leise, abgasfreie Fahren ebenso wie die frühe Kraftentfaltung des Elektroantriebs. Positive Fahreigenschaften überlagern oft die bescheidenen Reichweite-Erwartungen. Gleichzeitig setzen die E-Mini- bzw. Smart ED-Nutzer auf Nutzungsvorteile. Dabei geht es um die Bevorteilung bei öffentlichen Parkflächen, Benutzung von Sonderspuren und Befreiung von Stadtsperren oder von einer City-Maut, wie das Beispiel London zeigt¹⁷.

2. BEWEGUNG IN DEN ANGEBOTEN

Das batteriebetriebene Autofahren wird auf absehbare Zeit mit – gegenüber dem bisherigen konventionellen Auto – einer geringeren Reichweite und mit längeren Ladezeiten verbunden sein. Eine bezahlbare „Superbatterie“ mit einer dramatisch höheren Speicherdichte zu akzeptablen Kosten wird es mit großer Wahrscheinlichkeit nicht geben. Es führt also kein Weg daran vorbei, die Ansprüche an E-Mobile zurückzuschrauben. Tut man dies, erhält man eine vollkommen andere Perspektive: Das Elektro-Auto könnte in einer ziemlich „visionären“ Perspektive zum integralen Element eines umfassenden öffentlichen Verkehrsangebotes werden. Damit wäre das Auto nicht mehr das universell nutzbare Fahrzeug und autistische Artefakt, das es über Jahrzehnte war, sondern Teil einer neuen Vernetzungsstruktur. Die Verknüpfung der verschiedenen Verkehrsträger mit ihren jeweiligen Stärken unter Einschluss des Elektroautos führt zu intermodalen Verkehrsdienstleistungen. Das Ergebnis wäre eine „moderne Beweglichkeit“, die das Bedürfnis nach individualisierter Mobilität mit einer hohen Effizienz und einer für künftige Generationen verträglichen Ressourcenverwendung verbindet¹⁸.

Eingeschränkte Reichweiten und lange Ladezeiten sind aus dieser Perspektive nicht nur Handicaps; sie sind zugleich eine Chance, denn sie zwingen zur Verknüpfung mit anderen Verkehrsmitteln. E-Mobile im Flottenmanagement haben große Vorteile. Inter-

¹⁶ Ebenda. Dieser Bedeutungswechsel hin zum Erstwagen wird auch von den (noch wenigen) privaten Pilotkunden aktueller Tests von E-Minis und Smart ED berichtet. Hier ist dringend eine systematische Erhebung der Nutzungsmuster über die Zeit als Teil einer sozialwissenschaftlichen Begleitforschung nötig.

¹⁷ In London sind Zero Emission Vehicles von der Gebühr befreit, die alle Autos zahlen müssen, wenn sie in die Congestion Zone wollen (immerhin aktuell 8 Pfund pro Tag). Diese Gebührenbefreiung ist nicht nur ein finanzieller Vorteil, sondern sie hat auch einen psychologischen Effekt: E-Fahrzeugnutzer fühlen sich zu Recht privilegiert und genießen dieses Privileg auch.

¹⁸ Vgl. Canzler/Knie 2009 und Sperling/Gordon 2009.

modalität wird als Geschäftsmodell interessant und damit möglich. Das geteilte Auto hat möglicherweise erstmals eine Chance, aus der Nische herauszukommen, in der es sich seit vielen Jahren bewegt. Soll dieses „intermodale E-Mobility-Angebot“ nicht eine Vision bleiben, muss es zumindest Ansätze und günstige Bedingungen zu ihrer Realisierung geben. Wo gibt es solche Ansätze und wie ist ihr Potenzial einzuschätzen?

> 2.1 Urbane Mobilitätskonzepte: Nutzen ohne zu besitzen

Mehr als zwei Jahrzehnte wird das kollektive Autoteilen schon praktiziert. Als soziale Praxis in der Umweltbewegung entstanden, hat es mittlerweile viele Kinderkrankheiten überwunden und ein professionelles Niveau erreicht. Carsharing ist ein kommerzielles Kurzzeitvermietgeschäft geworden, das längst die Welt der Stadtteilgruppen oder normativ motivierten, organisierten Autoteiler verlassen hat. Die Car rental-Firmen Sixt und Hertz haben ebenso wie die Deutsche Bahn ein eigenes Carsharing-Geschäftsfeld etabliert. Seit 2008 hat auch die Daimler AG das Carsharing entdeckt und betreibt seither den viel beachteten Versuch Car2go in Ulm. Dort sind derzeit 200, bald 300 – bisher aber nur konventionell mit einem Verbrennungsmotor betriebene – Smarts im Stadtgebiet verfügbar. Teils an festen Stationen, teils frei im Stadtgebiet abgestellt, können die Autos spontan genutzt oder per Internet und Telefon auch kurzfristig gebucht werden. Wie lange die Autos mindestens ausgeliehen werden müssen, ist nicht festgelegt, lediglich eine Höchstvermietdauer von 48 Stunden ist einzuhalten. Erstmals ist damit bei der Kurzzeitvermietung die Möglichkeit des open Access, des open Ends und (noch eingeschränkt) der one Way-Fähigkeit gegeben.

Der Erfolg von Car2go im Jahr 2009 hat selbst die Promotoren bei Daimler überrascht¹⁹. Nach einer Anlaufphase von sechs Monaten mit 50 Smarts, in der allein Firmenangehörige von dem Angebot Gebrauch machen konnten, wurde im April 2009 die Flotte kräftig aufgestockt und das Kurzzeitmietmodell für alle Ulmer geöffnet. Um die kleinen Stadtautos zu einem Minutentarif von 19 Cent nutzen zu können, ist es nötig, sich registrieren und den Führerschein mit einem Chip ausstatten zu lassen. Nach einem halben Jahr hatten das bereits 14.000 Ulmerinnen und Ulmer getan. Im Frühjahr 2010 sind es bereits mehr als 20.000 registrierte Kunden in der 120.000-Einwohner-Stadt, darunter ungefähr die Hälfte in der für Daimler so wichtigen Altersgruppe der Unterdreißigjährigen.

Die Kunden fahren vor allem kurze Strecken, sodass ein Smart durchschnittlich mehr als fünf Mal am Tag von unterschiedlichen Fahrern genutzt wird. Die Auslastung

¹⁹ Eigentlich hat Daimler eine Idee aus den 1990er Jahren wieder aufgegriffen. Damals hatte man die Strategie vom integrierten Mobilitätskonzern mit dem fast revolutionär anmutenden Konzept des „bequemen Sitzkilometers“ garniert. Gemeint war das Verkehrsmittel übergreifende Angebot einer Verkehrsleistung, bei der der Daimlerkonzern als Mobilitätsprovider agiert und der Kunde und die Kundin ein Mobilitätspaket kaufen. In einem solchen Paket war das Auto ein Element unter mehreren, besonders bedeutsam für kurze Strecken und als flexibles Bindeglied zwischen den anderen Verkehrsmitteln. Nach dem Strategiewechsel und der Konzentration auf das Autogeschäft ein paar Jahre später war jedoch die Idee schnell wieder in der Versenkung verschwunden.

ist insgesamt mehr als doppelt so hoch wie beim konventionellen Carsharing, wo das Auto immer an die Ausleihstation zurück gebracht werden und das Ende der Leihzeit vorher angegeben werden muss. Offenbar steigern open Access, open End und one Way-Fähigkeit die Attraktivität des Carsharings erheblich. Ob das Car2go-Prinzip auch in den USA funktioniert, wird seit Anfang 2010 in Austin/Texas in einem zweiten Flottentest überprüft. Angekündigt ist bereits, dass ab dem Jahr 2011 ein europaweites Rollout des Geschäftsmodells Car2go beginnen soll. Ziel ist es, in den Metropolen Europas diese professionelle Variante des Carsharings als neues Geschäftsfeld zu etablieren.

Die Nachfrage und damit die Verbreitung des Carsharings haben in den letzten Jahren generell sowohl in Deutschland – und vor allem im „Mutterland des Carsharings“, in der Schweiz – als auch in den USA deutlich zugenommen. In den USA verzeichnen mittlerweile 26 Organisationen mehr als 400.000 Mitglieder, die größte davon, Zipcar, verzeichnet allein über 320.000. Zipcar gewann im Jahr 2009 mehr als 100.000 neue Kunden und will noch 2010 an die Börse gehen. Zum Vergleich: In Deutschland sind über 120.000 Kunden für das Carsharing registriert. Das ist im Verhältnis zum Gesamtmarkt des privaten motorisierten Individualverkehrs nach wie vor verschwindend gering, doch liegen die Wachstumsraten in den letzten Jahren beständig zwischen 10 und 20 Prozent.

> 2.2 Städte werden restriktiver – und fördern zugleich Intermodalität

Es sind nicht nur die Stickoxyd- und Feinstaubbelastungen, die die Städte dazu bringen, restriktiver gegenüber dem Verbrennungsmotor vorzugehen. Dazu kommen die Platznöte. In vielen Metropolen ist Parkraum knapp und teuer, die Durchschnittsgeschwindigkeit auf den Straßen zu Spitzenzeiten geringer als beim Zufußgehen. Auf der anderen Seite treiben die Erfolge von public Bike-Systemen, die in vielen großen Städten in den letzten Jahren eingeführt worden sind, die Städte dazu an, diese Angebote auszuweiten und in Teilen auch auf das Auto auszudehnen. Am weitesten ist derzeit Paris, wo das Velib-Angebot mit mehr als 20.000 Fahrrädern an 1.500 innerstädtischen Stationen zu einer spürbaren Verschiebung des modal Splits zugunsten des Fahrrads geführt hat. Um eine weitere Entlastung der Pariser Innenstadt vom schwerfälligen privaten Autoverkehr zu erreichen, hat die Stadtverwaltung für das Jahr 2010 eine Ausweitung des Velib-Systems und den Aufbau eines Kurzzeit-Autovermietangebotes mit dem Namen „Autolib“ angekündigt. Parkplätze in der Innenstadt werden für Autolib reserviert und Nahverkehrskunden können zusätzlich zum Fahrrad auch noch kurzfristig ein Auto nutzen. Die Ausschreibung für 2.000 Elektroautos in der Innenstadt und zusätzlich noch einmal 2.000 Autos für eine Reihe von Vorortbahnhöfen sieht kleine stadtverträgliche Fahrzeuge mit Elektroantrieb vor. Damit wird erstmalig eine umfassende Verknüpfung von Carsharing und E-Mobility realisiert.

Paris ist ein Pionier in der Einführung von Public Bike- und Public Car-Systemen. Bei den Elektroautos kommt der Stadtverwaltung zudem zugute, dass Elektromobilität ein nationales industriepolitisches Projekt mit hoher Priorität geworden ist. So können nationale Fördermittel genutzt und die französischen Autohersteller zu verstärkten Anstrengungen für eine Serienfertigung von Elektroautos veranlasst werden, weil erstmals eine kalkulierbare Abnahme von Fahrzeugen garantiert werden kann. Doch dürfte die französische Hauptstadt nicht lange alleiniger Vorreiter bleiben. So wie viele Städte Velib als Anlass und Vorbild für ein eigenes Fahrradverleihangebot genommen haben, so könnte auch Autolib schnell in anderen Metropolen Verbreitung finden – insbesondere auch deshalb, weil auf diese Weise eine reine Verbotspolitik vermieden oder zumindest kompensiert werden kann. Denn es ist nur ein kleiner Schritt, eine City-Maut mit der Einführung von elektrisch betriebenen Public Car-Angeboten zu verknüpfen. Das hieße: Das Hineinfahren in die Innenstadt ist für Fahrzeuge mit Verbrennungsantrieb schmerzhaft teuer und gleichzeitig sind elektrisch betriebene public Cars im doppelten Vorteil, weil sie von der Maut befreit sind und außerdem auf reservierten Flächen parken können. Eine solche Kombination könnte besonders für schnell wachsende asiatische Städte attraktiv sein. Sie ist pragmatisch umsetzbar, mit bereits eingeschlagenen Strategien vereinbar und zudem politisch oft leichter durchzusetzen als in westlichen Metropolen mit ihrer komplizierten konsensualen Governance.

Leicht kann man sich abgewandelte und weiter entwickelte Konzepte vorstellen. Die Städte können je nach Problemdruck und gemäß eigener Prioritäten verschiedene Varianten realisieren. Offensichtlich ist, dass die Städte selber (wieder) ein wichtiger Akteur werden. Sie können über Verbote und Zugangsbeschränkungen einerseits und Ausschreibungen andererseits Märkte kreieren. Sie können die Attraktivität des öffentlichen Raumes (wieder) selber erhöhen. Dies ist im Übrigen auch eine indirekte Folge der E-Mobility-Welle. Denn Elektromobilität braucht sowohl in der Form von public- und sharing-Angeboten als auch für private E-Mobile eine öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur. Hausanschlüsse und Ladevorrichtungen am Arbeitsplatz genügen nicht, um eine ausreichende Versorgung zu gewährleisten. Ladestationen im öffentlichen Raum, besonders an Verkehrsknoten, auf Parkflächen und überhaupt an zentralen Plätzen bedürfen der Zustimmung der Kommune. Damit erhalten Kommunen einen wirksamen Hebel, um Bedingungen an die Gestaltung der Ladestationen und nicht zuletzt auch an die Verknüpfung mit dem öffentlichen Verkehr stellen zu können.

> 2.3 E-Fahrzeuge heute und morgen

Es tut sich etwas bei neuen urbanen Mobilitätskonzepten; neue Angebote werden lanciert und die Städte erweitern ihren Gestaltungsspielraum. Was ist nun bei den E-Fahrzeugen zu erwarten? Eine Fülle von Studien, Veranstaltungen und Berichten in der Wirtschaftspresse beschäftigen sich seit etwa zwei Jahren mit Elektromobilität.

Das Thema hat Hochkonjunktur. Die Deutsche Bank Research versucht sich in Abschätzungen ebenso wie die großen Beraterfirmen Boston Consulting und McKinsey²⁰. Zwar schwanken die Zahlen zum erwarteten Marktpotenzial für E-Autos erheblich, doch der Tenor ist ähnlich: Elektromobilität wird in den nächsten Jahrzehnten zum boomenden Zukunftsmarkt. Aufwendige PR-Shows von RWE und anderen Energieversorgern verfehlen ihre Wirkung nicht. Auch Siemens hat die E-Mobility entdeckt und prognostiziert eine rasche Marktdurchdringung²¹. Mit der Auslobung von öffentlichen Fördermitteln in den verschiedenen Programmen der Bundesregierung hat das Interesse von Wissenschaft und Unternehmen zusätzlich gewonnen.

In einem ernüchternden Kontrast steht bislang jedoch die Realentwicklung: Weil es bisher nur sehr wenige Elektroautos im Betrieb gibt, die entweder Nischenfahrzeuge aus einer Manufakturfertigung sind oder als Versuchsfahrzeuge jenseits aller Rentabilitätsberechnungen produziert wurden, sind alle Erwartungen auf morgen fokussiert. Viel wird gemutmaßt, wann welcher Hersteller welche Fahrzeuge auf den Markt bringt oder zumindest in Testflotten auf die Straße schickt. Lediglich Nissan hat für sein Modell LEAF konkrete Zahlen vorgelegt: Das Fahrzeug soll ab Herbst 2010 auf dem amerikanischen Markt für knapp 33.000 Dollar zu kaufen sein. Ansonsten ist bisher noch weitgehend unklar, was die Fahrzeuge kosten sollen und welche Vermarktungsstrategien verfolgt werden. Die hohen Batteriekosten legen es nahe, an Leasingangeboten für die Fahrzeuge und/oder der Batterie zu feilen oder andere Formen der Verschleierung der fixen Kosten zu wählen.

Niemand wird ernsthaft bezweifeln, dass mit höheren Forschungsanstrengungen sich die technische Leistungsfähigkeit von Elektrofahrzeugen und insbesondere die Leistungsfähigkeit der Batterien verbessern werden. Dass hier gerade in Deutschland ein großer Nachholbedarf besteht, ist mittlerweile forschungspolitischer Konsens²². Ebenso wird niemand bestreiten, dass große Fortschritte erreicht werden können, wenn nur ein Bruchteil der FuE-Kapazitäten, die bisher in die Optimierung des Verbrennungsmotors gesteckt werden, künftig für die Verbesserung der Elektrotraktion eingesetzt wird. Und schließlich stellt auch niemand in Abrede, dass die heute noch sehr hohen Kosten für Elektrofahrzeuge drastisch sinken werden, wenn ihre Serienfertigung erst anläuft. Skaleneffekte winken und sie werden umso größer, je dynamischer Nachfrage und Wettbewerb steigen. Dennoch ist nicht zu erwarten, dass die Leistungsverbesserungen und Kostenreduktionen in den nächsten Jahren so dramatisch ausfallen, dass das Elektroauto in eine direkte Konkurrenz zum weiter optimierten konventionellen Automobil treten kann. Eine eingeschränkte Reichweite und hohe Kosten für die Batterie werden trotz

²⁰ Siehe Boston Consulting Group 2010 und McKinsey 2010.

²¹ Siehe como (Zeitschrift von Siemens Mobility), Ausgabe 4, April 2010, www.siemens.com/mobility. Diese Ausgabe ist ganz der Elektromobilität gewidmet und bietet einen optimistischen Ausblick auf ihre Potenziale.

²² Besonders einflussreich im Zustandekommen dieses Konsenses waren zu Beginn des Jahres 2010 die Studien von acatch (acatech 2010) und der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI 2010).

aller Fortschritte bleiben. Das Elektroauto wird auf absehbare Zeit „weniger können“, aber trotzdem teurer sein als das Auto mit Verbrennungsmotor bisher war.

Dieses Dilemma wird Bestand haben. Intermodale E-Mobility zeichnet sich zwar als Lösung ab. Doch sind die mit dem Elektroantrieb verbundenen Umwälzungen für die Automobilhersteller und ihre Zulieferer fundamental. Sie sind mit einem dramatischen Wandel der Organisation und der Kultur der traditionellen Autounternehmen verbunden. Die Autounternehmen werden – obwohl die meisten von ihnen schon lange keine reinen Produktionsfirmen, sondern bereits große Finanzdienstleister sind, die außer in Krisen gut an der Finanzierung ihrer eigenen Produkte verdienen – sukzessive zu umfassenden Mobilitätsdienstleistern. Steigende Anteile an der Wertschöpfung werden in der Realisierung von Mobilität erzielt, wie auch immer sie technisch umgesetzt wird. Damit erweitert sich nicht nur ihr technisches Portfolio, sondern auch das Selbstverständnis und die Unternehmenskultur ändern sich grundlegend. Die künftige Wertschöpfung von Elektromobilität umfasst die Hardware der Fahrzeuge und Infrastruktur mit entsprechender Integration in die Stadtlandschaft ebenso wie Verkehrsdienstleistungen und die Energielieferung und -speicherung. Eine Schlüsselrolle spielen die Informations- und Kommunikationstechniken, auf deren Basis die softwaretechnische Integration von Fahrzeugen und Energienetz zu realisieren ist.

Innovative Fahrzeugdesigns, das heißt kleine Fahrzeugformate und leichte Werkstoffe, ermöglichen weniger Gewicht und damit bessere Leistungsdaten als die einfache antriebstechnische Konversion bestehender Fahrzeuge. Der Fahrzeugbau steht vor einem beispiellosen Innovationsschub nicht nur beim Antrieb, sondern auch beim Fahrzeugkörper und bei den Materialien. Zudem wird – vor allem auf kurze und mittlere Sicht – der Markt der Fahrzeuge mit Hybridantrieb und Range Extender in Umfang und Vielfalt drastisch wachsen.

Daher spricht viel dafür, dass kurz- und mittelfristig für Elektroautos in erster Linie der Einsatz in Flotten infrage kommt. Flotten lassen sich professionell managen; zum großen Teil liegen die täglichen Wegelängen innerhalb einer Reichweite von 100 Kilometern. Intermodal vernetzte E-Fahrzeuge sind dabei nur eine Variante. Groß ist vor allem das Potenzial, Flotten von Firmen und Verwaltungen umzustellen. Innerhalb von wenigen Jahren ließen sich bei entsprechenden Anreizen beträchtliche Flottenbestände durch Elektrofahrzeuge ersetzen. Im Flotteneinsatz gemanagte Elektrofahrzeuge haben einen weiteren Reiz: Sie sind als Speicher für überschüssigen regenerativen Strom einsetzbar. Damit können sie eine Pufferfunktion im Stromnetz einnehmen, das bei einem steigenden Anteil regenerativ erzeugten Stroms auf zusätzliche Speicheroptionen drin-

gend angewiesen ist. In einem zweiten Schritt ist das Vehicle-to-Grid-Konzept zu erproben. Dann könnten bestimmte Energiemengen in Zeiten hoher Nachfrage wieder ins Netz zurückgespeist werden.

3. MOBILITÄTSKONZEPTE DER ZUKUNFT

Seit Jahrzehnten ist das Auto das private Individualverkehrsmittel, geeignet sowohl um Brötchen um die Ecke zu holen als auch um mit der Kleinfamilie ans Mittelmeer zu fahren. Sein Lasten- und Pflichtenheft ist an Schnelligkeit und an der Überwindung auch langer Distanzen orientiert, eben am Leitbild der Rennreiselimousine. An den Anforderungen dieses Pflichtenheftes wurden alle potenziellen Antriebsvarianten gemessen. Viele alternative Antriebe, bisher auch alle Elektroaggregate, scheiterten daran, weil die vom Verbrennungsmotor gewohnte Reichweite nicht zu schaffen war. Wenn man aber das Leitbild der Rennreiselimousine einmal zurückstellt und sich ein Auto als Teil einer integrierten Verkehrslandschaft vorstellt, dann ergeben sich ungeahnte Einsatzmöglichkeiten für ein Elektrofahrzeug. Die je nach Variante der Batterietechnik derzeit problemlos zu erreichenden 50 bis 100 Kilometer Reichweite sind für die allermeisten Fahrten völlig ausreichend. Die Leistung der Batterietechnik muss dafür nicht in künstliche, kostenträchtige Höhen getrieben werden. Denn das vermeintlich technische Handicap ist, umgekehrt betrachtet, vielmehr ein Integrationsbaustein: Das Elektroauto wird zum vernetzten Auto, es ergänzt vortrefflich den öffentlichen Verkehr. Wo Busse und Bahnen nicht fahren, kann ein Elektrofahrzeug gute Dienste leisten. Mit regenerativem Strom betrieben, fahren diese Fahrzeuge leise, bequem und schadstofffrei in die Ecken und Winkel, in die kein takt- und spurgeführter Verkehr mehr kommt.

Das Elektroauto als vernetztes Auto: So könnte E-Mobilität funktionieren. Die Komponenten existieren bereits, sie müssen allerdings optimiert und technisch integriert werden. Kurz beschrieben, könnte das intermodale Verkehrsangebot inklusive Elektroauto so aussehen: Öffentliche Elektroautos stehen wie Busse und Bahnen praktisch jedem zur Verfügung, vorausgesetzt, er oder sie hat sich unter Nachweis einer allgemeinen Fahrerlaubnis einmal angemeldet und ist zugangstechnisch freigeschaltet. Die Fahrzeuge stehen auf frei zugänglichen Parkplätzen überall an den Knotenpunkten des öffentlichen Verkehrs bereit. Carsharing-Technologie erlaubt einen einfachen Zugang mit Handy oder Karte, die Autos können ohne Vorbuchung direkt genutzt und an jedem anderen freien Parkplatz wieder abgestellt werden. Ist der Ladezustand der Batterie kritisch, bleibt das Fahrzeug gesperrt; die maximale Buchungszeit ist ohnehin auf 48 Stunden begrenzt. So ist eine breite Verfügbarkeit gegeben.

In dieser Vision ist das Elektroauto keine Bedrohung für den öffentlichen Verkehr. Im Gegenteil: Ein Elektroauto mit 100 Kilometer Reichweite bietet die Chance für die Lösung gravierender Probleme des öffentlichen Verkehrs. Es hilft, ein wirklich umfassendes Kundenangebot zu entwickeln und ermöglicht ein Zusatzangebot für den klassischen ÖV. Denn der Bus- und Bahnbetrieb hat selbst dort Lücken und wenig attraktive

„Schwachlastzeiten“, wo er gut ausgebaut ist. Allerdings muss eine kritische Menge an Fahrzeugen vorhanden sein und zudem müssen weitere Innovationen hinzukommen. Die überkommene Trennung von Nah- und Fernverkehr und das oft überdifferenzierte Tarifsysteem des öffentlichen Verkehrs sind ebenso zu überwinden wie der für Gelegenheitsnutzer oft so abschreckende Zugang zu Bussen und Bahnen. Mit einem smarten Mobiltelefon oder einer Karte lassen sich in einem entfalteten intermodalen E-Mobility-Szenario alle mit Strom betriebenen Verkehrsmittel gleichberechtigt zugänglich machen, nutzen und abrechnen. Gleichzeitig kann der Wunsch nach einem modernen und leistungsfähigen Individualfahrzeug befriedigt werden. Ein Elektroauto ist so gesehen die domestizierte Ausgabe von Automobilität – eine attraktive Ergänzung und keine Konkurrenz oder gar Kannibale gegenüber den anderen Verkehrsmitteln. Es ist vielmehr Element einer „modernen Beweglichkeit“.

> 3.1 Neue Wertschöpfung

Aus dieser Perspektive sieht die Verkehrswelt ganz anders aus als wir sie kennen: Wenn sich Stromkonzerne und öffentliche Verkehrsunternehmen mit Autoherstellern zusammentun, dann eröffnen sich ganz neue Optionen. Verkehrsdienstleistungen unter Einschluss des Elektro-Autos werden möglich, die bislang noch nicht einmal in Nischen vorhanden waren. Doch setzt dies einen Paradigmenwechsel voraus: Nicht allein der innovative Antrieb, sondern umfassende Mobilitätskonzepte für urbane Regionen stehen im Vordergrund. Technisch und produktseitig sind eine Fülle von Innovationen denkbar, neben technischen Neuerungen auch lukrative zusätzliche Dienstleistungen und wirkliche Nutzungsinnovationen. Die Wertschöpfung der intermodalen urbanen E-Mobility umfasst die Hardware der Fahrzeuge und Infrastruktur mit entsprechender Integration in die Stadtlandschaft ebenso wie Verkehrsdienstleistungen und die Energielieferung und -speicherung. Letztlich ist die vernetzte E-Mobility – vom elektrisch betriebenen Bus und von der bereits traditionell elektrisch betriebenen U-, S- oder Straßenbahn über das Elektroauto bis zu Pedelecs und Elektro-Rollern – Bestandteil eines smarten und zugleich Ressourcen schonenden urbanen Lebensstils. Damit ist sie Ergebnis und Ausdruck eines umfassenden wirtschaftlichen Strukturwandels mit hohen Dienstleistungsanteilen in der Wertschöpfung.

Ein neues Modell der Wertschöpfung im urbanen Verkehr, in dem vor allem die Integrationsleistungen und die Dienstleistungsqualitäten am wertvollsten sind, ist jedoch sehr voraussetzungsreich. Eine wesentliche Voraussetzung besteht darin, dass die erforderliche Energie vollständig aus regenerativen Quellen stammt. Zertifiziert, also glaubwürdig nachweisbar erneuerbar, muss die energetische Basis für die hier skizzierte intermodale E-Mobilität sein. Nur so kann eine umfassende E-Mobility wirklich nachhaltig sein und ein solides Image als zukunftsfähiges und damit verallgemeinerungsfähiges Verkehrsmodell aufbauen. Das gilt für alle Elemente des integrierten Angebotes.

Dienstleistungsintensive Wertschöpfung und eine komplett erneuerbare Energiebasis machen den Charme des intermodalen E-Mobility-Modells aus. Sie gewährleisten seine Zukunftsfähigkeit und sichern, dass das Modell weltweit verallgemeinerbar ist. Sie bedeuten neue wirtschaftliche Chancen in hochindustrialisierten Gesellschaften, neue Arbeitsplätze und ökologische Vorteile gegenüber der bisherigen fossilen Monokultur im Verkehr. Sie sind die oft geforderten großen Schritte in eine postfossile Ökonomie. Allerdings: E-Mobility ist werthaltig und teuer. Der bisherige Trend seit Mitte des 20. Jahrhunderts bricht ab: Mobilität wird nicht preiswerter, sondern teurer. Es ist davon auszugehen, dass künftig im Durchschnitt ein größerer Teil der verfügbaren Einkommen für Mobilität ausgegeben werden muss als zuvor. Das trifft Bezieher geringer Einkommen am stärksten. Es ist damit zu rechnen, dass sich für einen wachsenden Anteil der Bevölkerung die individuellen Möglichkeitsräume in ihrer physischen Ausdehnung einengen²³.

4. ELEKTROMOBILITÄT: KONTEXTE UND RAHMENBEDINGUNGEN

In Deutschland wird so intensiv wie nie zuvor über Elektromobilität und zukünftige Mobilitätskonzepte diskutiert. Mit der Einrichtung der interministeriellen „Nationalen Plattform für Elektromobilität“ und mit der begonnenen Strategiefindung nach dem „Elektromobilitätsgipfel“ Anfang Mai im Bundeskanzleramt haben sich die Aktivitäten verstärkt, zu Weichenstellungen zu kommen. Wie sieht nun der globale Kontext aus? In China, Japan und in Frankreich hat Elektromobilität höchste industrie- und forschungspolitische Priorität. Auch in den USA beflügeln staatliche Milliardenprogramme die E-Mobility. Es ist das Ziel, sich früh an die technische und ökonomische Spitze einer Zukunftstechnologie zu setzen, Standards zu setzen und möglichst frühe Skaleneffekte zu erreichen. Dafür bedient man sich der FuE-Förderung, Markteinführungssubventionen und einer offensiven staatlichen Beschaffungspolitik. Zunehmend wichtiger wird der regulatorische Pfad über die City-Maut und Innenstadtsperren für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. In China sind bereits Roller mit Verbrennungsmotor in den großen Städten verboten. In der Folge ist ein Markt für Elektroscooter entstanden mit mehr als 100 Millionen Fahrzeugen innerhalb von wenigen Jahren, die fast alle aus chinesischer Produktion stammen. Warum sollte China dieses Erfolgsmodell nicht auch mit Elektroautos wiederholen wollen, sobald die Produktionskapazitäten für bezahlbare E-Autos im Lande aufgebaut sind?

²³ Das ist nicht nur eine abstrakte Erwartung, sondern voraussichtlich in vielen einzelnen Fällen auch eine konkrete Erfahrung. Soziologisch von Interesse ist, ob sich soziale Mobilitätschancen infolge von Einschränkungen in der physischen Mobilität verringern und möglicherweise neue soziale Spaltungen entstehen. Politisch relevant ist nicht zuletzt, ob sich ein Widerstand gegen „Mobilitätsabbau“ artikuliert, der sich im Wahlverhalten oder sogar in Demonstrationen oder zivilem Ungehorsam gegen Fahrbeschränkungen für Fahrzeuge mit Verbrennungsantrieben äußern könnten.

In allen Ländern stehen die Batterien im Mittelpunkt aller Forschungs- und Entwicklungsbemühungen: Sie müssen für eine Serienproduktion von Elektromobilen billiger und zugleich leistungsfähiger werden. Dringend bedarf es außerdem gesicherter Erkenntnisse über Lebensdauer, Lade- und Entladesensibilität sowie Recyclingfähigkeit verschiedener Batteriekonzepte. Elektromobilität ist jedoch nicht allein ein Thema der Fahrzeug- und Batterietechnik, sondern auch der sozialen Verkehrspraxis und innovativer Angebotsstrategien. Deshalb sind die Entwicklung und die Umsetzung von neuen integrierten Mobilitätskonzepten unter Einschluss von Elektroautos, E-Scootern und Pedelecs, wie sie aktuell in Paris und London vorangetrieben werden, so interessant.

Auch wenn sich ein privater Markt für Elektroautos in den nächsten Jahren nur ansatzweise entwickeln wird, steckt bereits kurzfristig viel Potenzial in der so umfassend und integriert verstandenen Elektromobilität. Einsatzfelder für elektrisch betriebene Fahrzeuge liegen in den nächsten Jahren vor allem im Flotteneinsatz. Neben den erwähnten Carsharing-, Carpooling- und public Car-Angeboten kommen viele Fahrzeugflotten von Unternehmen und Verwaltungen infrage. Viele im Flottenbetrieb genutzte Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor können gegen E-Fahrzeuge ausgetauscht werden. Die täglich zu erbringenden Fahrleistungen liegen in aller Regel unterhalb von 100 Kilometer und die Fahrzeuge können geregelt in der Nacht und am Wochenende geladen werden. Der verstärkte Austausch von konventionell betriebenen Fahrzeugen durch Elektrofahrzeuge in Flotten erfordert jedoch Anreize, mit denen höhere Beschaffungskosten kompensiert werden können, bzw. es braucht Finanzierungsmodelle, die einen Ausgleich zwischen höheren Beschaffungskosten – insbesondere für die Batterie – und tendenziell günstigeren Betriebskosten schaffen. In der Entwicklung attraktiver Finanzierungsmodelle für den Einsatz von Elektrofahrzeugen in gewerblichen und administrativen Flotten liegt kurz- und mittelfristig auf Bundesebene ein zentraler Hebel einer politischen Förderstrategie für die Elektromobilität. Die Integration des Autos als Verkehrsdienstleistung braucht auch und vor allem öffentliche Stellflächen und öffentlich zugängliche Ladeinfrastrukturen. Damit verfügen Kommunen über einen Hebel, integrierte Verkehrsangebote mit Vorteilen auszustatten und diese zugleich stadtplanerisch mitzugestalten. Die Bundesländer als Empfänger der Regionalisierungsmittel des Bundes bestimmen weitgehend, unter welchen Bedingungen dieses Geld für den Regionalverkehr ausgegeben wird. Sie sollten den Ausschreibungswettbewerb nutzen, um integrative Mobilitätsbausteine unter Einschluss von E-Fahrzeugen zu etablieren.

Die Elemente einer künftigen E-Mobilität sind vorhanden. Überfällig ist ihre Integration in umfassende Praxistests sowie eine Verbreitung der Technik in adäquaten Nutzungskontexten bei konsequenter Einspeisung regenerativer Energien. Beide Ziele hängen eng zusammen; beide brauchen Produkt- und Nutzungsinnovationen, kreative Ideen und eine breite gesellschaftliche Unterstützung von Anfang an. Der Ausbau der erneuerbaren Energien verlangt nicht nur ein neues intelligentes Netzmanagement, sondern auch zusätzliche und flexible Speicher. Da bieten sich Batterien von E-Mobilen geradezu an. Sie können beispielsweise nachts, wenn der Wind die off Shore-Windanlagen kräftig antreibt, aber weder in den Privathaushalten noch in den Betrieben viel Strom benötigt wird, überschüssige Energie aufnehmen – „vehicle to grid“ heißt die Zauberformel. Wachsen smarte Stromnetze und IuK-gestützte Steuerung zusammen, lässt sich eine Fülle neuer Geschäftsmodelle denken. Dabei sind integrierte Versorgungsunternehmen wie viele Stadtwerke im Vorteil: Sie verfügen sowohl über Quellen der erneuerbaren Stromproduktion als auch über Busse und Bahnen, brauchen jedoch einen „Elektromobilbaustein“ und das Know-how zur effizienten Verknüpfung.

Gleichzeitig jedoch ist die Umsetzung eines intermodalen E-Mobility-Angebotes höchst voraussetzungsvoll und bedarf einer komplexen Trägerkonstellation. Ein solcher ambitionierter Innovationspfad ist alles andere als ein Selbstläufer. Denn sehr unterschiedliche Kulturen müssen eng zusammenarbeiten. Kooperationen sind nötig, für die es keine Vorbilder gibt. Die involvierten Branchen und ihre Unternehmen müssen sich auf vollkommen neue und eben noch nicht eingespielte Kooperationen einlassen. Hinzu kommt, dass die in dem hier skizzierten intermodalen E-Mobility-Konzept involvierten Akteure sich selbst erheblich verändern müssen, wenn sie glaubhafte Partner werden wollen.

> 4.1 Vor enormen Umbrüchen

Die Autohersteller müssen Abschied nehmen vom Konzept des Universalautomobils („Beyond Rennreiselimousine“) und ihre Wertschöpfung wird sich von der Produktion von Automobilen und ihrer Finanzierung für Kunden hin zu umfassenden Mobilitätsdienstleistungen verlagern. Das ist alles andere als trivial. Es bedeutet nicht zuletzt enorme Umbrüche in der Wertschöpfung einer jahrzehntelang erfolgreichen Branche und in der internen Hierarchie ihrer Unternehmen. Der klassische Fahrzeugbau wird nicht nur an Bedeutung verlieren, sondern zugleich muss er auch einen neuen technischen Pfad einschlagen. Leichtbauweise und effiziente Antriebstechniken sind zwar nach wie vor anspruchsvolle Hochtechnologiebereiche, doch kommen vor allem Servicefunktionen hinzu bzw. werden massiv ausgeweitet. Diese Transformation betrifft letztlich den Identitätskern der Branche. Denn der Verbrennungsmotor war – und ist nach wie vor – der Dreh- und Angelpunkt der Automobilentwicklung.

Vor einer ähnlich tief greifenden Transformation stehen auch die Energieversorgungsunternehmen. Der Grund ist vor allem das beschleunigte Wachstum der regenerativen Energien. Sie müssen nicht nur von zentralen Großtechniken als dem prägenden Element der fossilen Stromversorgung Abschied nehmen. Sie sind gezwungen, ihr Netzmanagement radikal umzubauen. Aus einem zentralen Energiesystem wird ein dezentrales, aus einem unidirektionalen Netzmanagement ein bidirektionales. Konkret geht es darum, nicht in erster Linie Strom für elektrische Verkehrsmittel zu verkaufen, sondern das Geschäft einer intelligenten Netzbewirtschaftung aufzubauen und zu lernen. Die Hoffnung auf „vehicle to grid“ kann nur dann in Erfüllung gehen, wenn es Betreiber gibt, die ein effizientes Netzmanagement leisten und dazu wirksame Anreize für die Nutzer von Elektrofahrzeugen platzieren, die dazu führen, dass sie diese als temporäre Speicher einsetzen.

Auch im öffentlichen Verkehr werden die Umstellungen erheblich sein: ÖV-Unternehmen müssen ihre klassischen Verkehrsleistungen um neue Angebotsbausteine ergänzen. Sie betreiben neben Bahnen und Bussen dann künftig ebenso Autofлотten und Fahrradverleihsysteme. Gleichzeitig bedeutet das notwendigerweise mehr Orientierung an den Kunden und an ihren sich weiter ausdifferenzierenden Ansprüchen. Ein solcher Wandel im Angebot und in der Kundenorientierung im ÖV ist nicht ohne eine enge Zusammenarbeit mit dem langjährigen Konkurrenten Autoindustrie sowie mit Energieversorgern und IT-Unternehmen möglich. Damit verlässt der ÖV den Sektor der öffentlichen Daseinsvorsorge und wird zu einer an der privaten Nachfrage orientierten Branche.

Und schließlich müssen auch die Städte und Kommunen lernen, ihre neue – und gleichzeitig gegenüber der jüngeren Vergangenheit wichtigere – Rolle auszufüllen. Sie brauchen ein erweitertes inhaltliches Know-how und sie können sich dabei nicht nur auf formale Kompetenz zurückziehen. Vor allem brauchen sie Kreativität und Mut, günstige Bedingungen für den neuen Markt für intermodale Verkehrsangebote zu schaffen. Hilfreich wäre es daher, wenn die staatliche Förderpolitik auf der einen Seite und die Anpassung der verkehrsrechtlichen und steuerlichen Rahmenbedingungen auf der anderen Seite sich am Ziel der Entwicklung intermodaler Verkehrskonzepte orientierten und sich nicht allein auf die Forschungsförderung in der Batterietechnik konzentrierten.

Die höchsten Hürden für die Realisierung intermodaler Mobilitätskonzepte sind angesichts der notwendigen und tief greifenden Transformationen weniger technischer als vielmehr organisationssoziologischer und innovationskultureller Art. Ungewohnte Bündnisse und Kooperationen ohne Vorbild sind nötig, um zu einer attraktiven, vernetzten E-Mobility zu gelangen. Die Chancen sind vorhanden: Solche Kooperationen können in den begonnenen Pilotversuchen geschlossen und ausprobiert werden, denn dort befindet man sich in einer vorwettbewerblichen Experimentalfunktion. Dort können auch die gemeinsamen Produktbilder entwickelt werden, die bislang nur vage beschrieben sind. Schließlich könnte – und sollte – in den Pilotversuchen auch das Maß an Fantasie und

Kreativität entstehen, das nötig ist, um ein starkes Leitbild zu entwickeln, das den bisher so blutleeren Arbeitstitel von der „vernetzten Elektromobilität“ ablöst und den neuen Pfad einer postfossilen und zukunftsfähigen Mobilität markiert.

5 LITERATUR

acatech 2006

acatech: Mobilität 2020. Perspektiven für den Verkehr von Morgen, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2006 (acatech berichtet und empfiehlt – Nr. 1).

acatech 2010

acatech: Wie Deutschland zum Leitanbieter für Elektromobilität werden kann. Status Quo – Herausforderungen – offene Fragen, Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 2010 (acatech bezieht Position – Nr. 6).

Ahrends 2009

Ahrends, Gerd-Axel: Ergebnisse und Erkenntnisse zur Mobilität in Städten aus der Haushaltsbefragung SrV 2008 (Präsentation auf der Abschlusskonferenz SrV 2008, Dresden, 30. Juni 2009).

Aurich/Böhmer 2009

Aurich, Tanja/Böhmer, Thomas: Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Interdependenzen zwischen Fahrrad- und ÖPNV-Nutzung“ (2009). URL: http://www.srl.de/dateien/dokumente/de/ergebnisse_aus_dem_forschungsprojekt_interdependenzen_zwischen_fahrrad_und_ouml_pnv-nutzung_dtsch_.pdf [Stand: 30.07.2010].

Boston Consulting Group 2010

Boston Consulting Group (BCG): Batteries for Electric Cars. Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020 (2010). URL: http://209.83.147.85/publications/files/BCG_Batteries_for_Electric_Cars_Dec_09.pdf [Stand: 30.07.2010].

Bratzel 2010

Bratzel, Stefan: Jugend und Automobil 2010. Eine Studie des Centre of Automotive der Fachhochschule Bergisch-Gladbach, Bergisch-Gladbach, 2010.

Buhr et al. 1999

Buhr, Regina/Canzler, Weert/Knie, Andreas/Rammler, Stephan: Bewegende Moderne. Fahrzeugverkehr als soziale Praxis, Berlin: edition sigma, 1999.

Canzler/Knie 1998

Canzler, Weert/Knie, Andreas: Möglichkeitsräume. Grundrisse einer modernen Mobilitäts- und Verkehrspolitik, Wien/Köln/Weimar: Böhlau Verlag, 1998.

Canzler/Knie 2009

Canzler, Weert/Knie, Andreas: Grüne Wege aus der Autokrise. Vom Autobauer zum Mobilitätsdienstleister. Ein Strategiepapier, Reihe Ökologie der Heinrich-Böll-Stiftung, Bd. 4, Berlin, 2009.

Deutsche Bank Research 2009

Deutsche Bank Research: Autoindustrie am Beginn einer Zeitenwende (2009). URL: http://www.dbresearch.de/PROD/DBR_INTERNET_DE-PROD/PROD0000000000237289.pdf [Stand: 30.07.2010].

EFI 2010

EFI (Expertenkommission Forschung und Innovation) (Hrsg.): Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2010 (2010). URL: http://www.e-fi.de/fileadmin/Gutachten/EFI_2010.pdf [Stand: 30.07.2010].

Heine et al. 2001

Heine, Hartwig/Mautz, Rüdiger/Rosenbaum, Wolf: Warum wir nicht vom Auto lassen, Frankfurt am Main: Campus Verlag, 2001.

Infas/DIW 2003

Infas/DIW: Mobilität in Deutschland 2002, Berlin/Bonn, 2003.

Infas/DIW 2009

Infas/DIW: Erste Ergebnisse der Befragung „Mobilität in Deutschland 2008“ (Präsentation von Robert Follmer von Infas, Berlin, Mai 2009).

InnoZ 2009

InnoZ (Hrsg.): Blockierte Moderne? Die Auswirkungen des demografischen und wirtschaftsstrukturellen Wandels auf die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland bis zum Jahre 2030 (2009). URL: <http://www.innoz.de/fileadmin/INNOZ/pdf/Bausteine/innoz-baustein-06.pdf> [Stand: 30.07.2010].

Knie 1997

Knie, Andreas: „Eigenzeit und Eigenraum. Zur Dialektik von Mobilität und Verkehr“. In: Soziale Welt. Zeitschrift für sozialwissenschaftliche Forschung und Praxis 47 (1997), Heft 1, S. 39-55.

Knie et al. 1999

Knie, Andreas/Berthold, Otto/Harms, Silvia/Truffer, Bernhard: Die Neuerfindung urbaner Mobilität. Elektroautos und ihr Gebrauch in den USA und Europa, Berlin: edition sigma, 1999.

Kraftfahrtbundesamt 2010

Kraftfahrtbundesamt (KBA) 2010: Jahresbericht 2009 (2009). URL: http://www.kba.de/cln_015/nn_124384/DE/Presse/Jahresberichte/jahresbericht__2009__pdf,templateld=raw,property=publicationFile.pdf/jahresbericht_2009_pdf.pdf [Stand: 30.07.2010].

McKinsey 2010

McKinsey: Elektromobilität in Megastädten: Schon 2015 Marktanteile von bis zu 16 Prozent (2010). URL: http://www.mckinsey.de/downloads/presse/2010/pm_100112_emobilitaet.pdf [Stand: 30.07.2010].

Projektgruppe Mobilität 2004

Projektgruppe Mobilität: Die Mobilitätsmaschine. Versuche zur Umdeutung des Automobils, Berlin: edition sigma, 2004.

Rees 2010

Rees, Jürgen: Junge Konsumenten zwingen Autobauer zu Strategieschwenk (Wirtschaftswoche vom 02.03.2010). URL: <http://www.wiwo.de/technik-wissen/junge-konsumenten-zwingen-autobauer-zu-strategieschwenk-423455> [Stand: 30.07.2010].

Sperling/Gordon 2009

Sperling, Daniel/Gordon, Deborah: Two Billion Cars. Driving Toward Sustainability, Oxford: Oxford University Press, 2009.

Welzer, Leggewie 2009

Welzer, Harald/Leggewie, Claus: Das Ende der Welt wie wir sie kannten: Klima, Zukunft und die Chancen der Demokratie, Frankfurt am Main: Fischer Verlag, 2009.

Zumkeller 2010

Zumkeller, Dirk: Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – wissenschaftliche Begleitung und erste Auswertungen, Bericht 2008, Karlsruhe, 2010, S. 62ff. URL: <http://mobilitaetspanel.ifv.uni-karlsruhe.de/de/downloads/panelberichte/index.html> [Stand: 30.07.2010].

> NEUE MATERIALIEN FÜR DIE ELEKTROMOBILITÄT: POTENZIAL UND STELSCHRAUBEN

JOACHIM MAIER

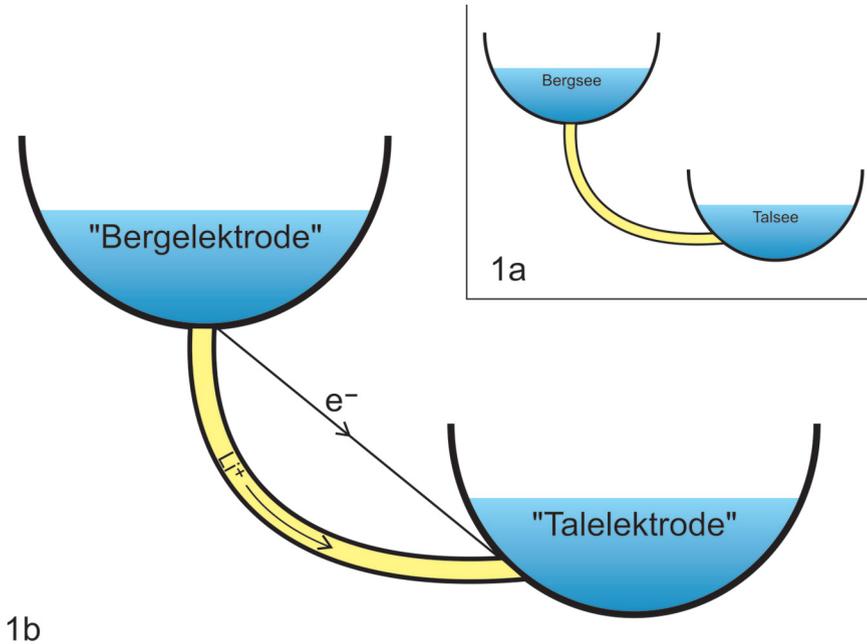
1 EINLEITUNG

Der folgende Beitrag ist ein Blick in die Herzkammer der Elektromobilität, die Batterieforschung. Er gibt zunächst einen kurzen Überblick in die Wirkungsweise elektrochemischer Zellen und beleuchtet dann Stand und Potenzial der Materialentwicklung, sind doch die Stellschrauben auf diesem Sektor entscheidend für zukünftige Innovationen.

2 DAS WIRKPRINZIP DER LITHIUMBATTERIE

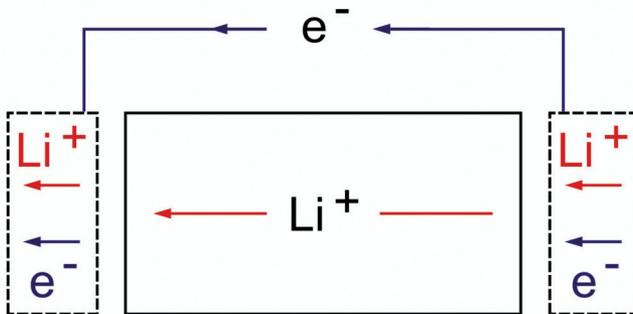
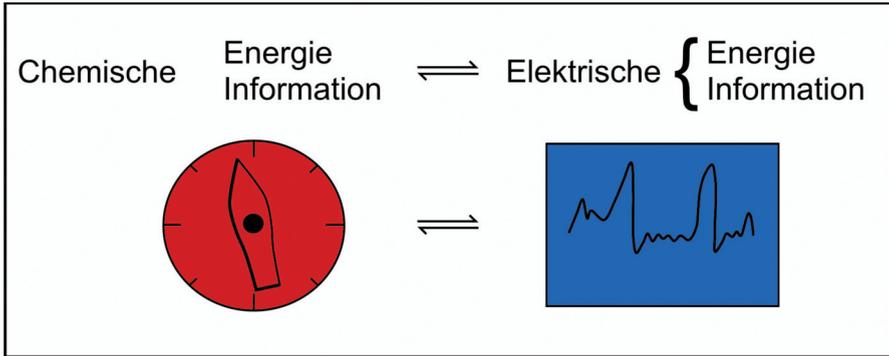
Es lohnt sich, zunächst die jedermann vertrauten, aber doch zumindest in ihrer Wirkungsweise einleuchtenden Pumpspeicherkraftwerke ins Auge zu fassen (siehe Abb.1). Natürlich handelt es sich hier um eine echte „Immobilie“ und die energetischen Umsätze sind nicht vergleichbar mit Batterien, doch gibt es eine wichtige Entsprechung. Bei dem Pumpspeicherkraftwerk wird Wasser vom Talsee zum Bergsee gepumpt und dadurch elektrische Energie gespeichert. Bei Bedarf wird der Prozess umgekehrt und – indirekt – elektrische Energie gewonnen. Bei der Lithiumbatterie wird elektrisch Lithium von der „Talelektrode“ (Positivelektrode) zur „Bergelektrode“ (Negativelektrode) gepumpt. Das Schwerepotenzial wird ersetzt durch das chemische Potenzial. In der „Bergelektrode“ ist Lithium viel weniger beliebt als in der „Talelektrode“, sodass es eine große Triebkraft verspürt, zurück zu gelangen. Der elektrochemische Trick besteht nur darin, dass es nicht simplerweise das neutrale Element Lithium ist, das man von „oben“ nach „unten“ gelangen lässt (wodurch nur Wärme entstünde, die man allenfalls mit dem Carnotschen Wirkungsgrad in elektrische Energie umwandeln könnte). Stattdessen schaltet man einen sogenannten Elektrolyten dazwischen, der nur den Lithiumionen ($\text{Li}^+ = \text{Li} \text{ minus } e^-$) die Passage erlaubt. Damit kann man die Elektronen über den „äußeren Draht“ führen und sie überzeugen, direkt elektrische Arbeit zu leisten. Auf diese Weise lässt sich theoretisch die gesamte freie Energie der Reaktion in elektrische Energie umwandeln (wegen der geringen Entropieänderung bei solchen Prozessen liegen die theoretischen Wirkungsgrade bei ca. 100 Prozent).

Abb. 1: Ähnlichkeiten und Unterschied zwischen Pumpspeicherkraftwerk (1a) und Lithiumbatterie (1b). Der Höhe in ersterem entspricht die Beliebtheitsskala (für Lithium) in letzterem.



Man benötigt also Materialien, die schnell und in großer Menge Lithium zu speichern gestatten (Elektrode), und solche, die schnell und ausschließlich Lithiumionen (Elektrolyt) transportieren. In Abb. 2 wird deutlich, dass der Elektrolyt ein reiner Ionenleiter ist, während die Elektroden gemischte Leiter sein müssen. In diesem Lichte erscheint der Name „Lithium-Ionen-Batterie“ extrem irreführend. Während der Elektrolyt üblicherweise ein Flüssigelektrolyt ist, sind die Elektroden Festkörper. Festkörper – das weiß man aus der Festkörperelektronik – sind prädestiniert für reversible und reproduzierbare Vorgänge, weisen aber weitaus geringere Diffusionskoeffizienten auf als flüssige Systeme.

Abb. 2: Die Lithiumbatterie ist ein Beispiel elektrochemischer Elemente, mithilfe derer chemische Energie in elektrische Energie umgewandelt wird. Im Unterschied zu Brennstoffzellen erlaubt die Batterie auch die Wiederaufladung. Während der Elektrolyt reine Li^+ -Ladung aufweisen soll, ist für die Elektroden die gleichzeitige Anwesenheit von Ionen- und Elektronenleitung wesentlich.



3 MATERIALANFORDERUNGEN

Abb. 3 gibt einen Überblick über die wichtigsten Anforderungen an leistungsfähige Batteriematerialien. Die thermodynamischen Kriterien setzen die theoretischen Limits (kein Stromfluss), während die kinetischen die Verluste (bei Stromfluss) betrachten. Darüber hinaus müssen natürlich auch noch Kriterien wie Verfügbarkeit, Umweltverträglichkeit oder Verfahrenstechnik berücksichtigt werden.

Abb. 3: Die wichtigsten Materialanforderungen leistungsfähiger Batterien.

Material-Anforderungen

- Thermodynamik (stromlos)

- theoretische Zellspannung
- theoretische chemische Kapazität
- theoretische Energiedichte

- Kinetik (unter Stromfluss)

- praktische Zellspannung, Kapazität, Energiedichte
- Leistungsdichte
- Reversibilität, Zyklierbarkeit
- Stabilität

- Kontext

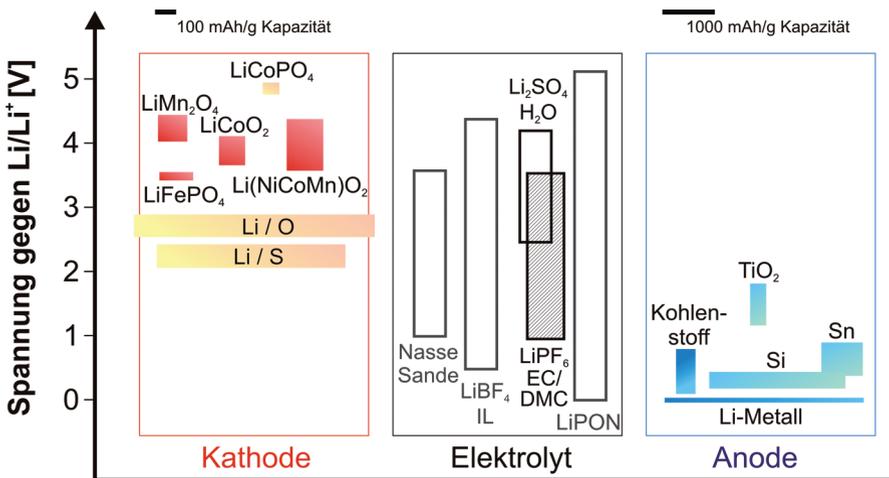
- Verfügbarkeit
- Kompatibilität
- Verfahrenstechnik

Generell bestehen elektrochemische Elemente, mithilfe derer man chemische Energie in elektrische Energie umwandelt (die dann über den Elektromotor in mechanische Energie umgewandelt wird), durch hohe Wirkungsgrade. Dies betrifft Batterien und Brennstoffzellen gleichermaßen. Natürlich ist der Energievorrat in Batterien und Brennstoffzellen begrenzt. Das erste E-Mobil muss an die Steckdose, das zweite muss an die Tankstelle. Der Vorteil des letzteren ist die schnelle Tankung sowie eine höhere Energiedichte; der enorme und entscheidende technologische Vorteil des ersteren ist die Wiederaufladbarkeit, das heißt die Nutzung ansonsten dissipierter „Bremsenergie“. Letzteres setzt enorme Reversibilität voraus, ein Umstand, den man sich mit „toter“ Masse (der Festkörpermatrix) erkaufte, innerhalb derer das Lithium untergebracht wird. Natürlich ließen sich auch Flüssigelektroden benutzen (siehe Na-S-Batterien), allerdings setzt dies die Verwendung fester Elektrolyte voraus. Gas-Elektroden sind bei Raumtemperatur (mit Ausnahme der Wasserstoffelektrode) schwerlich – zumindest nicht ohne Katalysatoren – reversibel zu gestalten.

Naturgemäß ist Lithium das Element der Wahl für eine Autobatterie. Ein Blick ins Periodensystem beweist dies. Lithium findet sich „oben links“ und ist das leichteste Metall. Die exponierte Stellung garantiert geringe Masse, hohe Zellspannung, große Speicherkapazität, geringe Energiedichte und hohe Speicherkapazität. Wenn wir für Li-Batterien eine Energiedichte von 102 Wh/kg in Rechnung stellen, benötigen wir für eine vergleichbare Reichweite bei einem Fahrzeuggewicht von einer Tonne etwa 100 kg Batteriegewicht. (Beim Bleiakku – wegen der mindestens um eine Größenordnung geringeren Energiedichte – benötigt man eine Tonne. Allerdings wäre es eine Milchmädchenrechnung, zu glauben, das Gesamtgewicht addiere sich zu zwei Tonnen. Es ist eher so, dass sich die Batterie – wenn sie es könnte – selber spazieren führe.)

Abb. 4 gibt einen Überblick über die Materialpalette. Was die Negativelektrode angeht, hat sich leider die Verwendung reinen Li-Metalls im Zusammenhang mit flüssigen Elektrolyten als ungünstig erwiesen, da sich Dendrite ausbilden, die zum inneren Kurzschluss führen.

Abb. 4: Ein Ausschnitt aus der Materialpalette von Li-basierten Batterien (aktuelle Materialien: dunkel, potenzielle Materialien: hell).



In üblichen Lithiumzellen wird Graphit als Li-Einlagerungselektrode benutzt, wie man sieht mit geringem Spannungsverlust (das heißt Li ist im Graphit fast so unbeliebt wie im metallischen Lithium). Zinn und Silizium sind Elektroden mit großer Kapazität für Lithium. Bei beiden sind jedoch die großen Volumenänderungen bei Li-Einlagerung ein

Problem, bei letzteren auch die unzureichende elektronische Leitfähigkeit. Mangelnde elektronische Leitfähigkeit ist bei den meisten interessanten oxidischen Phasen problematisch. Während oxidische Positivelektroden wie Li-Cobaltoxid, -Nickeloxid oder -Manganoxid wohl etabliert sind, ist Li-Eisenphosphat (LiFePO_4) trotz der etwas geringeren Spannung zurzeit der heiße Kandidat. Hier sind es die sehr gute Kinetik, der geringe Preis, eine größere Sicherheit sowie die Unbedenklichkeit der Elemente, die zu Buche schlagen.

Als Elektrolytmaterialien dienen zurzeit flüssige – leider brennbare – organische Lösemittel, die Lithium-Salze aufgelöst enthalten. Aus Sicherheitsgründen unbedenkliche wässrige Elektrolyte lassen nur ein geringeres Spannungsfenster zu (1-2 V statt 3-4 V).

Was einem Chemiker zunächst zumeist einfällt, ist das Generieren völlig neuer Verbindungen. Dieses Unterfangen ist beileibe nicht völlig ausgereizt, allerdings wegen der harschen Randbedingungen nur in den wenigsten Fällen von Erfolg gekrönt.

Eine hilfreiche Strategie ist die Modifizierung erprobter Materialien. Im Unterschied zur ersten Strategie betreffen solche Modifizierungen in erster Näherung nicht die thermodynamischen Größen wie theoretische Zellspannung oder theoretische Energiedichte, allerdings in empfindlichem Maße kinetische Aspekte wie praktische Zellspannung, praktische Energiedichte und Leistungsdichte, die zumeist durch ionische und elektronische Leitfähigkeiten kontrolliert werden.

Die Variationen, die diesbezüglich erzielt werden können, sind alles andere als marginal. Das Eigenschaftsfenster, das innerhalb einer Phase durchschritten werden kann, ist häufig größer als der Übergang der mittleren Eigenschaft von einer Phase zu einer neuen. Man denke in diesem Zusammenhang an die enorme Variierbarkeit der elektronischen Eigenschaften des Siliziums durch Dotierung.

Das Potenzial der Eigenschaftsvariationen durch Erhöhung der chemischen Komplexität („Dotieren“) ist bei Batteriematerialien bei Weitem nicht ausgeschöpft. Dies liegt am mangelnden Verständnis der Ladungsträgerchemie („Defektchemie“) dieser Festkörper. Die von uns unternommene defektchemische Untersuchung von LiFeO_4 ist die erste und bislang einzige systematische Untersuchung in dieser Hinsicht.

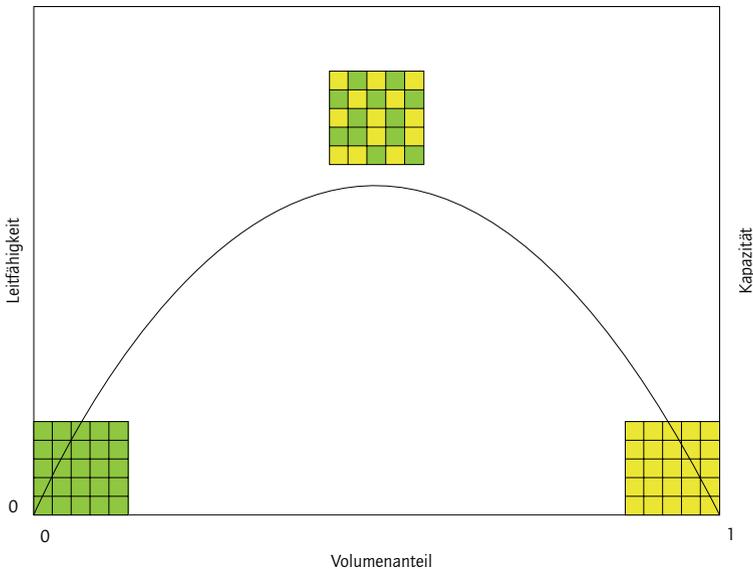
Eine Modifizierungsstrategie von erheblicher Tragweite ist die der Erhöhung der morphologischen Komplexität, das heißt gezieltes Einbringen von Grenzflächen und am Ende Nanostrukturierung. Dieses Verfahren strategisch einzusetzen ist eine spezielle Forschungsthematik unseres Stuttgarter Instituts (wir sprechen geradezu vom „Heterogenen Dotieren“); es soll im Folgenden detaillierter ausgeführt werden.

4 STRATEGIEN ZUR VERBESSERUNG DER MATERIALPARAMETER

An Grenzflächen sieht die Welt für die Ladungsträger anders aus. Hier können riesige Unterschiede in der Anzahl positiver und negativer Ladungsträger auftreten, auf Kosten einer lokalen Aufladung, ganz im Unterschied zum Festkörperinneren. Wegen der Beschränkung auf die Nähe zur Grenzfläche müssen sehr viele Grenzflächen eingebracht werden, unter Umständen so viele, dass die Grenzflächen miteinander kommunizieren, das heißt sich gegenseitig beeinflussen. Die dadurch erzielten Variationen in den Transporteigenschaften können immens sein; es lassen sich sogar Ionenleiter in Elektronenleiter umwandeln und vice versa.

Es erschien für die Fachwelt überraschend, dass Zumischungen von isolierendem Siliziumoxid zu Li-salzhaltigen Flüssigelektrolyten nicht nur die mechanischen Eigenschaften zu verbessern vermögen, sondern auch Leitfähigkeiten (dies liegt an verbesserter Dissoziation der Salze im Elektrolyten in Grenzflächennähe). Weiter unten soll auf diese „Nassen Sande“ zurückgekommen werden. Hier mag ein Blick auf Abb. 5 genügen, welche verdeutlicht, dass generell, wie von uns vorhergesagt und verifiziert, Komposite aus zwei Phasen völlig andere Leitfähigkeiten zeigen können als die Einzelphasen.

Abb. 5: Komposite aus zwei Phasen können Leitfähigkeiten, aber auch (chemische) Kapazitäten aufweisen, die völlig unterschiedlich zu denen der Einzelphasen sind.



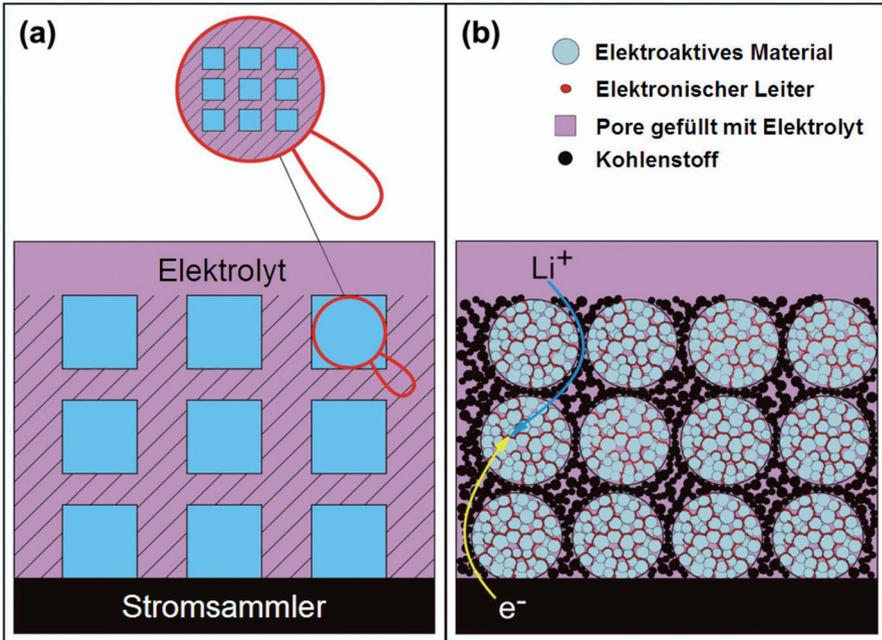
Eine weitere Überraschung aus der Grundlagenforschung ist, dass solche Composite Elemente oder Verbindungen – zum Beispiel Lithium – speichern können, die keine der beiden einzeln zu speichern vermag (siehe Abb. 4). Dieser neue Speichermechanismus stellt die Verbindung her zwischen elektrochemischem Speichern (Elektroden) und elektrischem Speichern (Superkondensatoren). Superkondensatoren weisen viel höhere Leistungsdichten, aber dafür deutlich geringere Energiedichten auf.

All die bislang erwähnten Strategien sind Strategien der Verbesserung der Materialparameter. Die primären Parameter aller in diesem Zusammenhang relevanten Mechanismen sind aber Widerstände (R) und Kondensatoren (C) – nicht nur im typisch elektrischen Sinne, es kann sich auch um chemische Widerstände oder chemische Kondensatoren handeln.

All diese Größen sind nun nicht nur durch effektive Materialparameter gekennzeichnet, sie beinhalten auch eine Proportionalität zu einer gewissen Potenz der Transportlänge. Im rein elektrischen Fall ist dies wohlbekannt: R und C sind gegenläufig von L abhängig, sodass eine L-unabhängige Relaxationszeit resultiert. Bei der klassischen Speicherung ist die Relaxationszeit durch L^2/D gegeben, wobei D den Diffusionskoeffizienten des Li darstellt. Wenn also alle obigen Strategien, den Materialparameter D zu verbessern, nicht fruchten, ist die Verkleinerung der Transportpfade ein hilfreiches und empfindliches Mittel. Ein (gar nicht niedriger) Li-Diffusionskoeffizient von $10^{-10} \text{cm}^2/\text{s}$ verlangt bei einer 1 mm dicken Probe eine Füllzeit von mehreren Jahren; die Reduktion der Partikel auf 10 nm verkleinert diese Zeit um zehn Zehnerpotenzen auf Millisekunden!

Dies suggeriert eine simple Lösung des Problems, setzt allerdings voraus, dass Li^+ und e^+ schnell zu diesen kleinen Partikeln transportiert werden können. Der Li^+ -Transport ist bei Verwendung flüssiger Elektrolyte normalerweise kein Problem; allerdings müssen diese Nanopartikel effizient elektronisch verdrahtet werden, was eine ausgefeilte Morphologie voraussetzt. Abb. 6 zeigt eine der Lösungen, die Stuttgart erfolgreich hat verifizieren können.

Abb. 6: Nanostrukturierung mit unterlegter „Verdrahtung“ als leistungsfähiger Weg, schnelle Elektroden zu erhalten.¹



Nachzutragen bleibt, dass neben der Einlagerung von Li in feste Phasen noch drei weitere Mechanismen zu berücksichtigen sind. Der erste ist die Ausbildung einer neuen chemischen Verbindung bei Speicherung. Dies ist der Fall bei FePO_4 ; beim Entladen entsteht LiFePO_4 . Dieses System ist hoch reversibel und zeigt wegen der Zweiphasigkeit eine konstante Spannung während der Ladung/Entladung.

Natürlich lässt sich sehr viel Li speichern, wenn man die Oxidelektrode gänzlich in Metall (oder Legierung) und Li_2O zersetzt. Dies reversibel zu gestalten, ist schwierig, aber nicht aussichtslos. Darüber hinaus ist in derart entstandenen Kontakten der oben erwähnte „Job-sharing-Mechanismus“ aktiv, der zusätzlich Li in den Grenzflächen zu speichern erlaubt.

¹ Y.-G. Guo, Y.-S. Hu, W. Sigle and J. Maier, Adv. Mater. 19 (16) (2007): 2087.

5 VERFÜGBARKEIT: SPEICHER- UND LEISTUNGSANFORDERUNGEN

Nach diesem Ausflug in die Materialforschung möchte ich nochmals den Blick auf die Materialpalette richten. Der Flaschenhals liegt in der Entwicklung der „Talelektroden“. Hier ist – letztendlich, weil dort Li so beliebt ist – die zur Verfügung stehende Kapazität geringer als bei den „Bergelektroden“. LiMnPO_4 oder LiCoPO_4 geben zu sehr hohen Spannungen Anlass – Spannungen, die allerdings mit üblichen Elektrolytmaterialien nicht unbedingt kompatibel sind. Stabile Elektrolytmaterialien wären geeignete Festelektrolyte. Allerdings sind hier die Leitfähigkeiten nicht gut genug. Wichtiger noch: Sie sind nicht kompatibel mit der für Hochleistungsbatterien so entscheidenden Nanostrukturierung. Hier sind unsere Soggy-Sand-Elektrolyte vorteilhafter; sie verbinden quasi-feste Konsistenz im Elektrolytraum mit der Möglichkeit, die Nanopartikel flüssig zu umspülen. Allerdings ist das Sicherheitsproblem nur partiell gelöst. Im Unterschied zu wässrigen Elektrolyten, bei denen nur ein kleines Spannungsfenster zur Verfügung steht, bieten ionische Flüssigkeiten im Prinzip bessere Stabilitäten; deren Leitfähigkeiten sind jedoch zurzeit nicht gut genug.

Bei der Anode stehen mit Sn und Si zwei Kandidaten zur Verfügung, die erhebliche Mengen Li speichern können. Das Problem der enormen Volumenänderung beim Befüllen lässt sich durch Zerlegung in getrennte Nanopartikel umgehen. Allerdings müssen diese Partikel wie eine Schafherde zusammengehalten und elektrisch verbunden werden. Im Falle von Sn ist uns dies in eleganter Weise durch Einbringen in Kohlenstoffmikrofasern gelungen.

Die Grenze der Energiedichten ist durch Li-Luft-Zellen gegeben. Die hier erzielten Werte der Energiedichte sind von denen der Brennstoffzellen gar nicht mehr weit entfernt, da sozusagen nur die reinen Brennstoffe in Rechnung gestellt sind. Allerdings sollte bedacht werden, dass solche Metall-Luft-Systeme typische Primärelektroden sind und es bislang nicht gelungen ist, die Sauerstoffreduktion über größere Zyklenzahlen reversibel zu gestalten. Rechnet man noch den Katalysatorgehalt in die Bilanzen ein, liegt eine zu erwartende Erhöhung der Energiedichten nicht bei zwei, sondern bei höchstens einer Größenordnung in Bezug auf die zurzeit realisierten. (Nicht ganz so extrem sind die Bedingungen für die Li-Schwefel-Batterie.)

Dies sieht anders aus bei der Leistungsdichte. Hier sind Steigungen von zwei Größenordnungen ohne Weiteres möglich. Die Frage ist nur, ob eine prinzipielle Ladezeitverkürzung von mehreren Stunden in den Minuten- oder Sekundenbereich nicht unsere Ladetechnologie überfordert bzw. mit erheblich geringerer Lebensdauer der Batterie erkauft werden muss.

Was die Verfügbarkeit angeht, sollten wir uns – wenn auch die Lithiumressourcen² sehr viel kleiner sind als die etwa von Natrium – diesbezüglich nicht allzu viele Sorgen machen; größeren Anlass zur Sorge bietet die Verfügbarkeit von Seltenen Erden, die für den Elektromotor benötigt werden. Dennoch erleben möglicherweise Na-basierte Systeme (Na-S oder Na- Cl_2) wieder eine Renaissance.

Zink-Luft-Batterien oder Brennstoffzellen sind ebenfalls intelligente elektrochemische Elemente, erlauben aber nicht die Wiederaufladbarkeit. Schlussendlich ist es wenig sinnvoll, die verschiedenen elektrochemischen Varianten gegeneinander auszuspielen; man sollte vielmehr ihre Kombinationsfähigkeiten in den Vordergrund stellen.

6 FAZIT

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Während die Grenze der Energiedichten elektrochemischer Systeme absehbar ist, gilt dies nicht für Leistungsdichten und Materialspezifikationen. All dessen ungeachtet wird die Elektrochemie in unserem Leben (und nicht nur in unserem Automobil) in einem Maße Einzug halten, wie es bislang der Halbleiterphysik im Zuge der Informationstechnologie vorbehalten war. Lassen Sie uns die Chancen dieser Technologie ergreifen.

² Vorhanden sind 30 Millionen Tonnen Li weltweit, davon die Hälfte in Südamerika. Zwei Drittel der Weltvorräte sind in Form von Salzlaken gespeichert (dies gilt für den in Südamerika). Das so erhaltende LiCl lässt sich durch Schmelzelektrolyse in Li umwandeln. Die anderen Vorräte sind in Form von Silikatgestein gespeichert, das sich über Li_2CO_3 weiterverarbeiten lässt. (Evans 2008.) Szenarien, die von einem erwarteten Mischanteil an EV, HEV und CV ausgehen und mit einer Rezyklierrate von 50 Prozent nach 2030 ausgehen, zeigen, dass die Vorräte für ca. 1000 Jahre reichen (allein die chilenischen Vorräte für 200 Jahre). (Vgl. Chemetall 2009.)

7 LITERATUR

Chemetall 2009

Chemetall GmbH: Chemetall Statement: Lithium Applications and Availability (2009). URL: http://www.chemetalllithium.com/fileadmin/files_chemetall/Downloads/Chemetall_Li-Supply_2009_July.pdf [Stand: 30.07.2010].

R. Keith Evans 2008

Evans, R. Keith: Lithium Abundance – World Lithium Reserve (2008). URL: <http://lithiumabundance.blogspot.com> [Stand: 30.07.2010].

> HERAUSFORDERUNGEN IM BEREICH FAHRZEUGKONZEpte UND ELEKTRISCHE ANTRIEBSSYSTEME

HERBERT KOHLER

1 EINLEITUNG

Ressourcenverknappung, Metropolisierung und gesetzliche Rahmenbedingungen bezüglich CO₂ und weiteren Emissionen sind bedeutende Herausforderungen an unsere Mobilität und werfen die Frage auf, wie Fahrzeugkonzepte in Zukunft aussehen werden. Die Relevanz solcher Konzepte wird unter anderem an der Tatsache deutlich, dass einerseits etwa 80 Prozent der weltweiten CO₂-Emissionen aus großen Städten und Ballungsräumen stammen¹ und andererseits der Anteil des Transportbereiches an den weltweiten CO₂-Emissionen ca. 20 Prozent beträgt².

Abb. 1: Herausforderungen zukünftiger Mobilität



¹ IEA World Energy Outlook 2008.

² IPCC 2007.

Bei der Herleitung zukünftiger Fahrzeugkonzepte müssen wir aber auch nach den Erwartungen und Bedürfnissen unserer (zukünftigen) Kunden fragen. Studien aus Japan zeigen beispielsweise, dass bei jungen Menschen die Bedeutung der individuellen Mobilität, die sich unter anderem im Besitz eines eigenen Fahrzeugs ausdrückt, seit einigen Jahren sinkt. Wird sich diese Entwicklung weltweit fortsetzen?³ Oder wird es den Automobilherstellern auch weiterhin gelingen, junge Generationen für die Innovationen im Bereich der automobilen Mobilität zu begeistern?

Um Mobilität nachhaltig sicherstellen zu können, wird ein intelligenter Mix aus unterschiedlichen Antriebskonzepten erforderlich sein. Denn die Vorteile in punkto Verbrauch und Emissionen der einzelnen Technologien kommen immer in Abhängigkeit vom jeweiligen Einsatzprofil zum Tragen. Daimler verfolgt deshalb gezielt einen mehrspurigen Technologie-Ansatz für emissionsärmere bzw. lokal emissionsfreie Fahrzeuge:

1. Spur: der effiziente (High-Tech) Verbrennungsmotor
2. Spur: der Hybridantrieb, Range Extender
3. Spur: das Elektro-Auto – mit Batterie oder Brennstoffzelle

Abb. 2: Technologieportfolio für eine nachhaltige Mobilität

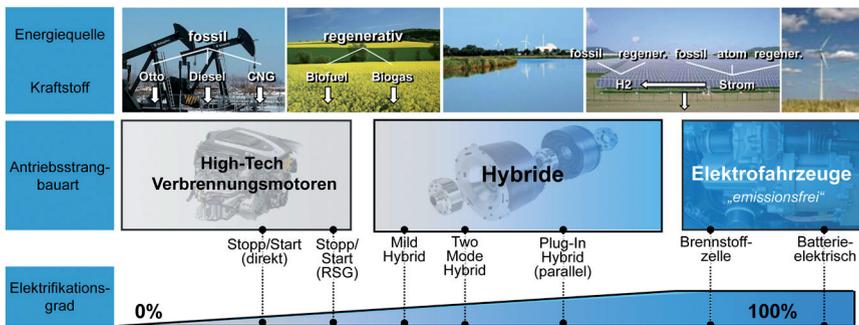


³ Interne Studie der Daimler AG.

2 ELEKTRISCHE ANTRIEBSSYSTEME

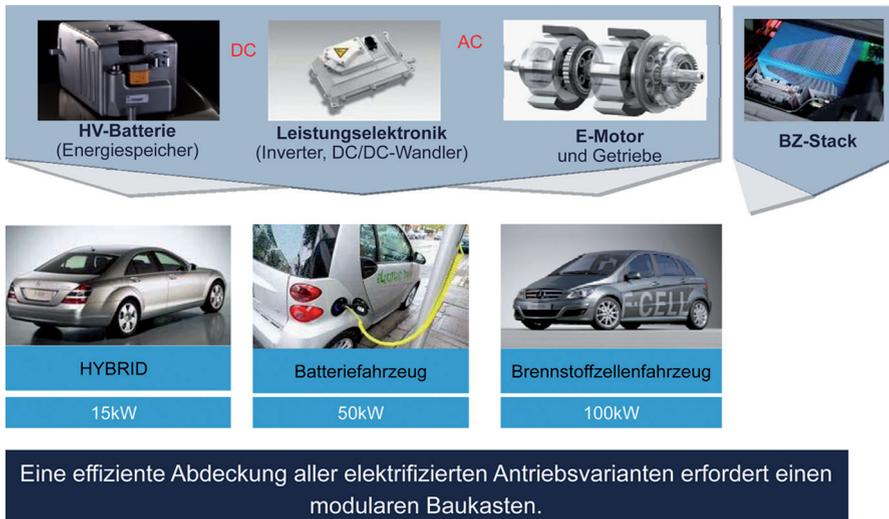
Es ist unstrittig, dass die Elektromobilität bzw. die Elektrifizierung des Antriebsstrangs – in welcher Form auch immer – die automobile Zukunft bestimmen wird. Ausgehend vom Elektrifikationsgrad des Antriebsstrangs wird dabei zwischen hybriden Antrieben (angefangen mit Start-Stopp-Funktion) und reinen Elektroantrieben unterschieden.

Abb. 3: Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs bestimmt die automobile Zukunft!



Als Hauptkomponenten der elektrifizierten Antriebsstränge sind die Batterie als Energiespeicher, die Leistungselektronik (Inverter, DC/AC-Wandler) sowie der E-Motor mit entsprechendem Getriebe zu nennen. Beim gegenwärtigen Hype rund um das Thema Batteriefahrzeug darf die Brennstoffzellen-Technologie allerdings nicht in den Hintergrund rücken; schließlich handelt es sich dabei ebenfalls um eine Form der elektrischen Mobilität, die sich durch hohe Reichweiten und relativ kurze Betankungszeiten auszeichnet. Sowohl die Lithium-Ionen-Batterie als auch die Brennstoffzelle stellen daher die Schlüsseltechnologien für emissionsfreies Fahren dar und sind als gleichberechtigte Systeme immer auch parallel zu betrachten.

Abb. 4: Hauptkomponenten in elektrifizierten Antriebssträngen



2.1 BATTERIE UND BRENNSTOFFZELLE

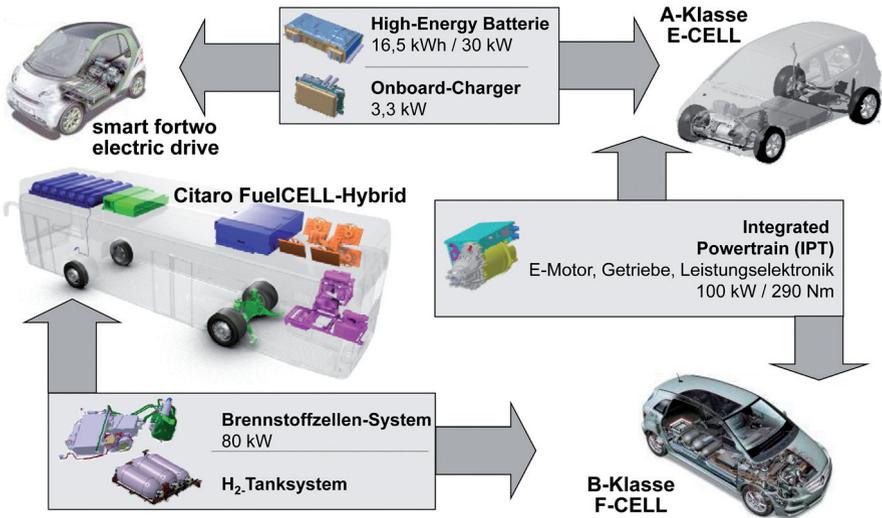
In Bezug auf die Batterietechnik wurden in der Vergangenheit zwar viele positive Erfahrungen gemacht, allerdings sollte in diesem Zusammenhang an Prof. Martin Winter (Universität Münster) erinnert werden, der darauf hinweist, dass aktuell keine Lithium-Ionen-Batterie existiert, die älter als vier Jahre ist.⁴ Hinsichtlich Alterungsbeständigkeit bzw. Langzeitverhalten von Batterien sind also Erfahrungen notwendig, die zusätzliche Entwicklungsstufen nach sich ziehen werden. Darüber hinaus stellen die Themen Leistungs- bzw. Energiedichte, Schnellladung und Niedrigtemperaturverhalten weitere Herausforderungen der Zukunft dar.

Auf der anderen Seite wurden im Hinblick auf die Laufleistung von Fahrzeugen mit Brennstoffzellentechnologie positive Erfahrungen gesammelt. Is zukünftige Herausforderungen sind hier insbesondere die erforderliche Kühlung bei hohen Leistungen und die Kosten der Technologie sowie die Volumen-effiziente Speicherung des Wasserstoffs zu nennen..

Ziel des Automobilherstellers Daimler ist, möglichst viele Komponenten so zu gestalten, dass sie in unterschiedlichen Antriebsformen und Aufbauformen zum Einsatz kommen. Nur über eine solche Modularisierung bzw. Standardisierung können die Entwicklungskosten für Elektrofahrzeuge gesenkt und damit preisattraktive und wettbewerbsfähige Mobilitätslösungen für Endverbraucher angeboten werden.

⁴ Vgl. Auto Motor und Sport 2009.

Abb. 5: Fahrzeugübergreifende Modulstrategie als Voraussetzung für Wirtschaftlichkeit



2.2 LEISTUNGSELEKTRONIK

Wie bereits angesprochen, bildet die Leistungselektronik neben Batterie und Motor eine weitere Hauptkomponente im Antriebsstrang eines Elektrofahrzeugs. Als Herausforderungen für die Zukunft sind das Kosten-Leistungs-Verhältnis, das (niedrige) Gewicht, die Integration ins Fahrzeug, die technische Weiterentwicklung sowie die Skalierung dieses Bauteils zu nennen. Darüber hinaus müssen Hersteller von Elektroautos insbesondere Lösungen für elektromagnetische Verträglichkeit im Fahrzeug weiter entwickeln und anbieten.

2.3 ELEKTROMOTOR

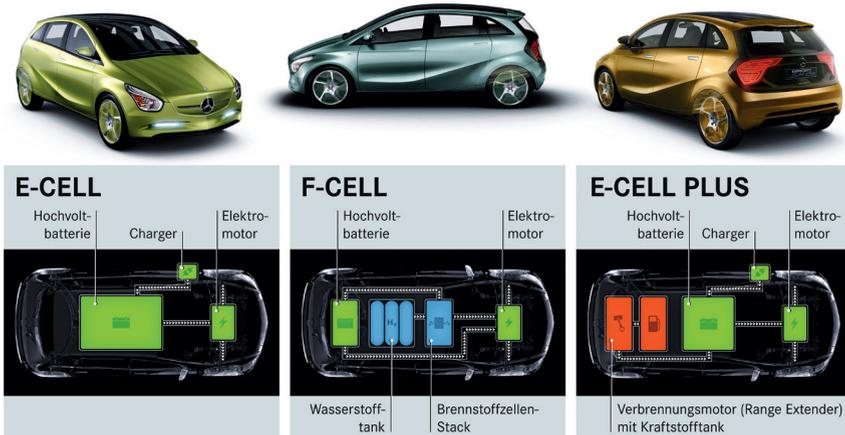
Obwohl Traktions-E-Motoren bereits seit über 100 Jahren gefertigt werden und in industriellen Anwendungen zahlreich zum Einsatz kommen, erfüllt der heutige technische Stand nicht alle Anforderungen für das Automobil. Als Herausforderung ist in diesem Zusammenhang insbesondere die Produktion hoher Stückzahlen in Fahrzeug-Qualität zu nennen, wobei das Gewicht und der Bauraum des Elektromotors letztendlich die entscheidenden Kriterien darstellen. Weitere Herausforderungen bei der Entwicklung von Traktions-E-Motoren für den Einsatz in der Automobilindustrie sind:

- Integrierbarkeit der Leistungs- und Drehmoment-Dichte
- komfortbetontes Fahren im Hinblick auf Geräusch oder Vibrationen
- Skalierbarkeit und Modularität hinsichtlich Leistung und Drehmoment

Bislang basieren Fahrzeugentwicklungen eines Herstellers auf einheitlichen Plattformen, die beispielsweise über Fahrwerk, Interieur oder Aufbau (Limousine, Cabrio etc.) entsprechend den Kundenwünschen flexibel ausgestaltet werden. Zukünftige Fahrzeugkonzeptionen streben eine Plattform an, die sowohl mit Elektromotor als auch mit Brennstoffzelle und Range Extender ausgestattet werden können. Dieses „Baukastenprinzip“ führt zwangsläufig zu einer breiten Differenzierung von Antriebssystemen im Automobil-Segment. Es ist davon auszugehen, dass sich nur die Hersteller behaupten werden, die diese Systemvielfalt beherrschen und kostengünstig anbieten können.

Abb. 6: Daimlers Konzept „BlueZERO“: Eine Fahrzeugplattform für drei Antriebsvarianten

Concept BlueZERO – Modulares Konzept für Elektromobilität



Mercedes-Benz

3 ALTERNATIVE INFRASTRUKTUREN

Sowohl Elektro- als auch Brennstoffzellenfahrzeuge benötigen für uneingeschränkten Alltagsbetrieb individuelle Lade- bzw. Wasserstoff-Infrastrukturen. Die Vollladung einer entladenen Batterie wird sich allerdings nie in Minutenschnelle realisieren lassen, wie dies bei der Betankung eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor oder bei einem Brennstoffzellenfahrzeug der Fall ist.. Batterie-Ladezeiten zwischen 45 und 60 Minuten liegen aber im Bereich des technisch Möglichen.

Die Realisierung einer Lade-Infrastruktur wird durch die unterschiedlichen Standards der Hersteller erschwert. In Bezug auf batteriebetriebene Fahrzeuge ist beispielsweise unklar, auf welcher Spannungsebene diese betrieben werden und ob Gleich- oder Wechselstrom zur Verfügung stehen muss. Diese Fragen müssen diskutiert und idealerweise als Standards für alle Hersteller und Kooperationspartner verbindlich definiert werden.

Der finanzielle Aufwand für den Aufbau der Infrastrukturen ist für die Batterie- und Brennstoffzellentechnologie vergleichbar – voraussichtlich sind in Deutschland Investitionen in Höhe von 1,5 bis 2 Milliarden Euro pro System erforderlich. Nach Meinung der Automobilindustrie sollte die Bundesregierung die Entwicklung dieser Zukunftstechnologien finanziell fördern.

4 RELEVANTE ROHSTOFFE

Für die Produktion alternativer Antriebe ist der gesicherte Zugriff auf bestimmte relevante Rohstoffe eine Grundvoraussetzung. Die Problematik der eingeschränkten Verfügbarkeit ergibt sich dabei weniger aus der naturgegebenen Endlichkeit der Stoffe, sondern vielmehr aus der politischen Instabilität einiger Herkunftsländer. Die Steigerung der Ressourceneffizienz sowie der Entwurf und die Umsetzung eines intensiven Recyclingkonzepts stellen daher relevante Handlungsfelder für Automobilhersteller dar.

5 KUNDENSTUDIEN

Die Daimler AG hat Kundenstudien durchgeführt, die die Erfahrungen mit Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen im Alltagsbetrieb untersuchen und deren Verbesserungspotenziale aufzeigen. Kunden, die ein mit Batterie betriebenes E-Fahrzeug ein Jahr in London testeten (Smart Fortwo Electric Drive), sind angetan von der einfachen Nutzung und den geringen Betriebsgeräuschen und haben Vertrauen in die Sicherheit des Fahrzeugs. Verbesserungspotenzial wird bei der Wiederaufladung der Batterie gesehen (dieser Vorgang dauert zurzeit noch 6 bis 8 Stunden) und beim Aufbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur. Von Kunden der Daimler AG, die über einen längeren Zeitraum hinweg ein Fahrzeug mit Brennstoffzelle nutzten, wird insbesondere dessen hohe Reichweite positiv herausgestellt. Verbesserungspotenzial besteht hinsichtlich Preis und der Infrastruktur für Wasserstoff.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Abschließend sollen noch einmal die vier zentralen Voraussetzungen für die Etablierung nachhaltiger elektrischer Mobilität zusammengefasst werden:

- Aufbau einer flächendeckenden Infrastruktur für Wasserstoff und Ladestrom.
- Ausbau der Primärenergie auf Basis erneuerbarer Quellen: Aktuell stoßen sowohl batteriebetriebene Fahrzeuge als auch Fahrzeuge mit Brennstoffzelle ca. 20 Prozent weniger CO₂ aus als konventionelle Verbrennungsmotoren, die mit Benzin oder Diesel betrieben werden. Eine weitere Reduzierung der CO₂-Emissionen im Elektromobilitätsbereich wird dann möglich sein, wenn der Anteil erneuerbarer Energien im europäischen Strom-Mix ausgeweitet wird.
- Weltweite Harmonisierung der Standards und Gesetze für Fahrzeuge: Dass durch die Entwicklung und Einführung eines standardisierten Tankrüssels vor ungefähr 65 Jahren die grenzüberschreitende Mobilität mit Autos erst möglich wurde, unterstreicht die Bedeutung von internationalen Standards und Industrienormen für die gesamte Branche. Bei der Produktion von Elektrofahrzeugen fehlen solche Normen und Standards noch – beispielsweise in Bezug auf die Stecker-Technologie beim Ladevorgang oder die benötigten Infrastrukturen (siehe oben). Um die

Elektromobilität aus ihrem Nischendasein zu führen und als massentaugliche Alternative auf dem Automobilmarkt positionieren zu können, ist die weltweite Harmonisierung der Standards und Gesetze allerdings zwingend erforderlich.

- Finanzielle Anreize für Kunden und Hersteller: Weltweit betrachtet, existiert im Bereich der Elektromobilität eine Vielzahl nationaler Förderprogramme, die sich in Bezug auf ihre Adressaten (F&E-Programme, Steuervergünstigungen als privater Kaufanreiz) und ihren Umfang zum Teil deutlich unterscheiden. Weil das Volumen der von Deutschland initiierten Programme im internationalen Vergleich geringer ausfällt, fordern die deutschen Automobilhersteller stärkeres staatliches Engagement, um dem Führungsanspruch Deutschlands im Bereich der Elektromobilität gerecht zu werden.

Abb. 7: Voraussetzung für Elektromobilität: Kooperation von Herstellern, Infrastrukturbetreibern und Politik



7 LITERATUR

Auto Motor und Sport 2009

Auto Motor und Sport: Batterieforscher Martin Winter im Interview (Online-Interview vom 12. Oktober 2009). URL: <http://www.auto-motor-und-sport.de/eco/lithium-ionen-batterie-forscher-martin-winter-im-interview-1430557.html> [Stand: 28.07.2010].

IEA World Energy Outlook 2008

International Energy Agency IEA: World Energy Outlook 2008. URL: <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2008/weo2008.pdf> [Stand 12.08.2010].

IPCC 2007

IPCC: Climate Change 2007, Synthesis Report, Genf 2007. URL: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm [Stand 12.08.2010].

> AUTORENVERZEICHNIS

Dr. Weert Canzler ist seit 1993 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB) und leitet dort seit 1998 zusammen mit Andreas Knie die Projektgruppe Mobilität. Er studierte von 1979 bis 1985 Politische Wissenschaft, Volkswirtschaft und Jura an der Freien Universität Berlin und promovierte 1996 in Soziologie an der Technischen Universität Berlin. Von 1986 bis 1988 war er im Nachwuchsförderprogramm „Berlin-Forschung an der Freien Universität“. Anschließend war er bis 1992 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) Berlin sowie am Sekretariat für Zukunftsforschung (SFZ) Gelsenkirchen.

Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka ist seit 2001 Institutsleiter des Fraunhofer-Instituts für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit in Darmstadt und Leiter des Fachgebietes „Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik (SzM)“ an der TU Darmstadt. Er studierte Allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal und begann seine berufliche Laufbahn 1988 als wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Braunschweig. Seine Promotion schloss er 1992 an der TU Clausthal ab und übernahm anschließend leitende Funktionen im DLR. 1997 folgte er einem Ruf als Professor an die Otto-von-Guericke-Universität in Magdeburg und wurde Inhaber des Lehrstuhls Adaptronik sowie Leiter der Arbeitsgruppe Experimentelle Mechanik. Seit 2006 ist er Mitglied des Präsidiums der Fraunhofer-Gesellschaft. Bei acatech ist Holger Hanselka seit 2009 Mitglied.

Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl ist seit 1993 Professor für Bodenschutz und Rekultivierung an der BTU Cottbus. Nach seinem Studium der Forstwissenschaften in Freiburg und Corvallis (Oregon) folgten Promotion und Habilitation in Freiburg, mehrjährige leitende Forschungstätigkeit in der Industrie und eine Vertretungsprofessur an der University of Hawaii. Hüttl ist Autor und Co-Autor von mehr als 300 wissenschaftlichen Beiträgen. Von 1996 bis 2000 war er Mitglied des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen der Bundesregierung und von 2000 bis 2006 Mitglied im Wissenschaftsrat, davon drei Jahre lang Vorsitzender der wissenschaftlichen Kommission des Wissenschaftsrates. Seit 2007 berät er das BMBF in der Hightech-Strategie zum Klimaschutz und ist wissenschaftlicher Vorstand des Deutschen GeoForschungs-Zentrums in Potsdam. Reinhard Hüttl ist Präsident bei acatech.

Dr.-Ing. Michael Jöckel leitet seit 2009 die Geschäftsstelle „Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität“. Nach seinem Studium des Allgemeinen Maschinenbaus an der TU Darmstadt nahm er 1999 seine Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) auf. 2004 wechselte Jöckel zum Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF und schloss ein Jahr später seine Promotion an der TU Darmstadt ab. Seit 2007 leitet er die Gruppe „Modellierung dynamischer Systeme“ am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF.

Prof. Dr. Herbert Kohler ist seit 2009 Leiter „E-Drive und Future Mobility“ in der Forschung und Vorentwicklung der Daimler AG und dort auch Umweltbevollmächtigter. Bereits 1976 war Kohler in die damalige Daimler-Benz AG eingetreten, wo er zunächst im Planungsbereich der Produktionswerke tätig war. 1982 promovierter er an der Universität Stuttgart. 1993 ging er in die Mercedes-Benz-Entwicklung und übernahm bis 1999 die Leitung der strategischen Produktplanung. In den darauffolgenden sechs Jahren leitete Kohler die Forschungsdirektion Fahrzeugaufbau & Antrieb und bis 2009 den Bereich Konzernforschung & Vorentwicklung für Fahrzeugaufbau und Antrieb der Daimler AG. Bereits seit 1998 ist Kohler Honorarprofessor an der Universität Stuttgart.

Prof. Dr. Joachim Maier ist seit 1991 Direktor am das Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart und gleichzeitig Honorarprofessor an der Universität Stuttgart. Zurzeit ist er Geschäftsführender Direktor des Instituts. In seinem Studium an der Universität des Saarlandes Saarbrücken widmete er sich der Chemie. 1982 schloss er seine Promotion ab und wechselte noch im selben Jahr als wissenschaftlicher Mitarbeiter an das Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart. Sechs Jahre später habilitierte Maier sich an der Universität Tübingen und nahm eine leitende Tätigkeit am Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart auf. 1989 bis 1996 lehrte er als externes Fakultätsmitglied am MIT. Maier hat über 575 wissenschaftliche Fachartikel veröffentlicht und hält 17 Patente. Seit 2009 ist er Mitglied bei acatech.

Dr.-Ing. E.h. Bernd Pischetsrieder ist seit 2007 Berater der Volkswagen AG. Von 1968 bis 1972 studierte er Maschinenbau an der TU München und begann 1973 seine berufliche Laufbahn bei der BMW AG München. 1982 wurde er Direktor für Produktion, Entwicklung, Einkauf und Logistik bei BMW Südafrika in Pretoria. 1985 kehrte er als Leiter der Qualitätssicherung zu BMW Deutschland zurück und übernahm ab 1987 die Leitung der Technischen Planung. Vier Jahre später trat Pischetsrieder in den Vorstand der BMW AG ein – zunächst als Vorstandsmitglied, später als Vorstandsvorsitzender. 2002 wechselte er zur Volkswagen AG und übernahm bis 2006 den Vorstandsvorsitz. Bernd Pischetsrieder ist Vizopräsident von acatech.

Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath leitet seit 2002 das Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) sowie das Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT) an der Universität Stuttgart. In den Jahren 1971 bis 1975 absolvierte er ein Maschinenbaustudium an der TU München und arbeitete anschließend als wissenschaftlicher Assistent und akademischer Rat am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der TU München, wo er 1981 promovierte. Im selben Jahr trat Spath in die KASTO-Firmengruppe ein. 1985 wurde er dort Prokurist sowie Chairman of Board der amerikanischen Tochterfirma KASTO Racine Inc.; 1988 stieg er zum Geschäftsführer der KASTO-Firmengruppe auf. Vier Jahre später nahm Spath einen Ruf der Universität Karlsruhe an das Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik an, bevor er nach Stuttgart wechselte. Dieter Spath ist Vizepräsident von acatech.

> **acatech – DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN**

acatech vertritt die Interessen der deutschen Technikwissenschaften im In- und Ausland in selbstbestimmter, unabhängiger und gemeinwohlorientierter Weise. Als Arbeitsakademie berät acatech Politik und Gesellschaft in technikwissenschaftlichen und technologiepolitischen Zukunftsfragen. Darüber hinaus hat es sich acatech zum Ziel gesetzt, den Wissenstransfer zwischen Wissenschaft und Wirtschaft zu erleichtern und den technikwissenschaftlichen Nachwuchs zu fördern. Zu den Mitgliedern der Akademie zählen herausragende Wissenschaftler aus Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen. acatech finanziert sich durch eine institutionelle Förderung von Bund und Ländern sowie durch Spenden und projektbezogene Drittmittel. Um die Akzeptanz des technischen Fortschritts in Deutschland zu fördern und das Potenzial zukunftsweisender Technologien für Wirtschaft und Gesellschaft deutlich zu machen, veranstaltet acatech Symposien, Foren, Podiumsdiskussionen und Workshops. Mit Studien, Empfehlungen und Stellungnahmen wendet sich acatech an die Öffentlichkeit. acatech besteht aus drei Organen: Die Mitglieder der Akademie sind in der Mitgliederversammlung organisiert; ein Senat mit namhaften Persönlichkeiten aus Industrie, Wissenschaft und Politik berät acatech in Fragen der strategischen Ausrichtung und sorgt für den Austausch mit der Wirtschaft und anderen Wissenschaftsorganisationen in Deutschland; das Präsidium, das von den Akademiemitgliedern und vom Senat bestimmt wird, lenkt die Arbeit. Die Geschäftsstelle von acatech befindet sich in München; zudem ist acatech mit einem Hauptstadtbüro in Berlin vertreten.

Weitere Informationen unter www.acatech.de

> **acatech DISKUTIERT**

Die Reihe „acatech diskutiert“ dient der Dokumentation von Symposien, Workshops und weiteren Veranstaltungen der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften. Darüber hinaus werden in der Reihe auch Ergebnisse aus Projektarbeiten bei acatech veröffentlicht. Die Bände dieser Reihe liegen generell in der inhaltlichen Verantwortung der jeweiligen Herausgeber und Autoren.

BISHER SIND IN DER REIHE „acatech DISKUTIERT“ FOLGENDE BÄNDE ERSCHIENEN:

Manfred Broy (Hrsg.): *Cyber-Physical Systems* (acatech diskutiert), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2010

Klaus Kornwachs (Hrsg.): *Technologisches Wissen* (acatech diskutiert), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2010

Martina Ziefle/Eva-Maria Jakobs (Hrsg.): *Wege zur Technikfaszination* (acatech diskutiert), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009

Petra Winzer/Eckehard Schnieder/Friedrich-Wilhelm Bach (Hrsg.): *Sicherheitsforschung – Chancen und Perspektiven* (acatech diskutiert), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009

Thomas Schmitz-Rode (Hrsg.): *Runder Tisch Medizintechnik. Wege zur beschleunigten Zulassung und Erstattung innovativer Medizinprodukte* (acatech diskutiert), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009.

Otthein Herzog/Thomas Schildhauer (Hrsg.): *Intelligente Objekte. Technische Gestaltung – Wirtschaftliche Verwertung – Gesellschaftliche Wirkung* (acatech diskutiert), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009.

Thomas Bley (Hrsg.): *Biotechnologische Energieumwandlung. Gegenwärtige Situation, Chancen und Künftiger Forschungsbedarf* (acatech diskutiert), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009.

Joachim Milberg (Hrsg.): *Förderung des Nachwuchses in Technik und Naturwissenschaft. Beiträge zu den zentralen Handlungsfeldern* (acatech diskutiert), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009.

Norbert Gronau/Walter Eversheim (Hrsg.): *Umgang mit Wissen im interkulturellen Vergleich. Beiträge aus Forschung und Unternehmenspraxis* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008.

Martin Grötschel/Klaus Lucas/Volker Mehrmann (Hrsg.): *Produktionsfaktor Mathematik. Wie Mathematik Technik und Wirtschaft bewegt* (acatech diskutiert), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2008.

Thomas Schmitz-Rode (Hrsg.): *Hot Topics der Medizintechnik. acatech Empfehlungen in der Diskussion* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008.

Hartwig Höcker (Hrsg.): *Werkstoffe als Motor für Innovationen* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008.

Friedemann Mattern (Hrsg.): *Wie arbeiten die Suchmaschinen von morgen? Informati- onstechnische, politische und ökonomische Perspektiven* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008.

Klaus Kornwachs (Hrsg.): *Bedingungen und Triebkräfte technologischer Innovationen* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2007.

Hans Kurt Tönshoff/Jürgen Gausemeier (Hrsg.): *Migration von Wertschöpfung. Zur Zu- kunft von Produktion und Entwicklung in Deutschland* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2007.

Andreas Pfingsten/Franz Rammig (Hrsg.): *Informatik bewegt! Informationstechnik in Verkehr und Logistik* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2007.

Bernd Hillemeier (Hrsg.): *Die Zukunft der Energieversorgung in Deutschland. Heraus- forderungen und Perspektiven für eine neue deutsche Energiepolitik* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2006.

Günter Spur (Hrsg.): *Wachstum durch technologische Innovationen. Beiträge aus Wis- senschaft und Wirtschaft* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2006.

Günter Spur (Hrsg.): *Auf dem Weg in die Gesundheitsgesellschaft. Ansätze für innovative Gesundheitstechnologien* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2005.

Günter Pritschow (Hrsg.): *Projektarbeiten in der Ingenieurausbildung. Sammlung bei- spielgebender Projektarbeiten an Technischen Universitäten in Deutschland* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2005.