



Fraunhofer
IWES

15. Kasseler Symposium
Energie-Systemtechnik

Erneuerbare Energien
und E-Mobilität

Tagungsband
23. – 24. September 2010



Fraunhofer

IWES



15. Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik

Erneuerbare Energien
und E-Mobilität

Mitveranstaltende:



Bezirksverein Kassel e.V.



ForschungsVerbund
Sonnenenergie



Universität Kassel



Kompetenznetzwerk dezentrale
Energietechnologien e.V.



Impressum

Herausgeber

Fraunhofer Institut
für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES

Der Institutsteil Kassel des am 01.01.2009 gegründeten neuen Fraunhofer IWES ist aus dem ehemaligen Institut für Solare Energieversorgungstechnik - Verein an der Universität Kassel e. V. (ISET) hervorgegangen.

Anschrift

Königstor 59
34119 KASSEL / Germany
Telefon: +49 (0) 561 7294-0
Telefax: +49 (0) 561 7294-100
E-Mail: mbox@iwes.fraunhofer.de

Am Seedeich 45
27572 BREMERHAVEN / Germany
Telefon: +49 (0) 471 902629-0
Telefax: +49 (0) 471 902629-10

Internet: www.iset.uni-kassel.de
www.iwes.fraunhofer.de

Wissenschaftlicher Tagungsleiter

Peter Caselitz, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES

Kassel 2010

Verantwortlichkeit für den Inhalt:

Die Verantwortung liegt bei den Autoren



Inhalt

Vorwort	5
Transformation der Energiesysteme und Elektromobilität	7
Jürgen Schmid	
Elektromobilität und Erneuerbare Energien - Szenarien und Perspektiven	18
Michael Weinhold	
Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität	28
Ulrich Buller	
Erneuerbare Energien und Elektromobilität - Forschungsförderung des BMU	29
Alexander Folz	
Lithium Ion Batteries - a Key Component for Electric Vehicles	35
Klaus Brandt	
Virtuelle Batterien und Elektromobilität	42
Peter Caselitz	
Integration of electric vehicles into the grid - Grid-to-Vehicle	60
Zbigniew Styczynski, Martin Stötzer, André Naumann	
Intelligente Netzschnittstellen für Elektrofahrzeuge	77
Jan Ringelstein, Sina Pezeshki, Johannes Prior, Stephan Funke, David Nestle	
Kontaktlose Netzanbindung von Elektrofahrzeugen	92
Ulrich Reker	
Stromrichter für Elektrofahrzeuge	101
Peter Zacharias, Ludwig Brabetz	



Vehicle to Grid Communication Interface	125
Jörg Heuer	
Geschäftsmodelle Elektromobilität	133
Anke Weidlich	
Wasserstoff und Elektromobilität - ein Zukunftsmodell?	141
Hubert Landinger, Ulrich Büniger	



Vorwort

Elektrofahrzeuge und Erneuerbare Energie sind die Zukunft des Individualverkehrs. Diese Einsicht ist seit einiger Zeit Konsens in Forschung und Industrie sowie in Gesellschaft und Politik. So sieht der nationale Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung vor, bis 2030 wenigstens fünf Millionen Elektrofahrzeuge auf die Straßen zu bringen. Viele wissenschaftliche und populär-wissenschaftliche Tagungen und Veranstaltungen befassen sich daher mit dem Thema „E-Mobilität“, und oft steht die Fahrzeugtechnik dabei im Vordergrund. Das 15. Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik widmet sich dagegen eher dem Aspekt der Energieversorgung der Elektrofahrzeuge. Beleuchtet werden Szenarien der Elektromobilität unter Verwendung erneuerbarer Energien ebenso wie technische und ökonomische Fragen der Netzanbindung und Netzintegration. Soweit sie die Wechselwirkung mit dem elektrischen Netz betreffen, werden aber auch verschiedene Aspekte der Fahrzeugtechnik wie kontaktlose Netzanbindung oder Stromrichter für Elektrofahrzeuge behandelt.

Der Übergang von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren zu Elektrofahrzeugen hat mit der Einführung von Hybridfahrzeugen bereits begonnen und wird über einen Zeitraum von wenigen Dekaden vermutlich zu reinen Elektrofahrzeugen führen. Dabei stellt die elektrische Antriebstechnik sicher kein prinzipielles Problem dar. Entscheidend ist die Verfügbarkeit kleiner und leichter elektrischer Energiespeicher die außerdem sicher, kostengünstig und langlebig sein müssen. Aus heutiger Sicht werden sich Speicher mit diesen Eigenschaften wohl nur durch Lithium-Ionen-Technologien oder vielleicht auch durch Lithium-Metall-Polymer-Batterien realisieren lassen. Dabei ist die Entwicklung von Lithium-Ionen-Speichern für Traktionsanwendungen schon aus thermischen Gründen mit Speichern der Gerätetechnik kaum vergleichbar. Die größten Probleme im Bereich der Traktionspeicher stellen immer noch die Kosten und die Lebensdauer dar. Allerdings sind Batteriehersteller und Forscher optimistisch und gehen davon aus, dass sich diese Probleme in den nächsten Jahren überwinden lassen.

Unser Dank gilt allen Referenten des Kasseler Symposiums 2010 sowie allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des IWES für ihr Engagement bei der Vorbereitung und Durchführung der Tagung. Mögen die beiden Tage in Kassel allen Teilnehmern interessante Informationen bieten und in guter Erinnerung bleiben.



Jürgen Schmid
Institutleiter



Peter Caselitz
Bereichsleiter Regelungstechnik und Energiespeicher
Wissenschaftlicher Leiter des Symposiums



Transformation der Energiesysteme und Elektromobilität

Prof. Dr. Jürgen Schmid, Institutsleiter Fraunhofer IWES und Mitglied im Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen WBGU

Dem heutigen globalen Primärenergiebedarf und der zu erwartenden Zunahme stehen mit den erneuerbaren Energien bekanntermaßen ausreichende Potentiale gegenüber (s.a. Bild 1). Sonne und Wind könnten den Bedarf jeweils allein decken, fluktuieren allerdings stark und stehen bei geographischer Betrachtung nicht überall ausreichend zur Verfügung. Die Aufgabe besteht also im Wesentlichen in der technischen und ökonomischen Erschließung der erneuerbaren Quellen sowie der Integration in die Versorgungsstrukturen und der Transformation der Energiesysteme.

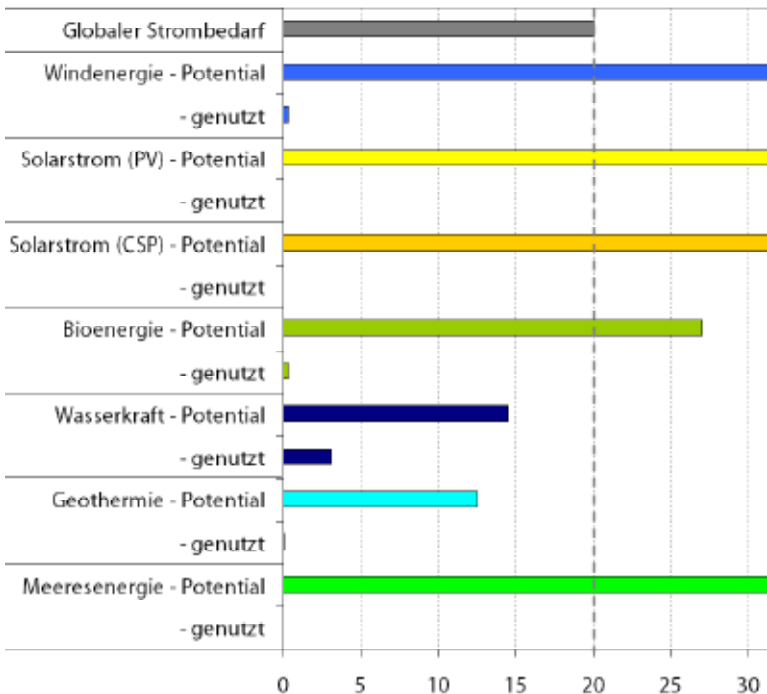


Bild 1: Technisches Potential erneuerbarer Energien weltweit nach der Substitutionsmethode. (Quellen: s. Grafik)

Wo stehen die Erneuerbaren heute?

Die Windenergie hatte in den vergangenen Jahren beispielsweise jährliche Zuwächse zwischen 30 und 40 %. Das wird in den nächsten Jahren sicherlich etwas geringer ausfallen. Die Lernkurve der Kosten zeigt bei der Windenergie derzeit einen Rückgang um 10 % je Verdoppelung der installierten Leistung. Bei der Photovoltaik sind es rund 20 %. Für den Vergleich eignet sich besonders gut die Betrachtung der Kosten aufgetragen über der erzeugten Energie (s.a. Bild 2). Dabei wird deutlich, dass alle Erneuerbaren konkurrenzfähig zu den konventionellen fossilen Energieträgern werden, wenn ihr Anteil ausreichend groß, etwa bei 20 % liegen wird. Das gilt für alle gleichermaßen, auch wenn wir bei der Photovoltaik global erst bei einem Promille und der Windenergie bei rund 1,5 % liegen. Die Wirtschaftlichkeit ist also keine grundsätzliche, sondern nur eine zeitliche Frage.

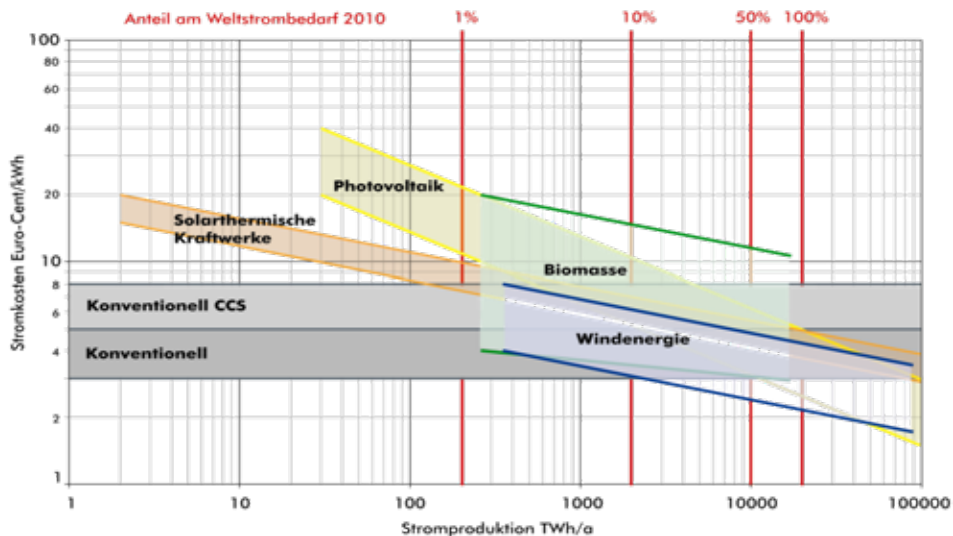


Bild 2: Entwicklungspotential der Kosten für Strom aus erneuerbaren Energien (Quelle: Schmid, Bard)

Die alleinige Versorgung mit erneuerbaren Energien ist aufgrund der Fluktuationen von Wind und Sonne natürlich auf mehr Säulen zu bauen. Dazu zählen z. B. auch die Nutzung von in Biomasse gespeicherter Energie, Maßnahmen zum Verbrauchsmanagement (Demand Side Management) und Erzeugungsmanagement (Kombikraftwerke), geeignete Einbindung großer Pumpspeicher für den mittel- bis langfristigen Ausgleich sowie neuer Speicheransätze für die kurzzeitige Netzunterstützung, wie sie z.B. mit der Elektromobilität oder der Speicherung von erneuerbarem Strom im Erdgasnetz entstehen können.



Wie lässt sich die Effizienz unserer Energieversorgung deutlich steigern?

Bei der Stromerzeugung mit konventionellen Kraftwerken gehen zwei Drittel der Primärenergie als Verlustwärme verloren. Durch jede direkt aus erneuerbaren Energien erzeugte Kilowattstunde werden drei Kilowattstunden auf der Primärseite der konventionellen Kraftwerke ersetzt (s.a. Bild 3). Andererseits gilt es durch einen schnellen und weitreichenden Ausbau von Kraft-Wärme-Kopplung die thermischen Verluste für unsere Wärmebedürfnisse zu nutzen. Ein weiterer wichtiger Baustein sind elektrisch betriebene Wärmepumpen. Deren Effizienz und Umweltbilanz fällt umso besser aus, je höher der erneuerbare Anteil des eingesetzten Stroms ist (s.a. Bild 4). Der dritte große Primärenergieanteil wird im Verkehrsbereich mit mittleren Wirkungsgraden von rund 20 % für unsere Mobilitätsbedürfnisse eingesetzt. Hier bietet die mit regenerativem Strom betriebene Elektromobilität die effizienteste Alternative (s.a. Bild 5, 6, 7).

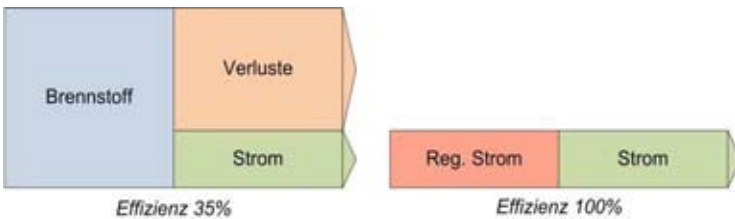


Bild 3: Effizienzsprung im Stromsektor durch zunehmende direkte Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Quelle: (Sterner, Schmid, Wickert, 2008); (WBGU, 2008)

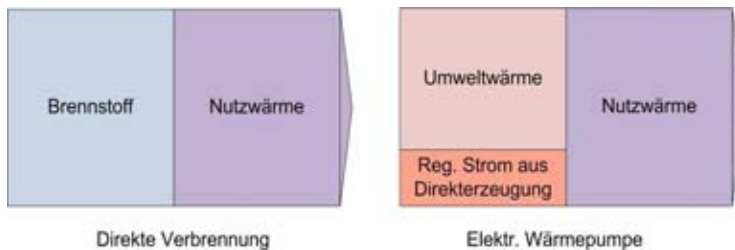


Bild 4: Effizienzsprung im Wärmesektor durch regenerative Wärmepumpen. Quelle: (Sterner, Schmid, WBGU, 2008)

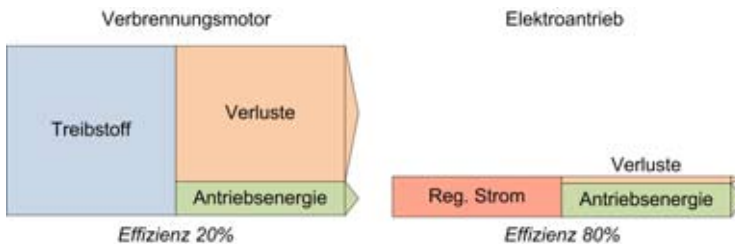


Bild 5: Effizienzsprung im Verkehrssektor durch Elektromobilität um den Faktor 3 bis 4. Quelle: (Sterner, Schmid, Wickert, 2008); (WBGU, 2008)

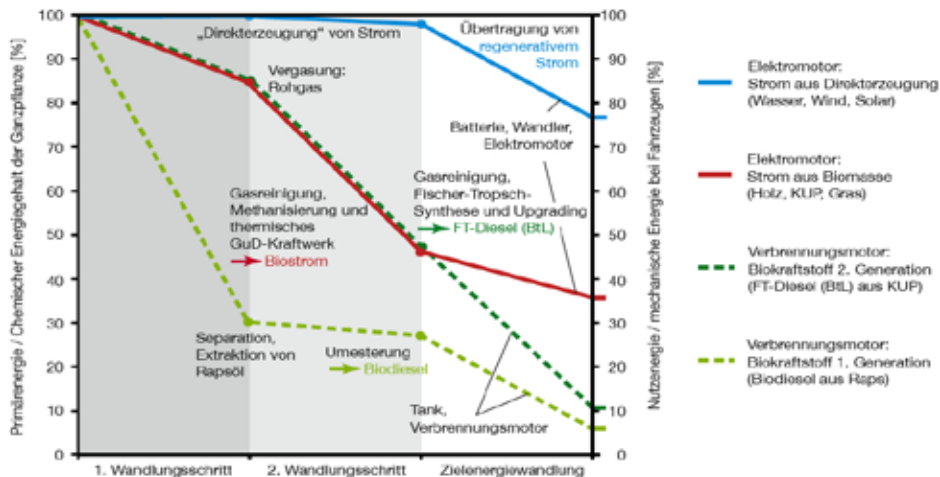


Bild 6: Wirkungsgrade verschiedener Bioenergiepfade im Vergleich zur Elektromobilität mit Strom aus Wasser-, Wind- oder Solarenergie. Quelle: (Sternner, Schmid, WBGU, 2008)

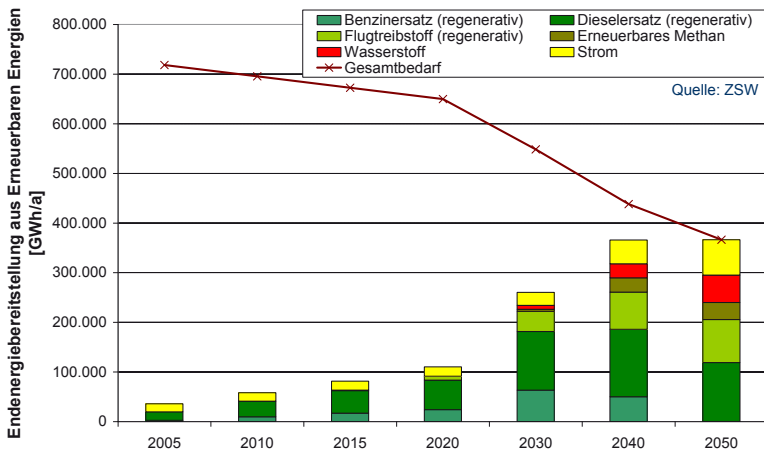


Bild 7: Entwicklung des Endenergiebedarfs des Verkehrs aus erneuerbaren Energien (Quelle: Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg)



Transformation der Energiesysteme

Der Übergang vom heutigen Zustand der Energiesysteme zu einem nachhaltigen, emissionsfreien System muss so gestaltet werden, dass technologische Fehlentwicklungen vermieden und dass die Versorgungssicherheit auch während der Transformationsphase gewährleistet ist (no regret Strategie). So zeichnet sich schon heute ab, dass mit zunehmenden Anteilen von erneuerbaren Energien aus Wind und Sonne im Strommix, die bisherige Aufteilung der Lastbänder (Grund-, Mittel- und Spitzenlast) verschwinden wird (Sternier et al, 2010). Mit zunehmenden Anteil fluktuierender Stromquellen muss für Europa ein neues, sehr leistungsfähiges Stromübertragungsnetz zur Verfügung stehen, das einerseits die bei der lokalen Erzeugung entstehenden Schwankungen großflächig ausgleicht (irgendwo bläst in Europa immer der Wind) und das andererseits die Einbindung der enormen Speicherkraftwerkskapazitäten vor allen Norwegens erlaubt.

Gelingt der Ausbau dieses transeuropäischen Supernetzes nicht rechtzeitig oder nicht vollständig, müssen im nationalen Rahmen sog. Residuallast-Kraftwerke diesen Ausgleich übernehmen. Im Gegensatz zu bisher eingesetzten Grund- bzw. Mittellastkraftwerken sind das schnell reagierende Gaskraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung und virtuell vernetzbare Kleinstsysteme wie Blockheizkraftwerke, Mikroturbinen und Brennstoffzellen. Elektrische Energiespeicher, wie sie oft vorgeschlagen werden, könnten im Prinzip diesen Ausgleich ebenfalls leisten, sind jedoch auf absehbare Zeit gegenüber starken Netzen bzw. Residuallast-Kraftwerken nicht konkurrenzfähig.

Heutige Großkraftwerke sind dafür ungeeignet, denn sie können den dafür erforderlichen großen Leistungsänderungen nicht schnell genug folgen. Geeignete Kraftwerkstypen sind dann: Gaskraftwerke und Kraft-Wärmekopplungsanlagen (Motor-Generatoren, Mikroturbinen, Brennstoffzellen), die über entsprechende Kommunikationseinrichtungen gesteuert werden können.

Mit dem Ausbau der Erdgas-basierten Kraftwerke und der Kraft-Wärme-Kopplung kann sofort begonnen werden. Der zunächst zunehmende Bedarf an fossilem Erdgas wird mittelfristig kompensiert durch den Wegfall des Bedarfs für Erdgas-Heizungen (bei Zunahme der Kraft-Wärme-Kopplung und der elektrischen Wärmepumpen). Langfristig wird der Erdgasbedarf durch dessen zunehmende Substitution mit nachhaltig erzeugtem Biomethan und erneuerbarem Methan aus elektrischen Überschüssen gegen Null gehen (s.a. Bild 11, 12). Dies bedeutet, dass auch das bestehende Erdgasnetz an die sich ändernden Standorte zukünftiger Quellen angepasst werden muss. Wie beim elektrischen Netz wird auch das Gasnetz im Gegensatz zu heute wechselnde Durchflussrichtungen verarbeiten müssen. Dafür sind neue Management-Strategien notwendig (smart grids). Der zur Zeit stattfindende Ausbau von Flüssiggas-Terminals sollte weiterhin forciert werden, um die Aufnahmefähigkeit von z.B. aus Windstrom-Überschüssen an besonders günstigen Standorten erzeugten Methan zu ermöglichen.

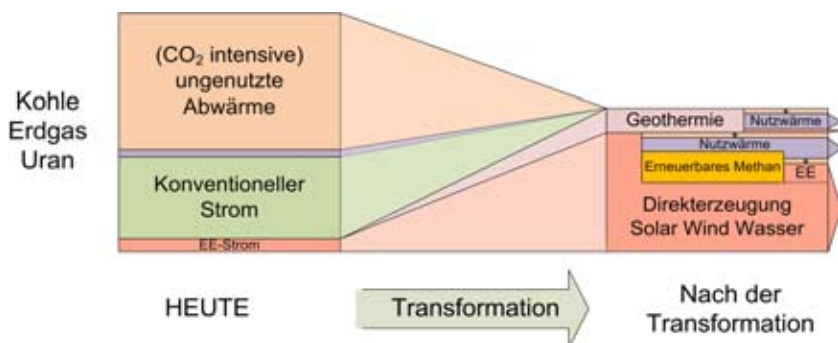


Bild 8: Transformation im Stromsektor (Quelle: Sterner, Schmid, WBGU, 2008/2010)

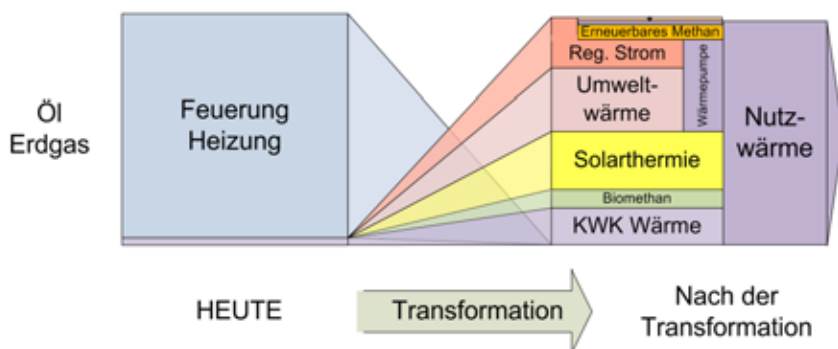


Bild 9: Transformation des Wärmesektors (Quelle: Sterner, Schmid, WBGU, 2008/2010)

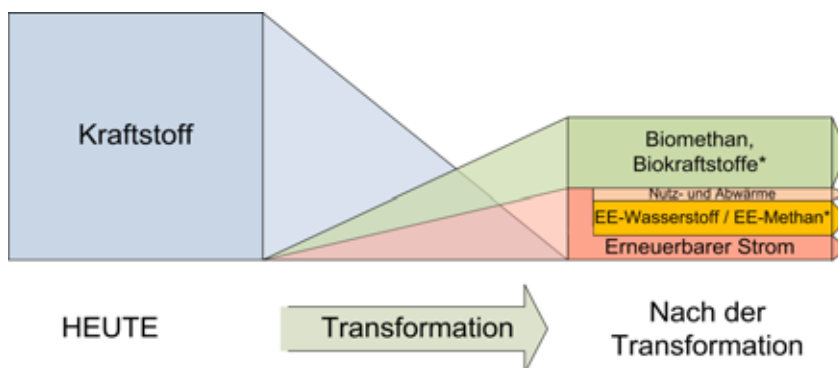


Bild 10: Transformation im Verkehrssektor (Quelle: Sterner, Schmid, WBGU, 2008/2010)

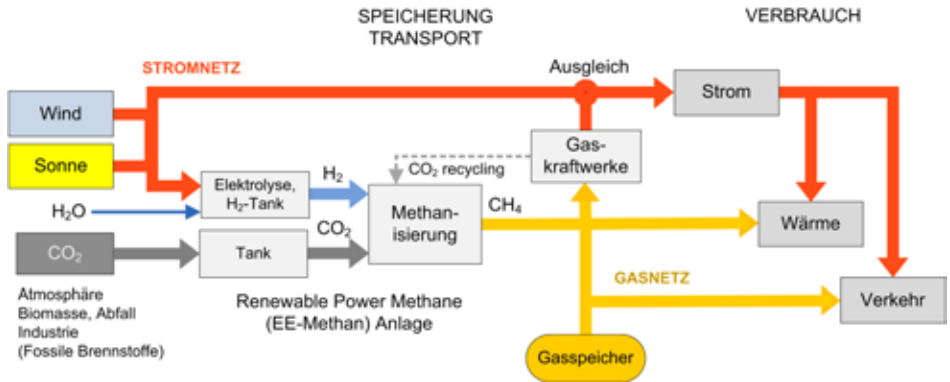


Bild 11: Stromspeicherung durch Kopplung von Strom und Gasnetz (Quellen: Sterner, 2009; Specht et al, 2010)

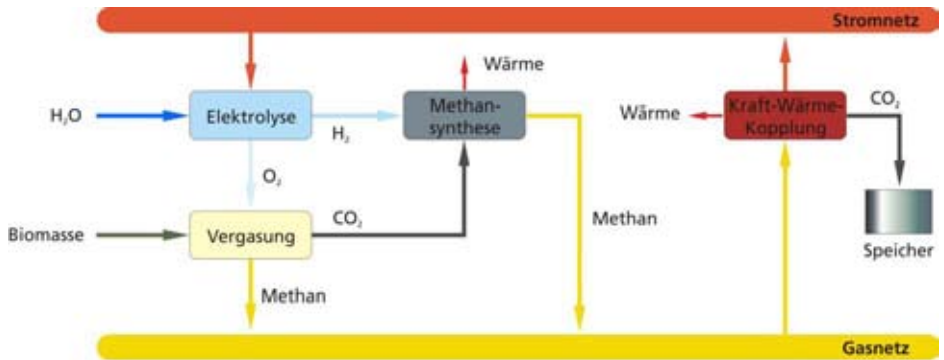


Bild 12: Zukünftige Vernetzung von Gas und Strom: Nutzung des Erdgasnetzes für den Kohlenstofftransport (Quellen: Sterner, 2009; Specht et al, 2010)

Zukünftige Mobilität

Im Jahr 2004 stammten 23 % der energiebezogenen CO₂-Emissionen aus dem Transportsektor, drei Viertel davon aus dem Straßenverkehr (IPCC, 2007). Gleichzeitig wird die Nachfrage nach Transportdienstleistungen mit anhaltendem starkem Wirtschaftswachstum in Schwellen- und Entwicklungsländern weiter anwachsen. Wichtige Kernelemente eines zukünftigen nachhaltigen Transportsystems müssen daher schon heute identifiziert werden, um die Investitionen in nachhaltige Verkehrssysteme zu lenken. Das Ziel der Emissionsreduktion erfordert insbesondere, dass die Verwendung von fossilen Energieträgern, die heute etwa 97 % der 96 EJ Primärenergie für Transport bereitstellen (IEA world energy balance 2007 online), stark reduziert wird.

Im Gegensatz zum Fall der anderen Sektoren reichen heute verfügbare Technologien nicht aus für eine vollständige Dekarbonisierung des Transportsektors. Während der Schienenverkehr und der



motorisierte Individualverkehr mittelfristig durch Elektrifizierung zumindest großteils zu dekarbonisieren sind, stehen für den Güterverkehr auf der Straße und den Flug- sowie Schiffsverkehr noch keine nachhaltigen Lösungen in der Phase der Markteinführung. Das nachhaltige Biomassepotential von 80-170 EJ Primärenergie (WBGU 2009) reicht wahrscheinlich nicht aus, den zukünftig zu erwartenden Energiebedarf dieser Verkehrssektoren, der im Jahre 2050 knapp 100 EJ betragen wird (WBCSD 2004), vollständig abzudecken. Daher ist zweifelhaft, ob Biomasse eine nachhaltige Energieversorgung für diese Verkehrssektoren bieten kann und die Machbarkeit einer vollständigen Umstellung auf erneuerbare Energien hängt von der Entwicklung weiterer Technologien ab.

Gegenüber dem Verkehrssektor lassen sich CO₂-Minderungen in anderen Sektoren kostengünstiger erreichen. Daher stellen fossile Energieträger für die meisten Studien im Jahr 2050 noch mehr als die Hälfte der Energie im Verkehrssektor bereit. So sinkt z.B. bei Krewitt (2009) der Anteil fossiler Energie im Verkehr auf etwa 85 % im Jahr 2030 und auf knapp 60 % im Jahre 2050; die IEA kommt in ihrem 450 ppm Szenario des WEO 2009 auf einen Anteil von 87 % im Jahr 2030. Für Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen auf sehr niedrige Werte (400 ppm) dürfte zum Ende des Jahrhunderts eine vollständige Dekarbonisierung des Transportsektors erforderlich werden (van Vuuren 2010). Daher ist es von großer Bedeutung, diejenigen Technologien, die nachhaltige und CO₂-freie Mobilität ermöglichen, schnell zu entwickeln und wenn möglich auch schon einzusetzen. Der exemplarische Pfad des WBGU zeigt, dass von den Energiepotenzialen her auch 2050 schon eine Vollversorgung des Verkehrsbedarfs mit erneuerbarer Energie möglich sein könnte. Die Demonstration der nötigen Technologien gerade in den technisch hoch entwickelten Gebieten der Erde könnte also früh geschehen und würde als Vorbild das leap-frogging sich schnell entwickelnden Regionen fördern.

Wichtige Elemente für einen Umbau des Energiesystems in Richtung Nachhaltigkeit sind:

- Vermeidung von unnötigem und ungewolltem Verkehr
- Wechsel auf effizientere Fortbewegungsmittel
- Effizienzsteigerungen aller Fortbewegungsmittel, auch durch Wechsel der Antriebstechnologie

Durch die Erhöhung der Umwandlungseffizienz beim Antrieb - entweder durch Verbesserung der Technologie oder den Wechsel zu effizienteren Antriebstechnologien wie den Elektromotor - durch die Reduktion des Energiebedarfs und durch den teilweisen Wechsel auf weniger kohlenstoffintensive Treibstoffe sinken die spezifischen Emissionen aller Fortbewegungsmittel. Die Studien von Krewitt (2009) und der IEA (2009) gehen hier von inkrementellen Änderungen aus: Neben den Effizienzsteigerungen, die den Großteil der Emissionsminderungen bewirken, kommt es nur zu einem moderaten Einsatz von Hybrid- und Batterietechnik. Aus technologischer Sicht wäre auch ein schnellerer Umbau wie im exemplarischen Pfad des WBGU möglich. Hierbei werden die Antriebstechnologien komplett ausgetauscht. Fossile Kraftstoffe kommen nicht mehr zum Einsatz, stattdessen wird Mobilität zunehmend auf elektrischer Basis erfolgen und damit um den Faktor 2 bis 3 effizienter sein als unsere heutigen Kraftfahrzeuge. Hierzu zählen rein elektrisch betriebene Fahrzeuge auf Batteriebasis mit und ohne „Range-extender“ (Reichweitenverlängerer), wobei letzterer sowohl aus kleinen Verbrennungsmotoren als auch aus Brennstoffzellen bestehen kann.



Im Güterverkehr werden zum einen ebenfalls Hybridtechnologien eingesetzt. PKW, Bahn und Bus beziehen ihre Energie über Oberleitungen, Akkumulatoren oder Brennstoffzellen. Die Akkumulatoren werden durch bidirektionale Ladegeräte an Ladestationen geladen. Zusätzlich können durch kontaktloses Laden beim Fahren (induktive Übertragung) die Speicherbatterien nachgeladen werden. Für den Güter- und Langstreckenverkehr, sowie für Flugzeuge und Schiffe werden erneuerbare Kraftstoffe (erneuerbares Methan oder Wasserstoff) aus den Überschüssen der Stromproduktion aus Windenergie, Solarenergie und Wasserkraft hergestellt.

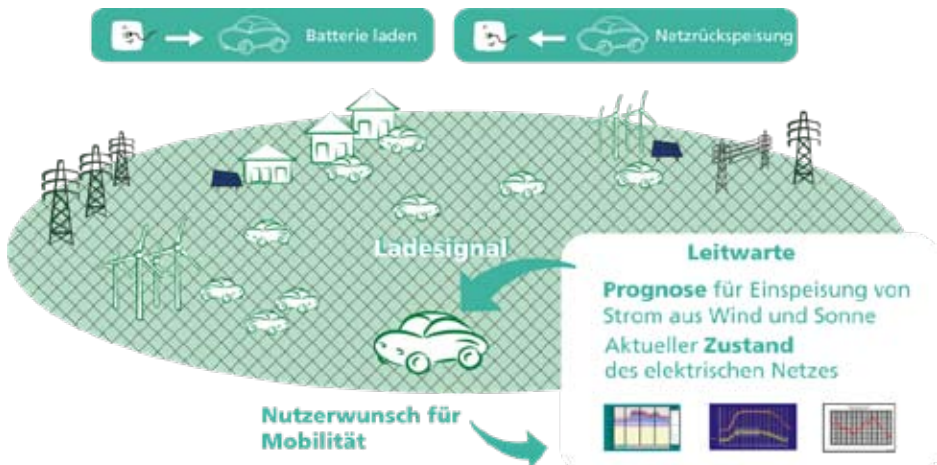


Bild 13: Automobile als flexible Speicher für kontrollierte Netzunterstützung (Quelle: Projekt Harz E-Mobility)

Zusammenfassung und Ausblick

Für den Ausgleich der in Zukunft stark steigenden Schwankungen bei der Stromerzeugung aus Sonne und Wind stehen dann folgende Elemente zur Verfügung:

- Leistungsfähige Hochspannungs-Gleichstromübertragungsnetze für die Aufnahme der an optimalen Standorten platzierten Stromquellen aus Sonne und Wind, für den großflächigen Horizontalausgleich von Leistungs-Schwankungen und für die Anbindung an die großen Speicherkraftwerkskapazitäten z.B. in Norwegen.
- Schnell reagierende, dezentrale Kraftwerke (vorzugsweise Kraft-Wärmekopplungs-Anlagen bzw. Gaskraftwerke), die über Erdgasnetze aus Biomasse-, Abfall- oder Kohlevergasungsanlagen mit CCS oder mit aus Stromüberschüssen erzeugtem Methan versorgt werden.
- Interaktive Netze für Strom und Gas (smart grids) in Verbindung mit Last- und Einspeisemanagement Verfahren (Kombikraftwerke).

Die Umweltverträglichkeit der elektrischen Wärmepumpen bzw. der Elektrofahrzeuge inkl. Bahn, Straßenbahn und Omnibussen verbessert sich mit zunehmendem Anteil der erneuerbaren Energien

im Strommix. Bei konsequenter Umsetzung der beschriebenen Strategie werden keine zusätzlichen Speicher zur Stabilisierung der elektrischen Netze erforderlich. Dies gilt allerdings nur für ein gesamteuropäisches Konzept. Eine enge Abstimmung zwischen allen europäischen Mitgliedsländern und die Koordination z.B. durch die Europäische Kommission ist daher Voraussetzung für eine erfolgreiche Implementierung.

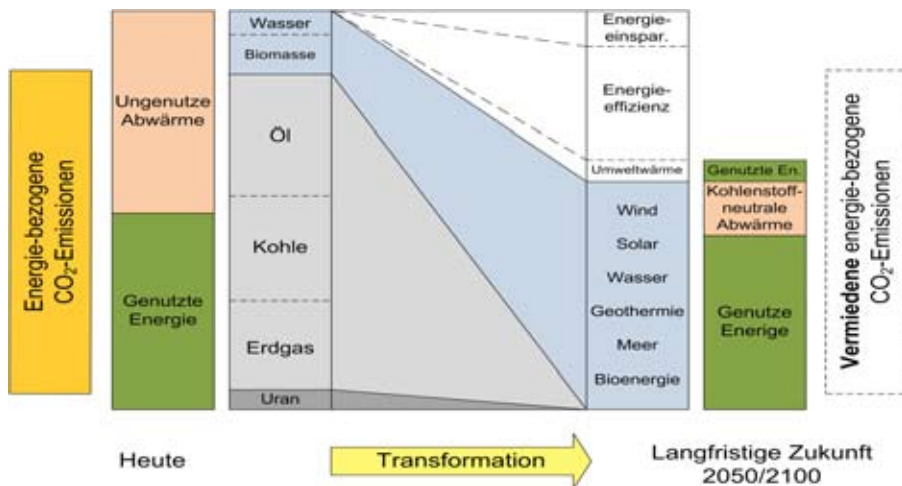


Bild 14: Vermeidung von Abwärme und Emissionen durch erneuerbare Energien (Quelle: Sterner 2009)

Quellen:

- [1] Specht, M.; Baumgart, F.; Feigl, B.; Frick, V.; Stürmer, B.; Zuberbühler, U.; Sterner, M.; Waldstein, G. (2010): Speicherung von Bioenergie und erneuerbarem Strom im Erdgasnetz. FVEE Jahrestagung 2009. Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien. FVEE, Berlin.
- [2] Sterner, M.; Schmid, J.; Wickert, M. (2008): Effizienzgewinn durch erneuerbare Energien - der Primärenergiebeitrag von erneuerbaren Energien. BWK No. 60, 08/2008. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag.
- [3] Sterner, M. (2009): Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems. Limiting global warming by transforming energy systems. Kassel University, Dissertation. <http://www.upress.uni-kassel.de/publi/abstract.php?978-3-89958-798-2>
- [4] Sterner, M.; Gerhardt, N.; Saint-Drenan, Y.M.; von Oehsen, A.; Hochloff, P.; Kocmajewski, M.; Lindner, P.; Jentsch, M.; Pape, C.; Bofinger, S.; Rohrig, K. (2010): Energiewirtschaftliche Bewertung von Pumpspeicherwerken und anderen Speichern im zukünftigen Stromversorgungssystem. Fraunhofer IWES, Kassel. <http://www.schluchsewerk.de/105.0.html>



- [5] WBGU (2008): Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung. WBGU Hauptgutachten 2008. Berlin: WBGU

Quellen zu EE-Potentialen:

- [1] (Harvard) Lu, X.; McElroya, M. B.; Kiviluomac, J. (2009): Global potential for wind-generated electricity. In: PNAS. <http://www.pnas.org/content/early/2009/06/19/0904101106>
- [2] (UNDP) Goldemberg, J. (2000): World Energy Assessment. Energy and the Challenge of Sustainability. 1. print. New York, NY: UNDP / UN-DESA / World Energy Council
- [3] (DLR) Teske, S.; Schäfer, O.; Zervos, A.; Beranek, J.; Tunmore, S.; Krewitt, W. et al. (2008): energy [r]evolution. A Sustainable Global Energy Outlook. Greenpeace und European Renewable Energy Council. Berlin. Online available at www.energyblueprint.info/
- [4] FAO (2008b): The State of Food and Agriculture 2008: Biofuels - Prospects, Risks and Opportunities. Rome: FAO.
- [5] BP (2009): BP Statistical Review of World Energy June 2009. London: BP.



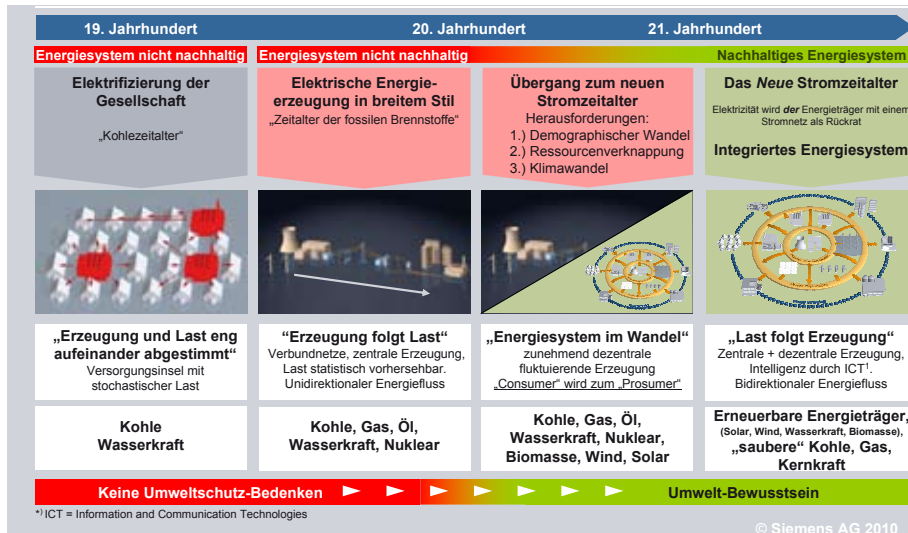
Elektromobilität und Erneuerbare Energien - Szenarien und Perspektiven

Dr. Michael Weinhold, CTO Siemens Energy

1. Das Neue Stromzeitalter
2. Smart Grid
3. Elektromobilität
4. „Picture of the Future“

Transformation des Energiesystems:

1. Das Neue Stromzeitalter

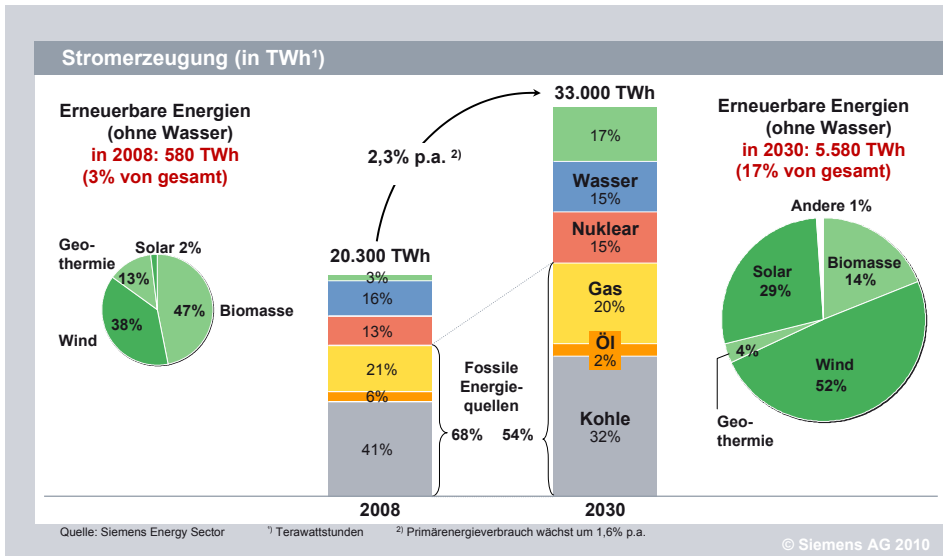


*ICT = Information and Communication Technologies



Globales Szenario:

Fossile Energieträger weiter bestimmend, Erneuerbare gewinnen an Bedeutung



Siemens wird den ersten Offshore-Windpark der Gigawatt-Klasse errichten

- ▶ 175 3.6-MW Turbinen mit 120m Rotor
- ▶ Kapazität: 630 MW
- ▶ Option, auf 1000 MW zu erweitern
- ▶ Genug Energie für ca. 750.000 Haushalte oder ¼ der Haushalte von Greater London

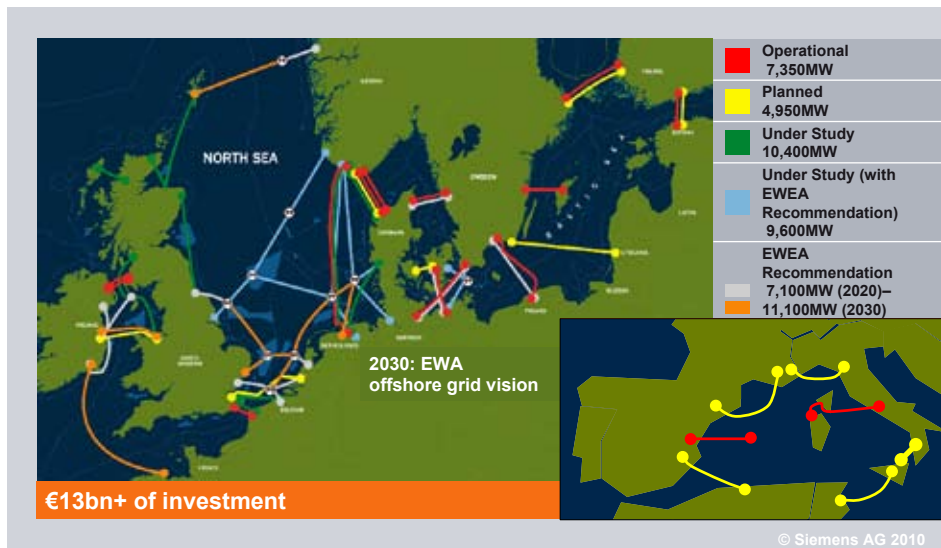
London

Wind farm London Array

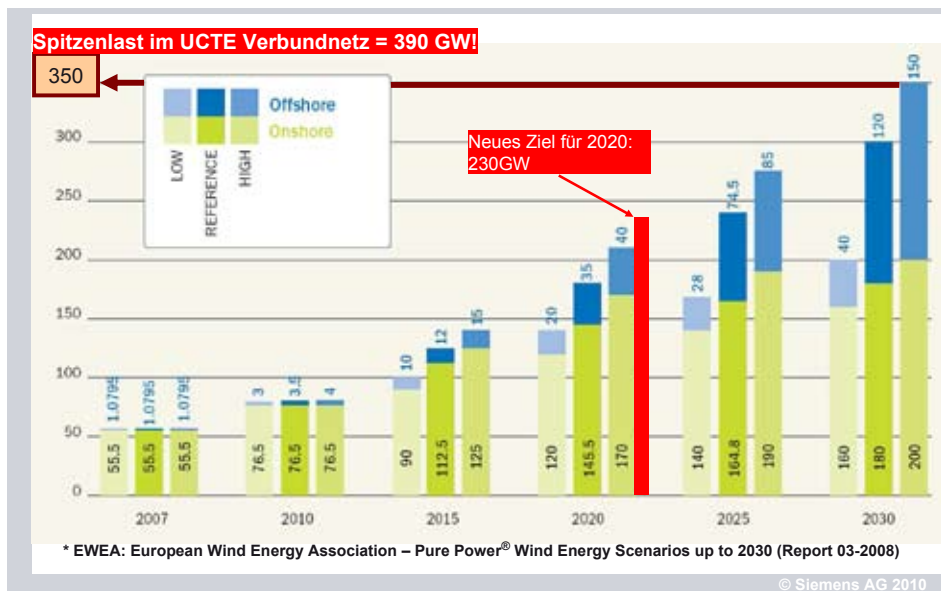
© Siemens AG 2010



Das Neue Stromzeitalter in Europa:
das europäische Offshore Super Grid



EWEA's* 3 Windenergie-Szenarien für Europa (in GW)





Die DESERTEC-Vision wird Realität mit Produkten und Lösungen von Siemens

Offshore wind farms

HVDC electricity highways

Onshore wind energy

Solar thermal power plants

Solar fields Receiver Power block Steam turbines

Siemens will play a key role in Desertec Industrial Initiative !

© Siemens AG 2010

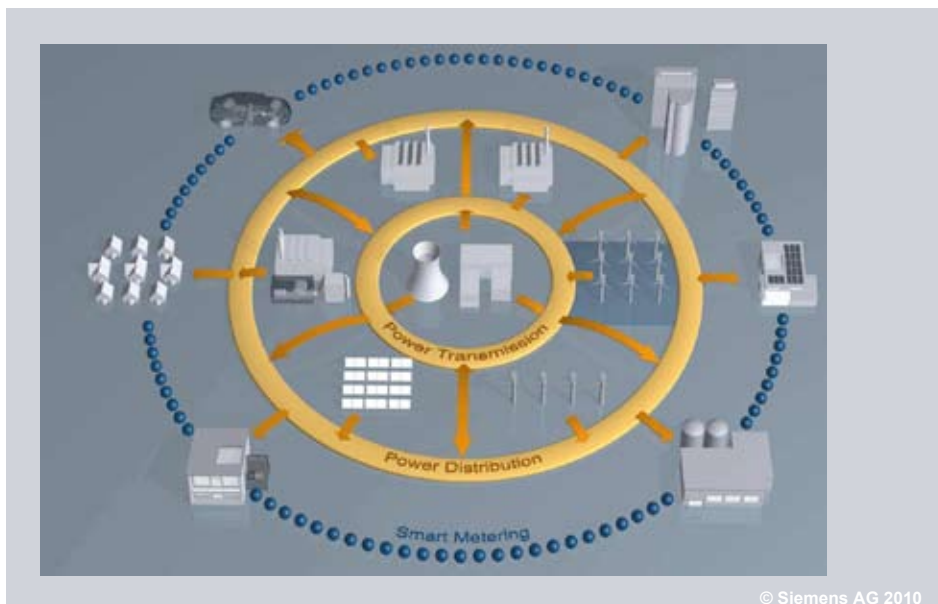




Das alte Stromsystem



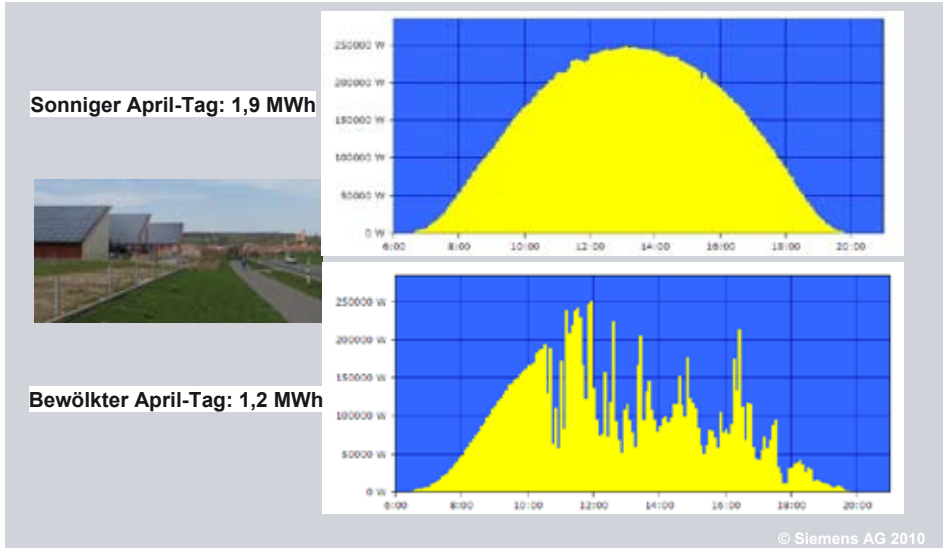
Intelligente Erzeugung, Netz und Last ermöglichen das Neue Stromzeitalter



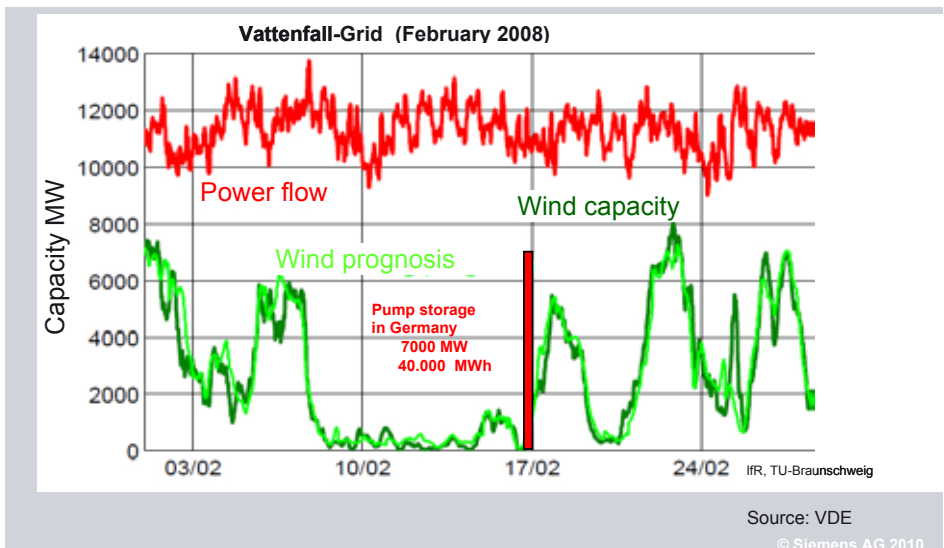


2. Smart Grid

Stromproduktion einer 314 kWp PV-Anlage in der Nähe von Erlangen, Deutschland



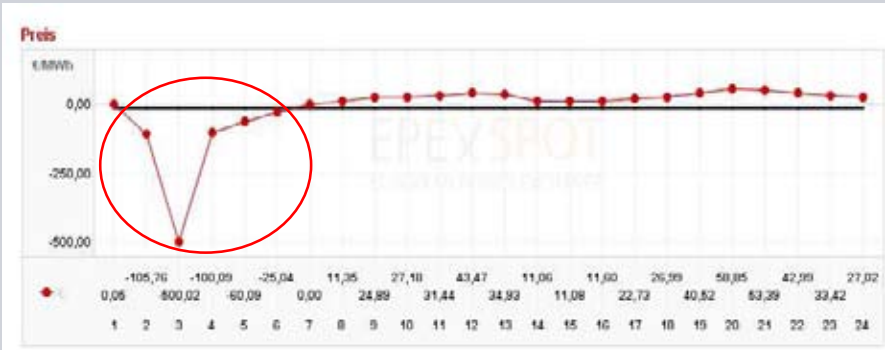
Windenergie und vorhandene Energiespeicher



Deutscher Spot Markt in Leipzig (EEX)

Preisentwicklung am 04. Oktober 2009

Hohe negative Preise aufgrund starker Windeinspeisung ins Netz und In-Flexibilitäten der konventionellen Kraftwerke



© Siemens AG 2010

Drei Schritte auf dem Weg zu einem nachhaltigen integrierten Energiesystem

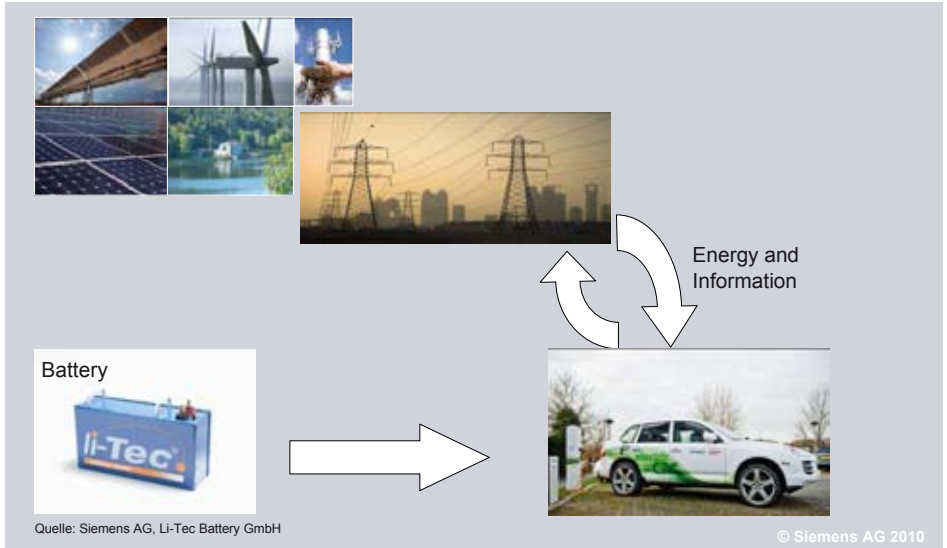
<p>1 Optimierung des Energiemix</p>	
<p>2 Effizienzsteigerung entlang der gesamten Energiekette</p>	
<p>3 Systemische Optimierung/ Smart Grid</p>	

© Siemens AG 2010



3. Elektromobilität

E-Mobility beschleunigt die Transformation in das Neue Stromzeitalter

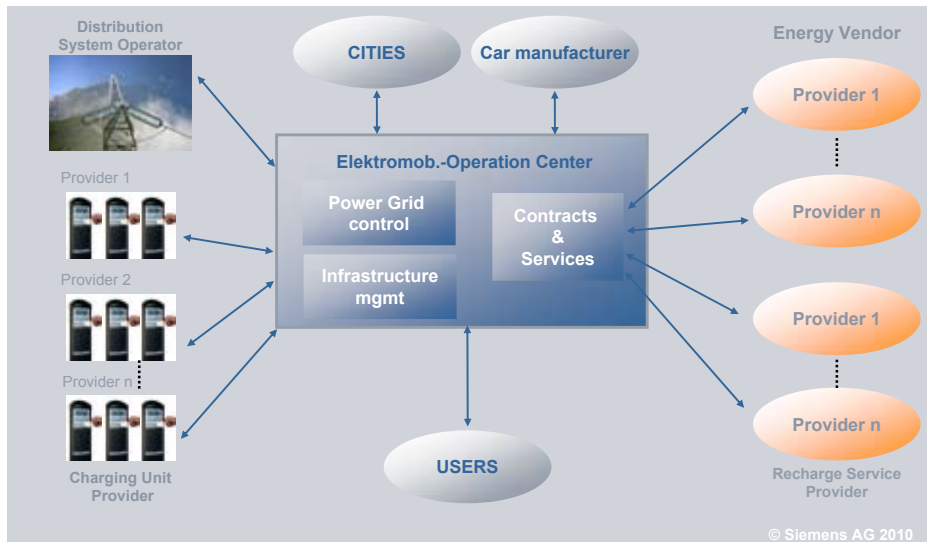


Die Elektromobilität verlangt einen integrierten IT Ansatz





Alle Interessen der beteiligten Partner müssen in sich in der Abrechnungs- und Infrastrukturverwaltungssoftware widerspiegeln



Siemens Portfolio für die Elektromobilitäts-Infrastruktur

Integriertes Laden, Energieversorgung und Parken, Lösungen für zu Hause und öffentlichen Gebrauch.

Integrierte Lösung für das Lademanagement für Ladeinfrastrukturen, Energiebedarf, Verkehr und Flotten.

A grid of six images showcasing Siemens products:

- Wall box:** A vertical charging station.
- Energie Management:** A computer monitor displaying data charts.
- Parkplatzsysteme:** A parking management system with a camera and sensor.
- Ladesäule AC/DC:** A tall, vertical charging station.
- NV and MV Verteilung:** A large electrical distribution cabinet.
- Mehrplatz Parkscheinautomaten:** A multi-space parking ticket machine with a person using it.

Unterstützung in allen Projektphasen

The diagram shows a four-stage process flow:

- Netz und Verkehrsplanung
- Errichtung
- Service und Wartung
- System betrieb

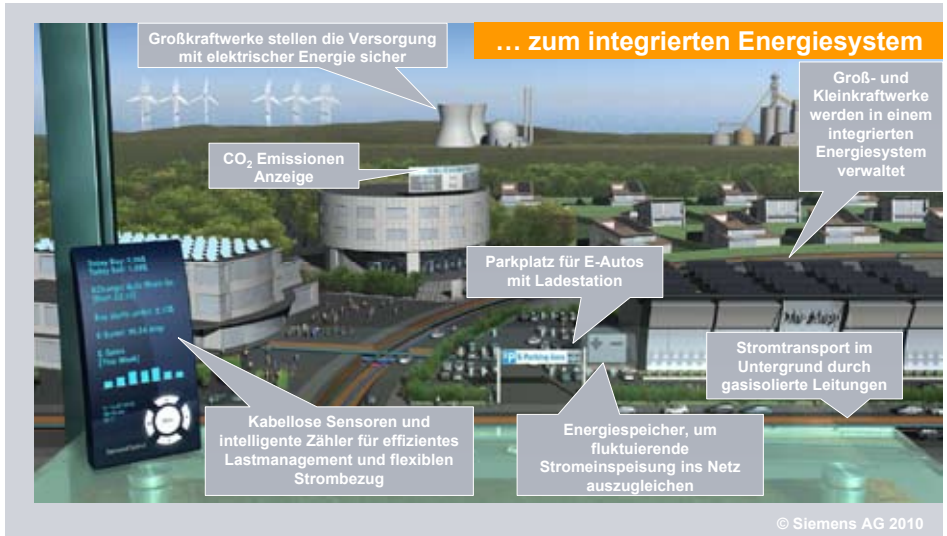
Integrierte Elektromob.-Infrastruktur für Lösungen und Service

- Ladeinfrastruktur Management
- Smart Grid Integration
- Abrechnungssysteme
- Service Desks / Back Office Systems
- Verkehrsmanagement
- Flottenmanagement & Navigation
- Sicherheits- und Zugangskontrollenmanagement
- Service und Wartung
- Systembetrieb



4. „Picture of the Future“

Das Neue Stromzeitalter: Smart Grid und intelligenter, effizienter Energiemix verschmelzen...



Disclaimer

This document contains forward-looking statements and information - that is, statements related to future, not past, events. These statements may be identified either orally or in writing by words as “expects”, “anticipates”, “intends”, “plans”, “believes”, “seeks”, “estimates”, “will” or words of similar meaning. Such statements are based on our current expectations and certain assumptions, and are, therefore, subject to certain risks and uncertainties. A variety of factors, many of which are beyond Siemens’ control, affect its operations, performance, business strategy and results and could cause the actual results, performance or achievements of Siemens worldwide to be materially different from any future results, performance or achievements that may be expressed or implied by such forward-looking statements. For us, particular uncertainties arise, among others, from changes in general economic and business conditions, changes in currency exchange rates and interest rates, introduction of competing products or technologies by other companies, lack of acceptance of new products or services by customers targeted by Siemens worldwide, changes in business strategy and various other factors. More detailed information about certain of these factors is contained in Siemens’ filings with the SEC, which are available on the Siemens website, www.siemens.com and on the SEC’s website, www.sec.gov. Should one or more of these risks or uncertainties materialize, or should underlying assumptions prove incorrect, actual results may vary materially from those described in the relevant forward-looking statement as anticipated, believed, estimated, expected, intended, planned or projected. Siemens does not intend or assume any obligation to update or revise these forward-looking statements in light of developments which differ from those anticipated.

Trademarks mentioned in this document are the property of Siemens AG, it’s affiliates or their respective owners.

Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität

Prof. Dr. Ulrich Buller
Fraunhofer-Gesellschaft
Hansastr. 27c, 80686 München
Tel.: +49 89 1205 4000, Fax: +49 89 1205 77 4000
E-Mail: ulrich.buller@zv.fraunhofer.de

Um die volkswirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit vor allem im Automobilbau und auf den Gebieten Energieerzeugung und -speicherung zu erhalten und die internationale Entwicklung maßgeblich und nachhaltig mit zu gestalten, muss Elektromobilität in Deutschland systematisch und ganzheitlich vorangetrieben werden.

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.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF fördert dieses Vorhaben mit insgesamt 44 Millionen Euro aus den Konjunkturprogrammen I und II für den Zeitraum von zwei Jahren.

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. Sie umfasst 33 Fraunhofer-Institute, die zukunftsfähige Lösungen in vier aufeinander abgestimmten und verzahnten Schwerpunkten entwickeln: Fahrzeugkonzepte, Energieerzeugung, -verteilung und -umsetzung, Energiespeichertechnik sowie technische Systemintegration und gesellschaftspolitische Fragestellungen.





Erneuerbare Energien und Elektromobilität - Forschungsförderung des BMU

Alexander Folz

Projekträger Jülich (PtJ)

c/o Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Alexanderstr. 3, 10178 Berlin

Tel.: (03018) 305-3655, Fax: (03018) 10 305-3655

E-Mail: Alexander.Folz@bmu.bund.de

1 Einleitung

Das bestehende Energiesystem steht vor enormen Herausforderungen. Insbesondere aufgrund der Liberalisierung der Stromversorgung, der zunehmenden grenzüberschreitenden Stromlieferungen, der Altersstruktur des Kraftwerksparks und der wachsenden Bedeutung der fluktuierenden Einspeisung aus erneuerbaren Energien sind eine Modernisierung und ein Ausbau des Stromversorgungssystems unabdingbar.

Mit dem steigenden Anteil der erneuerbaren Energien am Stromsystem muss sich das bestehende Energiesystem verändern. Die Systemintegration erneuerbarer Energien erfordert Veränderungen sowohl bei den EE-Anlagen als auch den bestehenden Versorgungsstrukturen. Insgesamt soll eine optimierte Energieversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien erreicht werden. Die folgenden Punkte sind dabei von besonderer Bedeutung.

1. Netzoptimierung und -ausbau
2. flexible Erzeugung
3. flexibler Verbrauch
4. Systemdienstleistungen durch EE
5. flexibler Strommarkt

Die Stromnachfrage in Deutschland schwankt derzeit im Laufe eines Jahres zwischen gut 40 GW und knapp 80 GW. Im Jahr 2020 werden wahrscheinlich allein Wind- und PV-Anlagen mit einer Gesamtnennleistung von etwa 65 GW in Deutschland installiert sein [1]. Es wird also in steigendem Maße vorkommen, dass allein diese beiden erneuerbaren Energieträger den aktuellen Strombedarf vollständig abdecken oder sogar übersteigen. Stromerzeugung und -verbrauch müssen jedoch jederzeit übereinstimmen. Einerseits muss sich die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien also besser an der Nachfrage orientieren. Andererseits muss aber auch die Nachfrageseite flexibler werden, z.B. durch Lastmanagement.

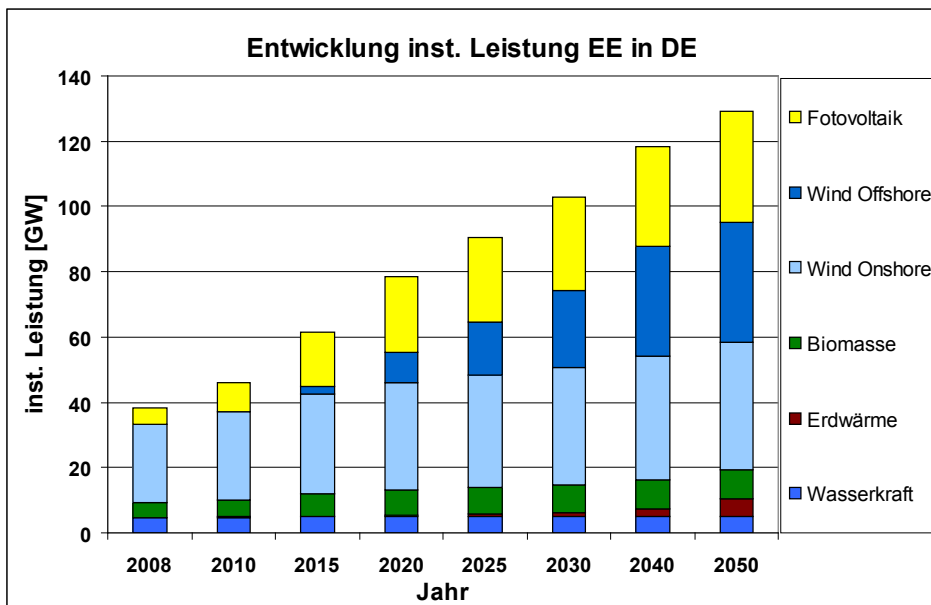


Abb. 1: Entwicklung der installierten Leistung erneuerbarer Energien in Deutschland (Datenquelle: [1])

Das System muss in technischer, ökonomischer und rechtlich-administrativer Hinsicht für einen hohen Anteil erneuerbarer Energien ausgelegt werden. Oberstes Ziel muss dabei immer die Optimierung des Gesamtsystems sein. Aufgrund der Altersstruktur der Netze und des Kraftwerksparks und des damit ohnehin anstehenden Modernisierungsbedarfs ergibt sich hierfür ein günstiges Umfeld mit der Chance zur Realisierung eines modernen Energiesystems der Zukunft mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Dazu kann Elektromobilität einen wichtigen Beitrag leisten.

Dieser Artikel gibt einen kurzen Überblick über ausgewählte Maßnahmen und Aktivitäten des Bundesumweltministeriums (BMU) im Bereich Systemintegration erneuerbarer Energien durch Elektromobilität.

2 Systemintegration erneuerbarer Energien durch Elektromobilität

Batterien von Elektrofahrzeugen können bei der Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien zum Lastmanagement oder als Speicher genutzt werden. Schwankungen bei der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien können ausgeglichen werden, indem z.B. der „überschüssige“ Windstrom in Fahrzeugbatterien zwischengespeichert wird. Essentiell ist dabei, dass das Laden und die Rückspeisung geregelt erfolgen, da es sonst zu Netzproblemen kommt. Eine überschlägige Beispielrechnung verdeutlicht dies: Wenn 200.000 Elektrofahrzeuge am Netz angeschlossen sind, entspricht dies bereits einer Gesamtanschlussleistung von ca. 1 GW und damit der Größenordnung



eines Atomkraftwerkes (bei einer angenommenen Anschlussleistung der E-Fzg. von 5 kW; „normale“ Steckdose (230 V, 16 A): 3,7 kW, Drehstrom (400 V, 32 A): 12,8 kW, geplanter Einheitsstecker E-Fzg (400 V, 63 A): 25,2 kW).

Mit Elektrofahrzeugen, die am Netz angeschlossen sind, können auch Systemdienstleistungen, wie z.B. Regelleitung, erbracht und damit das Stromnetz stabilisiert werden. Elektromobilität kann somit zur Systemintegration und damit zu einem weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien beitragen.

Die Bundesregierung erkennt die Bedeutung der Elektromobilität und hat daher am 19. August 2009 den Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität verabschiedet. Ziel ist es, die Entwicklung und Markteinführung von Elektrofahrzeugen voranzubringen. Bis 2020 sollen eine Million Elektroautos in Deutschland fahren.

3 Forschung und Entwicklung im Bereich erneuerbare Energien und Elektromobilität

Das Bundesumweltministerium (BMU) fördert anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung im Bereich der erneuerbaren Energien. Diese Förderung erfolgt auf der Grundlage des 5. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung. Kurze Beschreibungen der einzelnen Förderschwerpunkte des BMU sowie die aktuellen Förderbekanntmachungen finden sich unter www.erneuerbare-energien.de/inhalt/4595/. Eine ausführliche Beschreibung der Forschungsförderung des BMU findet sich im Forschungsjahresbericht des BMU [2].

Das BMU fördert Forschungsprojekte zur Systemintegration erneuerbarer Energien im Bereich „Optimierung der Energieversorgungssysteme“. Die Forschungsförderung des BMU in diesem Bereich zielt darauf ab, ein innovatives, zukunftsfähiges Energiesystem mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien zu schaffen. Dabei soll das Gesamtsystem optimiert werden, wobei von der Stromerzeugung über den Transport der Elektrizität bis hin zum Verbraucher alle Bereiche zu beachten sind.

Schwerpunkte der Förderung sind beispielsweise virtuelle Kraftwerke bzw. Kombikraftwerke, Lastmanagement, die verstärkte Einbeziehung und Weiterentwicklung von Speichertechnologien zur Integration fluktuierender erneuerbarer Energien, intelligente Netze (smart grids), Systemdienstleistungen durch erneuerbare Energien und Elektromobilität zur Systemintegration erneuerbarer Energien. Das BMU hat die „Optimierung der Energieversorgungssysteme“ 2008 zu einem eigenständigen neuen Förderschwerpunkt erklärt. In den Jahren 2008 und 2009 wurden neue Projekte mit einem Gesamtvolumen von ca. 40 Mio. Euro bewilligt - im Bereich Elektromobilität z.B. ein Flottenversuch mit Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen. Bei den Forschungsprojekten des BMU steht dabei die Nutzung der Fahrzeugbatterie zur Systemintegration erneuerbarer Energien im Vordergrund (z.B. Lastmanagement, EE-Zwischenspeicherung, Systemdienstleistungen).

Um die Markteinführung von Elektrofahrzeugen zu beschleunigen, stehen dem BMU bis Ende 2011 zusätzlich rund 100 Millionen Euro aus Mitteln des Konjunkturpakets II für die Förderung der Elektromobilität zur Verfügung. Unterstützt werden vor allem die Weiterentwicklung und Erprobung von Plug-In-Hybrid- und reinen Elektroantrieben, der Kauf von Diesel-Hybrid-Bussen durch Kommunen

und die Forschung und Entwicklung im Recycling von Antriebsbatterien. Die Vernetzung von Elektrofahrzeugen und Energiesystemen mittels Informations- und Kommunikationstechnologie ist ein besonderer Schwerpunkt der E-Energy-Modellregionen (siehe unten). Darüber hinaus steht die Systemintegration auch im Fokus der in Berlin stattfindenden Feldversuche im PKW- und Wirtschaftsverkehr, die vom BMU gefördert werden. So werden im Vorhaben MINI E von Vattenfall Europe AG und BMW AG u.a. Methoden und Anwendungen entwickelt, die angebotsseitige Erzeugungsspitzen, z.B. in Starkwindphasen, ausgleichen können. In der Zukunft könnten Elektrofahrzeuge als virtuelle Kraftwerke fungieren und ihre gespeicherte Energie bei Bedarf in das Stromnetz einspeisen. Im Vorhaben werden hierzu Konzepte erarbeitet und in praxisnahen Tests verifiziert. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Untersuchung der Praxistauglichkeit von Elektrofahrzeugen und die Kundenakzeptanz von gesteuertem Laden. In weiteren Projekten steht das kabellose Laden von Elektrofahrzeugen im Mittelpunkt.

Im Rahmen des Begleitforschungsprojekts OPTUM wird ein integrativer Ansatz zur Bilanzierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen verfolgt. Auf Basis einer umfangreichen Nutzerakzeptanzbefragung werden Marktdurchdringungsszenarien für Elektrofahrzeuge abgeleitet. Zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen wird die Gesamtenergienachfrage mit der Treibhausgasintensität der Strombereitstellung gekoppelt. Hierbei werden die Interaktionsmöglichkeiten zwischen den Elektrofahrzeugen und dem Energiesektor berücksichtigt.

3.1 E-Energy und Elektromobilität

Im Rahmen des Förderprogramms „E-Energy“ der Bundesregierung werden Lösungen zur Optimierung der Stromversorgung durch den Einsatz moderner Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) entwickelt und erprobt. Ziel sind „Smart Grids made in Germany“. In dem vom BMWi initiierten Programm werden in ressortübergreifender Partnerschaft mit dem BMU in sechs Modellregionen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten mit insgesamt etwa 60 Mio. Euro gefördert. Die E-Energy-Aktivitäten richten sich beispielsweise auf die Koordination dezentraler Energieerzeuger zu virtuellen Kraftwerken, die Flexibilisierung der Verbrauchsseite durch intelligentes Lastmanagement oder auch Speicher (u.a. Elektroautos) sowie die Optimierung der Stromflüsse in den Netzen. Innerhalb des E-Energy-Programms fördert das BMU die Projekte „Regenerative Modellregion Harz (RegModHarz)“ und „Modellstadt Mannheim (MoMa)“ sowie die korrespondierenden Erweiterungen zur Elektromobilität („Harz.EE-mobility“ und „Future Fleet“). Für weitere Informationen zum Förderprogramm E-Energy siehe www.e-energy.de.

Im Jahr 2009 wurde das E-Energy-Programm mit Mitteln aus dem Konjunkturpaket um den Aspekt der Elektromobilität erweitert. Dabei geht es v.a. um die Vernetzung von Elektrofahrzeugen und Stromnetzen mittels Informations- und Kommunikationstechnologie, um die Elektrofahrzeuge zur Optimierung der Energieversorgung einsetzen zu können. Förderschwerpunkte sind z.B. IKT-basierte Lade-, Steuerungs- und Abrechnungsinfrastrukturen und Elektrofahrzeuge als Speicher- und Regelelemente im Netz der Zukunft.

Das BMU hat dafür den neuen FuE-Förderschwerpunkt „Intelligente Netze, erneuerbare Energien und Elektromobilität“ geschaffen und fördert zwei Projekte („Harz.EE-mobility“ und „Future Fleet“), die die bisherigen Modellregionen erweitern. Das BMWi fördert unter dem Schwerpunkt „IKT für die Elektromobilität“ fünf weitere Projekte.



3.1.1 Future Fleet, Mannheim

Zentraler Bestandteil des Forschungsprojektes „Future Fleet - Einbindung von Elektro- und Plug-In Hybridfahrzeugen in betriebliche Fahrzeugflotten“ ist der Einsatz von mit regenerativem Strom betriebenen Elektroautos in Dienstwagenflotten. Neben der SAP AG, die das Projekt leitet, testet die Mannheimer MVV Energie AG die Integration von Elektroautos in ihre Flotte. Geplant ist insbesondere die Ausstattung des Fuhrparks der SAP AG mit bis zu 80 Elektroautos sowie mit der erforderlichen Infrastruktur und Netzsteuerung für die Beladung, um zu zeigen, wie Elektromobilität zur Systemintegration erneuerbarer Energien beitragen kann. Gesteuert wird der Einsatz der Fahrzeugflotte über einen Forschungsprototypen einer Flottenmanagementlösung der SAP AG. Dabei werden neue Anforderungen bei der Unternehmensnutzung von Elektromobilität erforscht. An dem Projekt sind neben der SAP und MVV drei weitere Partner beteiligt: das Öko-Institut, das Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) und die Hochschule Mannheim.

3.1.2 Harz.EE-mobility

Ziel des Projektes „Harz.ErneuerbareEnergien-mobility“ (Harz.EE-mobility) ist die technische und wirtschaftliche Einbindung von Elektrofahrzeugen in ein Energiesystem mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Wind, Sonne und andere erneuerbare Energien tragen im Landkreis Harz bereits zu mehr als 50% zur Stromversorgung bei. Zunehmend stellt sich daher die Frage, wie möglichst viel erneuerbare Energie auch dazu genutzt werden kann, die Mobilitätswünsche der Menschen mit heimischen regenerativen Energien zu realisieren und wie Elektrofahrzeuge zur Systemintegration erneuerbarer Energien beitragen können. Dabei gilt es, die Stabilität der Energienetze zu gewährleisten sowie Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit und Klimaschutz gleichzeitig zu optimieren. Das Projekt Harz.EE-mobility untersucht, wie Fahrer eines Elektrofahrzeugs regenerativen Strom tanken können und die Reichweite der Elektromobilität durch die geschickte Platzierung von Ladestationen deutlich ausgedehnt werden kann. Eine intelligente Lösung, basierend auf Informations- und Kommunikationstechnologien stimmt dabei das Angebot an regenerativen Energien, die Belange des Energienetzes und die Mobilitätsanforderungen der Fahrzeuglenker aufeinander ab. Künftig soll ein Gesamtsystem aus Fahrzeugen, Stromspeichern und regenerativen Kraftwerken entstehen. Für das Projekt wird rund um Halberstadt, Wernigerode und Quedlinburg eine Flotte von 25 Elektrofahrzeugen aufgebaut. Partner des von der Universität Magdeburg koordinierten Projekts sind: E.ON Avacon, FhG-IFF, Hochschule Harz, FhG IWES, in.power, Krebs & Aulich GmbH, RKWH GmbH, Siemens AG, Universität Magdeburg, Vodafone, DB Rent GmbH.

4 Ausblick

Die Forschungsförderung des BMU im Bereich Erneuerbare Energien und Elektromobilität soll die Elektromobilität befähigen, die für den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien notwendigen Veränderungen des Energiesystems zu unterstützen und zu einer optimierten Energieversorgung beizutragen. Das Ziel ist Elektromobilität als fester Baustein zur Systemintegration erneuerbarer Energien.



5 Literatur

- [1] BMU (2009), *Leitszenario 2009 - Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland*, Download unter <http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/45026/40870>.
- [2] BMU (2010), *Innovation durch Forschung: Jahresbericht 2009 zur Forschungsförderung im Bereich der Erneuerbaren Energien*, Berlin



Lithium Ion Batteries - a Key Component for Electric Vehicles

Dr. Klaus Brandt
GAIA Akkumulatorenwerke GmbH
Nordhausen, Germany
brandt@gaia-akku.com

1 Introduction

In recent months, most automobile companies have announced hybrid electric vehicles (HEV) and battery powered electric vehicles (BEV) using lithium ion batteries for electricity storage. However, storage of the electrical energy on board a vehicle is much more difficult than carrying liquid fuel in a tank. Gasoline has a specific energy of 13,000 Wh/kg, the specific energy of today's advanced batteries is about 50 to 100 times less. This difference is effectively reduced by a factor of 3 to 5 due to the higher efficiency of an electric drive train, however, it limits the range of battery powered electric vehicles. Therefore, hybrid systems using both an internal combustion engine (ICE) and an electric motor appear to be an interim solution for vehicles when range limitation is not acceptable. Full electric vehicles will have an initial opportunity in urban use. Advances in battery technology or alternative concepts like battery changing stations or fast charging stations will lead to an increase in BEV numbers.

2 Battery Requirements for HEV and EV

Different types of hybrid electric vehicles are being developed. The main difference is the relative roles the ICE and the electric motor play during the different operational modes of the vehicle. The battery requirements from a mild or micro hybrid to an HEV with a significant all electric driving range and external charging capability (PHEV) vary greatly in battery size (energy content), power requirements and cycle life requirements. For the BEV, specific energy is the most important battery feature as it limits the energy content of the battery and with it the driving range.



Table 1: Summary of typical battery requirements for different vehicle applications. Power requirements are listed for acceleration (Acc.) and regenerative braking (Regen.). Values for PHEV and EV are taken from USABC requirements [1]. PHEV 10 means a 10 mile electric driving range, PHEV 40 a 40 mile range

	Mild Hybrid	PHEV 10	PHEV 40	BEV
Battery Size (kWh)	0.7	3.4	11.6	40
Battery Weight (kg)	12	60	120	265
Specific Energy (Wh/kg)	50	57	97	150
Power Required - Acc./Regen (kW)	15/10	45/30	45/30	80/40
Specific Power - Acc./Regen. (W/kg)	1100/830	750/500	370/250	300/150
Power/Energy Ratio (P/E)	21	13	3.9	2
Energy Throughput- X times Size	10.000	5.000	5.000	1.000
Cost (US\$/kWh)	500	500	290	150

Table 1 gives an overview of these battery requirements. The battery size/energy content given is required to achieve the specified electric driving range. The required specific energy is calculated from the allowable battery weight. It increases with increasing range in order to limit battery weight to a reasonable fraction of vehicle weight. The power requirement of PHEVs is about 40kW, enough for city driving, requirement for the BEV is 80kW, sufficient for highway operation. During regeneration, the battery is charged at power levels close to the levels at acceleration. Due to increasing battery size, the power requirement relative to battery size however decreases moving from the mild HEV to the BEV; the power to energy ratio drops from 21 to 2 h^{-1} . The lifetime of the battery is given as energy throughput. For the BEV, the battery will have a total energy throughput of 40,000 kWh, corresponding to a battery life of 200,000 km at an energy consumption of 0.2 kWh per km driven. Energy throughput for the PHEVs needs to be higher due to the small electric range of the vehicles and the fact that the battery is also used in the HEV-mode.

3 Lithium Ion Battery Chemistry

Most of the cells used in consumer applications have the same basic chemistry that was introduced by Sony in 1991. The cathode material is lithium cobalt oxide (LiCoO_2 or LCO for short), the anode consists of carbon, either graphite, hard or soft carbons. This combination still dominates the consumer market due to its high energy density despite large efforts to develop new electrode materials. High energy density means long run time and low device weight, key selling features for portable equipment. For PHEV and BEV applications, however, other system properties such



as safety, high power, long life, low cost, fast charge and wide temperature range are at least as important.

Most of the systems considered today still use carbon anodes, however, differ in their choice of cathode materials. Four cathode systems are being considered for vehicle applications to date, lithium iron phosphate (LiFePO_4 , LFP for short), lithium nickel cobalt oxide doped with aluminium ($\text{Li}[\text{Ni},\text{Co},\text{Al}]\text{O}_2$, NCA for short), lithium manganese cobalt oxide ($\text{Li}[\text{Ni},\text{Mn},\text{Co}]\text{O}_2$ or NMC) and lithium manganese spinel (LiMn_2O_4 , or LMO). Figure 1 shows qualitatively the relative intrinsic properties of these materials. LFP has the best safety, cycle life, lowest cost and fast charge capability, however, it has the low energy density. NCA excels in energy and power density but is not as safe as the other materials. NCM is lower in performance than NCA but has improved safety and good high temperature stability. LMO is attractive from the cost point of view but has lower energy and calendar life, especially at elevated temperatures. In the loner run one has also to consider the raw material cost where LFP and LMO use iron respectively manganese, compared to NCA and NMC that both use nickel and cobalt.

When making these material performance comparisons, one should keep in mind that cathode material properties can be influenced in many ways, for example through doping, particle size, surface coating and electrolyte additives. Separators filled with ceramic particles will improve the response to some of the abusive conditions for materials with a lower level of intrinsic safety, however, these separators are thicker than the commercially available polyolefin separators and will therefore reduce energy density and power capability. This makes it very difficult to make a choice between the various chemistries under investigation.

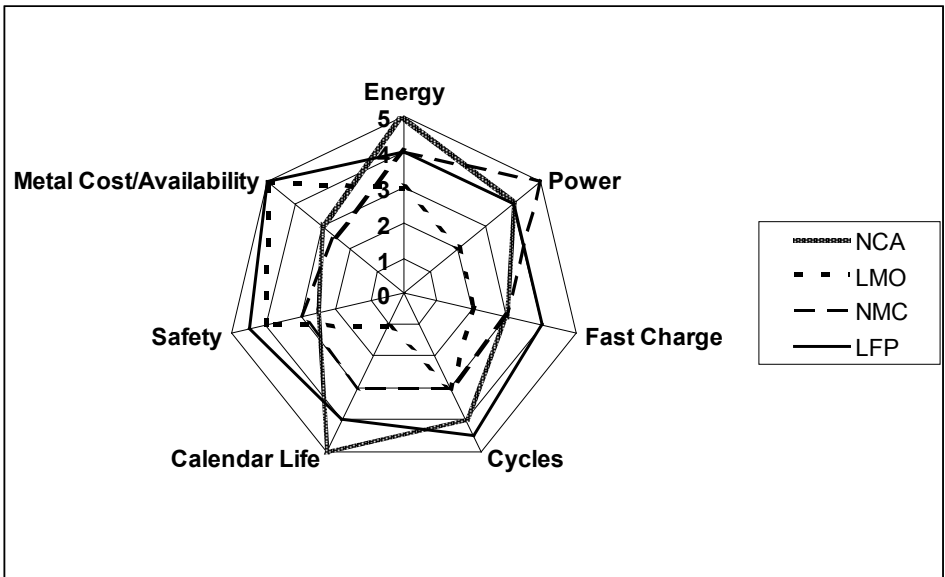


Figure 1: Qualitative comparison of the intrinsic properties of five cathode materials. "5" is best, "1" is worst.



All the chemical systems discussed above have in common that they require individual cell management to avoid overcharge and over discharge. Even though self discharge rates are low, even small difference will cause the cells to drift apart over time and therefore electronic means are required to equilibrate the state of charge of all cells in a battery. Calendar and cycle life are temperature dependent, therefore thermal management is required as well. These functions are controlled by a battery management system (BMS) that also provides information to the vehicle about the state-of-charge, the maximum power available and the state-of-health of the battery. The BMS is also crucial in avoiding cells being operated outside their electrical and thermal range of safety.

4 Cell and System Design

Basic cell designs known from the consumer applications are wound cylindrical cells and stacked or flat-wound prismatic cells. Both come with metal cases, flat cells also exist in a foil package (sometimes called polymer cells). Consumer cells have capacities of 4Ah or less. Batteries assembled from these cells are typically 20V or less and have an energy content of 100Wh or less. PHEV and EV operating voltages are in the range from 200V to 600V and energy content of 1 to 2kWh for an HEV, 5 to 15kWh for a PHEV and over 20kWh for BEVs. Battery capacities range from 5 Ah to 100Ah. To minimize the number of cells required and with it minimize complexity and increase reliability, cell capacity should equal battery capacity so that cells have only to be connected in series to achieve the desired battery voltage. Cells of the required capacity are available from a number of manufacturers in different chemistries and in the three basic package forms described above for consumer cells.

Similar to the debate about the best choice of cathode materials, opinions about the best cell package also differ. It is obvious that rectangular battery spaces can be more efficiently filled with prismatic cells rather than cylindrical cells, however, heat needs to be removed from the cell surfaces which typically requires spacing the cells apart thus negating some or all the packing density advantage. Soft packaging has significant advantages regarding cell weight and with it specific energy at the cell level, however, the required shock and vibration resistance requires a more sturdy battery construction adding weight at battery level. Soft packaging has yet to prove that it stays sealed for a long time under operating conditions, raising concern about calendar life.

Cell design has to take the P/E ratio into consideration. Cells with high P/E ratios - i.e. cells with high power capability - sacrifice specific energy. Proper design results in low electrical losses and therefore low heat generation. Cell properties are sensitive to temperature and aging of cells is accelerated with increasing temperature, removal of the waste heat and uniform cell temperatures are required for long life and safety. Cooling concepts depend on the cooling medium available from the vehicle, the maximum amount of heat to be removed, cell and battery designs. In general, air cooling has safety and weight advantages, liquid cooling is better suited for high heat loads and achieves more uniform cell temperatures.



5 Status of Battery Development Relative to HEV and BEV Requirements

5.1 Specific Energy

The most important battery performance attribute for BEV is specific energy. For the known chemical systems, Figure 2 shows the theoretical energy specific and compares it with the state-of-the-art and what should be achievable with further development. System level energy density is considerably lower than cell energy density as the weight of battery case, electrical components and cooling need to be included. The specific energy of present systems is between 80 and 110 Wh/kg with the potential to be increased to 120 to 160 Wh/kg. The difference between the various chemistries is not very significant so that other system attributes will play a major role. For example, most cell chemistries need to be de-rated with respect to usable energy content to achieve the required life. When cells are not fully charged and discharged, their cycle life increases significantly. The required de-rating will depend on the cell chemistry and the application.

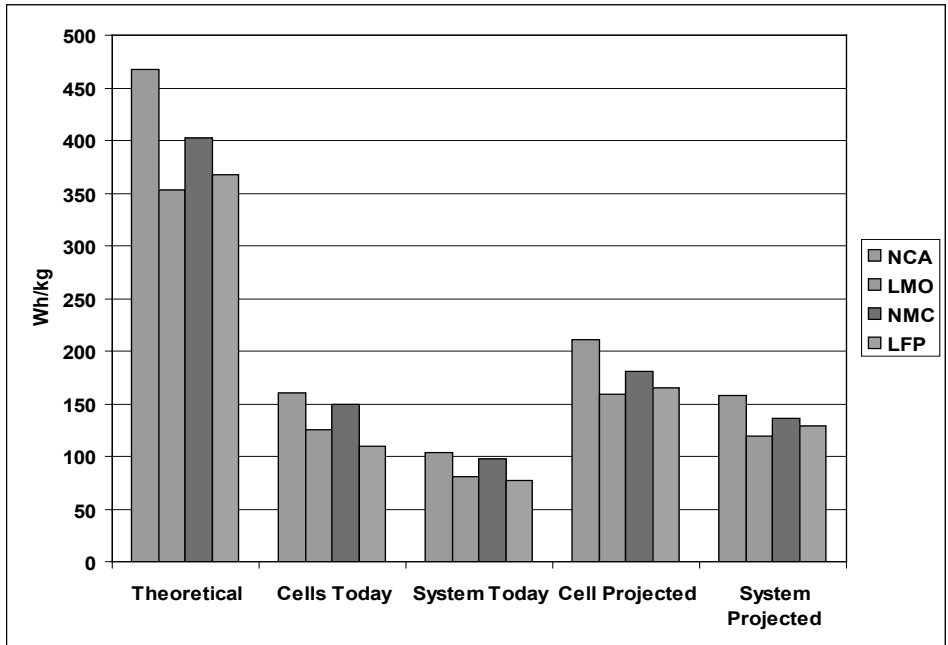


Figure 2: Specific energy for different cathode chemistries. Anode material is graphite in all cases. At the cell level, either cylindrical or prismatic cells with steel cases are assumed. The cell design is based on a power/energy ratio of 2 (BEV).

5.2 Power

At the cell level, specific power levels exceeding 2,000 W/kg have been achieved in the discharge direction [2]. Thermal management becomes a challenge at high, continuous discharge rates. High charge rates are more difficult to achieve, especially at lower temperatures. The issue is lithium plating at the carbon anode which will shorten life severely.

5.3 Life

The USABC requires an energy throughput of 5000 times the rated energy over the life of the vehicle for both PHEV types. For these vehicles, this will be a mixture of micro cycles when the vehicle drives in the hybrid mode and deep cycles in the pure electric drive mode. Micro cycles are less critical for cycle life than deep cycles. Laboratory data suggest that the target can be achieved, however, these data are based on accelerated tests. As discussed above, some de-rating of the usable battery capacity might be required. Battery life is reduced with increasing temperature, therefore thermal management of the battery plays a major role in battery life. Calendar life of the batteries is an issue at elevated temperatures as the aging of the cells follows an Arrhenius type relationship with rate of battery degradation increasing by a factor of 2 every 10°C to 15°C. This can become a major issue in warm climates where batteries in parked cars without active cooling can be exposed to high temperatures.

5.4 Safety

Lithium ion cells have a high energy content, high power capability and at the same time a low heat capacity. Uncontrolled release of the stored energy leads to high cells temperatures. Both anode and cathode materials can undergo exothermal reactions with the organic electrolyte at elevated temperatures. The resultant temperature increase leads to a cell pressure increase and possible to breach of the cell envelope/case. Expelled electrolyte vapours are flammable and can burn in air.

In order to avoid major problems, safety measures need to be implemented at all of the levels of an application; from the raw materials to the vehicle (Figure 3).

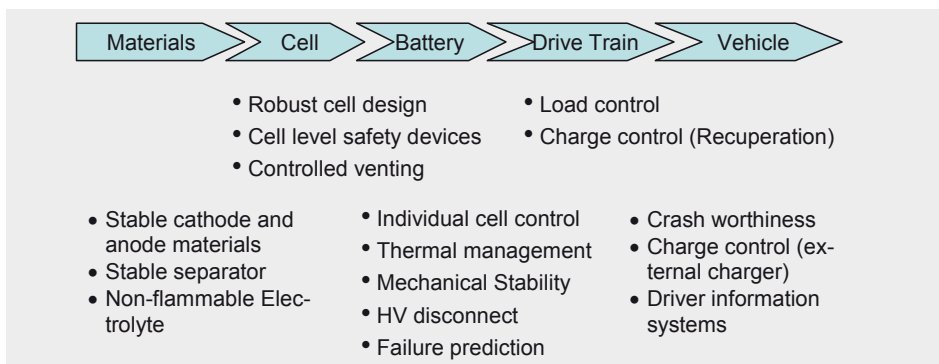


Figure 3: Safety measures at all systems levels



5.5 Cost and Manufacturing Volume

Large lithium ion cells and batteries today are produced only in small volumes. Their cost at the system level is above \$ 1,000/kWh. On the other hand, consumer cells are made in very large volumes and are selling for about \$250/kWh. It can be argued that active material cost of the large cells will be lower as the use of high cost transition metals such as cobalt can be avoided with the choice of LFP and LMO. On the other hand, high power performance comes at a cost premium as electrodes need to be thinner and more current collector foil and separator are being used. It is therefore reasonable to assume that the same cost level as in consumer cells can be reached when production volumes are high enough. The cost of battery components - hardware, BMS and cooling - is estimated to be about 40% of the cell cost, giving a system cost of \$350/kWh.

A recent study commissioned by the Air Resources Board of California [3] arrives at a cost of \$300/kWh on a module level or \$360/kWh at the system level assuming a production volume of 1,000 MWh per year or about 100,000 PHEV 40 per year.

A study by the Boston Consulting Group [4] arrives at a cost at the cell level of \$270 to \$330 and at the system level of \$360 to \$440 per kWh for a \$25billion HEV battery market in the year 2020.

Based on the expectation of a rapid market growth, investments of a total \$10 billion have been announced for the production of 2.6 million batteries for PHEV and EV batteries per year [5]. This will drive cost to the levels discussed above and should create the required market volumes.

6 Conclusion

Lithium ion technology has been scaled successfully to large, high power systems with the use of a several new chemistries and the development of large format cells. Which of these chemistries and cell designs will be used in HEVs and BEVs is not clear at the moment. The specific power of these systems is sufficient for all applications. Energy density is adequate for HEV and PHEV applications. The specific energy target for the BEV, however, will require significant improvements in cell and system development. Cost of the system remains a concern for applications with a large electrical driving range. It is difficult to see how cost can be reduced much below \$400/kWh for today's technology. To achieve the cost targets especially for the BEV, new technologies will be required. However, a number of external factors such as higher oil prices and government incentives could make the cost of today's battery technology acceptable for vehicles with a larger battery and larger electric driving range.

7 Literature

- [1] "Energy Storage System Goals", United States Advanced Battery Consortium, 2002-2010
- [2] Product Specifications, GAIA Akkumulatorenwerke GmbH, www.gaia-akku.com/, 2009
- [3] "Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology", Report of the ARB Independent Expert Panel, California, USA, 2007
- [4] "Batteries for Electric Cars", The Boston Consulting Group, 2009
- [5] "Li-Ion Batteries - the Next Bubble Ahead?" Roland Berger, 2010

Virtuelle Batterien und Elektromobilität

Peter Caselitz
Fraunhofer IWES
Königstor 59, 34119 Kassel
Tel: 0561-7294-332
peter.caselitz@iwes.fraunhofer.de

1 Einleitung

Die zur Zeit diskutierten Szenarien der Elektromobilität haben für die Fahrzeugtechnik und für die elektrischen Netze zur Energieversorgung erhebliche Konsequenzen. Der Übergang von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren zu Elektrofahrzeugen hat mit der Einführung von Hybridfahrzeugen bereits begonnen und wird über einen Zeitraum von wenigen Dekaden vermutlich zu reinen Elektrofahrzeugen führen. Dabei stellt die elektrische Antriebstechnik sicher kein prinzipielles Problem dar. Entscheidend ist die Verfügbarkeit kleiner und leichter elektrischer Energiespeicher die außerdem sicher, kostengünstig und langlebig sein müssen. Aus heutiger Sicht werden sich Speicher mit diesen Eigenschaften wohl nur durch Lithium-Ionen-Technologien oder vielleicht auch durch Lithium-Metall-Polymer-Batterien realisieren lassen. Dabei ist die Entwicklung von Lithium-Ionen-Speichern für Traktionsanwendungen schon aus thermischen Gründen mit Speichern der Gerätetechnik kaum vergleichbar. Die größten Probleme im Bereich der Traktionspeicher stellen immer noch die Kosten und die Lebensdauer dar. Allerdings sind Batteriehersteller und Forscher optimistisch und gehen davon aus, dass sich diese Probleme in den nächsten Jahren überwinden lassen.

Ein weiterer Aspekt des Übergangs zum Energieträger Elektrizität im Bereich der individuellen Mobilität ist die Energieversorgung der Fahrzeuge. Hier sind verschiedene Szenarien denkbar: vom Austausch der Batterien an zentralen Orten - vergleichbar mit den heutigen Tankstellen - bis zum Anschluss der Fahrzeuge an private Steckdosen. Dabei wird die Ladegeschwindigkeit an privaten Anschlüssen eher durch die Netzanschlussbedingungen als durch die Eigenschaften der Batterien begrenzt. In jedem Fall wird die Versorgung einer großen Anzahl von Plug-in-Hybriden oder Elektrofahrzeugen mit elektrischer Energie drastische Auswirkungen auf den Betrieb der Versorgungsnetze haben. Im Zusammenspiel mit der Nutzung erneuerbarer Energien werden inzwischen Szenarien diskutiert, die nicht nur die Ladung der Speicher über das Netz vorsehen, sondern die Speicher der Elektrofahrzeuge auch als Puffer betrachten. Die Bereitstellung von Regelleistung im Bereich der Primär- und Sekundärregelung durch eine sehr hohe Zahl relativ kleiner Speicherbatterien wird die Philosophie des Netzbetriebes völlig verändern und erfordert intelligente Schnittstellen zwischen Fahrzeugen und Verteilnetzen.

Solche Schnittstellen koordinieren die Anforderungen des Netzes und der Fahrzeuge. Diese Anforderungen hängen von den Netzanschlusspunkten ab und können sich in kurzer Zeit merklich än-



dern, verursacht durch Eingriffe der Fahrer und Notwendigkeiten des Netzbetriebes. Die Komplexität dieser Schnittstellen stellt daher hohe Anforderung an Entwicklungsingenieure und Techniker, die die Eigenschaften des Bordnetzes und des Verteilnetzes sehr gut kennen müssen.

Die Entwicklung intelligenter Netzkoppelsysteme und zukünftiger elektrischer Bordnetze können durch den Einsatz virtueller Speicher wirkungsvoll unterstützt werden. Virtuelle Systeme sind Nachbildungen realer Systeme, die so geregelt werden, dass sie sich an passenden Anschlüssen wie ihre realen Vorbilder verhalten. Erforderlich sind daher sehr gute mathematische Modelle der nachzubildenden Komponenten und echtzeitfähige Implementierungen für die verwendeten Steuerrechner.

Im Bereich elektrochemische Speicher wurden im ISET/IWES bisher verschiedene Varianten virtueller Bleiakkumulatoren für unterschiedliche Industriekunden realisiert. Diese Entwicklungen basieren auf der Software ISET-LAB zur Simulation des dynamischen Verhaltens von Bleiakkumulatoren. Unter Verwendung einer Echtzeitvariante dieser Software wird eine an einen Mikrorechner angeschlossene elektrische Energiequelle so angesteuert, dass das Klemmenverhalten des virtuellen Systems dem realer Bleibatterien entspricht. Auch für die neue Software ISET-LIB zur Simulation von Lithium-Ionen-Batterien wird eine Echtzeitvariante ISET-LIB-RT zur Verfügung stehen, die sich zur Realisierung virtueller Batterien verwenden läßt.

Experimentell konnten verschiedene Prototypen ihre Praxistauglichkeit unter anderem bei der Entwicklung von Photovoltaik-Wechselrichtern, Batterie-Stromrichtern und bei Untersuchungen von Kfz-Bordnetzen beweisen. Verschiedene Prototypen virtueller Batterien werden seit längerer Zeit auch in einigen Unternehmen der Automobilindustrie genutzt. Zeitaufwendige und kostenintensive Vorkonditionierungen realer Batterien oder die Präparation in Klimakammern werden bei vielen Versuchen durch die Verwendung virtueller Batterien überflüssig. Auf diese Weise kann die Verwendung virtueller Batterien zu wesentlich reduzierten Entwicklungszeiten und Entwicklungskosten führen. Für die Entwicklung der Systemtechnik in der Elektromobilität dürfte dies bedeutsame Vorteile mit sich bringen.

Der vorliegende Beitrag erläutert zunächst das Prinzip und den Aufbau virtueller Batterien. Die Kernkomponente solcher Systeme ist die Software zur Simulation realer Batterien, die durch virtuelle Batterien ersetzt werden sollen. Daher wird anschließend in vergleichender Weise die Modellierung von Blei-Säure- und Lithium-Ionen-Batterien beschreiben. Schließlich werden Meß- und Simulationsergebnisse für Lithium-Ionen Batterien vorgestellt.

2 Virtuelle Batterien

Abbildung 1 zeigt das Prinzip einer virtuellen Batterie: Eine geregelte Spannungsquelle wird über einen Rechner gesteuert, der über ein mathematisches Batteriemodell zu den Messwerten des Klemmenstromes die Sollwerte für die Klemmenspannung berechnet. Solche Spannungsquellen stehen kommerziell in vielen Varianten zur Verfügung und können an übliche Laborstromnetze angeschlossen werden. Die elektrischen Daten der Spannungsquelle müssen dabei zum Verwendungszweck passen: bei Starterbatterien muss die Quelle Spannungen bis zu 20 Volt und Ströme

bis weit über 1000 Ampere liefern. Traktionsbatterien erfordern dagegen Spannungen bis 600 Volt, dafür aber wesentlich geringere Ströme. Der Rechner kann ein normaler Industrie PC mit Echtzeitbetriebssystem oder eine Speicherprogrammierbare Steuerung sein. Wesentlich ist das Batteriemodell, das das zeitliche Verhalten einer ausgesuchten Batterie simuliert. Bei Belastung der Spannungsquelle - zum Beispiel durch das komplette Bordnetz eines Elektrofahrzeuges - verhält sich die Quelle wie eine reale Batterie.

Im Unterschied zu realen Batterien können beliebige Batteriezustände sehr schnell und sehr genau eingestellt werden, ohne das - zum Beispiel - sehr langsame thermische Ausgleichsvorgänge, die in der Regel über zehn Stunden dauern, abgewartet müssen. Weiterhin lassen sich problemlos unterschiedliche Batterien nachbilden und miteinander vergleichen. Ein weiterer Vorteil ist die absolute Reproduzierbarkeit des Batterieverhaltens. Abbildung 2 zeigt den Aufbau einer virtuellen Starterbatterie für Starterströme bis 1200 Ampere. Anstelle der normalen Fahrzeugbatterie wird die virtuelle Batterie angeschlossen. So läßt sich zum Beispiel sehr schnell überprüfen, ob das Fahrzeug bei einer fast entladenen Batterie noch gestartet werden kann.

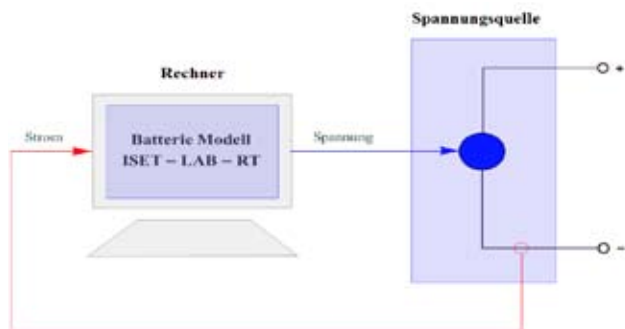


Abb. 1: Prinzip virtueller Batterien



Abb. 2: Virtuelle Starterbatterie in den Laboratorien des IWES



Virtuelle Batterien können mit geregelten Spannungs- oder Stromquellen realisiert werden. Abbildung 3 zeigt diese beiden Varianten als Ersatz einer realen Batterie in einem elektrischen Bordnetz. Bei Verwendung einer geregelten Spannungsquelle wird der Klemmenstrom gemessen. Über das Batteriemodell wird zu diesem Strom die Batteriespannung berechnet, die dann den Sollwert für die geregelte Spannungsquelle liefert. Bei Einsatz einer geregelten Stromquelle wird die Klemmenspannung gemessen und das Batteriemodell berechnet den Klemmenstrom, der als Sollwert für die geregelte Stromquelle dient. Viele elektrische Quellen können zwischen Strom- und Spannungsregelung umgeschaltet werden, so dass sich beide Varianten in einem Gerät realisieren lassen.

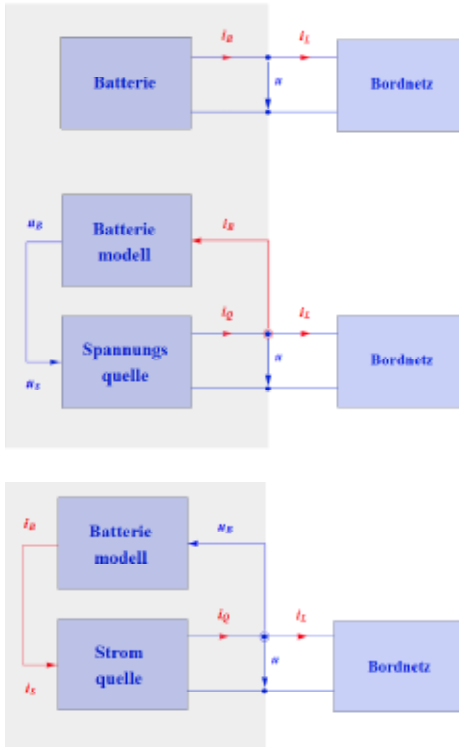


Abb. 3: Realisierung virtueller Batterien mit geregelten Spannungs- oder Stromquellen

Ob eine virtuelle Batterie als geregelte Spannungs- oder Stromquelle arbeiten sollte, hängt vom Charakter der Last ab. Arbeitet die Last als geregelte Stromquelle, muss die virtuelle Batterie als geregelte Spannungsquelle arbeiten. Arbeitet die Last als geregelte Spannungsquelle, muss die virtuelle Batterie als geregelte Stromquelle wirken. Bei unregulierten Lasten lässt sich eine virtuelle Batterie wahlweise durch eine geregelte Strom- oder Spannungsquelle realisieren. Beispielsweise wirkt das Bordnetz eines PKWs als geregelte Spannungsquelle, wenn die Spannung durch den Regler des Generators begrenzt wird. In allen anderen Betriebsphasen kann ein Bordnetz als unregelte Last betrachtet werden.

Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen Versuchsergebnisse an einem Fahrzeug mit einer realen und mit einer virtuellen Batterie.

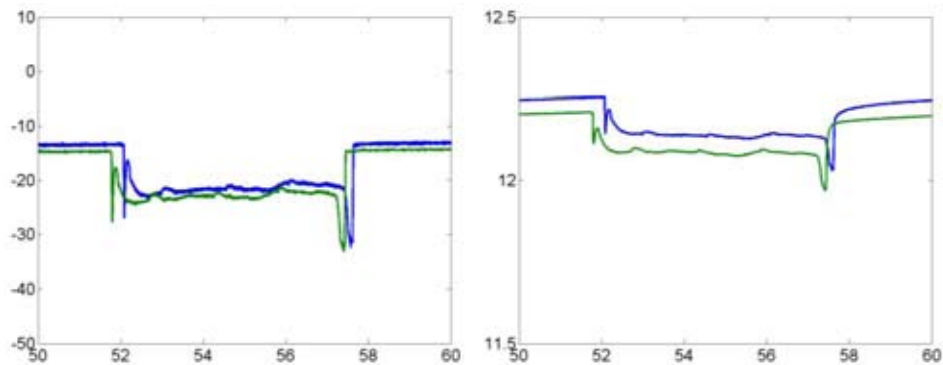


Abb. 4: Verlauf von Strom [A] und Spannung [V] an den Klemmen einer realen und einer virtuellen Batterie bei Betätigung der Fensterheber (Zeit in sec)

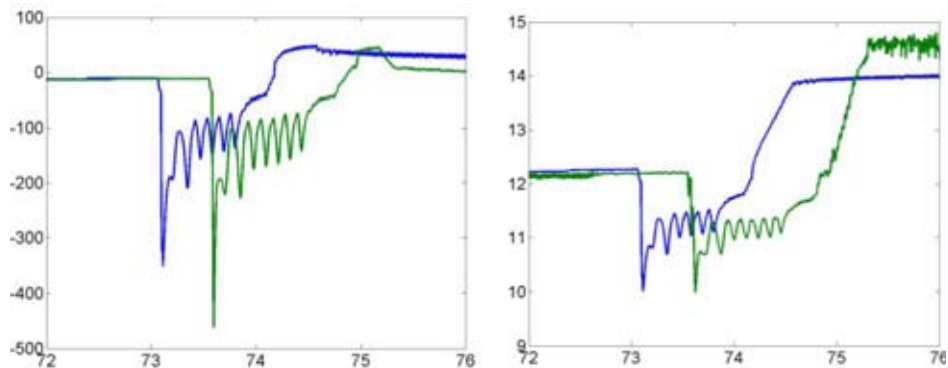


Abb. 5: Verlauf von Strom [A] und Spannung [V] an den Klemmen einer realen und einer virtuellen Batterie bei Betätigung des Starters (Zeit in sec)

Der Ladegrad der realen Batterie betrug 95 % und die Umgebungstemperatur 20 °C. Bei beiden Versuchen waren die Zündung und das Licht eingeschaltet. Der zeitliche Versatz in den Bildern ist beabsichtigt, um die Versuche besser voneinander unterscheiden zu können. Beim Betrachten der Ergebnisse läßt sich kaum erkennen, welche Zeitverläufe zur realen und virtuellen Batterie gehören. Da der Zustand realer Batterien nur mit einer gewissen Unsicherheit erfasst werden kann, sind Vergleiche dieser Art nicht einfach. Um so eindrucksvoller ist die gute Übereinstimmung der Versuchsergebnisse.



3 Modellierung elektrochemischer Speicher

Die Kernkomponente virtueller Batterien ist die Software zur Batteriesimulation. Für Anwendungen in der Elektromobilität wurde das Software Paket ISET-LAB [3, 4, 5] um die Software ISET-LIB [6] zur Simulation von Lithium-Ionen-Systemen erweitert. Zum Aufbau und zur Funktion von Bleibatterien und Lithium-Ionen-Batterien gibt es eine umfangreiche Literatur. Sehr gut verständliche Beschreibungen der aktuellen Technologien findet man z.B. in [1]. Einige Grundlagen zur Modellierung von Lithium-Ionen-Batterien findet man in [7, 8]. Im folgenden werden die wesentlichen Unterschiede zwischen der Modellierung von Bleibatterien und Lithium-Ionen-Batterien erläutert.

Blei-Säure-Systeme

Bekanntlich bestehen die Zellen einer Bleibatterie im geladenen Zustand aus porösen Blei- und Bleidioxid-Elektroden, die durch Separatoren getrennt werden und gemeinsam in eine wässrige Elektrolytlösung eintauchen. Die aktiven Stoffe sind bei Starterbatterien in Gitter aus Bleilegierungen pastiert, die auch als Stromableiter dienen. Eine andere Bauart verwendet für die positive Elektrode hochporöse Röhrchen, die einen stabförmigen Stromableiter umgeben, und die das aktive Material im Zwischenraum enthalten. Zur Erhöhung der Kapazität werden die Zellen zu Plattenpaketen zusammengefasst und elektrisch parallel geschaltet in ein Gefäß eingebaut, das die Elektrolytlösung enthält und das meist aus Polypropylen besteht. Bei Starterbatterien werden mehrere Gefäße dieser Art zu einer Batterie zusammengefasst. Die Software ISET-LAB zur Simulation von Blei-Säure-Systemen kann durch den Anwender mit Daten parametrisiert werden, die sich aus dieser Konstruktion ergeben. Neben den geometrischen Daten zur Festlegung der Randbedingungen werden nur noch die Mengen der verwendeten aktiven und passiven Materialien und die Porositäten der formatierten Elektroden verwendet. Diese Daten stehen bei Batterieherstellern zur Verfügung.

Beim Entladen einer Bleibatterie werden die aktiven Substanzen in den Elektroden in Bleisulfat umgewandelt. Da Bleisulfat ein höheres molares Volumen hat als Blei oder Bleidioxid, nimmt die Porosität der aktiven Substanzen in den Elektroden kontinuierlich ab und die Umwegfaktoren im Porensystem nehmen zu. Die Blei- oder Bleidioxid-Struktur wird dabei mehr und mehr mit Bleisulfat durchsetzt. Dieser Vorgang verändert nicht nur die Leitfähigkeit der aktiven Materialien, sondern auch die aktiven inneren Oberflächen, an denen die Elektrodenreaktionen ablaufen. Gleichzeitig nimmt die Konzentration der Elektrolytlösung spürbar ab, da die Bestandteile der wässrigen Schwefelsäure an den Elektrodenreaktionen teilnehmen. Diese starken Änderungen in der Elektrodenstruktur beeinflussen alle Transport- und alle Wechselwirkungsprozesse in der Zelle. Besonders für das Kurzzeitverhalten ist die abnehmende Doppelschichtkapazität der Phasengrenzflächen von hoher Bedeutung. Die Kinetik der verschiedenen Elektrodenreaktionen wird durch die abnehmende innere Oberfläche zunehmend verschlechtert. Das Verhalten beim Entladen wird außerdem stark durch die entstehende Inhomogenität der Elektrolytkonzentration in den Elektroden und im Separator geprägt. Zwischen den beiden Elektroden einer Zelle werden Wasserstoffionen, Sulfationen und Wassermoleküle durch die Elektrolytlösung transportiert.

Beim Laden einer Bleibatterie laufen die Prozesse im einzelnen nicht einfach in umgekehrter Richtung ab. Obwohl die Bleiionen innerhalb des Porensystems nur über sehr kurze Entfernungen transportiert werden, verlaufen die Transportwege beim Laden anders als beim Entladen. Bei sehr ho-

hen Strömen können beim Laden im übrigen Grenzströme auftreten, die durch den mangelhaften Nachschub an Bleiionen verursacht werden. Während der Stofftransport zwischen den Elektroden weitgehend umgekehrt verläuft wie beim Entladen, verursacht die inhomogene Sulfatverteilung in den Elektroden weitere Unsymmetrien zwischen Lade- und Entladeprozessen. Besonders bei Erreichen der Vollladung macht sich das extrem bemerkbar.

In diesem Bereich setzt an der negativen Elektrode die Entwicklung von Wasserstoff und an der positiven Elektrode die Entwicklung von Sauerstoff ein. Außerdem wird in dieser Phase der Ladung der Bleidioxidstruktur ein geringer Teil Wasserstoff entzogen, der beim Entladen in den Festkörper eingelagert wurde. Bei wartungsfreien Batterien wird an der negativen Elektrode zusätzlich Sauerstoff unter Beteiligung von Wasserstoff zu Wasser reduziert, so dass ein Sauerstoffkreislauf in der Zelle entsteht. In dieser Ladungsphase sind an jeder Elektrode wenigstens drei Elektrodenreaktionen wirksam, die für die Spannung an den Klemmen einer Bleibatterie von hoher Bedeutung sind. Weiterhin wird durch diese Prozesse weit mehr Entropie in einer Zelle erzeugt, als beim Entladen oder beim Laden einer teilentladenen Zelle. Die Wechselwirkung zwischen Elektrodenkinetik und dem thermischen Verhalten einer Batterie ist in dieser Phase daher besonders ausgeprägt. Generell wird das thermische Verhalten einer Bleibatterie vorwiegend durch die Entropieerzeugung und die Entropieabgabe geprägt. Durch die stofflichen Veränderungen beim Laden und beim Entladen ändert sich aber auch die Entropiekapazität in nicht vernachlässigbarer Größenordnung. Auch dieser Effekt macht sich im Verhalten eines Systems durchaus bemerkbar.

Lithium-Ionen-Systeme

Im Gegensatz zu Blei-Säure-Systemen hat sich bisher noch keine bestimmte Variante der verschiedenen Lithium-Technologien wirklich etablieren können. Obwohl sich im Bereich der aufladbaren Zellen Lithium-Ionen-Systeme gegenüber Lithium-Metall-Systemen wegen der geringeren Sicherheitsprobleme weitgehend durchgesetzt haben, werden auch Lithium-Metall-Polymer-Systeme angeboten und in der Forschung weiterhin untersucht. Die wesentlichen höheren Energiedichten dieser Systeme sind ein starkes Motiv, solche Systeme nicht außer Acht zu lassen. Die zur Zeit in Hybrid- und Elektrofahrzeugen eingesetzten Lithium Batterien gehören aber in der Regel zu Lithium-Ionen-Systemen.

Während bei Lithium-Metall-Systemen die negative Elektrode aus metallischem Lithium besteht und die positive Elektrode als Einlagerungselektrode realisiert wird, werden in Lithium-Ionen-Batterien beide Elektroden als Einlagerungselektroden gestaltet. In beiden Elektroden wird Lithium in einem Wirtsgitter gespeichert, das für die negative Elektrode üblicherweise aus Kohlenstoff und für die positive Elektrode aus einem Metalloxid besteht. Beim Laden und Entladen einer Lithium-Ionen-Batterie wird Lithium zwischen den beiden Elektroden ausgetauscht. Dazu müssen Lithium-Ionen innerhalb einer Zelle von einer Elektrode zur anderen transportiert werden, während im äußeren Stromkreis die komplementären Elektronen durch den Verbraucher fließen.

Vergleich von Blei-Säure- und Lithium-Ionen-Systemen

In einer geladenen Lithium-Ionen-Zelle befindet sich der größte Teil des Lithiums in der negativen Elektrode und nur wenig Lithium in der positiven Elektrode. Bei einer entladenen Zelle ist es genau umgekehrt. Im Gegensatz zu Blei-Säure-Systemen werden die Wirtsgitter beim Laden und beim



Entladen in der chemischen Zusammensetzung nicht geändert, obwohl mit dem Ein- und Ausbau von Lithium gewisse Volumenänderungen der aktiven Materialien verbunden sind. Dies vereinfacht die Modellierung von Lithium-Ionen-Batterien im Vergleich zu Bleibatterien sehr, da durch die extrem veränderliche Elektrodenstruktur in Bleibatterien die Transporteigenschaften der Säure- und Wasserstoff-Ionen signifikant beeinflusst werden.

Anders als bei Bleibatterien ändert sich die Konzentration der Lithium-Ionen in der Elektrolytlösung einer Lithium-Ionen-Batterie kaum, da durch die elektrochemischen Reaktionen an den Elektroden der Elektrolytlösung in der Summe keine Lithium-Ionen entzogen oder zugeführt werden. Auch dies erleichtert die Modellierung dieser Systeme, da Fehler in der extrem starken Abhängigkeit der Transporteigenschaften in der Elektrolytlösung von der Konzentration und von der Temperatur weniger von Bedeutung sind. Dies ist bei einem Temperaturbereich von $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ und höher ein bedeutende Vereinfachung.

Weitere Vereinfachungen im Vergleich zur Modellierung von Bleibatterien ergeben sich aus der geringeren Anzahl der Elektrodenreaktion in Lithium-Ionen-Systemen. Im Wesentlichen handelt es sich um die beiden Hauptreaktionen, die den Übergang des Lithiums zwischen der Elektrolytlösung und dem aktiven Material der Elektroden beschreiben. Diese Durchtrittsreaktion wird üblicherweise durch eine Butler-Vollmer-Gleichung beschrieben. Eine gewisse Komplikation ergibt sich durch die so genannte SEI-Schicht auf der inneren Oberfläche der negativen Elektroden, ohne die eine Lithium-Ionen-Zelle nicht funktionieren würde, und die in gewisser Weise wie ein Sieb für Lithium-Ionen wirkt. Für das dynamische Verhalten einer solchen Zelle beim Zyklieren ist die SEI-Schicht nur von untergeordneter Bedeutung, für das Langzeitverhalten der meisten Lithium-Ionen-Systeme spielt diese Schicht allerdings eine besondere Rolle.

Das dynamische Verhalten von Lithium-Ionen-Zellen hängt primär vom Transport des Lithiums innerhalb der Wirtsgitter ab. Die Diffusion des Lithiums in den aktiven Materialien ist den Durchtrittsreaktionen vor- oder nachgelagert und bestimmt letztendlich die Geschwindigkeit, mit der Lithium in die Festkörper eingelagert oder ausgebaut werden kann - und damit die Polarisierung der Elektroden oder die Änderungen der Klemmspannung. Der Spannungsabfall über dem Transportweg zwischen den Elektroden ist dagegen fast zu vernachlässigen. Im Gegensatz zu Bleibatterien, in der die Wasserstoff-Diffusion im aktiven Material der positiven Elektrode nur eine untergeordnete Bedeutung hat, spielt die Lithium-Diffusion in den aktiven Materialien einer Lithium-Ionen-Zelle für das dynamische Verhalten eine überragende Rolle. Zur Modellierung dieser Prozesse ist daher eine gute Kenntnis der Transporteigenschaften des Lithiums in den verschiedenen Elektrodenmaterialien ebenso unverzichtbar, wie die Kenntnisse zur Kinetik der Elektrodenreaktion.

Bei allen elektrochemischen Speichern sind außerdem die thermischen Eigenschaften eines Systems von hoher Bedeutung. Gerade im Bereich der Elektromobilität spielt dieser Aspekt eine sehr wichtige Rolle, nicht nur aus Sicherheitsgründen und in Extremsituationen: auch im üblichen Temperaturbereich eines Fahrzeuges können sich die Betriebseigenschaften eines Speichers extrem ändern. Zur Nachbildung des thermischen Verhaltens einer Lithium-Ionen-Batterie sind daher alle Prozesse zu modellieren, die zur Entropieerzeugung in einer Zelle nennenswert beitragen. Neben der Entropieerzeugung durch die Elektrodenreaktionen spielt dabei besonders der Elektronentransport in den Stromableitern eine wichtige Rolle. Auch an dieser Stelle ergeben sich einige Vereinfachung im Vergleich zu Bleibatterien, da es weniger Elektrodenreaktionen gibt. Weiterhin

ist die Berechnung der Entropiekapazität einer Zelle einfacher, da sich die Menge und die Art der Stoffe beim Laden und beim Entladen nicht ändern. In Bleibatterien hat dieser Effekt dagegen einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf das thermische Verhalten einer Batterie. Kaum einen Unterschied gibt es bei der Modellierung des Entropieaustausches mit der Umgebung eines Systems, der im Wesentlichen durch Temperaturgradienten aber auch durch Strahlung bestimmt wird.

Weiterhin gibt es einige Prozesse, die in Lithium-Ionen-Batterien eine vergleichbare Bedeutung wie in Bleibatterien haben. Ob sie bei der Modellierung zu beachten sind, hängt besonders von den Genauigkeitsansprüchen in verschiedenen Zeitbereichen ab. Zum Beispiel ist der Einfluss der Doppelschichtkapazitäten der Festkörper-Elektrolyt-Grenzschicht sicher nur im Kurzzeitbereich von Bedeutung. Anders als in Bleiakumulatoren ist die innere Oberfläche der Elektroden in Lithium-Ionen-Batterien kaum veränderlich, während die extreme Änderung dieser Größen in Bleibatterien eine dominante Rolle spielt. Insgesamt ist das Verhalten von Lithium-Ionen-Systemen daher sehr viel leichter zu beschreiben als das Verhalten von Bleibatterien.

Modelle für Lithium-Ionen-Batterien und ISET-LIB

Trotzdem ist die Modellierung von Lithium-Ionen-Batterien alles andere als trivial. Abgesehen von weiteren Prozessen, die bei genauerer Betrachtung nicht unbedingt vernachlässigbar sind, liegt ein Problem darin, dass sich bei Lithium-Ionen-Batterien eben noch kein spezielles System wirklich etabliert hat und auch bei den zur Zeit gängigen Ausführungen dieser Systeme noch sehr viele Unterschiede zu beachten sind. Dies betrifft sowohl die Elektrodenmaterialien als auch die Elektrolytlösung und die Separation der Elektroden. Während die negative Elektrode in der Regel aus einer Kohlenstoffmodifikation besteht, findet man für die positive Elektrode verschiedene Metalloxide wie Kobalt-, Mangan-, oder Nickeloxide oder Mischungen aus diesen Materialien. Bei der Auswahl dieser Materialien spielen nicht nur die Speicherfähigkeit für Lithium-Ionen, sondern natürlich auch der Preis, die Verfügbarkeit, das Alterungsverhalten, Sicherheitsaspekte usw. eine große Rolle. Weiterhin werden aktive Materialien untersucht, die nicht in diese Reihe passen, für zukünftige Systeme aber durchaus eine Bedeutung haben könnten.

Selbst für die zur Zeit in der Regel verwendeten Stoffe ist die Datenbeschaffung für eine zufrieden stellende Modellierung alles andere als einfach und für neue Materialien wird das noch schwieriger sein. Trotzdem sind gute Modelle sowohl für die Entwicklung der Lithium-Ionen-Technologie selbst als auch für die Integration in übergeordnete Systeme von hoher Bedeutung, da in vielen Fällen auf quantitative Aussagen zum Verhalten eines Speichersystems nicht verzichtet werden kann. In guten Modellen spiegelt sich letztendlich das Verständnis eines Systems wieder, und das ist für den Entwicklungsprozess auf allen Ebenen nicht unerheblich. Natürlich benötigt man bei der Lösung konkreter Probleme nicht immer hochgenaue Modelle. Aber auch bei der Verwendung vereinfachter Modelle sollte man sich Klarheit darüber verschaffen, welcher Vereinfachungen ein Modell enthält und welche Aussagekraft ein vereinfachtes Modell noch besitzt.

Das in ISET-LIB implementierte Modell bildet zur Zeit Zellen mit negativen Graphit-Elektroden und positiven Metalloxid-Elektroden in Lithium-Ionen- oder Lithium-Polymer-Batterien nach. Die Materialien für die Stromableiter sind Aluminium und Kupfer. Modelliert wurden alle relevanten Transportprozesse und alle wichtigen Wechselwirkungen in Batterien dieser Bauart. Das thermische Verhalten wurde für den relevanten Temperaturbereich in der Elektromobilität nachgebildet.



Um den Einfluss späterer Vereinfachungen vernünftig beurteilen zu können, wurden auch die Prozesse berücksichtigt, auf deren Modellierung man in einer ersten Approximation möglicherweise verzichten würde. In der aktuellen Implementierung wurde das Modell auf eine räumliche Dimension reduziert, da sich mit dieser Vereinfachung schon sehr gute Ergebnisse erzielen lassen und durch die stark verringerten Rechenzeiten eine interaktive Verwendung des Modells erlauben. Durch die Semi-Diskretisierung der Modellgleichungen, die in Form partieller Differentialgleichungen vorliegen, wird die Verwendung der Software ISET-LIB unter normalen, in der Industrie oft benutzten kommerziellen Simulationsumgebungen wie *Matlab/Simulink* oder unter Netzwerk-Simulatoren wie *Saber* oder *Simplorer* möglich. Das Basismodell, aus dem die C++ Implementierungen abgeleitet werden, wurde unter *Mathematica* entwickelt. Zur Verwendung unter *Matlab/Simulink* werden eine strom- und eine spannungsgesteuerte Version als Zustandsraummodell zur Verfügung stehen. Für Netzwerksimulatoren steht das Modell in impliziter oder relationaler Form zur Verfügung.

Wie bei ISET-LAB werden auch für ISET-LIB zur Parametrierung des implementierten Modells nur relativ einfach erhältliche Konstruktionsdaten der zu simulierenden Zellen erwartet. Diese können auf einfache Weise eingegeben oder aus einer Datenbank abgerufen werden. Auf diese Weise lässt sich zum Beispiel das Verhalten verschiedener Batterien in einem Kfz-Bordnetz schnell und einfach vergleichen. Alle anderen Parameter der beschriebenen Klasse von Lithium-Ionen-Batterien sind Bestandteil des Modells. Natürlich können auch alle sinnvollen Anfangszustände einer Batterie direkt vorgegeben werden und oft werden diese Anfangszustände einfach Ergebnisse vorhergehender Simulationen sein. In vielen anderen Fällen sind aber eher Zustände interessant, die zum Beispiel zu einem bestimmten Entladegrad einer Batterie oder zu vorgegebenen Werten der Klemmenspannung gehören. Da solche pauschalen Vorgaben den Zustand einer Batterie nicht eindeutig beschreiben, ist die Wahl der Anfangszustände nicht trivial. Da dieser Fall in der Praxis aber sehr oft auftritt, wird der Nutzer der Software bei der Wahl sinnvoller Anfangszustände durch integrierte Routinen unterstützt.

Bei der Simulation dynamischer Systeme sind Kompromisse zwischen Genauigkeit und Rechengeschwindigkeit unvermeidbar. Bei der zeitlichen Integration gewöhnlicher Differentialgleichungen kann der Nutzer in der Regel zwischen verschiedenen Lösungsverfahren wählen und auf diese Weise im Rahmen der Stabilitätsgrenzen einen für ihn vernünftigen Kompromiss finden. Bei gewöhnlichen Differentialgleichungen, die durch Semi-Diskretisierung partieller Differentialgleichungen entstanden sind, lassen sich in der Regel noch einige Diskretisierungsparameter wählen. In ISET-LIB kann der Nutzer auch auf diese Weise Genauigkeit und Rechengeschwindigkeit beeinflussen. Dies ist für das interaktive Arbeiten bei off-line-Simulationen oft von Vorteil. Auch bei der Generierung von Echtzeitvarianten der Software, die zum Beispiel bei der Realisierung virtueller Batterien gebraucht werden, ist eine gröbere Diskretisierung dem Verzicht auf die Nachbildung bestimmter physikalischer Teilprozesse oft vorzuziehen.

Für Anwender die das lokale Verhalten in bestimmten Bereichen des Zustandsraumes interessiert, werden außerdem die lokalen Linearisierungen der Systemgleichungen zur Verfügung stehen. Da sich elektrochemische Speicher in bestimmten Betriebsbereichen sehr stark nichtlinear verhalten, hängen die Matrizen, die solche Linearisierungen charakterisieren, vom Zustand einer Zelle ab. Mit diesen Informationen lässt sich dann zum Beispiel das Frequenzverhalten eines Systems in

diesen Zuständen untersuchen. Da das Verhalten elektrochemischer Systeme im Labor oft durch Frequenzanalysen ermittelt wird, lassen sich diese Linearisierungen auch zur Beurteilung des implementierten Modells oder zur Parameteridentifikation verwenden.

Modellunsicherheiten und Alterung

Modelle für physikalische Systeme sind generell mit kleineren oder größeren Unsicherheiten verbunden. Dabei lässt sich zwischen strukturellen und parametrischen Unsicherheiten unterscheiden. Die strukturelle Unsicherheit betrifft die Berücksichtigung aller für das Systemverhalten relevanten physikalischen Prozesse, wobei die Grenze zwischen relevanten und weniger relevanten Teilprozessen nicht immer scharf ist. Dies betrifft nicht nur die generelle Struktur eines Modells, also die Frage, welche physikalischen Größen im Rahmen eines Modells überhaupt bilanziert werden, sondern auch die Struktur der verschiedenen Funktionen, die die entsprechenden Transport- und Wechselwirkungsprozesse erfassen. Für elektrochemische Speicher spielen diese Funktionen eine besondere Rolle, da sie oft von verschiedenen Stoffkonzentrationen und von der Temperatur abhängen, deren Werte über sehr weite Bereiche variieren können.

Bekanntlich ändert sich das Verhalten elektrochemischer Systeme im Verlauf der Nutzungsdauer signifikant. Diese Alterung kann sowohl von der Betriebsweise abhängen, aber auch durch interne Prozesse verursacht werden, die durch die Betriebsweise kaum beeinflusst werden können. Oft hängt die Lebensdauer elektrochemischer Speicher primär von der Zyklisierung der Systeme ab, so dass die Gebrauchsdauer in Betriebszyklen - und nicht etwa in Monaten oder Jahren - angegeben wird. Gerade bei Lithium-Ionen-Batterien spielt die kalendarische Lebensdauer eine große Rolle, d.h. die Zellen altern auch ohne Zyklisierung. Generell werden Alterungsmechanismen außerdem stark durch die Temperatur beeinflusst.

Bei der Modellierung eines Systems ist daher zu entscheiden, ob die Dynamik dieser Prozesse berücksichtigt werden soll oder ob auf die Nachbildung des zeitlichen Verhaltens verzichtet werden kann. Da Alterungsprozesse in der Regel sehr langsam ablaufen, ist der Verzicht immer dann sinnvoll, wenn man primär am Verlauf normaler Betriebszyklen interessiert ist. Oft sind Alterungsmechanismen aber auch nicht besonders gut bekannt, so dass eine strukturelle Modellierung solcher Prozesse schon aus diesem Grund ausscheidet. Trotzdem lässt sich zumindest der Einfluss der Alterung auch mit diesen Modellen nachvollziehen, wenn bekannt ist, welche Parameter durch Alterung im Wesentlichen beeinflusst werden. Der Einfluss der Alterung macht sich dann in parametrischen Unsicherheiten bemerkbar. Natürlich stehen auch die Parameter neuwertiger Batterien nicht mit beliebiger Genauigkeit zur Verfügung.

Gelegentlich wird auf Grund dieser Unsicherheiten der Wert mathematischer Modelle für solche Systeme generell in Zweifel gezogen. Das ist sicher nicht sehr sachlich, da sich viele Probleme auch unter Berücksichtigung solcher Unsicherheiten klären lassen. Auch sollte man bedenken, dass selbst die verschiedenen Zellen einer Produktion schon eine gewisse Streuung aufweisen und geringere Modellunsicherheiten praktisch völlig irrelevant sind. Wichtig ist das physikalische Verständnis der Unsicherheiten. Es gehört zu den besonderen Vorzügen physikalischer Modelle im Vergleich zu heuristischen Modellen, dass sie eine quantitative Beurteilung solcher Unsicherheiten erlauben. In einer zukünftigen Version von ISET-LIB wird es möglich sein, die WQerte alterungsrelevanter Parameter über bestimmte Wahrscheinlichkeitsverteilungen auszuwählen. So lässt sich auf einfache



Weise der Einfluss bestimmter Parameterunsicherheiten studieren, ohne das ein Anwender der Software die Alterungsmechanismen in Lithium-Ionen-Batterien im einzelnen verstehen muss.

4 Messungen und Simulationen

Das zur Zeit in ISET-LIB implementierte Modell eignet sich in der Grundversion unmittelbar zur Simulation zylindrisch oder prismatisch aufgebauter Zellen. Die im Folgenden dargestellten Messungen wurden an einer einzelnen 40 Ah Gel-Polymer-Zelle der Firma Kokam in prismatischer Bauweise durchgeführt. Das aktive Material der negativen Elektrode ist Graphit Li_xC_6 und die positive Elektrode besteht aus dem Mischmetalloxid $\text{Li}_y\text{Ni}_a\text{Co}_b\text{Mn}_c\text{O}_2$. Die Zelle war frei in einer Klimakammer positioniert, so dass man von thermisch kontrollierten homogenen Umgebungsbedingungen ausgehen kann. Die wichtigsten Konstruktionsdaten für diese Zelle wurden uns freundlicherweise von Kokam/Korea zur Verfügung gestellt.

Zur ersten Charakterisierung einer Zelle werden von den Herstellern üblicherweise Kapazitätskennlinien angegeben. Diese Kennlinien zeigen den Verlauf der Klemmenspannung bei Entladung einer vollen Batterie mit verschiedenen konstanten Strömen für verschiedene Temperaturen bis zur Entladeschluss-Spannung. Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen Simulationsergebnisse für die Kokam Zelle, die leicht mit Messergebnissen des Herstellers für diesen Zellentyp verglichen werden können /www.kokam.com/. Gut erkennbar ist in Abbildung 7 der starke Einfluß der Temperatur bei Werten unterhalb des Gefrierpunktes. Über der Umgebungstemperatur ist der Einfluß der Temperatur auf den Verlauf der Spannung dagegen sehr gering.

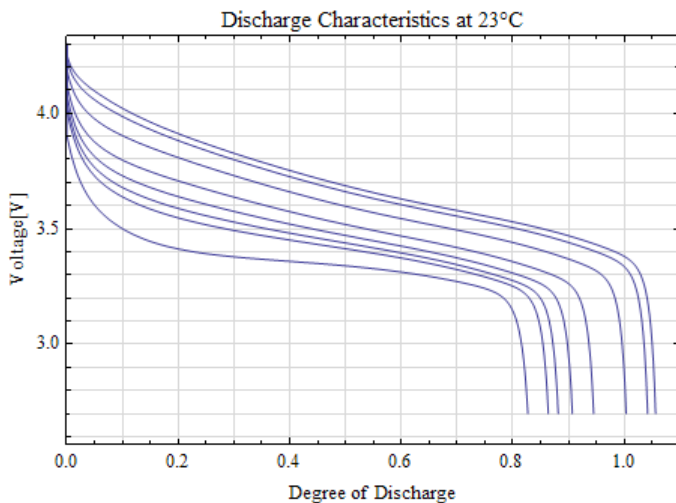


Abb. 6: Entlade-Charakteristik bei Raumtemperatur und Entlade-Strömen C/3, C/2, C, 2C, 3C, 4C 5C und 10C (von oben nach unten)

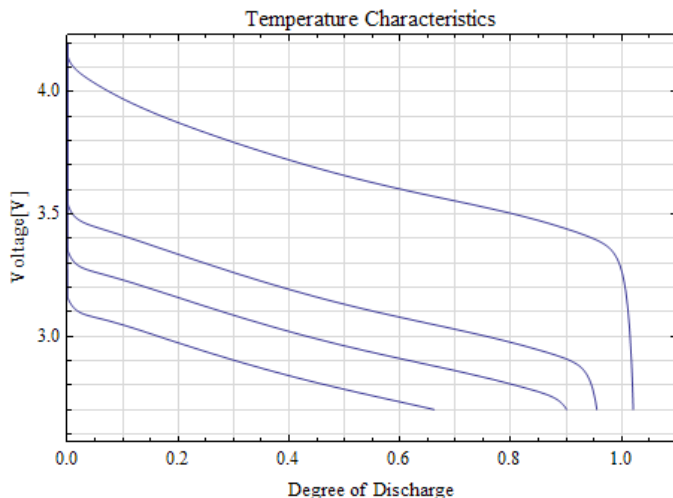


Abb. 7: Temperatur-Charakteristik bei 25 °C, -10 °C, -20 °C und -30 °C (von oben nach unten) und Entlade-Strom C/2

Abbildung 8 zeigt den Vergleich einiger Mess- und Simulationsergebnisse für intermittierende Entladungen mit C/2 Strömen bei 50 °C, 0 °C und -20 °C. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass sich nicht nur das stationäre Verhalten einer Lithium-Ionen-Batterie mit der Temperatur stark ändert: auch das dynamische Verhalten wird durch die Temperatur stark beeinflusst. Offensichtlich verlaufen die Ausgleichsvorgänge nach Abschalten des Entladestromes mit fallender Temperatur immer langsamer. Verursacht wird dieser Effekt durch den mit sinkender Temperatur steigenden Diffusionswiderstand für Lithium in den aktiven Materialien der Elektroden.

Die kleinen Abweichungen zwischen den Mess- und Simulationsergebnissen resultieren im wesentlichen aus Ungenauigkeiten in der Konzentrations- und Temperaturabhängigkeit der nicht sehr gut bekannten Diffusionskoeffizienten für Lithium in den aktiven Materialien der Elektroden. In [2] sind lediglich einige Messwerte für die Diffusionskoeffizienten von Lithium in Graphit zu finden. Angemerkt wird dort, dass die Streuung dieser Werte in der Fachliteratur durchaus über mehrere Größenordnungen geht. Die Abhängigkeit der Diffusionskoeffizienten von der Temperatur wurde daher soweit wie möglich durch den Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen rekonstruiert.

An dieser Stelle zeigt sich, dass gute physikalische Modelle auch die Identifikation nicht sehr gut bekannter Materialparameter zulassen und eine iterative Verbesserung durch den Vergleich mit gezielt ausgewählten Messungen möglich ist. Im Gegensatz zu heuristischen Modellen lassen sich physikalisch begründete Modelle auf diese Weise iterativ verbessern. Da die Struktur heuristischer Modelle oft ein hohes Maß an Willkür enthält, haben die Modell-Parameter in der Regel keine physikalische Bedeutung und müssen nach jeder Änderung der Struktur durch Messungen neu bestimmt werden.

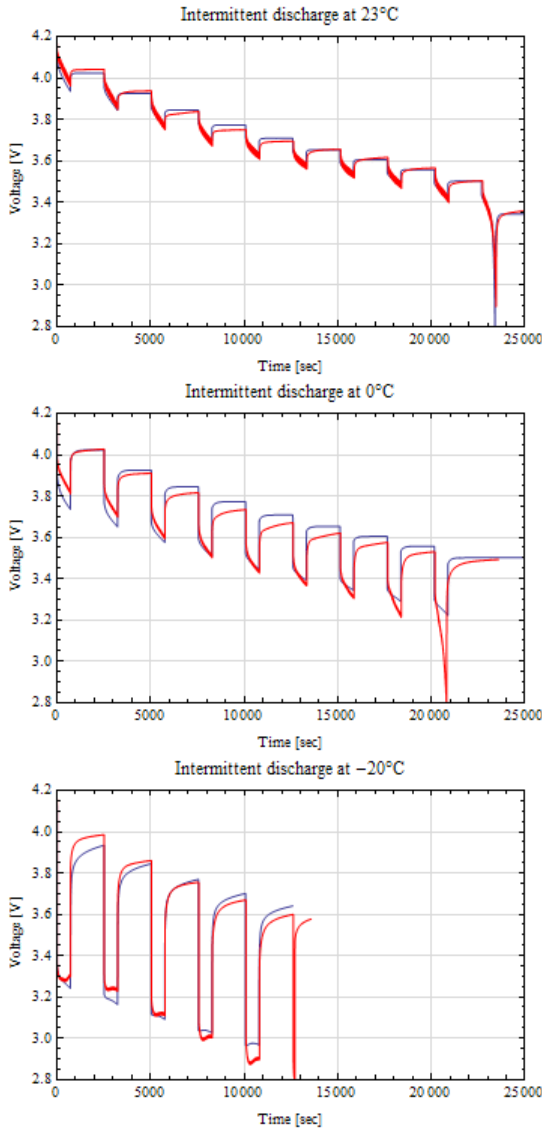


Abb. 8: Vergleich von Messungen und Simulationen bei intermittierender Entladung und verschiedenen Temperaturen

Abbildung 9 zeigt die zeitliche und räumliche Änderung der Lithium-Ionen-Konzentrationen in den aktiven Materialien und in der Elektrolytlösung der Elektroden. Die Simulationen verdeutlichen, was beim Entladen einer Lithium Batterie geschieht: In der negativen Elektrode wird zu Beginn der Entladung Lithium an der inneren Oberfläche des aktiven Materials aus dem Festkörper ausgebaut.

Durch das entstehende Konzentrationsgefälle strömt Lithium aus der Tiefe des aktiven Materials nach und die Konzentration wird im Laufe der Zeit auch dort geringer. In den Strompausen gleichen sich die Konzentrationsunterschiede dann wieder aus, die Lithium Konzentration ist aber geringer geworden. In der positiven Elektrode verlaufen diese Vorgänge qualitativ genau umgekehrt, quantitativ aber deutlich verschieden. Offensichtlich verläuft die Diffusion in der positiven Elektrode langsamer als in der negativen Elektrode. Die Relaxation der Klemmspannung wird also im wesentlichen durch die positive Elektrode verursacht.

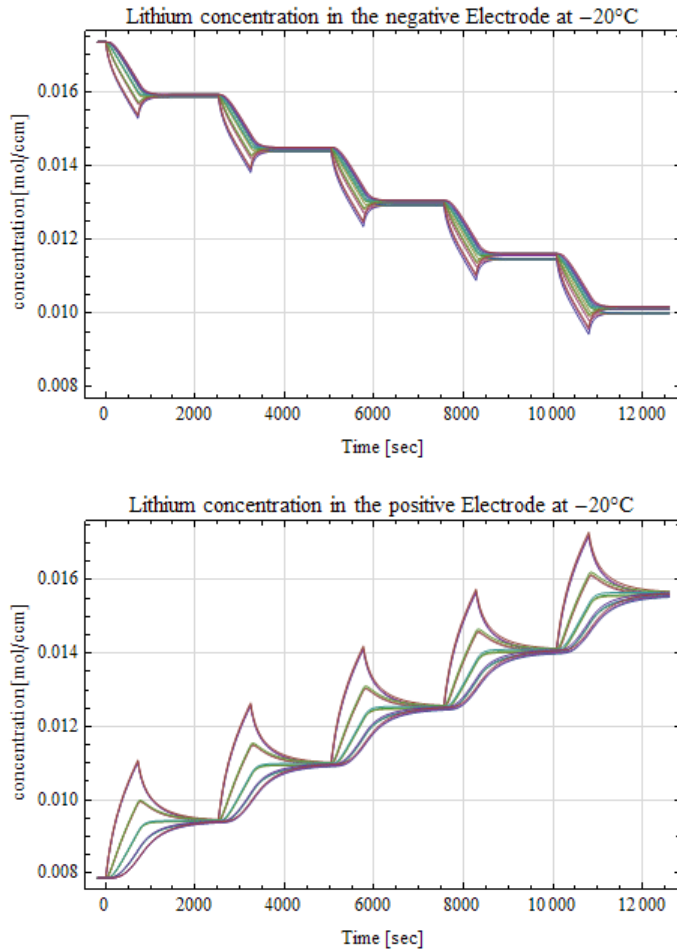


Abb. 9: Lithium Konzentration in der negativen und in der positiven Elektrode beim Entladen einer Lithium-Ionen-Batterie bei -20°C .



Abbildung 10 zeigt den Verlauf einiger thermische Größen, die sich aus der Entropieproduktion der einzelnen Transport- und Wechselwirkungsprozesse in der Zelle ergeben. Die Temperaturschwankungen um 6 °C resultieren aus der Entropieproduktion und der Entropieabgabe der Zelle, die in der unteren Abbildung durch die entsprechenden Energieströme dargestellt werden und sich gut mit dem elektrischen Energiestrom von etwa 70 Watt vergleichen lassen. Die mit der Entropieproduktion verbundene irreversible Wärme ist stets positiv und beträgt etwa 15 Watt. Der mit der Entropieabgabe über die Oberfläche verbundene Energiestrom der Batterie schwankt dabei zwischen 0 und 10 Watt.

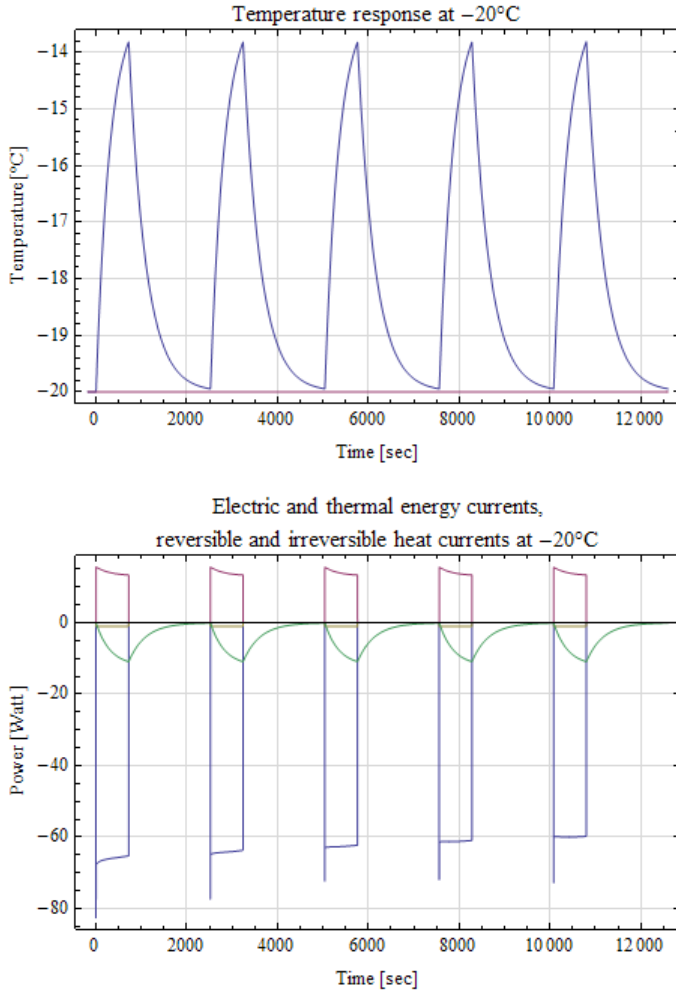


Abb. 10: Temperatur, elektrischer und thermischer Energiestrom, reversible und irreversible Wärme bei intermittierender Entladung



Es gibt viele weitere Größen in einer Lithium-Ionen-Zelle, deren Darstellung an dieser Stelle sehr reizvoll wäre. Das betrifft zum Beispiel alle Transport- und Wechselwirkungsstromdichten in der Zelle oder verschiedene thermische Größen, die mit diesen Prozessen verbunden sind. Die Sensitivitäts- oder Robustheitseigenschaften der wichtigsten Parameter, die z.B. die Alterung einer Zelle betreffen, ist für viele Anwendungen von hoher Bedeutung. Auch das Verhalten der Zellen im Sekunden und Minutenbereich oder das Frequenzverhalten von Lithium-Ionen-Batterien in verschiedenen Ladezuständen und bei verschiedenen Temperaturen ist für Batterie-Peripherie- oder System-Entwickler oft sehr interessant. Die vertiefte Diskussion dieser Themen würde den Rahmen dieses Beitrages allerdings deutlich überschreiten.

5 Ausblick

Lithium-Ionen-Batterien werden für die Zukunft der Elektromobilität eine Schlüsselrolle spielen. Sowohl bei der Entwicklung künftiger Hybrid- und Elektrofahrzeuge als auch bei der Realisierung intelligenter Systeme zur bidirektionalen Netzanbindung müssen die dynamischen Eigenschaften und auch das Alterungsverhalten dieser Speicher in geeigneter Weise berücksichtigt werden. Gute Simulationsmodelle und virtuelle Systeme können diesen Prozess wirkungsvoll unterstützen.

Das zur Zeit implementierte Modell für ISET-LIB ist für viele Zwecke der Bordnetzsimulation und Realisierung virtueller Batterien schon sehr gut geeignet. Durch weitere Untersuchungen im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben werden sich aber noch einige Verbesserungen erzielen lassen, die u.a. eine einfache Anpassung an unterschiedliche aktive Materialien erlauben und auch die objektorientierte Modellierung größerer Zellverbände wirkungsvoll unterstützen.

Ein bedeutsamer Unterschied bei der Realisierung virtueller Systeme für Bleibatterien und Lithium-Ionen-Batterien resultiert aus unterschiedlichen Sicherheitsanforderungen. Für bestimmte Untersuchungen von Lithium-Ionen-Systemen ist es unerlässlich, die Stackstruktur großer Speicher durch einzelne virtuelle Zellen oder Zellgruppen nachzubilden. Das betrifft besonders die Überwachung oder den Ladungsausgleich zwischen den Zellen von Lithium-Ionen-Aggregaten höherer Spannung. Für diese Zwecke müssen multi-virtuelle-Batterien eingesetzt werden, deren Entwicklung auf der Basis von ISET-LIB-RT zur Zeit vorbereitet wird.

6 Danksagung

Der Autor dankt Frau Dr. Aleksandra Bukvic-Schäfer und den Herren Matthias Puchta, Jochen Giehardt und Dominik Schledde für die Vorbereitung und Durchführung der in diesem Beitrag dargestellten Messungen an Lithium-Ionen-Zellen sowie für den Aufbau der vorgestellten virtuellen Batterie und die Durchführung der Beispielmessungen. Wir danken außerdem der Firma Kokam, die uns auf sehr unbürokratische Weise die Konstruktionsdaten der von uns untersuchten Zelle zur Verfügung gestellt hat.



7 Literatur

- [1] Jossen, Weydanz: *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*, Reichardt Verlag, 2006
- [2] Yoshio, Brodd, Kozawa: *Lithium-Ion Batteries*, Springer Verlag, 2009
- [3] Caselitz: *Simulation des dynamischen Verhaltens elektrochemischer Speicher*, Forschungsverbund Sonnenenergie, Themenheft Energiespeicherung, 1995
- [4] Caselitz: *Physikalisches Modell für Starterbatterien zur Bordnetz-Simulation von Kraftfahrzeugen*, Elektrotechnik im Kraftfahrzeug - VDI-Berichte Nr. 1287, 1996
- [5] Caselitz, Juchem: *Computer aided design of battery management systems for automobiles*, SAE Technical Paper Series No. 980309, 1998
- [6] Caselitz: *Modelling and Simulation of Lithium Ion Batteries for Hybrid and Electric Vehicles*, Tagungsband 7th Symposium on Hybrid Vehicles, Electric Vehicles and Energy Management, Braunschweig 2010
- [7] Botte, Subramanian, White: *Mathematical modelling of secondary lithium batteries*, Electrochimica Acta 45, 2000
- [8] Smith, Wang: *Power and thermal characterization of a lithium-ion battery pack for hybrid-electric vehicles*, Journal of Power Sources 160, 2006

Integration of electric vehicles into the grid - Grid-to-Vehicle

M. Stötzer, A. Naumann, Z.A. Styczynski

Otto-von-Guericke-Universität

Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg

Tel.: (+49 (0) 391) 67-18592, Fax: (+49 (0) 391) 67-12408

E-Mail: martin.stoetzer@ovgu.de; andre.naumann@ovgu.de; sty@ovgu.de

1 Introduction

Climate change, decreasing fossil resources, high dependency of the European Union (EU) on primary energy and increasing energy costs in the frame of energy intensive industry lead to a long term discussion about the future energy supply system.



Figure 1: Vision of Smart Grid in the frame of integrated energy technologies [1]

As can be seen in Figure 1 the electricity grid should become more intelligent and more complex in order to integrate different types of generation, mostly based on renewable energy sources (RES), and new types of loads like electric vehicles (EV). The need for this kind of networks is based on the following objectives being set by the European Union for 2020 to meet the challenges that have been mentioned at the beginning.

- Lower specific and total CO₂ emissions (-20 %-30 %)
- Increasing energy efficiency (+20 %)
- Significant amount of renewable generation on primary energy demand (20 %)
- Energy savings



To come up to the EU 20-20-20-goals all areas of energy generation, transmission and consumption have to be taken into account. One major issue in this case is the transportation sector and the individual mobility which consumes 30 % of the primary energy in particular [2].

In their national development plan the German government estimated the amount of pure EV by 1 Mio. in Germany by 2020 [3] [4]. That could lead almost to a significant market penetration of electrified vehicles (including plug-in hybrids) of about 20% in Western Europe by 2020 that need a reliable and secure connection to the electric power system. [5] Most of these EV will be used in the urban areas because of the limited range due to the low energy density of the applied battery technologies. The EV will likely replace the typical second car in the first generation.

The impact of e-mobility on the electric grid has to be investigated in addition to the increasing amount of dispersed generation based on renewable energy sources. Regarding typical grid planning periods of 15 or more years it is quite essential to know today how the network has to be enhanced or rebuild to face the new challenges. Therefore it will be necessary to develop several scenarios to estimate the amount of EV combined with dispersed generation under certain circumstances that could be integrated into different types of grid topologies considering the current limits in grid operation (EN 50160). Further the assets have to be identified that would be mostly stressed if the maximum amount of electric vehicle will be exceeded. Based on these results grid planning and operation can be adapted to the new conditions at the very beginning.

In this contribution an overview about the development of e-mobility with all related topics will be firstly presented. Then, proper scenarios describing the amount of RES and EV will be shown. These are used for the following grid calculation to estimate the impact of electric vehicles in the low and medium voltage grid.

2 E-Mobility - What is it all about?

2.1 Electric vehicles - Technical developments and market penetration

Most car manufacturer are currently develop their own EV respectively started a cooperation with other to create a common EV platform. Due to the high investment cost and the very limited range the market penetration is low. Different countries will provide or still offer subsidies to facilitate the purchase of an EV. China supports the purchase of an EV with \$8,800 as well as the USA with a tax credit by \$7,500 to reach their goals of a certain amount in the coming years. China set up a goal of 500.000 EV and hybrid cars in 2011. For Germany the expected amount differs between 850.000 to 8 Mio pure EV in 2020. Today only a few EV are registered [17].

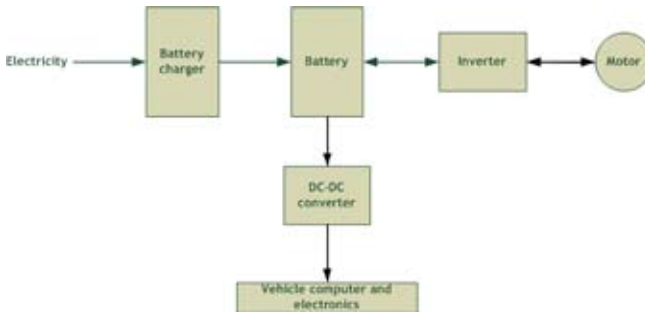


Figure 2: Key components of an electric vehicles [12]

The key components of a typical EV are presented in Figure 2. The most important elements regarding the electric grid are the installed battery and the related charger which commonly describes the power and energy demand.

Table 1: Comparison of typical battery technologies applied in electrified cars [6]

Battery technology	Nominal voltage	Energy density [Wh/kg]	Power density [W/kg]	Cycle stability	charging time [h]	Self discharging [%/month]
Pb	2,0	35	200	800	8-24	3
NiCd	1,2	35	260	1000	1-16	10
Ni-MH	1,2	75	850	900	1-2	30
Li-Ion	4,0	150	300	600	2,5	2
ZEBRA	2,58	115	160	3000		

The battery technologies that are used and/or developed for electrified cars are summarized in Table 1. The application is based on the type of car. Hybrid cars usually use the battery to supply the electric motor to support the ICE or for short pure electric drives in the city under a certain speed limit.

Therefore the most common battery technology is the Ni-MH (Nickel-Metalhydrid) The power and energy density is higher than for a Pb battery and the total discharge capability allows for using the whole capacity that is provided by the battery. For pure EV the lithium based electricity storage is the most promising technology due to the expected development potentials. Important improvements were made in the last decade to decrease costs and increase the power and energy density and the cycle stability. Major disadvantage is the temperature sensitivity that requires a good heat monitoring while charging and discharging. [18]

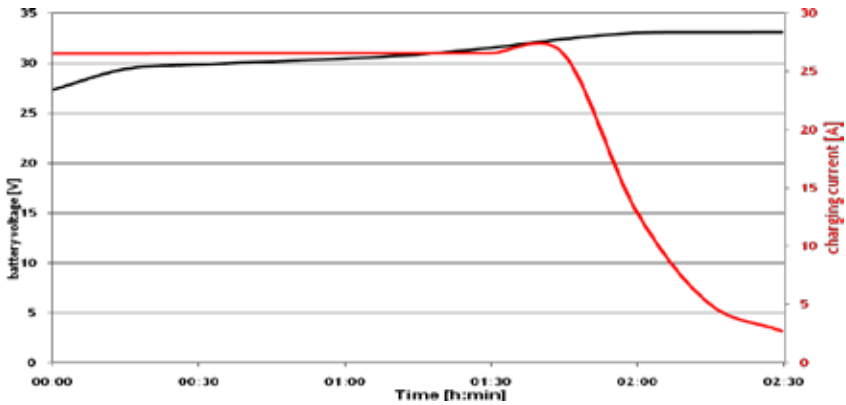


Figure 3: Typical charging characteristic of Li-Polymer batteries

For developing realistic load profiles the charging characteristic of the different battery technologies have to be taken into consideration. In Figure 3 a typical charging curve is shown for a lithium-polymer battery (33,4V, 53Ah) that has been measured under lab conditions. The curve is characterised by a long time constant charging power until a State-of-Charge (SOC) of about 95%. That can be used for a simplified charging model.

2.2 Charging technologies

In this chapter the charging technologies will be presented that are currently discussed. Due to the fact that EV have still a very limited range compared to vehicles with an internal combustion engine (IEC) the planning of a proper charging infrastructure is quite important. In this regard the interests of the EV drivers and the actual grid conditions have to be taken in consideration commonly.

The most obvious technology is closely related to the well known charging process of vehicles fuelled by petrol. Current EVs offer the opportunity to be charged with a single phase connection, i.e. 230V/16A in Germany. Due to the low power the recharge of the battery needs generally four to six hours depending on the battery size. So this technology would be mostly used in residential areas to charge the EV during the night.



Figure 4: Current charging technologies [7][8][9]

The limited range of the EV and the long charging process are some of the most important obstacles of EV to become widely accepted. Increasing the energy density of batteries is a big challenge for the industry and it will take decades to have a size that is comparable to petrol. But higher charging power would help to facilitate the market penetration due to the opportunity to recharge the battery shortly in the meantime while parking during the day. In the IEC 61851-1 four connection types including fast DC charging and the related requirements of the plugs are described. Today the limiting factor to implement these kinds of charging spots is mostly the applied battery technology due to the electrochemical reaction rate (max 0.2C (Pb) to 0.5C (Li-Ion)). [12]

To avoid long time charging two further technologies are developed that do not use any kind of plug. The battery switching station supported by Better Place offers an opportunity to exchange the whole battery within two minutes. Main disadvantages compared to the charging station technology are the significant higher costs (about 100 times) and the issue of interoperability between EV and the battery switching technology. [10][12]

Table 2: Connection types to charge EV (IEC 61851-1) [16]

Connection type	Loading power
House connection (type 1) Max. 16A per phase	3.7 - 11kW
Home connection (type 2) Max. 32A per phase	7.4 - 22kW
Charging spot (type 3) Max. 32A per phase	7.4 - 22kW
Fast charging (type 4)	Up to 400A (DC)

The second battery charging technology is based on a wireless connection between the EV and the electrical grid. In this case conductor loops are installed in the road to charge the EV inductively while driving or waiting at the traffic lights or parking lot. Major advantages are the interoperability because no kind of plugs are required. Further the EV are competitive to vehicle with ICE due to the opportunity of continuous charging. Negative factors are the necessary installation under the streets mainly focused on urban centers and the actual low energy efficiency (about 60%). [11][12]

Regarding the mentioned aspects of the three charging technologies in today's view the connection via plug might be the most common approach to charge electric vehicles. The infrastructure already exists and the installation of charging spots is comparatively cheap. Further the future EV drivers are familiar with tanking up their car which is akin to a charging spot. That can help to facilitate to increase the market penetrations. The fast charging capability depends mainly on the battery technologies and is not available in the medium term. Further steps are necessary to increase the reaction rate of the electrochemical reaction to allow for fast charging.



2.3 Vehicle to grid concept

The basic idea of this concept is that EVs are used as mobile storages while they are plugged in. The battery system can be used to compensate the difference between generation and demand. Main driver of this concept is the optimal integration of RES into the grid. The intermittent generation can lead to unsecure grid conditions due to low and static demand or a lack of line capacity. The EVs can be flexibly applied to charge in times of excess generation (local consumption) and feed back if the grid frequency falls below a certain value (see Figure 5).

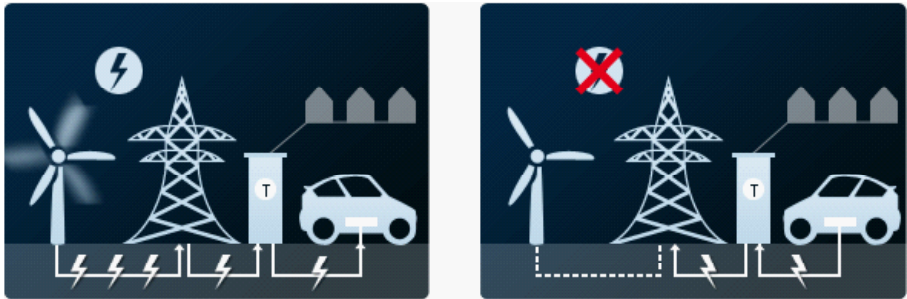


Figure 5: Vehicle-to-grid concept (T=transformer) [13]

For network planning and operation it is necessary to estimate the available storage capacity. The following issues have to be exemplary taken into consideration:

- Market penetration of EV
- Battery capacity and cycle stability
- Average duration of connection to the grid
- Rated maximum power of the vehicles power electronics
- Maximum line capacity at the grid connection node

3 Impact of E-Mobility on network security

3.1 Impact of charging on network security

3.1.1 Low voltage grid

EV are typically connected to the low voltage grid (0.4kV), so the first simulation are focused on that. To model the impact of multiple charging in the households or at the place of work different scenarios are developed. Main objective is to find a critical amount of EV that influence network security significantly in particular in case of overload.

For the grid simulations generic grid models of characteristic residential and commercial areas are applied (Figure 6). These kind of grids are typically built as radial distribution systems. The

load is supplied by transformers with the size of 250, 400 or 630kVA depending on the peak power demand. The technical specifications of the cables are summarized in Table 3.

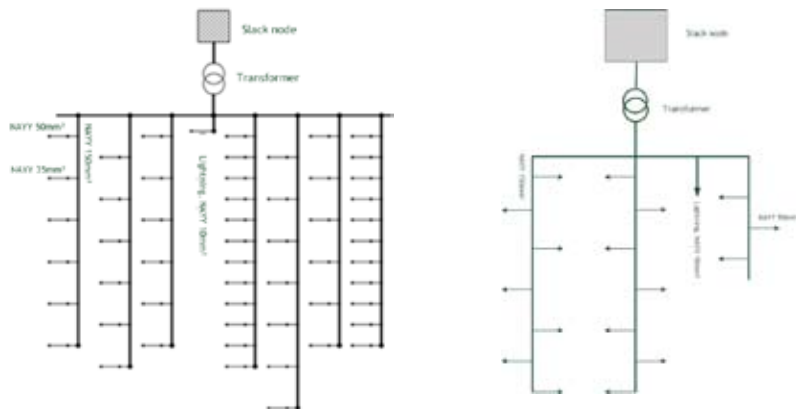


Figure 6: Generic low voltage grid models of residential (left) and commercial areas

The grid in the residential area consists of 54 households (about 4000kWh/a) representing an average amount of connections within a mid-sized city.[24] The consumption is modelled by using standardized load profiles (VDEW) (Figure 7) ($\cos \varphi = 0.95$). For the commercial area a characteristic composition of firms (i.e. traders, car wash, dispatch department, etc.) are considered to create a generic grid model. The electricity demand is also modelled by standardized load profiles. The yearly consumption is based on average values as described in [14]

Table 3: Technical specifications of the cable in low voltage grids

Type of cable	R [Ω /km]	X in [Ω /km]	C [μ F/km]	I_{th} [kA]
NAYY 4x150 SE 0,6/1kV	0,206	0,080	0,830	0,275
NAYY 4x50 SE 0,6/1kV	0,641	0,085	0,670	0,144
NYY 4x35 SM 0,6/1kV	0,524	0,085	0	0,159
NYY 4x10/10 0,6/1,0kV	1,830	0,125	0	0,083

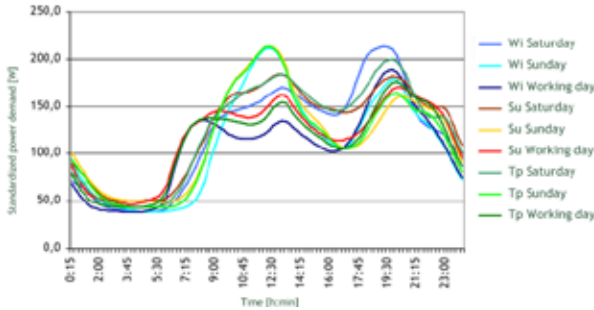


Figure 7: Standardized load profiles to model residential electricity demand [21][23]

Two scenarios for the residential and one scenario for the commercial area are defined to estimate the impact of EV on the network. In every scenario renewable generation by photovoltaic (PV) plants is considered. It is expected that this kind of generation is the most common one in low voltage grids. For simplification a constant amount of household (30%) have a PV plant on their roof. In the commercial area every consumer has one PV plant (size depending on yearly energy consumption). The generation profile is based on longterm PV measurements on a building of the Otto-von-Guericke University.

In the first scenario for the households 35 EV are connected to the grid (60% of all connections). In the second scenario every household uses one EV. In every scenario the EV are always charged during the night (19:00-4:00) starting at the same time. For the commercial customer it is expected that in the medium term every company has one EV on average. The EV are charged between 8.00-10.00. The required charging time is based on average driving routes. In all scenarios only single-phase charging (max. 2.5kW) is possible as described in 2.2. The charging profile is scaled based on Figure 3. The power factor is 0.95 for all EV:

The simulation results for the residential low voltage grid show that the network security is not dramatically at risk in case of 100% EV and 30% PV generation (Table 4). The loading of the transformer is within technical limits as long as the maximum temperature of 95 °C is not exceeded. The ampacity reaches a percental value of 102,5% compared to the nominal value. The cables are operated within acceptable parameters. The generation of the PV plants and the charging of the EV happens at different times, so there is no mutual influence. It can be expected that the increasing local consumption have a load reducing effect on the network which can improve network security.

Table 4: Loading of selected assets in the residential low voltage grid (100% EV)

Assets	Identification	I/I _{th} [%]
Transformer	T1	102,5
Cable	L19	74,9
Cable	L44	69,5
Cable	L20	68,7

Similar results are found for the commercial area. The penetration of EV and the PV plants have no significant impact on network security in the described scenarios. As can be seen in Table 5 the assets are operated within normal conditions. The installation of PV plants leads to a slightly improvement of system operation due to the local use of electricity as mentioned before.

Table 5: Loading of selected assets in the commercial low voltage grid

Assets	Identification	I/I_{th} [%] without PV	I/I_{th} [%] with PV
Line	L7	58,2	57,3
Line	L8	50,9	50,2
Transformer	T1	42,8	42,2
Line	L2	42,1	41,5
Line	L3	35,0	34,5

3.1.2 Medium voltage grid

In this section the impact of EV and RES on a medium voltage grid will be investigated. Therefore a typical grid topology describing a medium sized city is applied. The radial distribution network consists of two transformers supplying the load at 14 nodes from the 110kV level. Each of these nodes feed an underlying low voltage grid as already mentioned in 3.1.1. The nodes consists of two different kind of loads, industrial and residential customers. They are modelled by using standardized load profiles (see Figure 9 for households). Regarding the aim of the investigations charging profiles for the EV and generation profiles for the RES are integrated in addition.

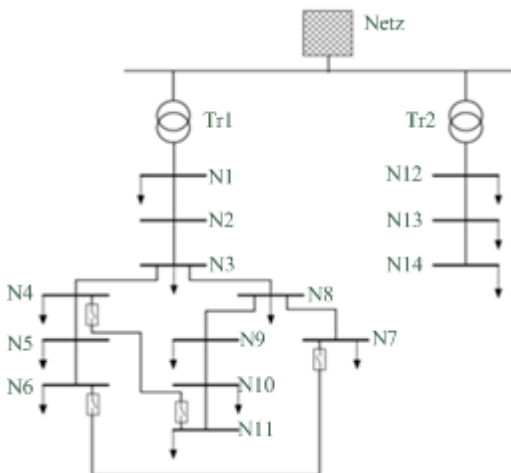


Figure 8: CIGRE-Benchmark grid (20kV, 14 nodes) [20]



Aim of the simulation was to find overloaded devices and voltage band violation caused by the charging process of the electric vehicles. Since the interoperation of electric vehicles with renewable energy sources is one key aspect of the investigation each of the 14 nodes has a feed-in from photovoltaics, bio mass or wind energy. The overall maximum renewable feed-in for the used grid is 0.75 MVA for photovoltaics, 32.6 MVA for wind power and 1.39 MVA for bio mass.

The cumulative peak load of all consumers excluding electric vehicles in the grid is 50 MVA. Load caused by electric vehicles is simulated via load curves derived from the charging process of real batteries, considering the allowed charging power and a coincidence factor. In different scenarios different amount of EV are included to the simulation, with an absolute maximum of 30,000 vehicles. Simulation steps increased that number by 20%-percent.

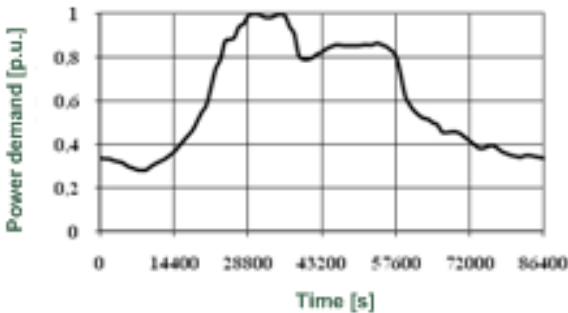


Figure 9: Standardized load profile of households in the CIGRE-Benchmark grid

The simulation results show the influence of a rising number of electric vehicles on the grid. When having an amount of 40% electric vehicles (12,000 EVs) one of the used transformers is overloaded. The nominal power of the transformer of 25 MVA is exceeded since according to the simulation 37 MVA are necessary. This is an overload of 100% when considering the (n-1)-criteria. The allowed voltage band is also exceeded. The voltage drops to 0.85 p.u.. Figure 10 shows the voltage curve of two nodes in the grid. The voltage band violation can be seen very well at 8 p.m.. When all EV charge simultaneously the voltage drops to 0.85 p.u. N1 is the most critical node in the system in that situation. N1 is the node directly connected to the feeding transformer interconnected to the 110 kV grid.

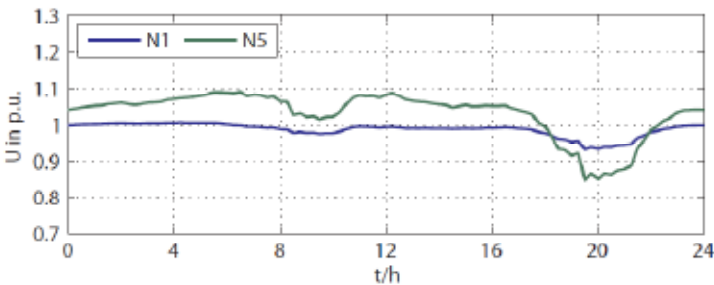


Figure 10: Voltage curve of two nodes for a electric vehicle part of 40%

The situation becomes worse when having a look at the 60% electric vehicle scenario (18 000 electric vehicles). The voltage drop even reaches 0.7 p.u. and also the feeding node N1 “scratches” the 0.9 p.u. margin. The transformer already mentioned before now is loaded with more than 60 MVA and would fail surely in real operation. Figure 11 shows the voltage curve for this scenario and the two mentioned nodes.

These two results of the simulation show that medium voltage grid is partly capable to bear the load caused by EV if the amount is far below 40% market penetration. In particular the fast charging capability leads to a massive overload of the assets.

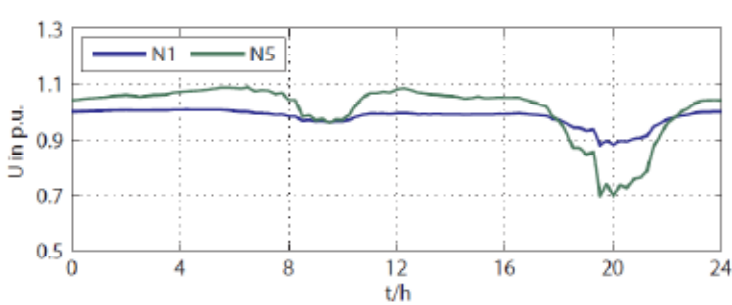


Figure 11: Voltage curve of two nodes for a electric vehicle part of 40%

3.2 Modelling of typical load profiles of electric vehicle users

The simulation results presented in 3.1.1. and 3.1.2 showed that it is essential to estimate a realistic behaviour of the EV driver to get an idea how typical load profiles of EV charging can look like. In the following section an approach to use agent based simulation is described.

A key point here is the knowledge of energy demand profiles caused by electric vehicles. Since until now not many electric vehicles are in use there is no experience that helps creating load profiles. One solution that is used to create load profiles caused from electric vehicles is the agent based simulation. This simulation allows the load prediction at one certain charging spot by simulating an almost unlimited number of vehicles in an defined environment. Since each electric vehicle is represented by one agent, each of them can act freely, make its own decisions and interact individually with its environment and with other agents [22]. Once initialized with starting parameters (e.g. start location, state of charge, destinations to go) every agent has its own behaviour and reacts to conditions given by environmental parameters and agent interaction. Environmental conditions, that have to be taken into account and evaluated by every agent, are aspect like price of energy, available streets to go on or available charging spots. The result of this simulation is the energy demand which occurs at one charging spot, the vehicle is connected to, leading to load profiles for each charging spot.

The agent based simulation is realized in a development environment which is suited for the needs of agent based simulation including support for different behaviours, messaging between the agents and the environment and the ability to run on distributed systems. As you can see in Figure 12 there are a lot of instances of the electric vehicle agent which uses one of several



behaviours, depending on the agent state. Of course for a proper simulation control objects are necessary. A time synchronization and a correlation between real time and simulated time is done by a time controller agent. The output of status information of every electric vehicle agent is handled by an output agent, which for example can output to data base or a text file or even may produce a graphical output with the vehicles shown on a map. By using specific messages, the information exchange between all agents becomes possible. Those message flows are represented by the dotted lines in Figure 12. The whole concept of the simulation allows for the extension with other agents, behaviours and input parameter sources. Based on this simulation realistic demand profiles can be developed.

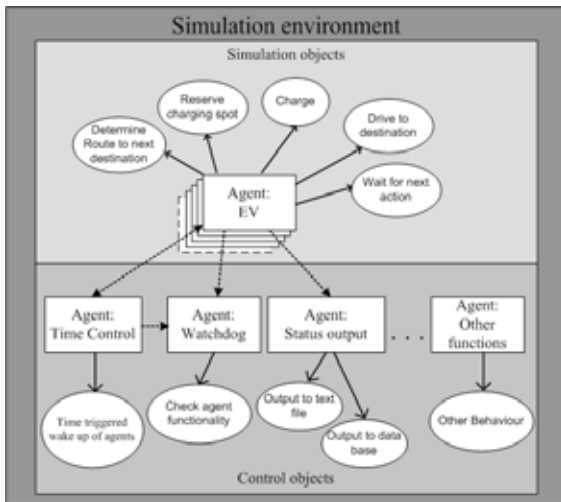


Figure 12: Simulation of electric vehicles in an agent based environment

4 Requirements for the E-Mobility infrastructure

4.1 Electrical grid

The rushed development of the dispersed and renewable generation in the last decade has resulted in this kind of generating unit gathering even more influence on the overall behaviour. The introduction of electric vehicles to the power grid can probably aggravate the situation further but also offers opportunities for an improved power grid reliability by an intelligent coordinated operation. In this regard improved measures have to be used to make sure that the power grid operation does not exceed any limits., i.e. voltage band boundaries and overload of assets like transformers or cables. Regarding the simulation results in 3.1.1 an 3.1.2 some required grid adaptation are presented in the following.

The most obvious measures, but probably also the most expensive ones have been examined first. The general upgrading of all related assets like cables and transformers contribute to the system



reliability in case of a high penetration of EV and RES. Further reactive power compensation in the medium voltage level ensures to keep the voltage within the allowed band. Regarding the technical and economical optimization process in network planning it is necessary to have a closer view on the specific local and regional requirements.

As can be seen in 3.1.1 the low voltage grids are generally capable to integrate a high amount of EV today if they just charge over night and if they are connected single-phased (charging with less than 3.7kW). This result is comparable to the findings presented in [25]. The transformer will be first operated close to its limits. That will necessarily lead to an enlargement of the transformer capacity taken into considerations in addition PV installations. The capacity of the lines will be sufficient being relevant from an economical point of view due to the high investment costs for their installation. Regarding the voltage profiles no reactive power compensation is required presuming a power factor of the EV charger of 0.95.

The requirements on the medium voltage grid are more complex. There will be different types of decentralised generation mainly based on RES and in future a significant amount of EV with partly fast charging capability. Regarding the (n-1)-criterion the assets in the 10-20kV grids are usually operated at maximal 70% of full capacity to ensure security of supply. In contrast to the low voltage grid which is typically oversized because of the expected growth in consumption all assets in the medium voltage level have to be enlarged if a certain level of EV and RES penetration will be exceeded (see 3.1.2). One reason is the frequent time shift between the renewable generation and the EV charging that can lead to reverse power flows in case of low load or high power demand from the upper grid level if the RES generation is low. To find a technical and economical optimization it has to be distinguished between new assets to be able to distribute the electricity or the implementation of intelligent charging to use the EV as mobile storages in the grid (see 2.3). The latter can facilitate the integration of RES into the grid due to the local consumption which can improve network security. As can be seen in the simulation results in 3.1.2 one crucial point is the voltage stability. The reactive power demand of EV charging lead to an decrease of the voltage at the grid nodes. To ensure power quality concerning EN 50160 reactive power compensation (capacitive) is required. In the presented grid and scenarios an installation of 3MVar are proposed to compensate the voltage drop.

4.2 Information and communication infrastructure

The topic of information and communication infrastructure has countless aspects, that need to be considered if feasible system shall be installed and working properly. Starting at the low level of communication, i.e. the physical layer to transport bits and bytes a lot of necessary work is already done, at least for the wide area transport of data. Today there is a data connection available almost everywhere. Technologies like fiber optic and copper cables provide a sufficient bandwidth for devices in the power grid. Devices at home mostly can be connected via the well known DSL to the internet, allowing information flow also for the power grid relevant parameters. More rural, isolated locations can be accessed via 3rd generation mobile phone technology or via power line communication. But things look different, when having a look at the communication between an electric vehicle and the connected charging spot. There is no common standard available today, although work is in progress. Technologies like CAN-BUS, PLC or WiFi are applied in research



projects for realizing a physical layer connection. At least there is a standard for the hardware connector known as the so called “Mennekes-Stecker”. It will be necessary to agree to one way of communication, to allow a car to charge at any charging spot.

Going upwards one level, there are already standards for communication available. In the field of energy automation the standard IEC 61850 can be applied. Integrating wind power plants can be done by using IEC 61400-25, which is structures similar to IEC 61850. One approach for defining data models according to these known standard for the communication with electric vehicles is the ongoing work on the IEC 15118. Cyber security is a very important factor which is covered by IEC 62351 for the power grid but not fully defined for electric cars yet.

Having a look at the control centres, which have to handle all the data, it is obvious that a standard interface must be provided to manage the amount of data. There are several components and participants using the data which all need to understand the “spoken language”. One approach of unifying the interfaces is the Common Information Model (CIM), which is defined in IEC 61970 and IEC 61968. This standard is already released but is still under development. At the moment there are no data classes defined for the field of electric vehicles, so that there is ongoing work in research projects to define classes that for that field and make a proprietary extension of the CIM standard. Future standardization work will need to add the aspects of electric vehicles and the related technology like charging spots and car routing. This standardization will also allow a roaming for electric vehicles and make possible an unproblematic travel for longer distances by electric vehicles.

4.3 Logistic infrastructure

In contrast to the nowadays installed components of a power system electric vehicles are not located at one place all the time, since its purpose is the driving from one point to another. This makes it necessary to include the logistic aspect to the whole system, which could be neglected before. The logistic aspect needs to make sure that every user can drive from his start to his desired destination, without having long delays or other inconvenience. This aspect is not trivial due to the limited range of EV. The first step is to create a location concept for the charging spots taken into account the users’ needs and the network security. Potential locations need to be checked for accessibility and permission to build a charging spot.

Once the charging spots have been erected an intelligent routing system for the user must be available. This system has to consider things like the state of charge of the EV battery, the destination and resting time of the user and requires a mobile data connection to the user and his car. A coordinating system must decide where to send vehicles if the preferred charging spot is already in use. These decisions must be made taking into account the load at the several nodes of the power grid and trying to optimize the energy flow. Since the battery of the electric vehicle ideally can provide positive and negative energy flow this decision on the location can be very attractive to grid operator. Things become more complicated since the user must have the choice which tariff he wants to use. Tariffs like “Green energy”, “Recharge as fast as possible” and “Charge as cheap as possible” are imaginable.

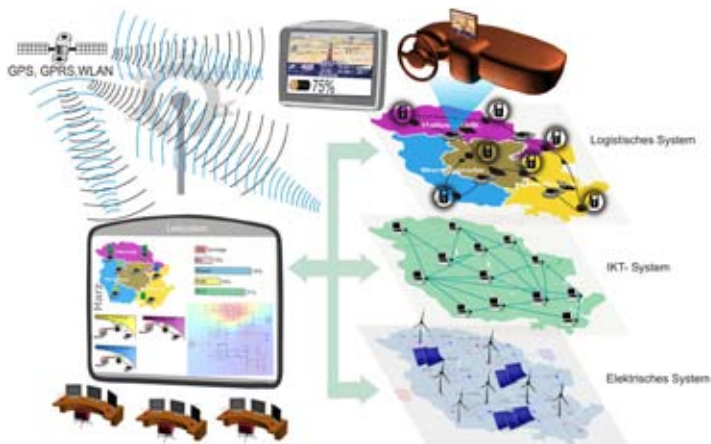


Figure 13: Vision of an E-Mobility system, Harz.EE-Mobility project [26]

5 Conclusions and outlook

The amount of electric vehicles will increase in the coming years. Different studies forecast a market boom starting from 2020. Regarding the typical time period for network planning it is necessary to calculate the impact of EV charging on network security. But this development should not be considered independently from the increasing penetration of RES into the grids. In this contribution the impact of EV and RES on network security was presented. Proper scenarios for low and medium voltage grid were developed and applied.

The simulation results have shown that the low voltage grid is generally capable to integrate a high amount of EV under the condition of single-phased charging with less than 3.7kW. The installed photovoltaic plants have no mutual influence with the EV on the network security due to the time shift between charging and generation. The most critical asset is the transformer which will be operated close to the maximum tolerable value if all EVs charge simultaneously.

The medium voltage grid is only able to integrate a low amount of EV (30%) because of a significant overload of the transformers and lines. In this case a grid enlargement and intelligent charging using ICT to avoid peak power are required. In addition to the asset loading the voltage drops put the security of supply at risk due to increased inductive reactive power of the battery charger. The application of reactive power compensators is necessary. Further a preliminary location planning is essential to consider the needs of the EV drivers as well as the network security.

In the next steps the vehicle to grid concept will be integrated in the grid simulation. Strategies will be developed how EV can be integrated into the grid concurrently with RES (objective 100% green charging). To model the behaviour of EV drivers more realistic the agent based simulation will be applied. The individual behaviour of the agents will modeled based on real test data.



6 References

- [1] EPRI, <http://www.smartgrid.epri.com/Demo.aspx>, accessed 20.08.2010
- [2] BMWI, energy statistics, <http://bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/statistik-und-prognosen.html>, accessed 10.08.2010
- [3] “Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität”, <http://www.elektromobilitaet2008.de/>, accessed March 10th, 2010.
- [4] European Commission Directorate-Generale Joint Research Centre: “Report of the Workshop on electricity storage for transport applications”, 2009
- [5] M. Valentine-Urbschat, W. Bernhart: “Powertrains 2020: The Future Electric Drive”, Roland Berger Strategy Consultants, 2009
- [6] D. Linden et al.: Handbook of Batteries, McGraw-Hill, Third Edition, 2001
- [7] “Elektroautos: Menekes erhält ersten eCarTec Award 2009”, [http://www.menekes.de/web/screen?ID=menekes%2Flive-browse-fresh%2F\[!rnccontent%2C\[content%2Fpres.cnt.page-seqentry%2FmenP5ee6b022%3A124cf88e0b0%3A-3eb%2F0%2F%2Ccontent%2Fexp-deflive%2Fde%2F\]](http://www.menekes.de/web/screen?ID=menekes%2Flive-browse-fresh%2F[!rnccontent%2C[content%2Fpres.cnt.page-seqentry%2FmenP5ee6b022%3A124cf88e0b0%3A-3eb%2F0%2F%2Ccontent%2Fexp-deflive%2Fde%2F]), accessed 10.08.2010
- [8] R. Lange: „Elektroauto: Batteriewechsel statt Tanken“, <http://www.teczilla.de/auto/elektroauto/elektroauto-batteriewechsel-statt-tanken/2723>, accessed 20.08.2010
- [9] IAV, http://www.iav.com/de/index.php?we_objectID=15760, accessed 20.08.2010
- [10] F. J. de Sisternes: “Plug-In Electric Vehicle Introduction in the EU”, Master Thesis at Massachusetts Institute of Technology, 2010
- [11] P. Ridden: “Korean electric vehicle solution”, <http://www.gizmag.com/kaist-olev-electric-vehicle/12557/>, accessed 20.08.2010
- [12] K.W.E. Cheng: “Recent Development on Electric Vehicles”, International Conference on Power Electronics Systems and Applications, 2009
- [13] RWE E-Mobility: “Vehicle-to-grid: Mobile Kraftwerke auf dem Weg”, <http://www.rwemobility.com/web/cms/de/236864/rwemobility/der-markt/vehicle-to-grid/>, accessed 20.08.2010
- [14] NEW Netz “Grobe Abschätzung/Anhaltspunkte des Strom-Jahresenergieverbrauches bei Gewerbebetrieben“ http://www.new-netz-gmbh.de/Media/Jahresstromverbrauch_je_Branche.pdf, accessed 20.04.2010
- [15] W. Kempton: „Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue“, Journal of Power Sources, Elsevier, 2004
- [16] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., “Electrical equipment of electric road vehicles, Electric vehicle conductive charging system” German version IEC 61851-1:2001, Beuth Verlag, Germany, 2001.



- [17] HybridCars: "China Subsidizes Electric Cars, But Small Efficient Gas Cars Too", <http://www.hybridcars.com/incentives-laws/china-subsidizes-electric-cars-and-small-efficient-cars-too-28182.html>, published 1.07.2010, accessed 29.08.2010
- [18] B.G. Kim, F.P. Tredeau, Z.M. Slameh, "Performance Evaluation of Lithium Polymer Batteries for Use in Electric Vehicles", IEEE Vehicle and Propulsion Conference, China, 2008.
- [19] T. Blank, "Elektrizitätswirtschaftliche Einbindung von Elektrostraßenfahrzeugen", FFE, study E.ON Energie AG, 2007.
- [20] C. O. Heyde et al., NETMOD-Reduced Models of Complex Electrical Networks with Dispersed Generation, NETMOD report WP 1.3, 2008
- [21] Network access for standardized load profiles, http://www.wemag.com/downloads/SLP_Verfahrensbeschreibung.pdf, accessed 26.04.2010
- [22] J. S. Sichman et al. (Eds): "Multi-Agent-Based Simulation VI", International Workshop MABS, Utrecht, 2005
- [23] O. Kalab: Standardisierte Lastprofile, http://portal.wko.at/wk/dok_detail_file.wk?AngID=1&DocID=603304&StID=289986, accessed 26.04.2010
- [24] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft: Stromverbrauch im Haushalt : Haushaltgröße beeinflusst Energiebedarf, http://www.bdew.de/bdew.nsf/id/DE_20100225_PM_Haushaltsgroesze_beeinflusst_Energiebedarf?open&WT.mc_id=Pressemeldung-20100225, published 25.02.2010, accessed 26.04.2010
- [25] S. Jundel: "Elektromobilität - Optimierung von Ladevorgängen zur Vermeidung von Netzengpässen", Master thesis with the RWE Netzservice GmbH, 2010
- [26] Press release Harz.EE-Mobility project, https://www.harzee-mobility.de/content/files/090831_Pressemitteilung.pdf, accessed 25.08.2010



Intelligente Netzschnittstellen für Elektrofahrzeuge

Dipl. Inf. Sina Pezeshki, Dipl. Inf. Jan Ringelstein, Dipl. Ing. Johannes Prior,
Dipl. Ing. Stephan Funke, Dr. Ing. David Nestle
Fraunhofer IWES
Königstor 59, 34119 Kassel
Tel.: (0561) 7294-127, Fax: (0561) 7294-200
E-Mail: spezeshki@iset.uni-kassel.de

1 Einleitung

Elektrofahrzeugen (E-Kfz) wird in den nächsten Jahren und Jahrzehnten ein großes Potenzial zugeschrieben, ist es doch mit ihnen möglich, durch die Nutzung der Elektrizität als universellem Sekundärenergieträger sehr flexibel verschiedene Primärenergieträger für Mobilitätszwecke einzusetzen - auch solche, die dezentrale, regenerative oder fluktuierende Quellen nutzen - sowie zu einer höheren Primärenergieeffizienz beizutragen. Das ist allerdings nur machbar, wenn verschiedenste Bausteine - von den Verbrauchern mit deren E-Kfz bis hin zu Lieferanten, Netzbetreibern und Großkraftwerken - geeignet vernetzt und intelligent zusammengesetzt werden. Das Ergebnis dieses Prozesses ist das oft genannte „Smart Grid“, das alle Bausteine im Sinne eines energieeffizienten und sicheren Betriebs verbindet. Nach dem üblichen Verständnis umfasst ein solches nicht nur ein elektrisches Netz, sondern auch ein Kommunikationsnetz. Ersteres zeichnet sich durch seine physikalischen Parameter, wie z.B. Spannungsebenen und Strombelastbarkeit von Leitungen (Hardware) aus, letzteres durch die Art der verwendeten Datenübertragungs- und Endeinrichtungen (Hardware) sowie der verwendeten Protokolle (Software). Die Netzschnittstelle eines E-Kfz umfasst folglich nicht nur eine elektrische, sondern auch eine Kommunikationsschnittstelle, deren technische Umsetzungen entsprechend Hard- und Softwarelösungen.

Unter der Annahme, dass die Nutzung von E-Kfz im wesentlichen der heutigen Nutzung von Kfz entspricht, werden private Fahrzeuge ein Großteil des Tages in der Nähe von Anschlusspunkten im Niederspannungsnetz (NSN) geparkt. Ein typischer NSN-Anschlusspunkt ist eine private Wohneinheit, z.B. ein Haushalt in einem Einfamilienhaus, wie in Abb. 1 dargestellt. Eine solche Wohneinheit verfügt über ein internes elektrisches Netz und ein Kommunikationsnetz. Ersteres ist über den NSN-Anschlusskasten, letzteres i.d.R. über ein so genanntes Gateway mit dem Kommunikationsnetz des Smart Grid verbunden. Für die Kommunikation mit dem Smart Grid sind verschiedenste Lösungen möglich, z.B. Powerline-Kommunikation mit Aufprägung auf das bestehende Stromkabel, Mobilfunk etc. Im folgenden wird angenommen, dass die Kommunikation über das im Internet verbreitete IP-Protokoll erfolgt und speziell auch, dass der Internetanschluss des Kunden mitgenutzt wird. In diesem Fall kann das Gateway im einfachsten Fall z.B. aus einem Internet-Router bestehen, wird aber sinnvollerweise mit einem Embedded-Rechner kombiniert, der für den gesamten bidirektionalen Datenaustausch zwischen Smart Grid und Wohneinheit zuständig ist (z.B. Zählwerte für

el. Verbrauch, Informationen des Energieversorgers, variable Tarife) sowie die Schnittstelle zum Benutzer herstellt. Letzteres gilt im Rahmen dieses Beitrags als Annahme. Als Schnittstelle zwischen E-Kfz und den hausinternen Netzen bündelt die „Ladesäule“ elektrische und kommunikative Verbindungen.

Dieser Beitrag befasst sich ausschließlich mit den Komponenten Ladesäule, Gateway und der Bedienschnittstelle. Für die Ladesäule, die im Wesentlichen eine Hardwareschnittstelle darstellt, werden aktuell bekannte Anforderungen zusammengefasst und verschiedene Ausprägungen sowie verfügbare technische Lösungen zur Umsetzung vorgestellt. Beim Gateway und der Bedienschnittstelle werden Anforderungen mit Schwerpunkt auf der Softwareschnittstelle definiert. Mit dem OGEMA Framework wird eine technische Lösung zur Umsetzung vorgestellt, die sich aktuell am IWES in der Entwicklung befindet.

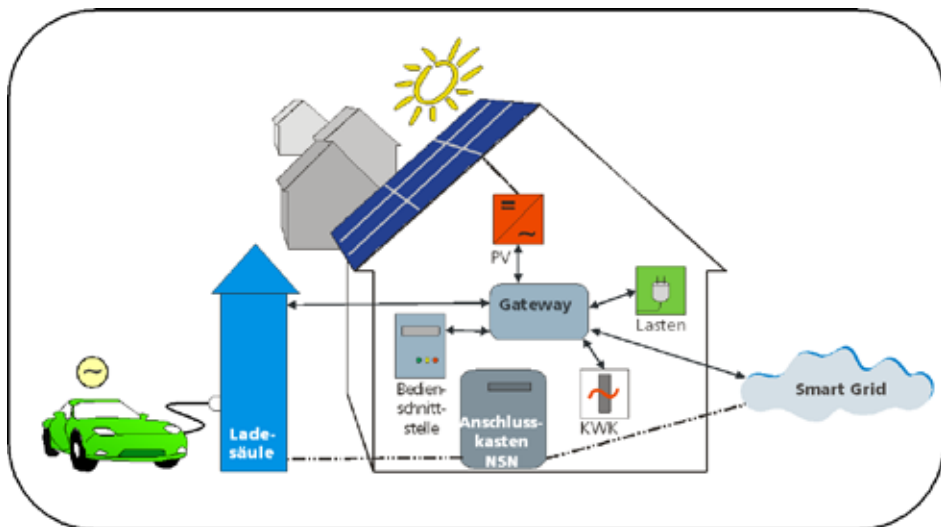


Abbildung 1: Integration von E-Kfz ins Niederspannungsnetz (NSN)

2 Ladesäule als Hardwareschnittstelle zwischen E-KFZ und intelligentem Niederspannungsnetz

Für den Betrieb von E-Kfz ist ein barrierefreier, d.h. standardisierter und allorts einheitlicher Zugang zum Niederspannungsnetz die Grundvoraussetzung für die flächendeckende Markteinführung. Dies ist dadurch bedingt, dass bei Einsatz bekannter Speichertechnologie die Energiespeicherkapazität in E-Kfz unter realistischen Bedingungen nur eine Reichweite von 100-200 km [1] ermöglicht und somit häufiges Nachladen erforderlich macht. Der Zugang zum Netz sollte an möglichst vielen Fahrzeug-Abstellplätzen zur Verfügung stehen. Um dies zu gewährleisten, sind zumindest europaweit gültige oder besser noch internationale Normen erforderlich. Die generellen Anforderungen an konduktive Ladesysteme für E-Kfz finden sich in der aktuell im Normungsprozess befindlichen



IEC 61851-1¹. Weiterführend wird im ISO/IEC/CD 15118-1 die Kommunikation zwischen E-Kfz und Ladestelle spezifiziert.

2.1 Aufbau und Funktion von Ladestellen

Der Aufbau einer alleinstehenden E-Kfz Ladestelle, die alle Funktionalitäten hinsichtlich Sicherheit, Kommunikation und Messung in sich vereint und im öffentlichen Bereich eingesetzt werden kann, ist in Abb. 2 dargestellt.



Abbildung 2 : Schematische Darstellung einer Ladestelle mit allen funktionalen Komponenten

Im Wesentlichen können die Funktionalitäten der Ladestelle in drei Kategorien eingeteilt werden:

Sicherheit

Die wesentlichen Sicherheitsfunktionen sind:

- Kontinuierliche Überprüfung der Schutzleiterkontaktierung (Komp. 10)
- Leitungsschutz (Komp. 4)

¹ Alle folgend beschriebenen Komponenten und Funktionalitäten beziehen sich auf die IEC 61851-1.



- Fehlerstromschutz (Schutz bei Berührung von anliegenden Spannungen im Fehlerfall, Komp. 5)
- Vermeidung von Batteriegasung in geschlossenen Räumen ohne Belüftung (Komp. 10)
- Stromloses Ein- und Ausstecken des Ladekabels (Komp. 6, 8 und 10)

Messung

Für die Messung (Komp.2) sind noch verschiedene Punkte in der Normung sowie auch bei den eichrechtlichen Bestimmungen der PTB² zu klären. Angestrebt wird eine Lösung auf Basis neuer Smart Grid Technologie, die eine zeitbezogene Abrechnung der über die Ladestelle bezogenen Energie ermöglicht. Wenn die Ladestelle von verschiedenen Stromkunden benutzt wird, gehen die Anforderungen an das Messsystem in einer Ladestelle über die Anforderungen, die bei einer Hausinstallation bestehen, hinaus. Dies ist durch die Annahme bedingt, dass die Ladestelle von verschiedenen Energiekunden benutzt wird. Dadurch ist es erforderlich, an öffentlichen Ladestellen dem Zähler eine Kennung des Kunden zu übergeben, um eine eindeutige Zuordnung von bezogener Energiemenge und Kunde eichrechtlich sicher durchführen zu können.

Die wesentlichen Messfunktionen sind:

- zeitgenaue Erfassung der übertragenen Leistung (Komp. 2)
- Übermittlung/Empfang einer Kunden-ID (Komp. 12 oder 7 und 11)
- Übermittlung/Empfang und Speicherung des Abrechnungstelegramms mit Zeitstempel, Energiemenge, Zähler- und Kunden-ID (Komp. 2, 9 und 11)
- Anzeigen der bezogenen Energie für den Kunden (Komp. 12)

Kommunikation

Entsprechend der IEC 61851-1 ermöglichen verschiedene mögliche Lademodi unterschiedlich aufwändige Abläufe der Kommunikation. Im Wesentlichen kann man zwischen Kommunikation mit und ohne Internet Protocol (IP) unterscheiden, wobei beiden Modi die sogenannte Low-Level-Kommunikation zugrunde liegt. Unter dem Begriff Low-Level-Kommunikation fallen die folgenden Funktionalitäten:

- Erkennung der Widerstandskodierung des Ladekabels und der Batterieeigenschaften³
- Erkennung der ordnungsgemäßen Verriegelung des Steckers in der Buchse
- Kommunikation der zur Verfügung stehenden Ladeleistung per PWM-Signal bzw. Übermittlung des Initiierungssignals für die IP-Kommunikation

Die IP-gebundene Kommunikation zwischen Fahrzeug und einer übergeordneten Instanz via Ladestelle wird derzeit von ISO/IEC/CD 15118 spezifiziert.

Wie in Abb. 3 zu sehen, kann für die Einbindung des E-Kfz in ein hauseigenes Energiemanagement der technische Aufwand einer Ladestelle reduziert werden, wenn man die Nutzung durch

2 Physikalisch-Technische Bundesanstalt

3 bezüglich der Notwendigkeit einer Lüftung des Parkplatzes



einen einzigen Anschlussnehmer annimmt. Eine solche Ladestelle wird im Folgenden als „Wallbox“ bezeichnet und verzichtet insbesondere auf die IP-Kommunikation und die leistungsfähige Steuerungseinheit. Die Kommunikation zwischen E-Kfz und das in Kap. 1 erwähnte Gateway wird auf die Low-Level-Kommunikation nach 61851-1 beschränkt, wodurch nur noch die sicherheitsrelevanten Funktionen und die Vorgabe der Ladeleistung durch die Basissteuerung realisiert werden. Die Übergabe der E-Kfz-Daten, mit Relevanz für die Einbindung des E-Kfz-Speichers in das hauseigene Energiemanagement, erfolgt direkt an der Nutzerschnittstelle durch den Nutzer. Letzteres kann durch das Gateway z.B. mittels einer Internetplattform zur Verfügung gestellt werden. Für dieses Energiemanagement wird im Folgenden ein so genanntes Bidirektionales Energiemanagementinterface (BEMI) angenommen, das mittels externer Vorgaben (z.B. einem variablen Strompreis) basierend auf Nutzervorgaben eine lokale Optimierung des Betriebs von elektrischen Verbrauchern und Erzeugern vornimmt (s. Kapitel 4).

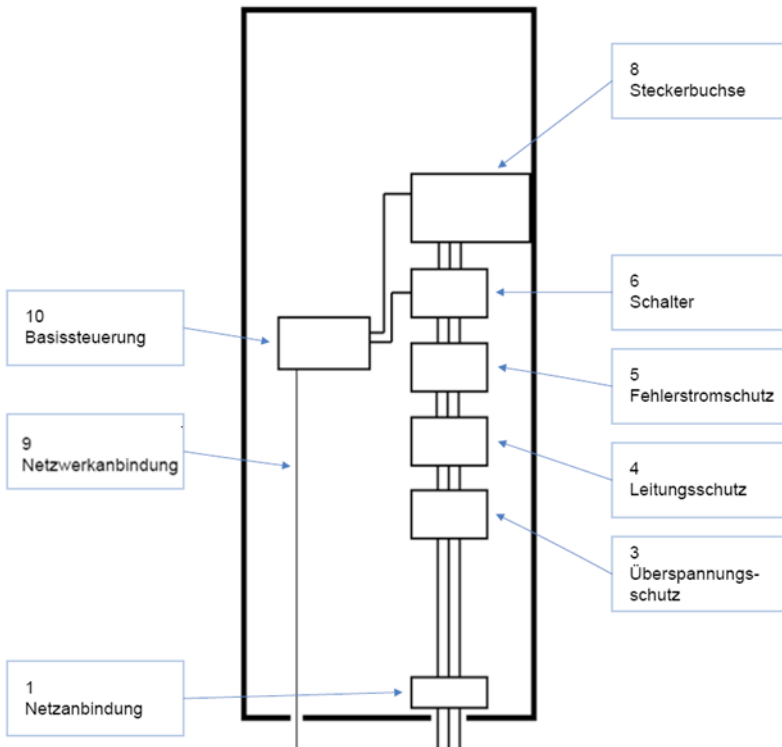


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer Wallbox mit reduzierter Anzahl funktionaler Komponenten

Da an der heimischen Wallbox keine separate Abrechnung der geladenen Energiemenge nötig ist, kann auch auf einen Energiezähler verzichtet werden. Lediglich die Möglichkeit der Vorgabe des Leistungsbezugs durch das Gateway sowie die geforderten Sicherheitsfunktionen werden von der

Wallbox bereitgestellt. Dies entspricht den Vorgaben der IEC 61851-1 gemachten Vorgaben für das Mode 2 Laden.

2.2 Umsetzung der Wallbox

Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, ist eine Ladestelle aus verschiedenen, meist aus dem Bereich der Hausinstallation bekannten Komponenten aufgebaut. An dieser Stelle soll eine kurze Übersicht der Komponenten gegeben werden.

1. Der Netzanschluss erfolgt an einem 3-phasigen TN-C-S oder TN-S Netz mit 400 V und max. 63 A; Bemessungsstrom. Der Anschluss kann direkt an einem Verteiler aufgelegt werden oder an einer vorhandenen CEE-Steckdose angeschlossen werden.

2. Ein Smart Meter ist in der heimischen Wallbox nicht nötig, da die Energiezählung am Hausanschlusspunkt erfolgt.

3. Der Überspannungsschutz schützt die an der Wallbox angeschlossenen Komponenten (im speziellen die Elektronik des Batterieladegeräts) vor unzulässig hohen Spannungen, wie sie z.B. durch einen Blitzschlag in das Netz eingeleitet werden können.

4. Durch den Leitungsschutz werden die Komponenten der Wallbox und des Fahrzeugs, die auf die festgelegte Anschlussleistung ausgelegt sind, vor einer zu hohen Strombelastung geschützt. Dies kann durch einen Sicherungsautomat (auch bekannt als MCB für englisch *Miniature Circuit Breaker*) oder Schmelzsicherungen geschehen.

5. Ein Fehlerstromschutzschalter (auch als Residual Current Device RCD bezeichnet) schützt gegen das Bestehenbleiben eines unzulässig hohen Berührungstroms. Er soll gefährliche Stromunfälle vermeiden, insbesondere den Erdschluss über den menschlichen Körper. Der Fehlerstromschutzschalter trennt bei Überschreiten eines bestimmten Differenzstroms, in Hausanlagen meist 30 mA, den überwachten Stromkreis. Fehlerstromschutzschalter sollen den Nutzer im Falle des Versagens anderer Schutzmassnahmen wie der Erdungsüberwachung und bei unsachgemäßer Handhabung, die zur Berührung spannungsführender Teile führt, schützen.

6. Der Lasttrennschalter hat die Funktion, die CEE-Plus-Dose zum Anschluss des E-Kfz erst dann unter Spannung zu setzen, wenn eine ordnungsgemäße Verbindung zwischen Fahrzeug und Ladestelle/Wallbox vorliegt. Dazu ist der Lasttrennschalter mit der Basissteuerung verbunden, die nach dem Erkennen einer korrekten Verbindung zum Fahrzeug das Signal zum Zuschalten an den Lasttrennschalter gibt.

7. Ein Powerline-Koppler ist in der heimischen Wallbox nur dann nötig, wenn eine IP-Kommunikation zwischen Fahrzeug und Wallbox aufgebaut werden soll. Mit dem Powerline-Koppler wird in diesem Fall über eine Phase des Drehstromsystems ein Kommunikationskanal aufgebaut, indem eine Trägerfrequenz auf die 50Hz des Drehstromsystems aufmoduliert wird.

8. Die CEE-Plus-Steckerbuchse verfügt neben den fünf Polen des Drehstromsystems noch über zwei weitere Kontakte (Pilotleiter und Proximity), mit denen die Erdungsüberwachung, die Widerstandscodierung des Kabels sowie die Übertragung des PWM-Signals für die Signalisierung der an der Wallbox verfügbaren Leistung an das E-Kfz realisiert wird.



9. Die Netzwerkanbindung kann auf verschiedenen Wegen erfolgen. Es kann z.B. ein gewöhnlicher LAN-Anschluss verwendet werden.

10. Das Basismodul für die Steuerung der Sicherheitsfunktionen des CEE-Plus-Steckers und der Low-Level-Kommunikation prüft durch Messung an Pilotleiter und Proximity die Belastbarkeit des Kabels sowie die Lüftungsanforderungen der Batterie, die beide durch Widerstandskodierung an der CEE-Plus-Buchse vom Fahrzeug angezeigt werden. Außerdem wird auf diese Weise die Bereitschaft des Fahrzeugs zum Laden, die durch Schalterstellung angezeigt wird, ermittelt. Entsprechend der Auswertung dieser Messungen signalisiert die Basissteuerung den Status des Fahrzeugs und der Ladeeinrichtung. Die möglichen Zustände sind:

- A Fahrzeug ist nicht angeschlossen
- B Fahrzeug ist angeschlossen / nicht bereit zur Energieaufnahme
- C Fahrzeug ist angeschlossen / bereit zur Energieaufnahme / Lüftung des Ladebereichs in Gebäuden ist nicht erforderlich
- D Fahrzeug ist angeschlossen / bereit zur Energieaufnahme / Lüftung des Ladebereichs in Gebäuden ist erforderlich
- E Stromversorgung abgetrennt, Elektrizität ist nicht verfügbar oder anderes Stromversorgungsproblem
- F Stromversorgung ist nicht verfügbar oder anderes Stromversorgungsproblem

3 Gateway als Kommunikationsschnittstelle zwischen E-KFZ und intelligentem Niederspannungsnetz

3.1 E-KFZ, intelligentes Gebäude und intelligentes Netz

Da elektrischer Strom als Sekundärenergieträger weitaus universellere Verwendung findet als fossile Brennstoffe, ist die Einbettung von E-Kfz in ein ganzheitliches Energiekonzept von großer Bedeutung, um deren Vorteile voll auszunutzen. Zu diesem Energiekonzept zählen die E-Kfz als dezentrale elektrische Speicher als auch regenerative und dezentrale Stromerzeugungsanlagen, elektrische Lasten und weitere Speicheranlagen. Viele dieser Anlagen sind innerhalb von Gebäuden installiert, die an das Niederspannungsnetz angeschlossen sind. Aus diesem Grund befassen sich mehrere Forschungsprojekte aktuell mit der Fragestellung, wie E-Kfz, die am Hausanschlusspunkt geladen werden, als aktive Komponente in ein Energiekonzept eingebunden werden können, das auch ein Gebäudeenergiemanagement umfasst [2][3].

Nutzungsmöglichkeiten ergeben sich insbesondere, wenn weitere Komponenten eines intelligenten Netzes, dezentrale gebäudeinstallierte Erzeuger, gesteuerte elektrische Lasten oder Einheiten, die elektrische und thermische Energieversorgung betreffen, wie Wärmepumpen oder KWK-Anlagen, vorhanden sind. Das in Abb. 1 dargestellte Gateway kann dann zur Betriebsoptimierung dieser Anlagen im Rahmen eines Gebäude-Energiemanagementsystems genutzt werden, das verschiedenen Zwecken dienen kann:



- Lokal: z.B. Maximierung der Eigennutzung von Strom aus PV-Anlagen, Maximale Versorgungssicherheit kritischer Verbraucher, Maximale energetische Autarkie von Gebäuden [4]
- Regional: z.B. optimale Nutzung regenerativer Kleinkraftwerke im Verbund eines virtuellen Kraftwerks, Maximierung der Autarkie einer Siedlung [3]
- Marktbezogen: Bereitstellung von Regelleistung, Maximale Ausnutzung bzw. Speicherung von Strom aus küstennahen bzw. off-shore Windkraftanlagen [1]
- Netzbezogen: Bereitstellung von Verteilnetzdienstleistungen, z.B. Glättung von Spannungsspitzen durch Wolkenzug über PV-Anlagen mittels verteilter Speicher [5]

Da elektrische Speicher in den heutigen Verteilnetzen nicht in nennenswertem Ausmaß installiert sind, bieten E-Kfz in Kombination mit den oben genannten Einrichtungen potenziell den höchsten Freiheitsgrad zur Erreichung der genannten Ziele, wenn diese mit bidirektionalen Wechselrichtern ausgestattet werden. Laut VDE [6] ist für den geplanten Ausbau der erneuerbaren Energien bis 2020 einerseits die Bereitstellung ausreichender elektrischer Speicherkapazitäten notwendig, um eine zeitweise Abregelung der erneuerbaren Stromerzeuger zu vermeiden. Andererseits ist es wegen hoher Kosten für stationäre Speicher vorteilhaft, dazu Anwendungen zu nutzen, die ohnehin Speicher benötigen - wie z.B. E-Kfz. Ferner ist nach Abschätzung des VDE [1] die Integration von 1 Mio. E-Kfz, die am Wohnort und am Arbeitsplatz an einphasigen Niederspannungsnetzanschlüssen geladen werden, bezüglich der Netzbelastung - von lokalen Konzentrationen abgesehen - noch unkritisch. Weiterhin wird der Einsatz von E-Kfz zur Bereitstellung von Regelleistung unter der Annahme heutiger Marktstrukturen als nicht wirtschaftlich eingeschätzt. Andererseits wird ein Lastmanagement zur nächtlichen Speicherung von Windenergie als Anwendung genannt, wobei eine Koordination zwischen Netz und Lasten zur Vermeidung von Überlastungen von Netzbetriebsmitteln einzuführen wäre. Ferner wird die Integration von über 1 Mio E-Kfz zur Erbringung von Netzdienstleistungen in Smart Grids als Forschungsziel identifiziert.

Die Integration der verschiedenen Technologien mittels eines Gebäudeenergiemanagements muss ein breites Spektrum von Anforderungen erfüllen. Als Grundlage dafür ist eine allgemeine Plattform ideal, die die Umsetzung von verschiedenen Anwendungen im Bereich elektrischer und thermischer Energieversorgung, Gebäudeautomation und Elektromobilität umfasst. Eine Ausweitung auf das gesamte Ressourcenmanagement des Gebäudes (z.B. Wasserversorgung) wäre denkbar. Eine massentaugliche Umsetzung erfordert einerseits die Bündelung der Kommunikation zwischen den verschiedenen Komponenten, z.B. PV-Wechselrichtern, E-Kfz, Wärmepumpe und steuerbaren Lasten, eine gebäudezentrale Regelung, z.B. in Form eines Rechners, der wiederum mittels modularer Softwarekomponenten die Integration von Anlagen verschiedener Hersteller erlaubt und andererseits eine Plattform für verschiedene Anwendungen zur Verfügung stellt, um eines oder mehrere der o.g. Optimierungsziele zu erfüllen. Da die Gebäudenutzer maßgeblich die Anwendungen bestimmen, müssen außerdem geeignete Nutzerschnittstellen zur Verfügung gestellt werden. Dabei ist zu beachten, dass verschiedene Nutzer stark unterschiedliche Anforderungen daran stellen. Daher sollte die Rechnerplattform auch hier mittels modularer Soft- und Hardware die Bereitstellung verschiedenartiger technischer Lösungen unterstützen, die von einfachen Eingabegeräten wie Schaltern oder Drehgriffen bis hin zu Internetportalen, Displays oder Handy-Applikationen reichen. Von besonderer Bedeutung ist hier eine weit reichende Herstellerunabhängigkeit.



Dabei ist allerdings angesichts der Komplexität des intelligenten Netzes als Gesamtsystem einerseits und den vielfältigen technischen Möglichkeiten andererseits darauf zu achten, dass ein günstiges Verhältnis zwischen technischem und finanziellen Aufwand und Nutzen gewährleistet bleibt. Dies erfordert eine kritische Betrachtung möglicher technischer Lösungen. So muss z.B. die eingesetzte Rechnerhardware höchsten Energieeffizienzstandards genügen, um den Nutzen nicht zu kompromittieren.

3.2 OGEMA als offener Standard für das Gateway

Eine Softwareplattform, die diese Anforderungen erfüllt, entwickelt das Fraunhofer IWES im Rahmen des E-Energy Projekts Modellstadt Mannheim (moma) und des europäischen Projekts Smart House / Smart Grid. Im Jahr 2009 hat IWES erstmals die Open Gateway Energy Management Alliance (OGEMA) vorgestellt [7], die als offene Plattform für die Entwicklung eines entsprechenden Standards dienen soll. Die wichtigsten Konzepte bei der Entwicklung des OGEMA-Gateways sind:

- Bereitstellung einer zentralen Laufzeitumgebung für Anwendungen im Bereich Energiemanagement und Energieeffizienz bei Kunden im Niederspannungsnetz
- Zugriff auf Geräte, z.B. Vorschaltgeräte und andere Hardware-Funktionalitäten über standardisierte Datenmodelle/Gerätedienste
- automatische Registrierung neuer Geräte („Plug&Play“), z.B. Elektroauto oder PV-Wechselrichter und Anbindung an geeignete Anwendungen, um Lasten und Erzeuger dezentral automatisch zu steuern
- Definition standardisierter Dienste des Frameworks für Funktionalitäten, die in typischen Anwendungen benötigt werden (z.B. Logging, persistente Datenspeicherung)
- Offene Schnittstellen für Anwendungen und Gerätetreiber, um eine breite Anwendung und Entwicklung der Technologie zu fördern
- Realisierung einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI) der Bedienschnittstelle, so dass der Nutzer über ein beliebiges Gerät auf das Gateway zugreifen kann (Web-Interface)

3.3. Architektur und Referenzimplementierung

Die Realisierung der Laufzeitumgebung erfolgt mittels Java. Das darauf aufbauende Framework OSGi stellt die Funktionalität zur Verfügung, verschiedene Anwendungen („Bundles“) parallel in einer Laufzeitumgebung auszuführen. Die Installation und Deinstallation einer Anwendung ist dabei im laufenden Betrieb und ohne Neustart des Frameworks möglich. Die Architektur ist in vier Bereiche unterteilt (siehe Abb. 4):

- OGEMA-Services: Dazu gehören zentrale Dienste wie die Ressourcenverwaltung, die Benutzerverwaltung, das Webinterface etc.
- Applications: Ist die Applikationsschicht für die Entwickler Anwendungen schreiben können, ähnlich wie Apps für Smartphones.
- Resources: Hier werden die Datenmodelle der Geräte (z.B. Kühlschrank, Waschmaschine, Trockner etc.) definiert, die vom Gateway-Rechner angesprochen werden.



- Communication drivers: Geräteanbindungs-Schicht. Verschiedene Kommunikations-treiber können hier entwickelt und eingesetzt werden (z.B. ZigBee, Z-Wave, EEBus, KNX, aber auch beliebige herstellereinspezifische Protokolle, die für bestimmte Anwendungen optimiert sind).

OGEMA Framework

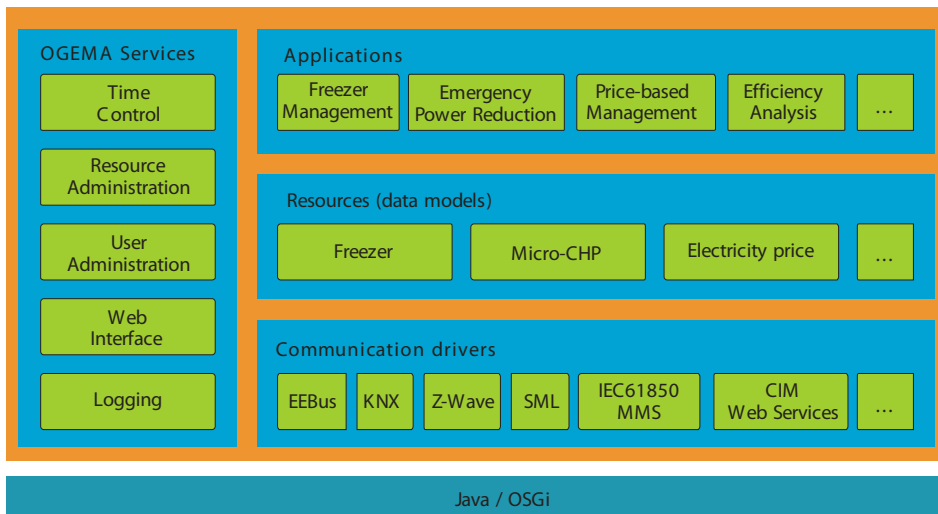


Abbildung 4: OGEMA-Architekturbild

Den Entwicklern der Treibersoftware zur Anbindung an die Geräte und Energiesysteme im Gebäude sowie an die Leitstellen der Energieversorger stehen ebenfalls offene Schnittstellen zur Verfügung. Wie ein Betriebssystem auf einem PC verbindet das Gateway Anwendungen und Hardware. Dadurch können die Anwendungen unabhängig von den Kommunikationstreibern entwickelt werden; beide knüpfen an Datenmodelle an die in OGEMA definiert sind. Diese Datenmodelle dienen als Hardware-Abstraktionsschicht, die von den Applikationen und den Kommunikationstreibern angesprochen werden.

Die OGEMA Referenzimplementierung wird Anfang 2011 als Open Source Projekt veröffentlicht. Ein Feldtest mit bis zu 1500 Teilnehmern findet 2010/2011 in Mannheim statt, in dem das OGEMA Gateway (Energiebutler) in einem größeren Umfang zum Einsatz kommt. Der Einsatz von OGEMA für E-Kfz wird am IWES u.a. für das laufende Projekt „Stromparkplätze“, das vom Bundeswirtschaftsministerium (BMWi) gefördert wird, vorbereitet.



4 Verwendung der Schnittstellen durch Anwendungen und Nutzer

4.1 Energiemanagement mit E-KFZ und BEMI

Beim BEMI handelt es sich um ein Energiemanagementsystem für elektrische Lasten und dezentrale Erzeuger in Gebäuden mit Anschlusspunkt im Niederspannungsnetz. Das BEMI bündelt vier Kernfunktionen:

1. automatisches Energiemanagement aufgrund variabler Tarife für Verbrauch und Erzeugung
2. Kundeninformation und -Interaktion
3. Fernauslesbare hochauflösende Last- und Erzeugungsgangzählung sowie
4. Überwachung physikalischer Kenngrößen am Netzanschlusspunkt

Das Konzept des BEMI wird auch als „Konzept der dezentralen Entscheidung“ bezeichnet, da der Betrieb von elektrischen Anlagen aufgrund vorliegender Informationen über diese Anlagen, Nutzervorgaben und variablen Tarifen dezentral getroffen wird. Das Konzept wurde vom IWES praktisch umgesetzt und in Labor und Feld demonstriert [8].

Für die Massenanwendung und den Einsatz in kommenden Feldtests in den Projekten Modellstadt Mannheim, Smart House/Smart Grids sowie RegModHarz wird das BEMI derzeit als OGEMA-Anwendung umgesetzt. Die Eigenschaften der OGEMA-Referenzimplementierung erlauben dabei eine weitreichende Trennung der BEMI-Kernfunktionen sowie der verwendeten Medien für die Kommunikation innerhalb und außerhalb des Gebäudes.

Außerdem erlaubt die modulare Gestaltung des OGEMA-Frameworks die effiziente Integration eines Kommunikationssystems und einer Anwendung für das Energiemanagement eines E-Kfz. Notwendig hierfür sind folgende Module:

- Ein fahrzeugspezifisches Communication System
- Eine Anwendung mit Algorithmen für das Lademanagement, die ähnlich der BEMI-Anwendung das netzseitige Management, z.B. aufgrund variabler Netzentgelte unterstützt
- Ggf. neue Datenmodelle für E-Kfz und netzseitiges Management

Die ersten beiden Module können entweder von den Fahrzeugherstellern selbst oder von unabhängigen Herstellern geliefert werden, sofern das jeweilige Fahrzeug einen bekannten Kommunikationsstandard benutzt.

4.2 Nutzereingaben zur Einbindung des E-Kfz-Speichers in die Optimierung

Da fast 98 % aller am Tag mobilen Fahrzeuge nach der letzten Fahrt am Tag eine Standzeit von mindestens acht Stunden aufweisen, ergeben sich ein entsprechend großes Zeitfenster, in denen der Ladevorgang stattfinden kann [1]. Hinzu kommen die Standzeiten während der einzelnen Fahrten am Tag, die zwar deutlich kürzer ausfallen, die aber trotzdem für Ladevorgänge genutzt werden können, wenn eine Lademöglichkeit vorhanden ist. Die Einbindung von E-Kfz in ein Lastmanagement-Konzept ist daher sehr gut möglich.



Ist ein E-Kfz nur zum Laden mit dem Netz verbunden, so spricht man vom Grid-to-Vehicle Konzept (G2V). Steht das E-Kfz zusätzlich auch für Rückspeisungen bereit, so spricht man vom Vehicle-to-Grid Konzept (V2G). Damit das G2V- bzw. das V2G-Konzept die erforderliche Akzeptanz des Fahrzeugnutzers finden, ist eine Nutzerschnittstelle erforderlich, die die Mobilitätswünsche des Fahrzeugnutzers abbildet, damit diese auf jeden Fall durch das Energiemanagement berücksichtigt werden können. Dieses hat - sofern technisch möglich - unter Berücksichtigung der Angaben des Nutzers dafür zu sorgen, dass der Nutzer seine Mobilitätswünsche auch umsetzen kann.

Die Eingaben, die der Nutzer für das Energiemanagement vornimmt, bestimmen jeweils die Zeitfenster, in denen Lade- und ggf. Rückspeisevorgänge möglich sind. Die Optimierung der Lade- und Rückspeisevorgänge im jeweiligen Zeitfenster nimmt das Energiemanagement in Abhängigkeit fahrzeugspezifischer Parameter vor (Ladezustand, spezifischer Verbrauch, elektrische Anschlusswerte usw.). Die vom Nutzer benötigten Angaben sind unabhängig davon, ob die Optimierung durch ein zentrales oder dezentrales Energiemanagement erfolgt.

Um ausgehend von den Mobilitätswünschen des Nutzers den Energiebedarf während der Ladephase bzw. das Potenzial für Energielieferung bei Rückspeisungen zu berechnen, muss der Energiebedarf für die einzelnen Fahrten bekannt sein. Dieser lässt sich jedoch nur näherungsweise abschätzen, da beim E-Kfz eine noch deutlich stärkere Abhängigkeit des Energiebedarfs vom tatsächlichen Nutzungsverhalten besteht als beim Kfz mit Verbrennungsmotor [9]. Für das E-Kfz teilt sich der Gesamtenergiebedarf auf in den Antriebsenergiebedarf und den Bedarf der Nebenaggregate. Zur Berechnung des Gesamtenergiebedarfs müssen daher beide Werte abgeschätzt werden.

Der Antriebsenergiebedarf ist sehr stark vom Streckenprofil abhängig und kann nur bei genauer Kenntnis der Strecke (Straßentypen und Höhenprofil) abgeschätzt werden. Wenn solche Informationen zur Strecke nicht vorliegen, kann eine grobe Abschätzung des Antriebsenergiebedarfs über die Kenntnis der Fahrtstrecke und der voraussichtlichen Fahrzeit oder über historische Daten - falls verfügbar - erfolgen.

Die in den E-Kfz verbauten Nebenaggregate teilen sich auf in Dauerverbraucher, Langzeitverbraucher, Kurzzeitverbraucher und sporadische Verbraucher. Soll ihr Energiebedarf für eine Fahrtstrecke abgeschätzt werden, so ist dafür besonders die Fahrdauer von Bedeutung. Anders als beim Antrieb des E-Kfz, wo der Energiebedarf typischerweise in kWh/km angegeben wird, lässt sich der typische Energiebedarf der Nebenverbraucher am besten in kWh/h beschreiben.

Dabei ist zu berücksichtigen, welche Nebenaggregate genutzt werden. Je nach Tageszeit wird mit oder ohne eingeschaltetes Licht gefahren. Je nach Außentemperatur kann es erforderlich sein, dass E-Kfz zu heizen oder zu kühlen. Muss das E-Kfz beheizt werden, so sind neben der eigentlichen Innenraumheizung oft auch die Sitz- und die Heckscheibenheizung im Einsatz. Der Energiebedarf für das Aufheizen oder Herunterkühlen des E-Kfz ist sehr hoch und muss auf jeden Fall berücksichtigt werden.

Am Fraunhofer IWES wurde der Gesamtenergiebedarf für typische Fahrten bei unterschiedlichen Helligkeitsverhältnissen und unterschiedlichen Außentemperaturen abgeschätzt. Als Grundlage dazu diente eine Tabelle mit den minimalen, maximalen und typischen Leistungen üblicher Nebenaggregate. Dabei zeigte sich, dass der Energiebedarf der Nebenaggregate bei nächtlicher Fahrt, kurzer Fahrtstrecke, hoher Fahrzeit und geringer Außentemperatur (z.B. Stadtverkehr mit Stop



and Go morgens im Winter) den Antriebsenergiebedarf deutlich übersteigt. Wird die gleiche Strecke mittags im Hochsommer gefahren, ist durch die notwendige Kühlung des Innenraums ebenfalls ein hoher Nebenaggregate-Energiebedarf vorhanden, der allerdings niedriger ist als im angenommenen Beispiel im Winter. Bei Fahrten in der Übergangszeit, bei denen weder die Heizung noch die Klimaanlage benötigt wird und die außerdem eine hohe Durchschnittsgeschwindigkeit aufweisen, dominiert deutlich der Antriebsenergiebedarf. Tabelle 1 zeigt einige der berechneten Beispiele für eine jeweils einstündige Fahrt.

Tabelle 1: Beispiele für den Energiebedarf zu unterschiedlichen Jahreszeiten

	Fahrt im April (ohne Licht, ohne Heizung, ohne Klimatisierung)	Fahrt im August (ohne Licht, mit Klimatisierung)	Fahrt im Dezember (mit Licht, mit Heizung)
Energiebedarf Nebenaggregate	0,66 kWh	2,66 kWh	3,86 kWh
Antriebsenergiebedarf (50 km Fahrt mit durchschnittlich 50 km/h)	7,5 kWh	7,5 kWh	7,5 kWh
Gesamtenergiebedarf	8,16 kWh	10,16 kWh	11,36 kWh

Es ist zu beachten, dass bei kürzeren Fahrten die Durchschnittsgeschwindigkeiten häufig niedriger liegen und der Energiebedarf der Nebenaggregate typischerweise überproportional steigt, da leistungsstarke Nebenaggregate wie Heizung und Klimaanlage zu Beginn der Fahrten üblicherweise mit voller Leistung betrieben werden.

Um an die vom Nutzer benötigten Informationen für die Gesamtenergiebedarfsabschätzung zu kommen, wurde am Fraunhofer IWES ein aus fünf Masken bestehendes Konzept für eine Nutzerschnittstelle entwickelt, siehe Abb. 5.

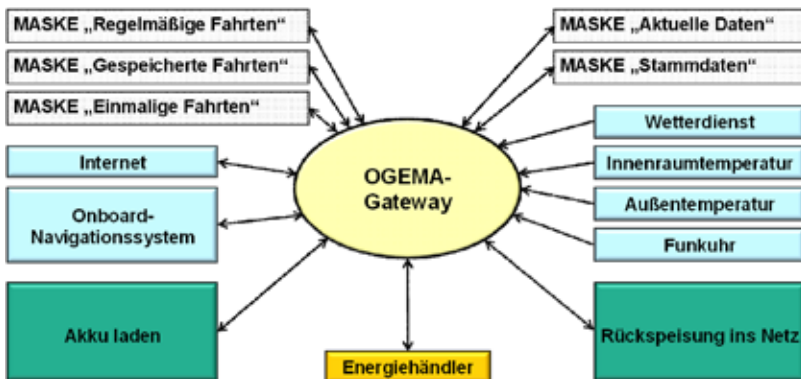


Abbildung 5: Konzept für eine E-Kfz-Nutzerschnittstelle (Quelle: Aufbauend auf [10])



Die Maske „Aktuelle Daten“ dient lediglich zur Information für den Nutzer. Hier wird z.B. der aktuelle Ladezustand, die Aktivität (z.B. Laden oder Rückspeisen), die geplanten Strecken und der dafür abgeschätzte Gesamtenergiebedarf sowie die freie Regelenergiemenge angezeigt.

In der Maske „Regelmäßige Fahrten“ können regelmäßige Fahrten wie z.B. die zum Arbeitsplatz oder zum wöchentlichen Vereinstreffen eingetragen werden. Die Maske ist mehrfach vorhanden und kann jeweils für die einzelnen Fahrten ausgefüllt werden. Die Maske berücksichtigt alle Wochentage. Somit muss für die Fahrt zur Arbeit nur eine Maske ausgefüllt werden. Die Masken müssen aktiviert werden, um in die Planung miteinbezogen zu werden. Dadurch ist es z.B. für Berufstätige, die im Dreischichtbetrieb arbeiten, möglich, jeweils einmalig eine Maske für die Früh-, die Spät- und die Nachtschicht anzulegen und diese nur nach Bedarf zu aktivieren bzw. zu deaktivieren.

Fahrten, die zwar wiederkehrend sind, die aber keinen festen Rhythmus haben (z.B. die Fahrt zum Baumarkt) können in der Maske „Gespeicherte Fahrten“ eingetragen werden. Zur Aktivierung der gespeicherten Fahrt müssen Uhrzeit und Datum der geplanten Fahrt eingegeben werden. Die gespeicherte Fahrt wird dann automatisch nach Ablauf der Fahrt deaktiviert.

Fahrten, bei denen nicht abzusehen ist, dass sie sich wiederholen, werden in der Maske „Einmalige Fahrten“ eingegeben. Die Masken löschen sich nach Ablauf der Fahrt automatisch.

Eingaben in der Maske „Stammdaten“ sind in der Regel bei der Erstinbetriebnahme sowie beim Wechsel des Energiehändlers, des Heimatstandortes oder des E-Kfz erforderlich, da hier z.B. Eingaben zum Fahrzeugakku, zur Heiz- und Klimaanlageleistung, zur vorzuhaltenden Reserve für spontane Fahrten und zur Mobiltelefonnummer (für optionale Systemmeldungen) zu machen sind.

Die Beispielabschätzungen zeigen, dass der Gesamtenergiebedarf von vielen Parametern abhängig ist und für eine realistische Planung des Gesamtenergiebedarfs einige Informationen vom Nutzer erforderlich sind. Mit dem entwickelten Konzept für die Nutzerschnittstelle wurde ergänzend gezeigt, dass die benötigten Informationen auf sehr schnelle und einfache Weise durch den Nutzer angegeben werden können und somit eine Abschätzung des Gesamtenergiebedarfs möglich ist. Dennoch ist festzustellen, dass für den optimalen Betrieb des E-Kfz vom Nutzer ein wesentlich interaktiveres Verhalten abverlangt als bei der heutigen Benutzung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren.

Förderhinweis

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben (Projekt *Harz.EE-mobility*) wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter Förderkennzeichen 03KP625 gefördert. Der Bericht wurde mit teilweiser Unterstützung der EU erstellt (Zuwendung FP7-ICT-2007-224628), Projekt SmartHouse/SmartGrid (Koordinator: SAP). Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Literatur

- [1] VDE e.v. (Hrsg.): Elektrofahrzeuge. Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf. Studie, Frankfurt am Main, April 2010.
- [2] L. Walch: Projekt MEREGIOmobil. IKT für Elektromobilität. Projektsteckbrief, 2.07.2009
- [3] Kontaktstelle Harz.EE-mobility: „Harz.ErneuerbareEnergien-mobility“ - Elektro-Autos und ein intelligentes Stromnetz ermöglichen umweltschonende Mobilität. Pressemitteilung vom 31.08.2009, <https://www.harzee-mobility.de/?page=presse> (Zugriff im August 2010)
- [4] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Haus versorgt Elektroauto mit Strom aus eigener Kraft. Pressemitteilung Nr. 118/2010, 26.04.201
- [5] M. Bodach: „Energiespeicher im Niederspannungsnetz zur Integration dezentraler, fluktuierender Energiequellen“, Dissertation, Universität Chemnitz, 2006
- [6] VDE e.v. (Hrsg.): Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger. Studie, Frankfurt am Main, Dezember 2008.
- [7] Fraunhofer IWES: Start des ersten Home-Automation-Betriebssystems für intelligente Netze, Pressemitteilung, 25.11.2009, http://www.ogemalliance.org/downloads/iwes_pm_ogema_2009-11-25.pdf (Zugriff im September 2010)
- [8] D. Nestle, P. Selzam, J. Ringelstein: Einbindung von Stromkunden in ein intelligentes Verteilnetz - Geschäftsmodelle und IT-Infrastruktur, Internationaler ETG-Kongress, Oktober 2009, Düsseldorf
- [9] T. Engel: „Plug-in-Hybrids“, 1. Auflage, Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, Verlag Dr. Hut, München, 2007
- [10] O. Franz: Konzeptentwicklung für eine Benutzerschnittstelle zur Integration von Elektrofahrzeugen in ein Energiesystem mit hohem Anteil erneuerbarer Energien, Masterarbeit, Universität Kassel, Januar 2010



Kontaktlose Netzanbindung von Elektrofahrzeugen

Hr. Ulrich Reker

Paul VAHLE GmbH & Co. KG

Westicker Str. 52, 59174 Kamen

Tel.: (02307) 704-293, Fax: (02307) 704-482

E-Mail: Ulrich.Reker@vahle.de

1 Ausgangslage

Der heutige Autofahrer ist gewohnt, sein Fahrzeug immer wieder mit einer stationären Einrichtung zu verbinden, nämlich beim Tanken. Allerdings ist dies nur ein kurzzeitiger Vorgang, der zudem noch manuell, meistens von ihm selbst ausgeführt wird. Die Verbindung, hier der Schlauch mit dem Tankrüssel, wird ihm an Ort und Stelle zur Verfügung gestellt, heute meistens in Zapfsäulen mit komfortablem Aufrollmechanismus oder ähnlichem, aufgestellt unter einem Überdach, kurzum, ein relativ einfacher und fast komfortabler Vorgang.

Ganz anders sieht es bei einem Elektro-Fahrzeug aus. Wieder gibt eine Verbindung zwischen einem stationärem Teil und dem Fahrzeug, aber mit wesentlichen anderen Merkmalen:

- Die Verbindung ist nicht kurzzeitig.
- Sie wird unbeaufsichtigt sein.
- Der Fahrer muss die Verbindung selbst zur Verfügung stellen.

Daraus resultieren verschiedene Problemfelder für unterschiedliche Gruppen.

Gegenüber dem bisherigen Tankvorgang ergibt sich für den Fahrer:

- Der Vorgang ist geteilt: eine Aktion beim Ladestart, sprich beim Verlassen des Wagens, eine Aktion beim Ladeende, sprich beim Einsteigen in das Fahrzeug. Zudem müssen zwei Steckvorgänge, am Fahrzeug und der Ladestation durchgeführt werden.
- Das Verbindungsmaterial muss im Wagen mitgeführt werden.
- Das Verbindungsmaterial liegt auf dem Boden. Der kann naß, dreckig vereist oder sonst etwas sein.
- Wenn es öffentliche Ladestationen sind, werden viele von Ihnen nicht überdacht sein, d.h. Durchführung ungeschützt bei jedem Wetter.
- Der Fahrer trägt das Risiko, das das Kabel beschädigt oder entwendet wird.

In der Folge wird der Benutzer des Elektrofahrzeuges versuchen, so wenig wie möglich diesen Vorgang durchzuführen.



Dies beeinträchtigt vor allem die Energieversorger, die den größten Nutzen haben, wenn möglichst viele Fahrzeuge mit ihren Batterien sich am Netz befinden, um damit ihre Regelkapazität im Strom-versorgungsnetz zu erhöhen.

Auch für den Unbeteiligten kann diese Konstellation Folgen haben. Auf dem Boden herum liegende Kabel stellen Stolperfallen dar. Beschädigte Kabel könnten eine Sicherheitsproblem bedeuten.

Allerdings gibt es auch einen entscheidenden Vorteil einer induktiven Lösung, sofern ein Anschluss an eine normale Haushaltssteckdose ermöglicht wird. Die gibt es in ganz Europa in jedem Haushalt und stellt damit eine Not-Lösung für den Fall der Fälle dar. Aber für den Alltag gibt es eine komfortablere Lösung.

2 Die induktive Lösung






2.1 Fa. VAHLE

Seit fast 100 Jahre ist Fa. Vahle auf dem Gebiet der Elektromobilität im Industriesektor unterwegs mit dem Motto: „VAHLE - elektrische Energie und Daten - für bewegliche Maschinen und Anlagen“.



- > 100 Mio. € Umsatz
- 550 Mitarbeiter weltweit
- 13 VAHLE-Gesellschaften weltweit
- Vertretungen in 52 Ländern
- Anteile: 100% Familienbesitz

Abbildung 1: Fa. VAHLE - Zahlen Daten Fakten

<div data-bbox="113 1064 260 1153" style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> Standardkrane 30% </div>		 <div data-bbox="566 1064 703 1153" style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> Prozesskrane 14% </div>
<div data-bbox="113 1174 260 1264" style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> Produktions-automatisierung 22% </div>		 <div data-bbox="566 1174 703 1264" style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> Lagertechnik 20% </div>
<div data-bbox="113 1284 260 1374" style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> Häfen- und Umschlagstechnik 4% </div>		 <div data-bbox="566 1284 703 1374" style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> Personentransport, Reinraumtechnik, etc. 10% </div>

VAHLE ist führend bei kontaktloser Energieübertragung mit mehr als 400 installierten Systemen seit 1998.

Abbildung 2: VAHLE Geschäftsfelder

2.2 Funktionsprinzip und Industrieanwendungen

Die bereits seit Jahren in der Industrie eingesetzten Systeme basieren auf einer alt bekannten Technik - der induktiven Übertragung, dessen Prinzip wir alle aus dem Transformator kennen.

grundlegendes Funktionsprinzip = Transformator = alt bekannte Technik

CPS® technology

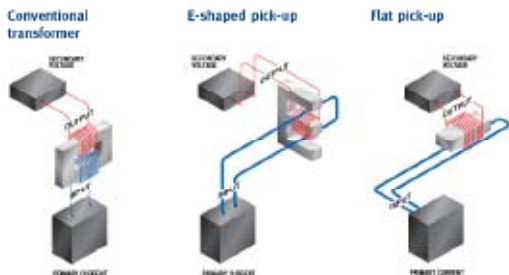


Abbildung 3: Prinzipbild der berührungslosen Energieübertragung

Die dazu notwendigen Komponenten und Techniken sind vorhanden und erprobt und werden ständig weiter entwickelt

Basis CPS® Komponenten and existierende Realisationen alles was man braucht zur Ladung von Elektrofahrzeugen !

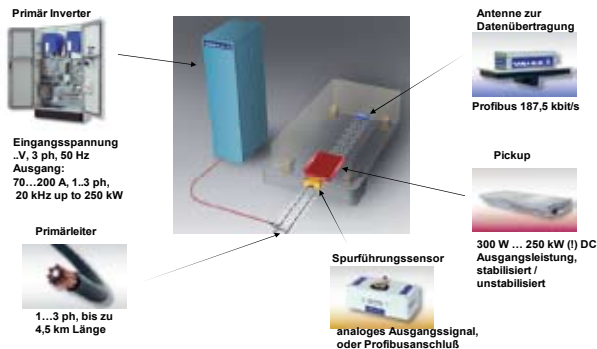


Abbildung 4: CPS® Komponenten zur induktiven Energieübertragung

Auf dieser technischen Basis und dem damit verbundenen Erfahrungsschatz ergibt sich die Frage: Warum soll dies nicht auch auf ein Elektro-Fahrzeug umgesetzt werden können ?



Abbildung 5: Anwendungspalette

2.3 emobile CPS®

Warum soll dies nicht genauso für Elektrofahrzeuge funktionieren ?

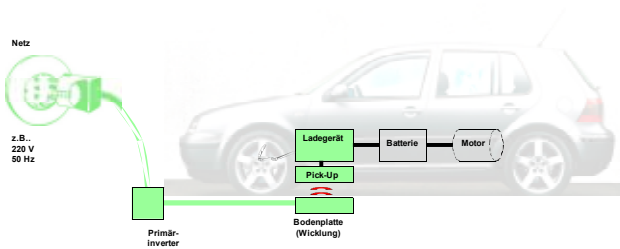


Abbildung 6: Warum CPS® nicht auch für E-Fahrzeuge ?



Source: Kiefer-Media

- ➔ einfache Ladung ohne Eingriffe des Benutzers
- ➔ kein Kabel im Kofferraum
- ➔ kein freiliegendes Kabel beim Laden
- ➔ keine Installationsaufbauten notwendig
- ➔ „Vandalismus“-sicher
- ➔ 100% berührungssicher, keine Teile „unter Spannung“
- ➔ 100% geschützt gegen Wasser, Schmutz ...
- ➔ Parktoleranzen
- ➔ Datenübertragung über das Pickup

und

- ➔ ... Laden beim Fahren möglich

Abbildung 7: emobileCPS® - Vorteile und Optionen

2.4 offene Fragen

Den vielen Vorteilen werden in Gesprächen immer wieder viele Argumente entgegen gesetzt, die auf den ersten Blick den Eindruck erwecken, das eine Realisierung nicht möglich sei.

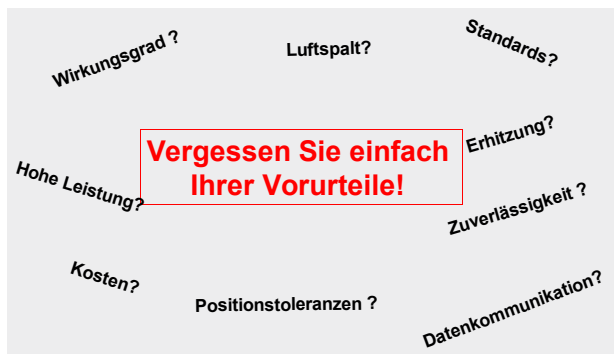


Abbildung 8: Vorurteile

Diese auch in den bisherigen Industrieapplikationen gestellten Fragen sind aber beantwortbar.

CPS[®] Magnetische Feldstärken sind unter den zulässigen Grenzen für den Bereich der Produktion*

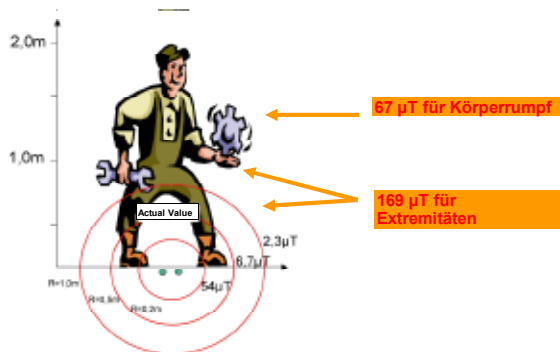
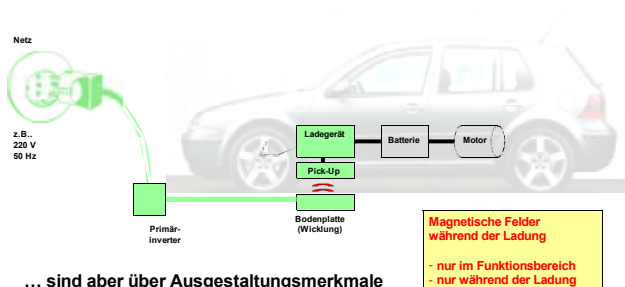


Abbildung 9: EMF im Industriebereich

Grenzen für magnetische Felder sind im öffentlichen Bereich wesentlich geringer ...



... sind aber über Ausgestaltungsmerkmale beherrschbar

Abbildung 10: EMF im öffentlichen Raum



Externe Metallteile können während der Ladung aufgeheizt werden ...



... aber eine "Feuer"-Gefahr kann durch Dimensionierung ausgeschlossen werden

Abbildung 11: Magnetische Felder sind durch Dimensionierungen beherrschbar

Wirkungsgrad der induktiven Batterieladung hängt prinzipiell ab von ...

- ✦ Luftspalt
- ✦ elektrische Last
- ✦ Ausgestaltung des magnetischen Kreises (d.h. mobile & stationäre Spule!)
 - Physikalische Anordnung (Kopplung)
 - Dimensionierung der Spulen
 - Ferrit-Material
- ✦ Elektrische Dimensionierung
 - Frequenz
 - Strom
 - Resonanz ...
- ✦ Halbleiterverluste

Abbildung 12: Einflußfaktoren auf den Wirkungsgrad

... die Parameter erlauben einen Wirkungsgrad von **mehr als 90%**
d.h. **5-8% Nachteil** gegenüber "Steckerlösung"

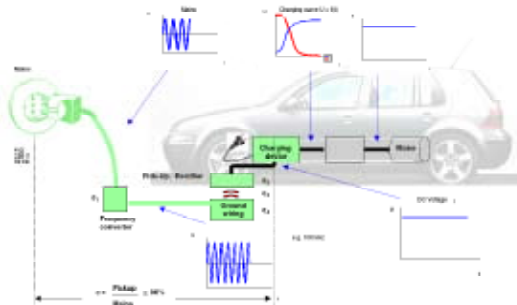


Abbildung 13: Abschätzung des Gesamtwirkungsgrades

Im Vergleich zur "Steckerlösung" gibt es prinzipbedingt **Mehrkosten ..**

- Frequenz-Erzeugung
- Bodeninstallation (Infrastruktur)
- Aufnehmer auf der mobilen Seite

... aber es bietet die Möglichkeit der „**mehrfachen, dezentralen Ladens**“.

- Verringerung der Batterie-Kapazität (es kann öfters geladen werden)
 - ➡ **signifikante Gewichts- und Kostenvorteile**
- Keine manuelle Aktivitäten des Benutzers (Steckanschluß) notwendig vor oder nach dem Laden
 - ➡ **Komfort für den Benutzer & Prozesssicherheit**

Abbildung 14: Gegenüberstellung der Mehrkosten gegen ander Vorteile

Erfahrungen aus dem Bereich der Bodentransportsystemes:



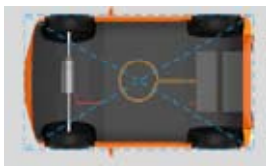
Die Gesamtkosten (TCO) eines BTS-Systems sind mit induktiver Technik geringer, weil keine Batterien benötigt werden

Abbildung 15: TCO Industriebereich

Der aktuelle (deutsche) Standardisierungsprozess ..



Source: Kiefer-Media



- **Basis-Konfiguration: 3 kW Ladeleistung, höher Lstg. optional**
- **“Niedermagnetfeld”:** absolut kein Risiko für Mensch und Umgebung
- **Es werden nur die Grundparameter definiert → Raum für intelligente Lösungen und Innovationen**

... garantiert eine Sicherung der Investitionen (F & E) aller Beteiligten (OEM's, EVU's, Betreiber etc.)

Abbildung 16: Standardisierung



Die induktive Lösung eröffnet ein breites Feld an "intelligenten" Lösungen...

... z.B. Pickup als ein integraler Teil der Bodenbaugruppe eines E-Fzgs

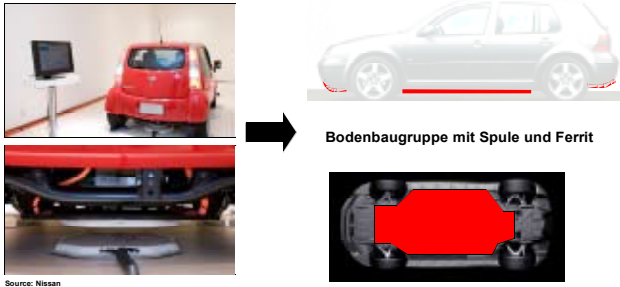
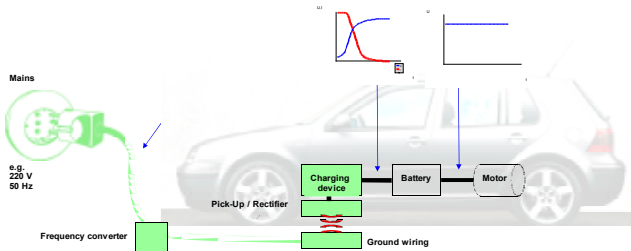


Abbildung 17: Innovationsfelder

Auch bei einer Standardisierung der magnetischen Schnittstelle gibt es noch jede Menge an Innovationsmöglichkeiten im Bereich der induktiven Ladung.

Die induktive Lösung eröffnet ein breites Feld an "intelligenten" Lösungen ...

... auch zum umgekehrten Energiefluß (Fahrzeug zum Netz)



... die Basiskomponenten liegen bereits vor!

Abbildung 18: Option Ladungsentnahme = Netz-Rückspeisung

2.5 aktuelle Aktivitäten

- Mitarbeit im DKE - Normungskreis
- Mitarbeit im Projekt W-Charge
- Aufbau einer Kooperation mit eingeführtem Automobil-Zulieferer

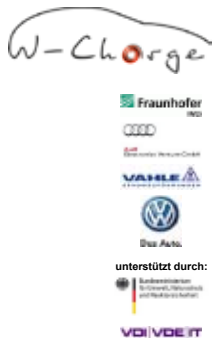


Abbildung 19: aktuelle Aktivitäten



Stromrichter für Elektrofahrzeuge

P. Zacharias*, L. Brabetz**

Universität Kassel, FB Elektrotechnik/ Informatik, Forschungsverbund Fahrzeugsysteme (FAST)
D-34109 Kassel, Wilhelmshöher Allee 71-73

Tel.: ++49 (0)561 804-6344 Fax: ++49 (0)561 804-6521

e-mail: peter.zacharias@uni-kassel.de; brabetz@uni-kassel.de

1 Einleitung

Die von verschiedenen Seiten prognostizierte Umstellung auf Elektromobilität wird langfristig gesehen auf verschiedenen Wegen erreicht werden können. Wie die technische Entwicklung zeigt, ist sowohl ein schrittweiser Übergang über verschiedene Stufen von Hybridfahrzeugen, die konventionelle und elektrische Antriebskomponenten vereinen, möglich als auch die vollständige Umstellung der Fahrzeuge auf elektrische Energie als einzige Ressource für alle Funktionen. Dabei ist bereits heute ein hoher Grad an Elektrifizierung auch in Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb erreicht. Bei reinen Elektrofahrzeugen mit elektrochemischem Speicher kommt zur Versorgung der Komponenten auch noch die Aufgabe der Aufladung der Speicher. Der vorliegende Beitrag soll einen Überblick über diese verschiedenartigen Probleme geben und Lösungsansätze skizzieren.

2 Antriebskonzepte in Fahrzeugen für den Individualverkehr

Bild 1 zeigt die ersten 3 Varianten für Antriebskonzepte, wie sie im Individualverkehr eingesetzt werden.

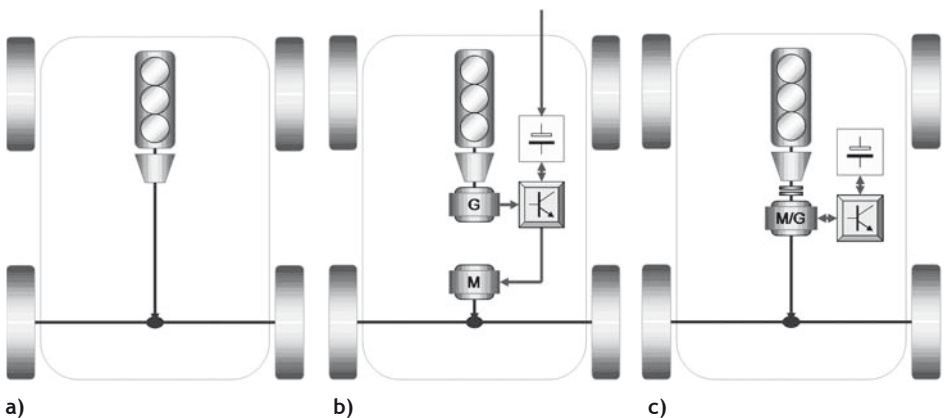


Bild 1: Antriebskonzepte (1): (1a) Verbrennungsmotor; (1b) Voll-(Seriell)Hybrid oder E-Mobil mit Range Extender; (1c) Parallel Hybrid

Ausgangspunkt für die derzeitige Entwicklung und Maßstab für die Gebrauchseigenschaften und Verwendung ist ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (1a), das seinen Energievorrat in chemischer Form gespeichert mit einer hohen auch abrufbaren Energiedichte/Leistung mit sich führt.

Beim seriellen Hybrid (1b) treibt der Verbrennungsmotor im idealen Arbeitspunkt den Generator. Der E-Motor bezieht seine Leistung durch die Batterie vom Generator weitgehend entkoppelt von der Batterie. Ähnlich aufgebaut, aber anders dimensioniert ist der sogenannte Range Extender. Bei diesem wird die Batterie extern geladen und genügt - ohne Unterstützung durch den

Verbrennungsmotor - den urbanen Anforderungen. Nur für größere Reichweiten wird der (kleinere) Verbrennungsmotor rechtzeitig zugeschaltet.

Beim parallelen Hybrid (1c) wirken Verbrennungs- und Elektromotor parallel auf die Antriebswelle. Die möglichen Funktionen sind stark abhängig von der Dimensionierung von E-Motor, Generator und Batterie.

Bild 2 zeigt den Übergang vom Hybridantrieb zum reinen (zentralen) Elektroantrieb

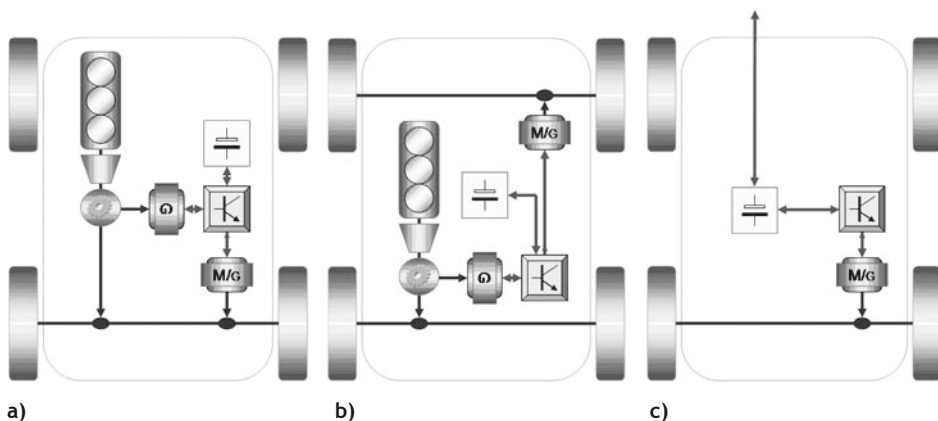


Bild 2: Antriebskonzepte (2): (2a) Leistungsverzweigter Hybrid mit gemeinsamem Antrieb; (2b) Leistungsverzweigter Hybrid mit getrennter Antriebsachse; (2c) Reiner Elektro-Antrieb mit Plug-In Eigenschaften

Wie beim parallelen Hybrid, treibt auch beim leistungsverzweigten Hybrid (2a) ein E-Motor gemeinsam mit der Verbrennungsmaschine das Fahrzeug. Jedoch ist hier ein Generator wie beim seriellen Hybrid zusätzlich vorhanden, so dass das Laden der Batterie bei gleichzeitigem E-Antrieb möglich ist. Kernkomponente ist ein Planetengetriebe, das den Kraftfluss des Verbrennungsmotors ohne Konvertierungsverluste auf Antrieb und Generator verteilt.

In der Variante (2b) lässt sich durch Antrieb von Vorder- und Hinterrädern durch jeweils Verbrennungs- und E-Motor das Verhalten eines Vierradantriebes ganz oder teilweise darstellen. Es gibt auch Varianten mit zwei E-Maschinen für beide Achsen.



In (2c) wird die Energie aus dem öffentlichen Niederspannungsnetz zunächst eingespeist und in der Batterie zwischengespeichert und steht bei einem ggfs. interessanten Geschäftsmodell auch für die Stabilisierung des öffentlichen Verbundnetzes zur Verfügung. Durch die Kompaktheit der elektrischen Antriebsmaschinen läßt sich der elektrische Antrieb auch in jedes einzelne Rad integrieren und steuern. Bild 3 veranschaulicht 3 dieser Varianten mit unterschiedlichen Ansätzen für die Energieversorgung.

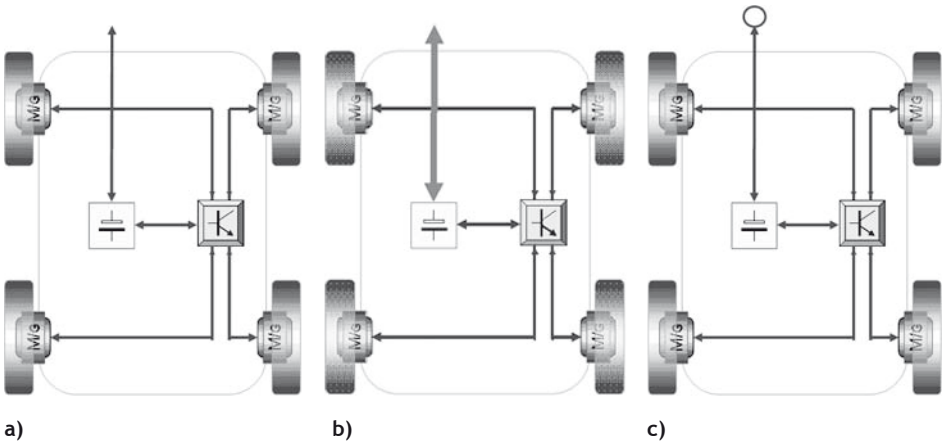


Bild 3: (3a) Elektroantrieb mit “Plug in Capability”; (3b) Elektroantrieb mit „Ladung durch Speicheraustausch“; (3c) Elektroantrieb mit reduziertem Speicher, der durch eine ständige oder hinreichend häufige Nachladung für den Fahrbetrieb ausreichend ist

Die reine Elektrotraktion mit 4-Rad-Antrieb (4WD) (3a) erlaubt für das Packaging und die Fahrdynamik interessante dezentrale Konzepte. Gesteuerte Antriebe einzelner Räder eröffnen hier völlig neue Möglichkeiten für Fahrstabilität und Fahrassistenz. Die Batteriegröße würde auch eine Netzstützung erlauben (*Plug-In*).

Der Austausch der elektrochemischen Energiespeicher (3b) hat primär nichts mit einem 4WD-Konzept zu tun, sondern ist als Option bei allen anderen Varianten mit hinreichend großem/die Gebrauchseigenschaften beeinflussenden Speicher latent vorhanden. Er wird in diesem Beitrag später noch einmal als Möglichkeit zur Lösung von Infrastrukturproblemen in der Elektroenergieversorgung besonders herausgestellt.

Das Konzept (3c) geht von einem kleinen Energiespeicher aus, der als Puffer für besondere Situationen dient. Im Mittel wird die benötigte Energie durch einen permanenten Energiezufluss von extern zugeliefert. Kurzfristige Unterbrechungen der Verbindungen zu diesem sind somit einkalkuliert, aber vergleichsweise limitiert.

3 Elektrische Systeme und Verbraucher in Fahrzeugen

3.1 Gesamtsystemüberblick und grundsätzliche Betrachtungen

Die Auslegung und elektrische Architektur des Leistungsbordnetzes wird weitgehend von Art und vom Grad der Elektrifizierung des Antriebsstranges bestimmt. Bild 4 zeigt einen Aufbau, der für ein reines Elektrofahrzeug angesetzt ist.

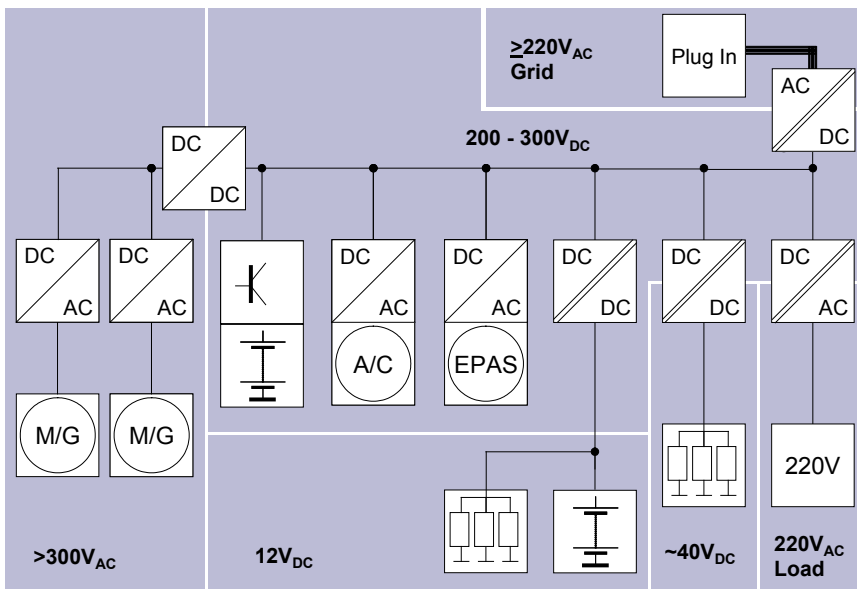


Bild 4: Architektur der Elektrik für ein Elektrofahrzeug mit 2 Antriebssträngen/-achsen

Es wird deutlich dass man es mit verschiedenen Spannungsebenen zu tun hat, die zum Teil über isolierende Wandler zu koppeln sind, um Energie untereinander auszutauschen. Nach wie vor existiert die 12V-Ebene, die jedoch maximale Lasten bis zu 1,5...2kW zu versorgen hat. Dies entspricht bereits Stromstärken von bis zu 160A. Die Antriebe, die einen weitaus höheren Leistungsbedarf haben, werden von einer Hochvoltbatterie versorgt. Hier liegt die Spannungsebene bei einigen hundert Volt. Diese Batterie dient als Hauptspeicher und lädt andere Speicher über DC/DC-Wandler nach. Um hohe Stoßbelastungen von der Batterie fern zu halten (z. B. beim Beschleunigen oder elektrischen Bremsen) kann ein Hochleistungskondensator zur Batterie parallel geschaltet werden). Wenn die Antriebe - wie in Bild 4 dargestellt - ebenfalls über einen DC/DC-Wandler (Hochsetzsteller) von der Hauptbatterie entkoppelt werden, gewinnt man einen Freiheitsgrad bei der Auslegung und kann ggfs. an Schaltverlusten der Antriebswechselrichter sparen, wenn man deren Zwischenkreisspannung nur dann erhöht, wenn sehr hohe Drehzahlen erreicht werden sollen. Hier ist keine Potenzialtrennung erforderlich. Während die 12V-Batterie mit dem Chassis des Fahrzeugs verbunden ist, ist die Hochvoltbatterie und alle mit ihr verbundenen elektrischen Komponenten mit einem hohen Standard isoliert. Dies impliziert auch, dass Komponenten zur Ladung aus dem



Niederspannungsnetz genau so isoliert sein müssen wie die etwaige Bereitstellung eines 220/230V-Wechselspannungsanschlusses nach außen.

Die Wandler für die Versorgung von Lasten müssen in der Regel nur für einen uni-direktionalen Energiefluss ausgelegt werden. Gleiches gilt für die Einrichtung zur Ladung der Hauptbatterie, solange das Fahrzeug nicht als Plug In Hybrid mit der Funktion Netzstützung ausgelegt werden soll. In diesem Fall muss auch Energie und ggfs. auch Blindleistung an das Netz geliefert werden können [17]. Dies bedingt andere Schaltungstopologien [11].

Die Stromrichter im Antriebstrang müssen in jedem Fall einen bidirektionalen Energiefluss ermöglichen, um Vortrieb und Rekuperation zu ermöglichen.

Die dargestellten Funktionsblöcke werden nur in seltenen Fällen auch als einzelne Komponenten realisiert, in der Regel erfolgt eine funktionale und mechatronische Integration. Dies ist insbesondere auf der Hochvoltseite geboten. Lange Leitungen im Fahrzeug mit Schaltspannungen müssen unbedingt vermieden werden. Bei Kabeln muss man - je nach Isolationsaufbau - mit Kapazitäten zwischen den Leitern und zu einer eventuellen Schirmung mit einem Kapazitätsbelag von 100...300pF/m rechnen. Moderne MOSFETs und IGBTs auf Silizium-Basis schalten mit einer Geschwindigkeit von 7...10kV/μs. Die neuesten Entwicklungen bei Schaltern in Trench-Technologie oder auch bei Schaltern auf SiC-Basis ermöglichen Schaltgeschwindigkeiten von 40...60kV/μs. Bezogen auf die eingekoppelten kapazitiven Spitzenströme in Leitungen und deren Umgebung bedeutet dies im ersten Fall unter der Annahme

$$\hat{i}_{cap} = C \frac{du}{dt}$$

Werte von 0,7...3A im letzteren sogar 12..18A pro Meter Leitung. Geht man von einer geschalteten Spannung von $U_d=300V$ und einem Cosinus-förmigen Spannungsverlauf aus, so erhält man bei einer vorgegebenen Schaltfrequenz f_{SW} für den effektiven (Stör-) Strom in die Umgebung der Leitungen

$$I_{cap} = \frac{\hat{i}_{cap}}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot U_d \cdot f_{SW}}{\left. \frac{du}{dt} \right|_{max}}}$$

Bei einer angenommenen Schaltfrequenz von 20kHz ergeben sich (wieder die oben genannten Bereiche zugrunde gelegt) effektive Störströme von 25...92mA bzw. 184...225mA pro Meter Leitungslänge. Das sind massive (!) Störpegel, die sich dann vor allem auf dem als „ruhig“ erwarteten Massepotenzial abbilden, Signalübertragungen direkt oder indirekt vor allem durch induktives „Übersprechen“ stören. Prinzipell sind alle diese Probleme beherrschbar in einem einheitlich geplanten Aufbau. Dies gilt selbst in medizinischen Anwendungen mit extrem hohen Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit. Bei einem Produkt, das größere Zykluszeiten haben und zwischenzeitlich weiterentwickelt werden soll, kann man diesem Problem nur dadurch begegnen, dass man die Quellen ihrer Entstehung blockiert und ein Gesamtkonzept (Architektur der Energieversorgung, Leitungsführungs- und Erdungskonzept etc.) sowie Regeln von Anfang an für dessen Erweiterung etabliert. Alles Andere ist aussichtslos.

3.2 Antriebsystem

Die Fahrzeuge werden von einem zentralen oder mehreren in der Achse oder den Rädern integrierten Elektroantrieben angetrieben. Als physikalische Funktionseinheit ist hier der Motor zusammen mit der zugehörigen Leistungselektronik zu sehen. Es handelt sich um Drehstrommotoren, für die aus der zur Verfügung stehenden Batteriespannung durch pulsweitenmodulierte Wechselrichter das erforderliche Wechselspannungssystem erzeugt wird. Durch eine Stromregelung wird dann das jeweils erforderliche Moment für den Antrieb erzeugt. Die höchsten Leistungsdichten, das heißt geringsten Baugrößen, werden hier mit permanent erregten Synchronmaschinen erreicht. Wegen der begrenzten Verfügbarkeit der Seltenerdmetalle werden in Zukunft sicher auch andere Konzepte elektrischer Maschinen für Fahrzeuge als Antriebe interessant werden. Derzeit häufigste Lösung für einen Antriebsstromrichter ist ein 3-phasiger Wechselrichter in Brückenschaltung mit Spannungszwischenkreis (B6I). Sein Zwischenkreis ist entweder galvanisch mit der Batteriespannung verbunden und somit mit dieser praktisch identisch oder über einen Hochsetzsteller (Booster) von der Batteriespannung entkoppelt. Letzteres ermöglicht die Auslegung des Motors für höhere Spannungen und im „Normalbetrieb“ (geringere und mittlere Geschwindigkeiten im innerstädtischen Bereich) ein Absenken der Zwischenkreisspannung des Antriebsstromrichters auf Batterieniveau. Damit lassen sich gleichzeitig die Schaltverluste der elektronischen Schalter (typischerweise IGBTs) senken. Wie oben bereits beschrieben, geht von diesen Schaltern ein erhebliches Störpotential aus. Daher ist es sinnvoll, Maschine und Elektronik weitestgehend zu integrieren, mit einem Schirmungs- und Erdungskonzept zu versehen und alle Zuleitungen mit Filtern auszustatten. So kann eine Ausbreitung der Störungen weitgehend verhindert werden. Beim elektrischen Abbremsen kann die kinetische Energie des Fahrzeugs teilweise zurückgewonnen werden und in der Batterie gespeichert werden. Da die erforderlichen Bremsbeschleunigungen oft erheblich größer als die Antriebsbeschleunigungen des Fahrzeugs sind, könnten hier auch erheblich größere Rückspeiseströme als beim Antrieb generiert werden. Daher gibt es auch immer noch eine mechanische Bremse, die dann mit der elektrischen Bremsung koordiniert wird.

3.3 Verbindung der Bordnetze

Wenn die Batterien sowohl aufgeladen als auch gesteuert entladen werden sollen, sind DC/AC-Konverter mit bi-direktionalem Energiefluss erforderlich.

Eine vollständige Integration der Ladeelektronik ins Fahrzeug würde heißen, dass man als Schnittstelle den Netzspannungsanschluss des Niederspannungsnetzes mit den in Europa typischen Spannungswerten 1-230V/50Hz bzw. 3-400V/50Hz wählen würde. Es muss mit der Gestaltung eines Wandlers und der Verbindungseinheit zum Netz sichergestellt werden, dass unter keinen Umständen Netzspannung auf das Fahrzeug-Chassis gelangt. Dies erfordert das Einfügen eines Transformators in die Wandlerkette.

3.4 Elektrische Verbindungen der Fahrzeuge nach außen

Man kann die grundsätzlichen gestalterischen Aufgaben an die Systemtechnik des leistungselektronischen Wandlers für einen netzgekoppelten Betrieb wie folgt zusammenfassen:



- Umwandlung von Gleichstrom in Wechselstrom (und umgekehrt) bei maximalem Wirkungsgrad und maximalem Leistungsfaktor $\lambda=P/S$ sowie $\cos\varphi=1$,
- Elektromagnetische Verträglichkeit des Gesamtsystems,
- Robustheit gegenüber Netzfehlern, insbesondere transienten Überspannungen,
- Entkopplung des weiten Eingangsspannungsbereichs auf der DC-Seite (Batterie) von der engen Netztoleranz,
- automatische Erkennung von Netzabschaltungen mit selbsttätiger Netztrennung bei geforderter Einspeisung,
- hohe Zuverlässigkeit und Lebensdauer,
- geringe Investitions- und Wartungskosten,
- ggfs. Sicherung der Energiequalität von lokalen Verbrauchern durch aktive Filterung der Oberschwingungen etc.,
- Standard-Anschlusswerte: 1-230V/16A (max. 3680VA), 3-400V/16A (max. 11kVA), größere Leistungen stehen zwar zur Verfügung müssen jedoch mit einer speziellen Infrastruktur bereitgestellt werden.

Insbesondere die Netzstützung im Fehlerfall ist mittlerweile angesichts einer in Deutschland installierten Leistung von ca. 22GW bei Windenergiekonvertern sowie >7GWp bei Photovoltaikanlagen zu einer wichtigen strategischen Forderung der Energieversorger und Netzbetreiber an die Konverter für erneuerbare Energiequellen geworden [1]. Diese Forderungen werden sich auch auf ans Netz angeschlossene Batteriespeicher übertragen, wenn dies zu einem Massenphänomen geworden ist.

Es ist davon auszugehen, dass die Batteriespannung der Fahrzeuge zunächst in einem weiten Bereich variieren wird. Dies ergibt sich einerseits aus dem Ladezustand der Batterie und andererseits aus dem Umstand, dass vermutlich in Abhängigkeit von der Applikation und Fahrzeughersteller keine einheitliche Nennspannung zur Verfügung stehen wird.

Die Batterie als hochwertige Komponente soll mit einer langen Nutzungsdauer betrieben werden. Die Art und Weise der Ladung und Entladung wird man daher auf keinen Fall vollständig einem externen (einheitlichen oder vereinheitlichten) System zur Batterieladung überlassen. Dies wird einem eigenen, ins Fahrzeug integrierten Batteriemanagementsystem obliegen, welches dann auch über entsprechende Möglichkeiten zur Steuerung der Lade- und Entladevorgänge verfügen muss.

Typischerweise sollte der Lade- und Entladestrom eines Akkumulators möglichst wenige Oberschwingungen aufweisen, um die Batterie nicht unnötig zusätzlich zu erwärmen.

Das Potenzial der Batterie sollte sich nicht schnell ändern können und wäre daher (ggfs. hochohmig) auf das Fahrzeugchassis zu beziehen oder anderweitig festzulegen. Schnelle Potenzialänderungen der Batterie - verursacht etwa durch Schaltvorgänge eines angeschlossenen Wechselrichters - führen wegen der relativ großen Abmessungen des Batteriespeichers zu starken kapazitiv in die Umgebung eingekoppelten Strömen (s. o.). Das Fahrzeugchassis selbst ist isoliert vom Erdpotential.



Ein On-Board-Ladegerät muss daher eine Isolation des Fahrzeugs vom Netz unter allen Umständen sicher stellen. Das „Auftanken“ eines batteriebetriebenen Fahrzeugs wird sich anders gestalten müssen, als dies derzeit bei Fahrzeugen mit flüssigem oder verflüssigtem Brennstoff der Fall ist, wie folgendes Beispiel verdeutlicht.

Ein Mittelklassewagen mit 700km Reichweite benötigt für eine Tankfüllung ca. 50l Benzin. Dies entspricht einem Energieinhalt von ca. 500kWh. Der eigentliche Betankungsvorgang dauert dabei ca. 2min. Rechnet man den Treibstoff-Fluss in eine äquivalent zugeführte Leistung um, so erhält man 15MW. Auch wenn man davon ausgeht, dass der Wirkungsgrad eines Elektromotors + Wechselrichter + Speicherwirkungsgrad + Ladegerät etwa bei >60% statt bei 20% wie der Verbrennungsmotor liegt und man vielleicht die Speicher nur für eine Reichweite von 100km auslegt, so ergibt sich immer noch eine Leistung von 714kW bei gleicher Ladedauer. Dies entspräche bei einer 400V-Batterie einem Ladestrom von 1785A. Eine solche Ladetechnik wird man sicher weder im Fahrzeug noch im Netz akzeptieren.

Für das oben angeführte Rechenbeispiel, das vor allem zur Veranschaulichung der Größenordnungen dienen soll, würde ein Batteriefahrzeug mit 100km Reichweite einen Speicher mit ca. 24kWh abrufbarer Energie erfordern. Ein Aufladevorgang mit 3,5kW bei 1-phasigem Anschluss würde dann 6h48min dauern. Bei einem 3-phasigen Anschluss mit 10kW würde sich die Ladezeit entsprechend auf 2h24min verkürzen.

Rechnet man bei Konverter-Systemen mit Luft-Zwangskühlung mit einer Leistungsdichte von 1-2kW pro dm^3 , so ist mit einigem zusätzlichem Bauraum im Fahrzeug zu rechnen, wenn man die gesamte Ladetechnik ins Fahrzeug integrieren würde. Im Fahrzeug würde man sicher bestrebt sein, auch diese Elektronik in den Wasserkühlkreislauf mit einzubeziehen, was erheblich höhere Leistungsdichten ermöglicht. Da der Batteriestack während der Ladung gekühlt werden muss, ist dies eigentlich kein besonderes Problem. Es verringert jedoch den Gesamtwirkungsgrad.

Ein wirklich schneller „Betankungsvorgang“ ist wegen der oben gemachten Ausführungen im Grunde nur mit einem Tausch des Batteriesatzes möglich (siehe auch Bild 3). Wegen der vergleichsweise niedrigen Energiedichte in elektrochemischen Akkumulatoren müssen dafür automatisierte Vorrichtungen eingesetzt werden, die dann standardisierte Batterie-Stacks in den entsprechenden Ladestationen austauschen. Ein Bewegen der Batterien „von Hand“ ist bestenfalls im Labor aber nicht für eine breite, allgemeine Anwendung denkbar. Die zugehörigen stationären Lade- und Tauschstationen für die Batterien sind dann sicher anders zu gestalten als mobile oder teilweise mobile Lade-/Entladeeinrichtungen um das immer bestehende Restrisiko für die individuellen Betreiber zu minieren. Unterstützt wird dieses Konzept durch das unterschiedliche Spannungsniveau des 1-phasigen Netzanschlusses in der Ländern weltweit (Bild 5).

Wenn die Batterien sowohl aufgeladen als auch gesteuert entladen werden sollen, wären DC/AC-Converter mit bi-direktionalem Energiefluss für alle Spannungsebenen erforderlich.

Eine vollständige Integration der Ladeelektronik ins Fahrzeug würde heißen, dass man als Schnittstelle den Netzspannungsanschluss des Niederspannungsnetzes mit den in Europa typischen Spannungswerten 1-230V/50Hz bzw. 3-400V/50Hz oder entsprechend flexiblere Anschlusswerte wählen würde. Es muss mit der Gestaltung eines Wandlers und der Verbindungseinheit zum Netz sicher-



gestellt werden, dass unter keinen Umständen Netzspannung auf das Fahrzeug-Chassis gelangt. Dies erfordert auf jeden Fall das Einfügen eines Transformators in die Wandlerkette da derzeit standardmäßig eine isolierte Speicherbatterie gefordert wird.

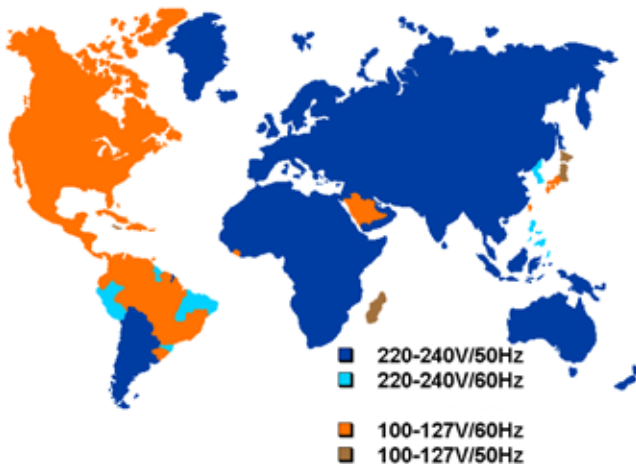


Bild 5: Weltweiter Überblick über die Nennspannungen und Nennfrequenzen des Versorgungsnetzes mit Niederspannung (1-phasig) im öffentlichen Bereich

Tabelle 1: Auflistung der weltweit implementierten Spannungen in den 1-phasigen bzw. 3-phasigen Niederspannungs-Versorgungsnetzen [13]

Netzspannung 1-phasig (Nennspannungen)	Leiterspannung 3-phasig (Nennspannungen)
1- 100V	3- 120V
1- 110V	3- 190V
1- 120V	3- 200V
1- 125V	3- 208V
1- 127V	3- 240V
1- 220V	3- 277V
1- 230V	3- 380V
1- 240V	3- 400V
	3- 415V
	3- 440V

Ein 50/60Hz-Transformator isoliert das Netz vom Fahrzeug und lässt eine einfache Überwachung der Verbindung der Batterie mit dem Erdpotential bei der Verbindung mit der Ladestation zu. Bei einem spezifischen Gewicht eines 50Hz-Transformators von 5...10kg/kVA im Leistungsbereich von 3...10kVA wird bei diesem Lösungsansatz der Transformator immer Bestandteil eines stationären Teils der Ladeeinheit sein. Wenn die übrige Leistungselektronik im Fahrzeug integriert ist, so hat man ihre Funktionsweise komplett im Fahrzeug unter Kontrolle. Die Steuerung einer selbsttätigen Ladung und Entladung entsprechend (auch) der Netzerfordernisse würde vom Fahrzeug aus geschehen können. Dieses wäre dann über einen Kommunikationskanal mit dem Netzbetreiber oder einem Energiehändler im Informationsaustausch, um die Netzdienstleistungen auch anbieten und ausführen zu können.

Es stellt sich die Frage, ob nicht durch Einsatz eines HF-Trafos eine deutliche Gewichts-reduzierung zu erreichen wäre, so dass das gesamte Ladeequipment Bestandteil des Fahrzeugs werden könnte. Den Übersichtsschaltplan für eine solche Topologie zeigt Bild 6 [6]. Der hoch-/tiefsetzende DC/DC-Wandler ist hier als ein bidirektionaler Cuk-Wandler mit isolierendem HF-Transformator ausgeführt.

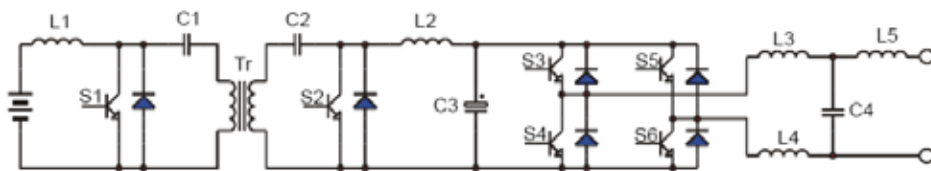


Bild 6: Bi-direktionaler Cuk-Konverter mit isolierendem HF-Transformator und aktivem Gleichrichter/Wechselrichter für sinusförmige Stromaufnahme/Stromabgabe an das Netz [6]

Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob nicht eine vollständige Isolation an der Koppelstelle selbst durch Nutzung des Transformators möglich ist. Bei loser Kopplung der Transformatorwicklungen werden hierzu meist resonante Wandler eingesetzt, wie in Bild 7 gezeigt. In [8, 9] wird die Gestaltung der Koppelstelle sowie die Dimensionierung des Resonanzkreises für einen uni-direktionalen Energiefluss untersucht. In [4] wird vorgestellt, wie man diesen DC/DC-Wandler bidirektional sehr flexibel mit abschaltbaren Schaltern steuern kann. Der Serienresonanzkreis ist bei entsprechender Steuerung in relativ weiten Grenzen in der Lage, durch Resonanzüberhöhung unterschiedliche Koppelfaktoren zwischen den Wicklungen L1 und L2 auszugleichen. Dadurch ist es prinzipiell möglich, den Transformator selbst als mechanische Koppeleinrichtung zu verwenden. Durch den Resonanzkreis wird andererseits Kommutierungs-Blindleistung bereitgestellt, so dass die Schaltverluste der Schalter extrem zurückgehen. Umrichter mit Serienresonanzkreis sind bereits aus den Zeiten der Thyristoren bekannt und daher vielfach in der Literatur beschrieben.

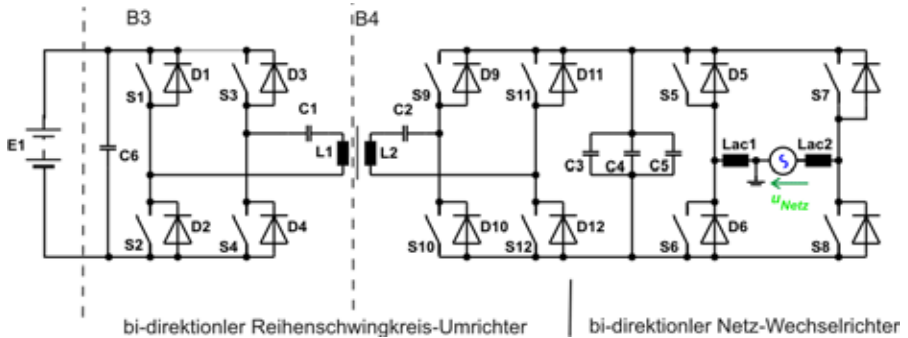
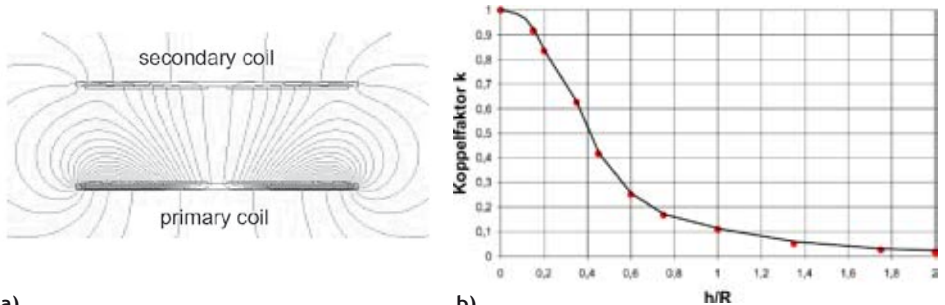


Bild 7: Bidirektionale Wandlertopologie zum Laden von Batterien aus dem Netz

Wenn man keine zusätzlichen beweglichen Koppelstellen schaffen will, um eine enge Kopplung zwischen den beiden Transformatorhälften zu erreichen, bieten sich Flachspulen als Ausführungsformen der Wicklungen an. Diese weisen jedoch ein erhebliches Streufeld in die Umgebung auf (Bild 8). Mit zunehmendem Abstand der Flachspulen wird auch der Koeffizient sehr gering. Bild 8b zeigt den näherungsweise Verlauf des Koeffizienten der beiden Spulen nach [14] in normierter Form für das Verhältnis von Abstand h zu Außenradius R .



a) Bildung des Streufelds einer Flachspulenordnung zur Energieübertragung (Mecke, EPE 2007) und Koeffizient der Spulen in Abhängigkeit vom Verhältnis Abstand/Außenradius

Geht man davon aus, dass die Transformatorspulen sich einerseits an einem Stellplatz des Fahrzeugs im Boden befinden und will bei einer Bodenfreiheit von 20cm einen Koeffizienten von 0,82 erreichen, so benötigt man eine Spule mit einem Außenradius von 1m. Da man über 1m Durchmesser die Spule kaum dimensionieren wird, ergibt sich damit ein Koeffizient von ca. 0,5. Dies spricht für ein außerordentlich starkes Streufeld in der Umgebung. Bei einer Ladeleistung von 3kW hat man allein für die Wirkleistung eine mittlere Leistungsdichte im Zwischenraum der Spulen (Wirkanteil des Poyntingvektor-Feldes $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$) von 3,8kW/m². Durch den starken Blindleistungsanteil wird das „Strahlungsfeld“ noch erheblich stärker. Auch wenn es Maßnahmen gibt, das Feld stärker zu richten, wird immer ein erhebliches Streufeld übrig bleiben, welches die Umgebung beeinflussen kann. Dies können Wirbelströme in metallischen Teilen der Umgebung sein oder massive elektromagnetische Störungen von Geräten.

Wenn man die Phobie vieler Menschen sogar vor den elektromagnetischen Feldern von Mobiltelefonen (max. Sendeleistungen 0,125...1W) bedenkt, wird dieser Lösungsansatz es schwer bei einer allgemeinen Durchsetzung haben. Sehr wohl dagegen sind Anwendungen denkbar, die bei Fahrzeugen des öffentlichen Personen-Nahverkehrs (Busse, Taxi etc.) sinnvoll sind, da hier vielfach spezielle Stellplätze und Haltestellen gegeben sind, die durch konstruktive Maßnahmen auch ein erheblich günstigeres Verhältnis von R/h aufweisen können und ein unterwiesenes Personal, das sachgerecht mit einer entsprechend anwendungsbezogen gestalteten Infrastruktur umgehen kann.

4 Übertragung der elektrischen Energie während der Fahrt

Da ein Nachtanken auf einer längeren Fahrt an einer Ladestation ohne Batteriewechsel selbst bei einer extremen Schnell-Ladung kaum unter einer halben Stunde dauern würde, ist es legitim, sich über weitere Alternativen Gedanken zu machen. Die Batterie könnte in moderaten Größen gehalten werden, wenn es gelänge, während der Fahrt auf Langstreckentrassen die verbrauchte Energie nachzuliefern. Auch hier wäre eine drahtlose Energieübertragung erforderlich. Nachfolgend werden einige Aspekte der dazu notwendigen Infrastruktur untersucht und Schlussfolgerungen für ein derzeitiges System gezogen.

4.1 Beschreibung der Fahrzeugsituation bei elektrischer Versorgung

Der Leistungsbedarf eines Autos während der Fahrt beträgt näherungsweise

$$P_{ges} = \frac{P_R + P_W + P_S + P_B}{\eta_{Antrieb}} + P_E$$

Dabei sind die folgenden Leistungsanteile berücksichtigt:

(A) Deckung der Rollreibungsverluste

Die Rollreibungsverluste sind Ergebnis des „Durchwalkens“ der Fahrzeugreifen und hängen stark vom Reifendruck und dem Aufbau der Fahrbahn ab. Für kleine Geländesteigungen gilt mit guter Näherung

$$P_R = c_R \cdot F_G \cdot v$$

F_G : Gewichtskraft

v : Geschwindigkeit

Als Werte für die Größe des Rollreibungsbeiwerts c_R kann man folgende Orientierungsgrößen heranziehen:



Rollreibungsbeiwert c_R	
0,011-0,015	Autoreifen auf Asphalt, Pkw
0,01-0,02	Autoreifen auf Beton*
0,020	Autoreifen auf Schotter
0,015-0,03	Autoreifen auf Kopfsteinpflaster*
0,03-0,06	Autoreifen auf Schlaglochstrecke*

*Schmidt, Schlender 2003, [7]

Die Fahrzeugmasse spielt hier offenbar einen großen Einfluss. Die nachfolgende Grafik zeigt einen Ausschnitt aus der Entwicklung der Masse der neu zugelassenen PKW. Der erkennbare Trend zu größeren Massen hält auch heute noch an und wird einerseits durch die steigende Ausstattung und den Komfort, andererseits durch zunehmende Maßnahmen zur Verbesserung der Fahrzeugsicherheit getrieben.

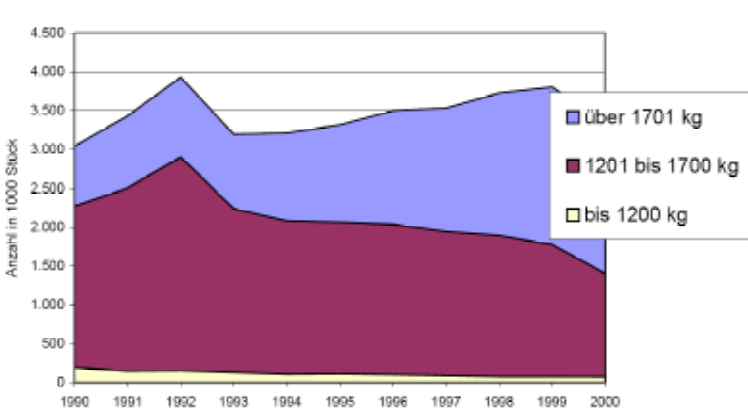


Bild 9: Entwicklung der Neuzulassungen an Pkw in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2000 nach Gewichtsklassen (Öko-Institut e.V. Geschäftsstelle Freiburg nach KBA-Daten, Studie PROSA - PKW-Flotte Freiburg, Dezember 2004)

Limousinen oder Kombinationskraftwagen mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 2.500-2.700 kg und einer Zuladung von 500-650 kg sind heute keine Seltenheit mehr. Fahrzeuge, die nach ihrem äußeren Erscheinungsbild (Karosserieform) sowie ihrer technischen Ausstattung (Fahrgestell und Motorisierung) einem annähernd baugleichen Pkw-Typ entsprechen und die nicht sowohl ein *zulässiges Gesamtgewicht von 2.800 kg* als auch eine Zuladung von 800 kg überschreiten, gelten mithin stets als Pkw und unterliegen wie diese der emissionsbezogenen Hubraumbesteuerung gem. § 8 Nr. 1 KraftStG.

Als typisch/durchschnittlich soll daher ein PKW mit 1.600 kg Fahrzeugmasse betrachtet werden (der derzeit ebenfalls - typisch - mit einer Motorleistung von 100 kW und einem EURO-Mix-Ver-

brauch von 8,2 Liter Kraftstoff ausgestattet ist). Mit einer Nutzlast von 100kg ergibt sich dann für weitere Berechnungen eine Fahrzeugmasse von 1.700kg. Nach ADAC bedeutet Leergewicht: Fahrzeug mit 75kg Fahrer und 90% Tankinhalt. Dies entspricht einer durchschnittlichen Limousine ohne Extras. Die Golfklasse liegt leicht darunter, Mittelklassewagen in Limousinen-Ausführung liegen im Durchschnitt leicht darüber mit steigender Tendenz bei steigender Ausstattung. (Bei den hier vorgelegten Betrachtungen werden größere Fahrzeuge bewusst ausgeklammert. Ziel ist nicht die Diminutionierung der Energieübertragung sondern die Erarbeitung einer Vorstellung von der Größenordnung der zu übertragenden Leistungen und über die allgemeinen Anforderungen an eine Infrastruktur, die dies leisten könnte. Bei den Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass Elektroantrieb und Batterie gewichtsneutral zum Antriebsstrang des Verbrennungsmotors nebst Tank sind. Reine Elektrofahrzeuge haben sicher in Zukunft auch völlig neue Gestaltungsbedingungen im Vergleich zum heutigen Zustand. Aber die Transition in die Zukunft startet aus der Gegenwart.

(B) Deckung der aerodynamischen Verluste

$$P_W = \frac{\rho_{Luft}}{2} (c_W \cdot A) \cdot v^3$$

ρ_{Luft} : Dichte der Luft (typisch bei Meereshöhe NN, 20°C: 1,2kg/m³)

c_W : aerodynamischer Widerstandsbeiwert des Fahrzeugs

A: angeströmte Fläche des Fahrzeugs

Dieser Leistungsanteil ist also proportional zu v^3 . Nicht allein der c_W -Wert ist maßgeblich, wie häufig fälschlich angenommen, sondern das Produkt aus angeströmter Fläche und c_W -Wert. Die nachfolgende Grafik zeigt einen Überblick über die Kombination von beiden Werten bei ca. 572 PKW-Typen. Der Mittelwert für den c_W -Wert ergibt sich dabei zu 0,33, während die Widerstandsfläche der Fahrzeuge im Mittel über die „Flotte“ der Fahrzeugtypen $\overline{A_W} = c_W \cdot A = 0,69m^2$ beträgt.

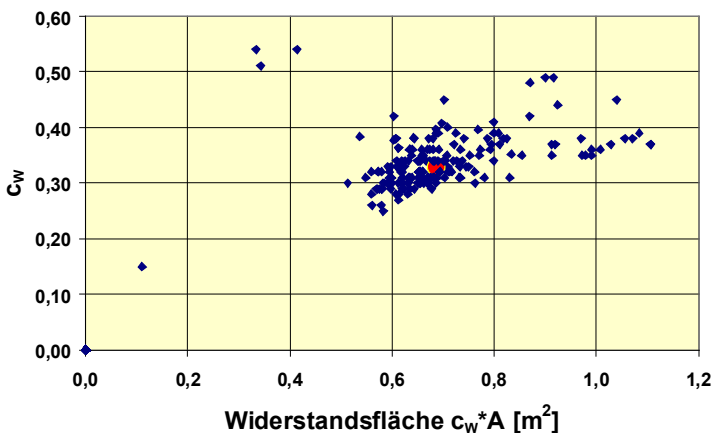


Bild 10: Wirksame Widerstandsfläche und c_W -Wert für 572 PKW-Fahrzeugtypen (Mittelwert als roter Kreis in der Punktwolke eingezeichnet)



(C) Deckung der „Steigungsverluste“ bei sacht steigendem Gelände ($s=\tan\alpha\approx\sin\alpha$)

$$P_S = \frac{m \cdot g \cdot \Delta h}{\Delta t} = \frac{m \cdot g \cdot \Delta l \cdot s}{\Delta t} = m \cdot g \cdot v \cdot \frac{s}{100\%}$$

m : Fahrzeugmasse s : relative Steigung in % v : Fahrzeuggeschwindigkeit
 Δh : Höhengewinn Δt : Zeitabschnitt Δl : Wegabschnitt
 g : Erdbeschleunigung $9,81\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$

(D) Deckung der „Beschleunigungsverluste“ $P_B = \frac{m \cdot \Delta v}{\Delta t} \cdot v = m \cdot v \cdot \frac{dv}{dt}$

(E) Wirkungsgrad des Triebstrangs: $\eta_{Antrieb} = 0,8...0,9$

(F) Eigenverbrauch $P_E = 0,3...0,8...1,3\text{kW}$

Durch Zusammenfassung ergibt sich für die gesamte aufzubringende Leistung während einer Fahrt die Näherungsformel

$$P_{ges} = \frac{1}{\eta_{Antrieb}} \left[\left(g \cdot \left(c_R + \frac{s}{100\%} \right) + \frac{dv}{dt} \right) \cdot m \cdot v + \frac{\rho_{Luft}}{2} (c_W \cdot A) \cdot v^3 \right] + P_E$$

Diese Leistung wäre auch als Grenzfall in einem Fahrzeug bereitzustellen, das nur einen extrem kleinen Speicher zur Bereitstellung der Spitzenleistungen bei Beschleunigung beinhaltet. Allerdings muss dann noch der Wirkungsgrad der Energieübertragungskette einkalkuliert werden.

Für den gesamten (gemittelten elektrischen) Leistungsbedarf eines Fahrzeugs mit Elektroantrieb soll diese Näherungsformel mit folgenden Parametern verwendet werden:

Parameter	Formelzeichen	Wert			Maßeinheit
		minimal	typisch	maximal	
Erdbeschleunigung	g	-	9,81	-	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
Rollreibungskoeffizient	c_R	0,01	0,15	0,02	-
Relative Geländesteigung	s	0	3	8	%
Fahrzeugmasse	m	1300	1700	2100	kg
Dichte der Luft	ρ_{Luft}	-	1,2	-	kg/m^3
Fahrzeuggeschwindigkeit	v	0	-	160	km/h
Widerstandsfläche	$c_W \cdot A$	0,6	0,69	0,8	m^2
Eigenverbrauch	P_E	0,4	0,8	1,2	kW

Unter Annahme der typischen Werte ergeben sich für die erforderliche Fahrzeugleistung folgende Verläufe bei unterschiedlichen Geländesteigungen:

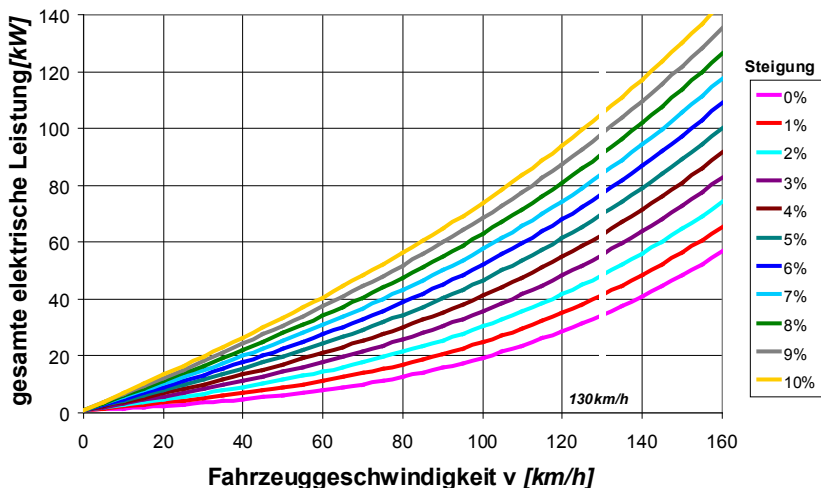


Bild 11: Benötigte elektrische Leistung eines Elektrofahrzeugs auf einer Asphaltstraße mit unterschiedlicher Steigung

Betrachtet man die derzeitige Richtgeschwindigkeit auf einer Autobahn von 130km/h so erhält man bei einer Steigung von 0% eine erforderliche Leistung von 34,4kW bzw. bei 3% eine Leistung von 55,6kW.

4.2 Schlussfolgerungen für die Gestaltung einer adäquaten Infrastruktur

Betrachtet man die Ergebnisse von 4.1 unter der geltenden Regeln in Deutschland, dass der Abstand der Fahrzeuge in *m* größer als der halbe Tachostand in *km/h* sein soll (gilt laut Bußgeldverordnung in Deutschland für *v > 80km/h*), so ergibt sich die maximale Anzahl von Fahrzeugen mit einer mittleren Länge von 4,5m auf einer Spur zu

$$Z_{1km} < \frac{1000m}{\left[\frac{v}{2km/h} \right] m + 4,5m}$$

wenn man deren Zahl auf einen Kilometer bezieht.

Hieraus lässt sich der Leistungsbedarf pro Spur und Kilometer abschätzen, um die erforderlichen Größenordnungen für entsprechende elektrische Installationen zu ermitteln. Als Beispiele für Fahrzeuge wurden PKW mit einem moderaten Gewicht gewählt, die jedoch von der Anzahl her einen großen Teil der Verkehrs ausmachen und die für den einzelnen Leser besonders anschaulich sind. Betrachtet man Tabelle 2, so wird klar, dass für ein Gemisch von PkW und Nutzkraftfahrzeugen die Rechnung etwas anders ausfallen wird, wenngleich sie auf die gleiche Größenordnung führen wird.



Tabelle 2: Fahrzeuggewichte nach Nutzungsklassen.

Bezeichnung	Maximal zulässiges Gesamtgewicht laut StVo und StVZO Deutschland
PKW	<2,8t
Schwere PKW und Transporter	<3,5t
Leichte LKW	<7,5t
Mittelschwere LKW	<18t
Schwere LKW	>18t
Superschwere LKW (in Diskussion)	Bis 60t

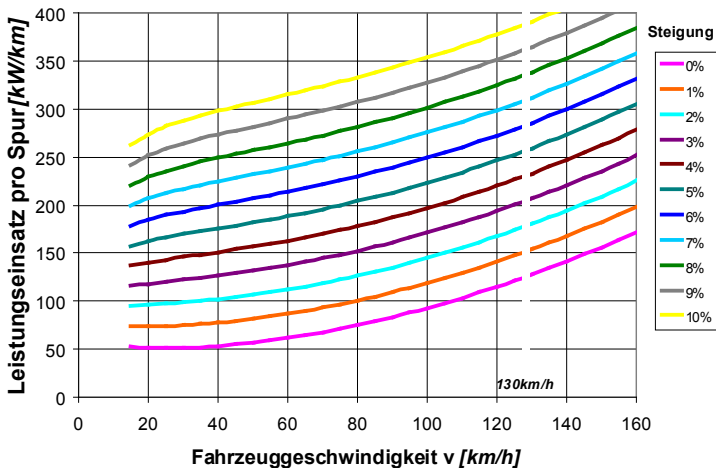


Bild 12: Leistungsbedarf pro Spur und Kilometer bei einer gleichmäßigen Fahrzeugbelegung mit Personenkraftwagen

Aus Bild 12 läßt sich bei einer horizontalen Autobahn eine installierte Leistung für die Deckung der vollen Energieaufwendungen bei einer 4-spurigen Autobahn von 400kW/km (netto) und ca. 450-500kW/km unter Berücksichtigung des Übertragungswirkungsgrades für die getroffenen Annahmen ansetzen. Bei Steigungen zwischen 8...9% hat man mit 700kW (netto) zu rechnen. Basierend auf diesen als Abschätzung gedachten Berechnungen soll im Weiteren von einer zu installierenden und ggfs. auch zu den Fahrzeugen zu übertragenden Leistungen von 1MW/km gerechnet werden.

Für die Energieübertragung zu den Fahrzeugen, deren Installationen mit einiger Sicherheit unter der Fahrbahn angeordnet sein müssen, wird man sicherlich keine Hochspannungsanlagen installieren ($U_{eff} < 1000V$). Auf einer Gleichspannungsleitung mit 1000V würden für eine Übertragungsstrecke von 1km Leitungsquerschnitte bis 1000A installiert werden. Dies entspricht einem erforderlichen

Leitungsquerschnitt bei Kupfer von ca. 260mm² je nach Verlegeart (Friedrich: Tabellenbuch Elektrotechnik). Bei Vollast (1000A), Elektrokupfer (19Ω.mm²/km) und der maximal zulässigen Leitertemperatur von 80 °C (23,5Ω.mm²/km) erhält man bei dieser Entfernung einen Spannungsabfall von 77,8V unter der Annahme einer gleichmäßig verteilten Stromabnahme über die Strecke. Dies entspricht einem nominellen Cu-Widerstand von 0,09 Ω/km. Zu installieren sind unter diesen Annahmen (maximaler Abstand eines Fahrzeugs zur nächsten Umspannstation: 1km, Abstand zwischen diesen Stationen 2km) 520mm² Kupferquerschnitt. Allein dafür müssten auf der Niederspannungsebene 4,64t/km an Kupfer eingesetzt werden, ohne dass die Übertragung zum Energie-Fahrzeug gelöst wäre, was dann den Bedarf vervielfachen würde.

Aus Gründen der hohen Aufwendungen für ausgedehnte Gleichspannungsinstallationen im Multimegawattbereich wird man so lang als möglich auf der Wechselspannungsebene bleiben. Als Standard bietet sich hier das weit verbreitete 3-690V Netz an. Die gleichgerichtete und geregelte Leerlaufspannung dieses Netzes beträgt 1100Vdc und liegt somit im Grenzbereich der Gültigkeit der Richtlinie VDE0100 zur Abgrenzung von Mittelspannungsanlagen. Aus einer solchen Spannung würde man sicher - abschnittsweise - die an die Fahrzeuge zu transferierende Leistung mit leistungselektronischen Mitteln bereitstellen. Dies hätte einen Leiterstrom von 847A zur Folge. Der Kupferquerschnitt wird dadurch pro Leiter nicht wesentlich verringert (insbesondere unter Berücksichtigung der Stromverdrängung auch bereits bei 50Hz). Es spielt jedoch der induktive Widerstandsbelag der Leitungen eine weit größere Rolle. Nach [13] kann man von folgenden Reaktanzbelägen in erster Näherung ausgehen:

Tabelle 3: Allgemeine Wertebereiche X'_L

Leitungsart	X'_L [Ω/km]
Freileitungen	0,3 bis 0,4
Kabel	0,08 bis 0,12
Isolierte NS-Freileitungen	Ca. 0,1

Die zu erwartenden Spannungsabfälle für ein Wechselspannungssystem sind hier unter den getroffenen Voraussetzungen zur Gleichspannungsvariante vergleichbar.

Die Leitungsverluste betragen dabei ca. 50...60kW auf den Leitungen (entsprechend 5-6%). Die reine Transportaufgabe für die elektrische Energie ist also technisch ohne größere Probleme lösbar. Die Fragen nach einer energiewirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Implementierung bleiben dabei noch offen.

4.3 Mögliche elektrische Infrastruktur

Die für die Fahrzeuge erforderliche Niederspannungsebene gestattet keinen adäquaten elektrischen Energiefluss auf größeren Strecken. Daher sind parallel zu den Fahrtrassen zusätzliche Energietransporttrassen wie bei der Bahn erforderlich. Diese ermöglichen einen verlustarme Energietransport vom Erzeuger zum Verbraucher.



Die Bahn betreibt ein weiteres Energieversorgungsnetz in Deutschland und damit das größte zusammenschaltete 110-kV-Netz / (50Hz/16⅔Hz) in Deutschland. Das Freileitungsnetz hat eine Länge von ca. 7600km an Bahnstromleitungen. Die Fahrdrachtspannung beträgt dabei (zumindest in Deutschland, Österreich und der Schweiz sowie Norwegen und Schweden 15kV_{AC} (Mittelspannung). Daraus resultieren u. a. relativ niedrige Fahrdrachtströme und eine vergleichsweise geringere Dichte an Umformerstationen als bei niedrigeren Spannungen (Südfrankreich, Niederlande 1,5kV_{DC}, Spanien, Italien, Belgien, Polen: 3kV_{DC}, Südkorea: 0,75kV_{DC}. Großbritannien (außer Raum London). Portugal, Nordfrankreich, Dänemark sowie fast alle osteuropäischen Länder und die Türkei haben Fahrdrachtspannungen von 25kV_{AC}. Die Frequenzen am Fahrdracht liegen dabei zwischen 16⅔Hz und 50Hz bei den AC-Netzen.

Wechselspannungsnetze haben den Vorteil der sehr einfachen Transformierbarkeit der Spannungsebenen und damit der Flexibilität. Bild 13 zeigt einen solchen Ansatz. Als Mittelspannungsebene wurde hier willkürlich nach den oben niedergelegten Ausführungen die 20kV-Ebene als Kompromiss gewählt.

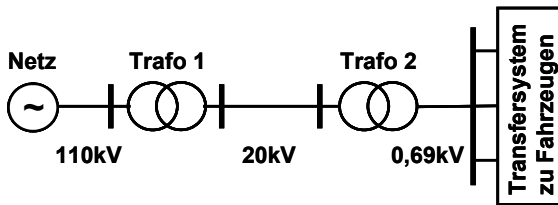


Bild 13: Möglicher Aufbau einer Energieversorgung für elektromobile Langstrecken

Als mögliche Transformatoren könnten hier - aufbauend auf derzeitigen Standardreihen - eingesetzt werden:

	Übersetzung	Typenscheinleistung	ca. Abstand
Trafo 1	110kV / 20kV	50MVA	50km
Trafo 2	20kV / 0,69kV	2,5MVA	2km

Wenn man berücksichtigt, dass pro Kilometer 3-100kV Freileitung zurzeit im Mittel etwa 0,3Mio.€/km an Investitionen [15] erforderlich sind, so sind für die beschriebene 3-fach-Installation der Spannungsebenen sicherlich 1Mio.€/km nicht untertrieben. Während die 20kV-Ebene noch als Freileitung ausgeführt werden wird, ist die Niederspannungsebene als Kabelinstallation fast unerlässlich. Dies ist - auch mit Blick auf die relativ hohe Dichte an Umspannstationen - mit höheren Investitionskosten verbunden. Die Schätzung dürfte daher eher konservativ sein. Verglichen mit den Baukosten für Autobahnen, die bei einfachem Gelände nach [16] im Bereich von 4-6Mio.€/km liegen, führt die zusätzliche elektrische Installation zu einer merklichen Erhöhung der Baukosten. Unter diesen Bedingungen werden sich die für eine Energieübertragung während der Fahrt erforderlichen Investitionen sicher noch eine längere Zeit verzögern, bis ein wirtschaftlicher Nutzen darstellbar ist. Weiteres schwerwiegende Argumente sind Forderungen nach Kompatibilität zur bestehenden

und Notwendigkeit einer flächendeckenden Infrastruktur. Insbesondere, wenn man die Zeit für die Umsetzung derartiger Infrastrukturmaßnahmen und die darauffolgende Amortisierungszeit rechnet (wohl mindestens 10-20 Jahre) ergeben sich erhebliche Unsicherheiten für eine Investition dieses Ausmaßes. Sollte z.B. nur die Batterietechnologie sich ein wenig verbessern, was in dieser Zeit anzunehmen ist, ist das Thema in die fernere Zukunft verschoben.

4.4 Energieübertragungsmethoden zu sich bewegenden Fahrzeugen

Im Abschnitt 4.3 wurde der Transport elektrischer Energie entlang längerer Fahrtstrecken diskutiert, ohne darauf die Antwort zugeben, wie diese Energie denn zu den sich mit relative hoher Geschwindigkeit bewegenden Fahrzeugen gelangen könnte. In der Vergangenheit wurden bewegliche Fahrzeuge ohne oder mit minimalem „Not“-Speicher über drahtgebundene Energieübertragung mit einer Oberleitung (Bahn, Straßenbahn, Metro) oder 2 Oberleitungen (Trolleybus) versorgt. Bei den schienengebundenen Fahrzeugen geht die Flexibilität im Straßenverkehr (Ausweichmanöver etc.) naturgemäß zu sehr geringen Werten. Trolleybusse gestatten im Rahmen ihrer Ausleger/Stromabnehmer und eingebauten Speicher hier eine höhere Flexibilität, sind aber für den Individualverkehr mit ggfs. hohen Reisegeschwindigkeiten ungeeignet.

Auch wenn von einer „drahtgebundenen“ Energieübertragung gesprochen wird, vergisst man leicht, dass auch hier die Energie als Leistung/Intensität im Poynting-Vektor-Feld $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ und nicht im „Draht“ transportiert wird. Die Gesamt-Leistung ergibt sich dann als $S \cdot A = \int_A \vec{E} \times \vec{H} \cdot d\vec{A}$

Dies ist ein Sachverhalt, der oft auch Elektrotechnik-Studenten im Grundlagenstudium suspekt bleibt: Die Leistung wird nicht in den Leitungen sondern in den sie umgebenden Feldern transportiert, obwohl offensichtlich die Leitungen warm werden. In Wahrheit wird die Leistung zwischen den Leitern transportiert. Die Leiter ermöglichen nur besonders hohe Stromstärken bei geringen Eigenverlusten, die dann ein entsprechend starkes H-Feld verursachen. So werden sehr hohe Leistungsdichten ermöglicht.

Auf sich bewegenden Fahrzeuge ließe sich dies durch Fahrdrabt mit Schleifkontakt übertragen. Dies schränkt jedoch den Spielraum im Individualverkehr inakzeptabel ein. Daher die immer wieder aufkommenden Vorschläge zur drahtlosen Energieübertragung, die scheinbar alles entschärfen können. Viele, wenn nicht die meisten davon, gehen auf den genialen Physiker und Elektrotechnik-Pionier Nikola Tesla zurück, der diese Form der Energieübertragung untersuchte, vielfältig patentierte und erprobte [10].

Alle Ansätze kommen an den allgemeinen Feldgleichungen der Elektrotechnik von Maxwell nicht vorbei. In jedem Fall wird die Energie über die Kombination von elektrischem und magnetischem Feld übertragen. Dies gilt von Gleichstrom bis in den höchsten Frequenzbereich!

Soll also an ein sich bewegendes Fahrzeug die erforderliche Leistung übertragen werden, so muss auf eine „Empfängerfläche“ die nötige elektromagnetische Leistung eingestrahlt werden, effektiv umgewandelt werden und für den Antriebsprozess zur Verfügung gestellt werden. Bei einer sehr optimistischen Schätzung kann man hier von 1m² Empfangsfläche bei einem Fahrzeug ausgehen. Die Empfängerflächen könnten oberhalb oder unterhalb des Fahrzeugs integriert werden.



Für 130km/h eines PKW wären nach obiger Rechnung ca. 30kW erforderlich. Dies entspricht einer mittleren Leistungsdichte von 30kW/m², die mit einem entsprechenden elektromagnetischen Strahlungsfeld bereit gestellt werden müsste. Dies ist im Prinzip technisch kein wirkliches Problem. Die US-amerikanische Initiative eines Schutzschirms gegen russische Raketen unter Präsident R. Reagan hat weltweit vielfältige Lösungen hervorgebracht, die weit höhere Leistungsdichten gerichtet abstrahlen können. Beispiele dafür seien Mikrowellen-Kanonen, chemische Laser elektrisch gepumpte Laser etc.. Hinzu kommen Methoden der resonanten Energieübertragung im Frequenzbereich 100kHz...1GHz, die dann - abhängig von der Frequenz - immer weniger gerichtet gestaltet werden könnten. Zielstellung war allerdings fast immer die Zerstörung eines Objekts. Dabei spielt der in der Energiewirtschaft so fundamentale Begriff des Wirkungsgrads keine Rolle. Ob ein störender Satellit schließlich mit einem Mikrowellenstrahl von 20MJ oder 40MJ pulverisiert wird, spielt für den Auftraggeber keine Rolle. Nur das Ergebnis zählt.

Dies ist in einem sich dem Gemeinwohl verpflichtet fühlenden Energieversorgungssystem anders. Daher kann nur davor gewarnt werden, dass etwas als für die Energieversorgung einsetzbar eingestuft wird, nur weil es in einer militärischen Anwendung funktioniert hat.

Auch wenn es gelingt, den elektromagnetischen Leistungsfluss zu kanalisieren, muss dessen räumliche Ausdehnung drastisch eingeschränkt werden, wie man es mit jedem Transformator tut, in dem das Streufeld die Energie überträgt [5]. Elektrische und magnetische Felder haben vielfältige Wechselwirkungen mit Gegenständen und Lebewesen der Umgebung. Daher wurden 1997 in der Bundesimmissionsschutzverordnung Grenzwerte festgelegt:

Folgende Grenzwerte für gewerblich betriebene feststehende Hochfrequenzanlagen sind in der 26. BImSchV festgelegt (Quelle: Bundesamt für Strahlenschutz):

Frequenz f [MHz]	Elektrische Feldstärke*) E [kV/m]	Magnetische Feldstärke*) H [A/m]
10 - 400	27,5	0,073
400 - 2.000	$1,375 \times f^{1/2}$	$0,0037 \times f^{1/2}$
2.000 - 300.000	61	0,16

*) Effektivwerte, gemittelt über 6-Minuten-Intervalle

Im niederfrequenten Bereich bezieht sich die Verordnung auf die gewerblich betriebenen Anlagentypen: Hochspannungsleitungen, Erdkabel, Transformatoren sowie Bahn- und Stromversorgungsanlagen. Folgende Grenzwerte sind festgelegt:

Frequenz f [MHz]	Elektrische Feldstärke*) E [kV/m]	Magnetische Flussdichte*) [Mikrotesla μ T]
50	5	100
16 2/3	10	300

*) Effektivwerte



Eine „Mikrowelle“ hat bei 800W eine Wellenfront mit einem Querschnitt von ca. $0,075\text{m}^2$. Das entspricht einer Leistungsdichte $10,7\text{kW}/\text{m}^2$, also einem Drittel der oben veranschlagten Leistungsdichte am Fahrzeug. Ein Vogel von der Größe eines Huhns ist bei einer derartigen Leistungsdichte, die in ihm vielfältige Wirkungen verursacht (dielektrische Erwärmung zzgl. induktiver Erwärmung) in wenigen Minuten gar.

Bei niedrigeren Frequenzen geschieht die Energieübertragung weniger gerichtet, es sei denn man sieht entsprechende Maßnahmen durch die Gestaltungsmöglichkeiten des elektromagnetischen Feldes vor. Dies macht aber auch eine besondere Gefahr aus: Die vom Streufeld durchsetzten umgebenden Bereiche werden in die Energieübertragung einbezogen, wenn die Anpassung passt.

Daher lauten die Regeln für eine drahtlose Energieübertragung für sich bewegende Fahrzeuge:

- sogenannte Streufelder konstruktiv eingrenzen/richten, denn in diesen wird vor allem die Energie übertragen
- Hohe „Streufeld“-stärken durch konstruktive Maßnahmen ermöglichen (keine Zusatzverluste durch Wirbelströme oder dielektrische Erwärmung einbauen) .

Die prinzipiellen Probleme bei der drahtlosen Energieübertragung lassen sich verkürzt wie folgt beschreiben:

- Bei hohen Frequenzen ($>100\text{MHz}$) sind die Umwandlungs-Wirkungsgrade für energietechnische Anwendungen indiskutabel (10...75%), jedoch ist eine Ausrichtung auf den Empfänger recht präzise möglich,
- Bei niedrigen Frequenzen erhält man akzeptable Wirkungsgrade, jedoch ist die (gebeugte) Wellenausbreitung des elektromagnetischen Feldes einer hinreichend engen Kopplung des Empfängers an den Sender im Wege, so dass das Streufeld geführt werden muss (z. B. beim Transrapid oder Flurfahrzeugen mit enger magnetischer Kopplung)

Beides führt im Moment und in absehbarer Zukunft, so lange keine fundamental neuen Grundlagentheorien bekannt werden, zu keiner Anwendung des drahtlosen Energie-Transferkonzepts für den Individualverkehr. Die Einsparung von Batterievolumen oder -masse wird durch eine massive Ausweitung der Elektronik für die Wandlung der übertragenen Energie kompensiert. Für Spezialanwendungen, insbesondere im ÖPNV, lassen sich sehr gute Anwendungen schaffen, da die Randbedingungen völlig anders sind als beim allgemeinen Individualverkehr.



5 Zusammenfassung

Die leistungselektronischen Wandler nehmen einen immer größeren Anteil in der Ausrüstung von Fahrzeugen ein. Dieser seit langem zu beobachtende Trend wird durch die Einführung von Hybridfahrzeugen und reinen Elektrofahrzeugen wesentlich im oberen Leistungsbereich der Stromrichter verstärkt. Auf absehbare Zeit wird bei reinen Elektrofahrzeugen die elektrochemische Batterie ggfs. gefolgt durch Brennstoffzellen die elektrische Energie für die Fortbewegung und die Hilfsfunktionen im Fahrzeug bereitstellen. Eine Übertragung der elektrischen Energie während der Fahrt ist nur unter besonderen Randbedingungen sinnvoll.

6 Literatur

- [1] VDN: Richtlinie für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz 12. 9. 2007
- [2] Bendel, C. et al.: Sicherheitsaspekte bei dezentralen netzgekoppelten Energieerzeugungsanlagen -SIDENA - Abschlussbericht BMU-Projekt FKZ 0329900C, Kassel 2006
- [3] Zacharias, P. (Editor): Use of Electronic-Based Power Conversion for Distributed and Renewable Energy Sources. ISET 2008, Kassel
- [4] Cheng, Y.; Joeri, v. M.; Lataire, Ph.: Control Principle and Modulation Method for Bi-directional and Dual-coupled Series Resonant Converters. EPE2007
- [5] Hermann, F; Schmid, G.: The Poynting Vector Field and the Energy Flow within a transformer. American Journal of Physics 54(6) June 1986, pp. 528-532
- [6] Burger, B.; Zacharias, P.; Cramer, G.; Kleinkauf, W.: Inverters for Modular Electric Energy Supply Systems. 16. EUPVSEC, Glasgow 2000
- [7] <http://de.wikipedia.org/wiki/Rollwiderstand>
- [8] Mecke, R.: Contactless Inductive Energy Transmission Systems with Large Air Gap. EPE2001
- [9] Mecke, R.: Contactless power transmission with secondary A.C./A.C. converter. PCIM2008 Nürnberg
- [10] Стребков, Д. С., Некрасов, А. И. Резонансные Методы Передачи Электрической Энергии. 2. изд., Москва ГНУ ВИЭСХ 2006. ISBN 5-85941-179-0
- [11] Zacharias, P.: Randbedingungen und technische Konzepte für die netzgekoppelte Ladung und Entladung von Batterien in Fahrzeugen. 1. Braunschweiger Symposium zum Thema „Elektrische Leistungsbordnetze und Komponenten von Straßenfahrzeugen, 2008
- [12] E-CONTROL: Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Nutzer von Netzen. Teil D: Besondere Technische Regeln. Version 2.2, Wien 2006



- [13] <http://kropla.com/electric2.htm>. Updated 16 April 2009
- [14] Philippow, E.: Taschenbuch Elektrotechnik. Bd. 1
- [15] Brakelmann, H.: Netzverstärkungs-Trassen zur Übertragung von Windenergie: Freileitung oder Kabel? Studie. BWE 2004
- [16] <http://de.wikipedia.org/wiki/Autobahn>
- [17] Rehtanz, Chr., Rolink, J.: Netzintegration und Lastmanagement von Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen. VDE: ETG Mitgliederinformationen Juni 2010. Nr. 2, S. 6-10
- [18] <http://www.betterplace.com/>



Vehicle to Grid Communication Interface

(Elektromobilität und Smart Grid Kommunikation)

Dr. Jörg Heuer
GTF Control Networks
Corporate Technology
Siemens AG



Table of Content

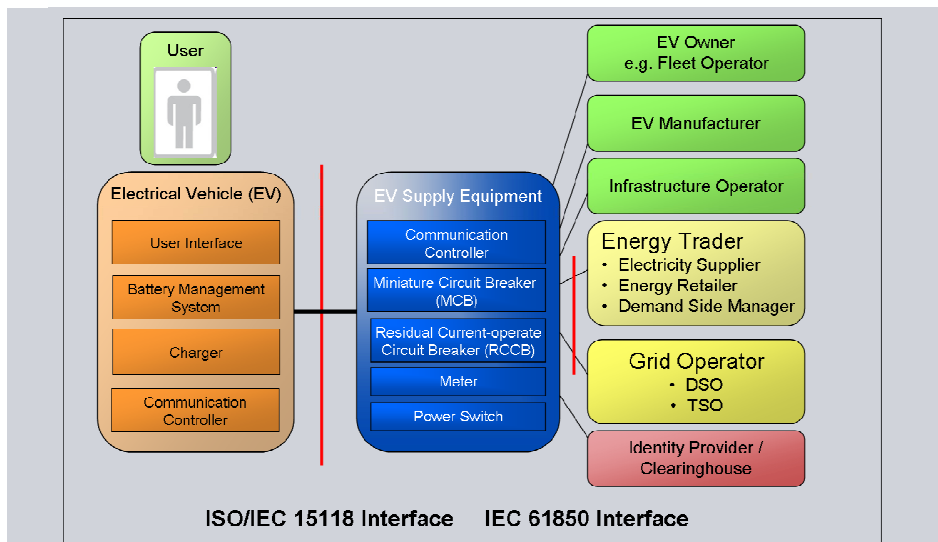
Motivation:	Challenges integrating electrical vehicles into the grid (V2G)
Stakeholders:	Who has to be considered for the V2G interface
Standardization V2G:	Current status
The Grid Perspective:	The concept of the distributed variable energy resource (DVER)
How does it fit together:	A proposed mapping of V2G and Smart Grid protocols
Conclusion:	V2G is an example use case for the grid adaptation layer

Motivation: Challenges integrating vehicle into the grid (V2G)

- How can the penetration of EVs balance the fluctuation of renewable energy resources?
- How to avoid overload situations in the grid?
- How can auxiliary services be provided?
- How to enable public charging infrastructure with roaming users?
- How can mobility be ensured for the user?

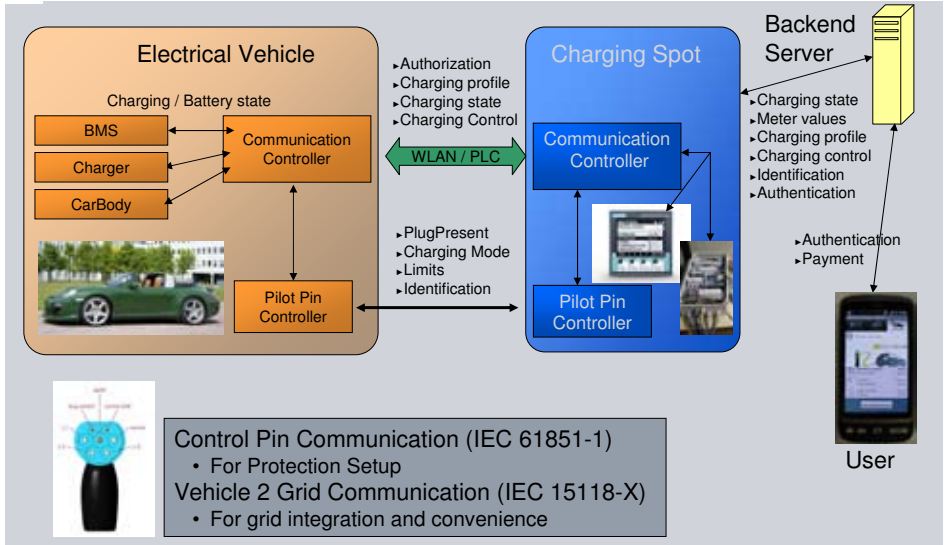


Vehicle 2 Grid Control Interface ISO/IEC 15118 Relevant Stakeholders

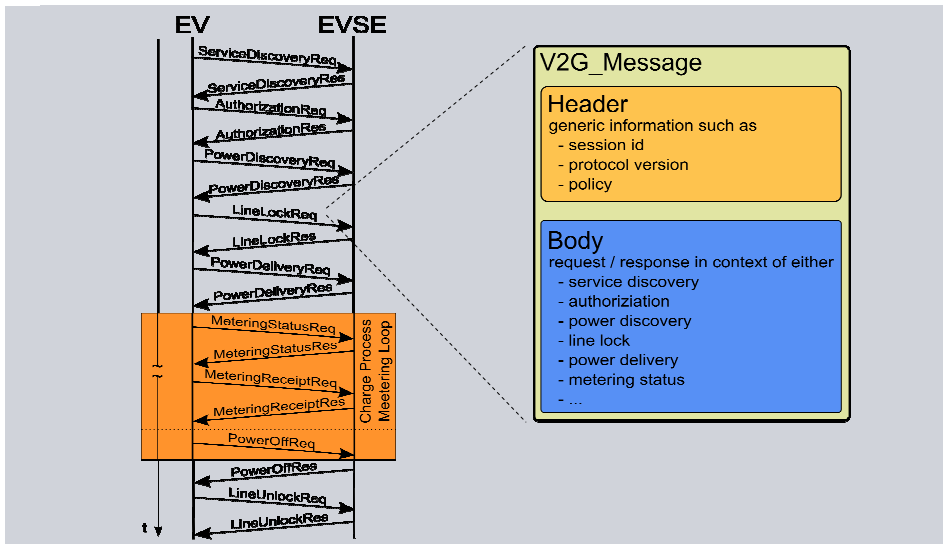




Prototypical Implementation of ISO/IEC15118



ISO/IEC 15118-X V2G Standardisation Sequence diagram of the charging process



Dual Use of EVs: User interaction enabled at all times



First demonstration of current ISO/IEC 15118 status





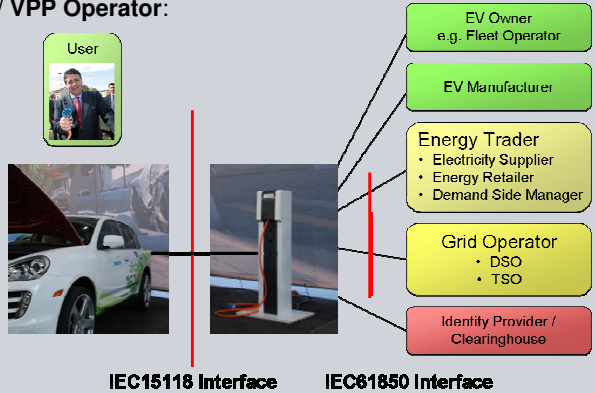
Vehicle 2 Grid Control Interface ISO/IEC 15118 The Grid Perspective

ISO/IEC15118 V2G Control Interface – a first conclusion:

- Focuses on the interface between charge spot and eCar
- Fulfills requirements of a diversity of stakeholders in eMobility

Requirement of the Grid / VPP Operator:

- V2G view which suits Grid / VPP operator perspective
- Modeling as energy resource based on IEC61850



Modeling of Decentralized Variable Energy Resources (DVER)

New control paradigm for DVER

- DVER is controlled by an independent operator
- No direct control by the VPP or Grid Operator in terms of the DER in IEC61850-7 (except in irregular situations)

Modeling of paradigm based on IEC 61850

- Proposal of new Logical Node „DVER“ to model offered variability of the energy resource
- Use of existing Logical Nodes for monitoring and requests
- No direct „Operate“ or „Control“ of the resource

Options for the Grid / VPP Operator

- Distributed Monitoring of the VPP or distribution grid
- Aggregation of working points and control options of DVERs
- Balancing of grid load and requesting of auxiliary services

IEC 61850 Logical Nodes for Decentralized Energy Resources

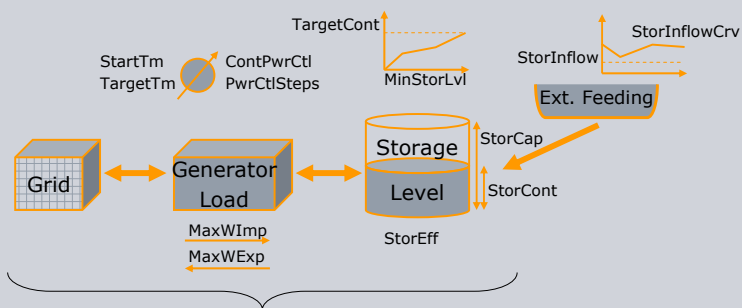
Already standardized

- | | | |
|--------|--------------------------------|--|
| ▪ LPHD | Physical device description | } Generic description and administration |
| ▪ LLN0 | Logical node zero | |
| ▪ MMXU | Measurement | } Grid state and energy monitoring |
| ▪ MMTR | Metering | |
| ▪ DSCH | DER energy schedule | } Control and scheduling |
| ▪ DSCC | DER energy schedule control | |
| ▪ DRCT | DER controller characteristics | } Control of auxiliary services |
| ▪ DRCC | DER controller | |

Additionally Proposed

- | | | |
|--------|--|---|
| ▪ DVER | Decentralized variable energy resource | } Offered variability of decentralized energy resources |
|--------|--|---|

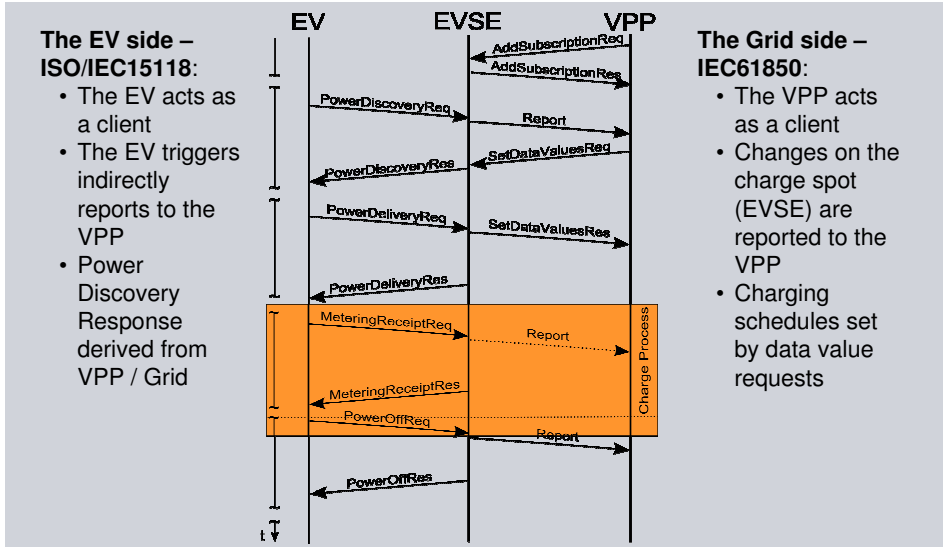
DVER: Simplified Block Diagram and Applicability for EVs



View of an EV connected to the grid as a distributed variable energy resource



ISO/IEC 15118-X / IEC61850 Gateway How does it fit together?



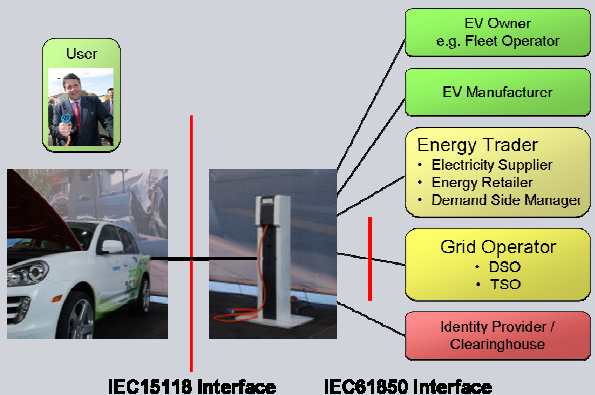
Conclusion I: The Grid / VPP Perspective on ISO/IEC 15118

ISO/IEC15118 V2G Control Interface:

- Focuses on the interface between charge spot and eCar
- Fulfills requirements of a diversity of stakeholders in eMobility

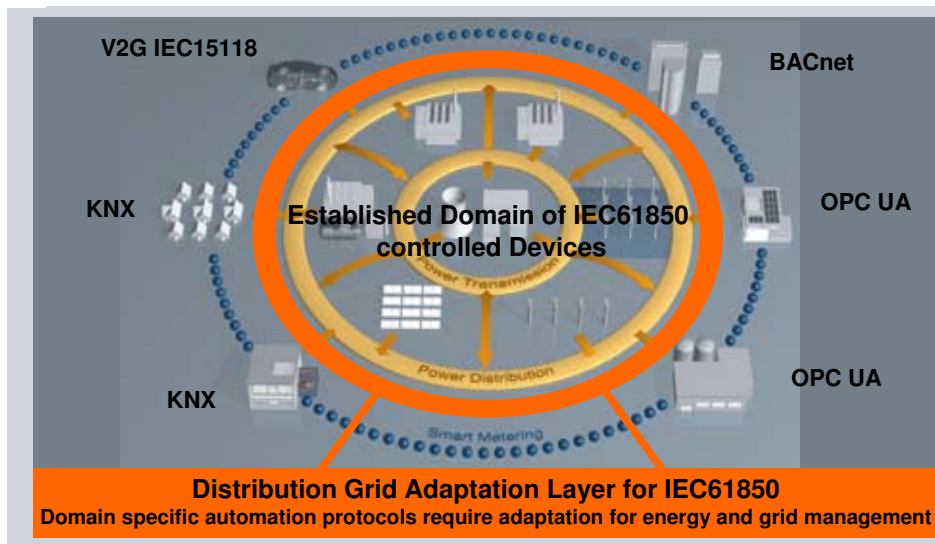
Mapping to IEC61850:

- Models eCar as DVER
- Enables load management
- Enables voltage control in the distribution grid





Conclusion II: V2G is one example of a unified Energy Management Interface for the Smart Distribution Grid





Geschäftsmodelle Elektromobilität

Anke Weidlich

SAP AG, Research Center Karlsruhe

Vincenz-Priefnitz-Str. 1, 76131 Karlsruhe

Tel.: (06227) 7-52550, Fax: (06227) 78-52856

E-Mail: anke.weidlich@sap.com

1 Einleitung

Die Machbarkeit von elektrischen Antrieben ist bereits seit über 100 Jahren bewiesen. Jedoch bestimmt nicht allein die technische Ausreifung der benötigten Komponenten den Erfolg von Mobilitätskonzepten, sondern ebenso die nicht-technischen Faktoren, allen voran das Angebot an komfortablen Nutzungsangeboten als Teil von tragfähigen Geschäftsmodellen.

Elektrofahrzeuge müssen die heute bestehenden Nachteile der geringen Reichweite und der im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen höheren Anschaffungskosten durch neue Mobilitätskonzepte ausgleichen, um für den Nutzer interessant zu sein. Hierbei müssen in verschiedenen Branchen parallel Lösungen entwickelt werden, um zur massenhaften Verbreitung der Elektromobilität beizutragen, insbesondere in den Bereichen Fahrzeugtechnologie, Ladeinfrastruktur und Informations- und Kommunikationslösungen. Der sorgfältigen Entwicklung und Analyse von darauf aufbauenden Geschäftsmodellen kommt eine hohe Bedeutung zu. Um eine Abschätzung dazu zu treffen, welche mögliche Lösungen Erfolg versprechend sind und welche relativ zügig umzusetzen sind, wurde eine Expertenbefragung durchgeführt und verschiedene mögliche Geschäftsmodelle bewertet. Die Ergebnisse dieser Befragung sowie einige Betrachtungen zur Weiterentwicklung von Mobilitätskonzepten, die den Einstieg in die Elektromobilität erleichtern, werden in diesem Artikel vorgestellt.

2 Elektromobilität erfordert neue Mobilitätsmodelle

Insbesondere für die jüngere Generation spielt heute der Besitz eines Automobils eine geringere Rolle als in der Vergangenheit. In Japan, wo dieser Trend schon seit längerem beobachtet wird, wurde hierfür bereits der Begriff „Kuruma Banare“ geprägt, der übersetzt „Demotorisierung“ bedeutet. Der daraus resultierende geringere Absatz an Fahrzeugen, der auch die deutsche Automobilindustrie vor neue Herausforderungen stellt, ist jedoch nicht gleichbedeutend mit geringerer Mobilität. Junge wie ältere Menschen sind heute sehr mobil, was sich durch eine höhere Anzahl an Wegen und größere zurückgelegte Strecken ausdrückt [1]. Es werden heute vielfältigere Verkehrsangebote genutzt, darunter auch neue Mobilitätskonzepte wie das Carsharing oder der ad-hoc Zweiradverleih. Beispiele hierfür sind das Call-a-Bike Angebot der Deutschen Bahn oder das Modell Vélib' in Frankreich.

Viele Automobilhersteller denken aufgrund dieser Entwicklungen bereits über ganzheitliche Mobilitätsdienste nach, die über den reinen Verkauf von Fahrzeugen hinausgehen. Ein prominentes Beispiel hierfür ist „car2go“, das Daimler derzeit in Ulm (und auch in Austin, Texas) testet. Auch das Angebot „Mu“ von Peugeot, durch das Kunden mit einer im Internet aufladbaren Prepaid-Karte eine Fülle von Verkehrsdienstleistungen nutzen können, ist ein Schritt in diese Richtung.

Elektrofahrzeuge haben als einen wesentlichen Nachteil gegenüber konventionellen Fahrzeugen eine deutlich geringere Reichweite (ca. 80-150 km). Eine spürbare Erhöhung der Reichweite von Elektroautos ist in naher Zukunft nicht abzusehen. Da sowohl Schnellladungs- als auch Batteriewechsellösungen derzeit noch nicht zur Verfügung stehen, kann dieser Nachteil erstens durch (i) eine IT-gestützte Wegeplanung mit Anzeige der nächsten Lademöglichkeiten inkl. Reservierungsfunktion und zweitens durch neue (ii) Mobilitätsangebote bestehend aus der Nutzung von Elektrofahrzeugen kombiniert mit einem einfach einlösbaren Nutzungsrecht anderer Verkehrsträger für Langstrecken (z.B. Bahn oder auch ein konventionelles Fahrzeug), ausgeglichen werden.

Ein weiteres Problem von Elektroautos im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor sind die hohen Kosten für die Batterien. Auch dieser Nachteil wird sich in naher Zukunft nicht beheben lassen. Im Gegensatz zu den hohen Anschaffungskosten sind die Betriebskosten von Elektrofahrzeugen vergleichsweise günstig, da sowohl die Energiekosten aufgrund höherer Effizienz niedriger sind, als auch Ölwechsel und Wartung nicht bzw. in deutlich geringerem Umfang anfallen. Diese Kostensituation spricht sehr dafür, Elektroautos kollektiv zu nutzen, etwa als Mietwagen oder innerhalb von Carsharing-Verbänden. Die entsprechende Ladeinfrastruktur könnte dann gezielt an den Stellen, an denen kollektiv genutzte Fahrzeuge abgestellt werden, aufgebaut werden. Auch diese neuartigen Fahrzeugnutzungskonzepte basieren stark auf leistungsfähigen IKT-Systemen für die Buchung, die Abrechnung und für Serviceangebote. Die Unternehmensberatung Frost & Sullivan [2] geht in einer aktuellen Studie davon aus, dass insbesondere der Carsharing-Markt in den nächsten Jahren stark wachsen wird - geschätzte Nutzerzahlen bis 2016 in Europa: 5,5 Millionen, davon 1,1 Millionen in Deutschland - und dass ab 2012 jeder dritte Neuwagen eines Carsharing-Fuhrparks ein Elektroauto sein wird. Deutschland wird in dieser Entwicklung das größte Potential beigemessen, da erwartet wird, dass es hierzulande die meisten Ladestationen geben wird.

3 Mögliche Geschäftsmodelle für die Elektromobilität und ihre Bewertung

Aus den beschriebenen neuen Mobilitätskonzepten ergeben sich mögliche neuartige Geschäftsmodelle für neue Serviceanbieter. Es werden Unternehmen in den Markt für Elektromobilität eintreten, die dem Elektromobilitätskunden Dienstleistungen aus mehreren Geschäftsfeldern wie dem herkömmlichen Verkauf von Fahrzeugen, der Vermietung von Fahrzeugen und auch dem öffentlichen Nah- und Fernverkehr anbieten und damit auch innovatives Geschäftswissen aufbauen. Gleichzeitig wird es Dienstleister geben, die sich auf bestimmte Produkte spezialisieren, bspw. auf den Aufbau und den Betrieb der Ladeinfrastruktur.



3.1 Begriffsbestimmung und Expertenbefragung

Geschäftsmodelle werden üblicherweise durch drei Bestandteile beschrieben [3]: (i) das Nutzenversprechen, das beschreibt, wie für den Kunden ein Nutzen geschaffen wird, (ii) die Architektur der Wertschöpfung, d.h. der Prozess, durch den der Nutzen hergestellt wird und (iii) das Ertragsmodell, welches beschreibt, wie durch das Geschäftsmodell ein Ertrag erwirtschaftet werden kann.

In Abhängigkeit von der Anwendungsdomäne können Geschäftsmodelle anders definiert werden, z.B. [4, 5, 6]. In der vorliegenden Untersuchung werden die oben genannte Definition und zusätzliche Konzepte aus [7] verwendet. Zur Untersuchung Erfolg versprechender Geschäftsmodelle im Bereich der Elektromobilität wurde auf Basis von Workshops und Literaturanalyse (z.B. [8]) eine Liste relevanter Geschäftsmodelle erstellt und diese im Rahmen von Experteninterviews auf Ihre Relevanz für die Phase der Einführung von Elektrofahrzeugen bis 2020 hin bewertet.

Es wurden insgesamt zwölf Interviews von jeweils 20 bis 45 Minuten Dauer mit Vertreterinnen und Vertretern aller relevanten Branchen (im Wesentlichen Automobilindustrie, Energieversorgung und IT-Branche), vorwiegend aus Großunternehmen, durchgeführt. Die Interviews waren semi-strukturiert [9] und wurden in einem persönlichen Treffen oder telefonisch durchgeführt. Den Experten wurde eine Liste möglicher Geschäftsmodelle vorgelegt, die sie kommentieren und in Bezug auf ihre Umsetzungsrelevanz in den nächsten zehn Jahren bewerten konnten. Die Relevanz konnte auf einer eindimensionalen Likert-Skala zwischen 3 = „sehr hoch“ und 1 = „niedrig“ eingestuft werden. Aus den von den Experten genannten Werten wurde anschließend ein Durchschnittswert errechnet, der in Tab. 1 aufgeführt wird.

Tab. 1: Geschäftsmodelle und deren Bewertung

Rang	Geschäftsmodell	Mittelwert
1	Abrechnung über Festvertrag	2,82
2	Integriertes Angebot Elektroauto und Ökostromvertrag	2,75
3	Leasing von Elektroautos	2,67
4	Kombinierte Abrechnung von parken und laden	2,58
4	Mobility on Demand nach gefahrenen km (Car2Go)	2,58
6	Infrastruktur wird von Stromlieferanten betrieben	2,55
7	Kauf und Verkauf von Strom über das Vehicle-2-Grid Konzept	2,5
7	Applikation Ortung favorisierter/freier Ladestationen	2,5
9	Multimodale Mobilitätsdienste	2,42
9	Leasing von Batterien um Anschaffungskosten zu senken	2,42
11	Schnellladung	2,42

Rang	Geschäftsmodell	Mittelwert
12	Infrastruktur wird von neuen Akteuren betrieben	2,36
13	Clearinghouse	2,33
14	Verkauf von Smart Home Systemen	2
14	Applikation Anzeige von Energieverbrauchsparametern	2
14	Service Provider	2
14	Aggregator	2
14	Fahrzeugservices	2
14	Drahtlose Ladung	2
20	Ganzheitliches Angebot: Strom und Elektroauto	1,92
21	Infrastructure Provider	1,82
21	Ad-Hoc Abrechnung	1,82
22	Abrechnung über Prepaid Konzept	1,55
23	Integriertes Leasing von Batterien und Batteriewechsel	1,08

Die Geschäftsmodelle wurden in eine Reihenfolge gebracht beginnend mit dem Modell mit dem höchsten Durchschnittswert (Rang 1) bis zu dem am niedrigsten bewerteten Modell. Auch diese Angaben sind Tab. 1 zu entnehmen. Zusätzlich zu den qualitativen Bewertungen konnten weitere Einschätzungen in Form von Kommentaren abgegeben werden, die gesondert ausgewertet wurden.

Das nach Einschätzung der Experten am ehesten Erfolg versprechende Geschäftsmodell in der Elektromobilität ist das Angebot eines Vertrags mit nachlaufender Zahlung, bei dem ein Anbieter alle Ladevorgänge auf einer Rechnung ausweist, auch wenn hierbei die Leistungen anderer Infrastruktur- und Diensteanbieter in Anspruch genommen wurden. Insbesondere die Zusicherung der Lieferung von Ökostrom hat nach Einschätzung der Experten eine hohe Umsetzungschance, da davon ausgegangen wird, dass sich die Kunden vor allem deshalb für Elektromobilität interessieren werden, weil sie die Möglichkeit einer CO₂-freien Mobilität bietet.

Aus der Bewertung der Geschäftsmodelle und aus den Kommentaren der Experten ließen sich eine Reihe weiterer Schlüsse in Bezug auf tragfähige Geschäftsmodelle ziehen, z.B.:

- Vehicle-to-Grid Dienste werden als schwierig zu realisieren eingeschätzt, da Energieversorgungsunternehmen und Unternehmen aus der Automobilindustrie keine Erfahrung in der Zusammenarbeit haben. Die Echtzeit-Preisbildung und der Austausch von hochaufgelösten Messdaten stellen weitere Herausforderungen dar.
- Das kombinierte Angebot von parken und laden wird als interessanter Zusatzdienst für Restaurants, Rasthöfe oder Geschäfte/Einkaufszentren angesehen. Es ist davon auszugehen,



das das Angebot zu einem Festpreis oder kostenlos angeboten wird, da die Kosten einer Einzelerfassung die Vorteile einer detaillierteren Abrechnung nicht kompensieren.

- Es wird nicht davon ausgegangen, dass die hohen Kosten der Errichtung einer ausreichenden Ladeinfrastruktur sich allein durch den Stromverkauf rentieren werden. Die Infrastruktur muss entweder durch anderweitige Nutzung (wenn möglich) oder durch Subventionen refinanziert werden.
- Es werden gegenseitige positive Effekte von einer Verknüpfung von Hausautomatisierungssystemen und intelligentem Lademanagement für Elektroautos erwartet.
- Zur Abwicklung der zahlreichen Ladevorgänge für die Abrechnung, und zur Realisierung eines „Roamings“, d.h. Mitnutzung der Ladeinfrastruktur von anderen Anbietern, mit denen der Kunde keine direkte Vertragsbeziehung hat, wird sich mittelfristig ein Clearinghouse etablieren, das als Datendrehscheibe zwischen den Akteuren fungiert. Allerdings ist noch unklar, wer ein solches Clearinghouse betreiben soll.

3.2 IT-Anforderungen für Geschäftsmodelle in der Elektromobilität

Eine wesentliche Voraussetzung für eine komfortable Nutzung von Elektrofahrzeugen ist nach Einschätzung der befragten Experten ein Vertragsmanagement mit integrierter Abrechnungsfunktionalität, durch die ein Fahrer jede Lademöglichkeit unabhängig vom Netzgebiet oder vom jeweiligen Ladestationsbetreiber nutzen kann und die entsprechenden Geldbeträge automatisch über einen individuellen Vertrag in Rechnung gestellt bekommt. Anders als bei heutigen Betankungsvorgängen sind die abzurechnenden Geldbeträge pro Ladevorgang sehr gering, d.h. die Abwicklungskosten hierfür müssen sehr niedrig sein, was nur durch eine vollständige Automatisierung über standardisierte IKT-Prozesse ermöglicht werden kann. Die Anbieter müssen untereinander kooperieren, damit der Kunde gleichzeitig mehrere Dienstleistungen von unterschiedlichen Anbietern nutzen kann, aber nur mit einem Anbieter ein Vertrag schließen muss. Dies erfordert Datenaustauschprozesse, die einerseits für den Markt standardisiert sein könnten, andererseits aber auch die Sicherheitsanforderungen und Datenschutzbestimmungen erfüllen.

Für den Betrieb der Stromnetze ist es aus wirtschaftlicher Sicht interessant, Elektrofahrzeuge als Zwischenspeicher für günstig verfügbare Strommengen zu nutzen. Zu bestimmten Zeiten, z.B. wenn günstiger Strom aus Windenergie oder anderen erneuerbaren Quellen zur Verfügung steht aber aufgrund geringer Nachfrage (z.B. nachts) nicht genutzt werden kann, könnten Fahrzeugbatterien aufgeladen werden. Umgekehrt könnten die Fahrzeuge auch Strom in das Netz einspeisen, um Lastschwankungen auszugleichen, sofern dies der Nutzung der Fahrzeuge nicht entgegensteht. Diese sogenannten „Vehicle-to-Grid“-Dienste [10] erfordern ebenfalls leistungsfähige IKT-Systeme. IKT-Systeme ermöglichen die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und der Netzleittechnik und erfassen genau die entnommenen und eingespeisten Strommengen mit den jeweiligen Ladezeitpunkten. Damit kann eine verursachungsgerechte und dadurch anreizkompatible Preisfindung und Abrechnung der Energiemengen vorgenommen werden. Auch wenn Vehicle-to-Grid, insbesondere die Rückspeisung von Strom aus dem Auto in das Netz, erst mittel- oder langfristig technisch realisierbar ist, sollten sich Optimierungsverfahren für die zeitliche Koordination von Ladevorgängen bereits in einer frühen Phase der Verbreitung von Elektromobilität etablieren, um die Anforderungen an einen Ausbau der Verteilnetze gering zu halten.

3.3 Umsetzungsprioritäten

Die Umsetzung von Elektromobilitäts-Geschäftsmodellen steht noch sehr am Anfang. Um tragfähige Konzepte zu etablieren, müssen zuerst die technischen Anforderungen implementiert werden. Da in der Elektromobilität jedoch mehrere Branchen zusammentreffen, die teilweise vorher noch wenig miteinander gearbeitet haben, ist auch die Etablierung neuer Kooperationen und Allianzen nötig, um der Elektromobilität zum Durchbruch zu verhelfen. Um die Umsetzungswahrscheinlichkeiten neuer Geschäftsmodelle abzuschätzen, ist es hilfreich, sowohl deren technische als auch organisationale Komplexität zu untersuchen und in einem abgestuften Vorgehen zunächst die einfach umzusetzenden Modelle zu implementieren und parallel dazu die Voraussetzungen für die Umsetzung der komplexeren Konzepte zu schaffen.

Die Komplexität der technischen Realisierung berücksichtigt den Stand der Technik und die Frage, welche benötigten Komponenten bereits vorhanden sind bzw. wie einfach neue entwickelt werden können. Für die Elektromobilität sind hier insbesondere die Batterietechnologie, die Leistungselektronik, die Netzanbindung bzw. das Netzmanagement und neue IT-Applikationen entscheidend.

Die organisationale Komplexität berücksichtigt die Anzahl der verschiedenartigen Akteure bzw. Branchen, die zusammen arbeiten müssen, um ein Geschäftsmodell umsetzen zu können. Je mehr Akteure an einem Strang ziehen müssen, umso schwieriger wird die Umsetzung, insbesondere wenn die entsprechenden Firmen wenig Erfahrung in der Zusammenarbeit mit der relevanten Branche haben. Bei der Elektromobilität ist sowohl die Kooperation zwischen der Automobilindustrie und der Energieversorgungsbranche Neuland, als auch die stärkere Kooperation zwischen Automobilbranche und IT-Unternehmen. Dies erschwert die Umsetzung übergreifender Elektromobilitätsmodelle, sodass es einige Zeit dauern wird, bis diese kommerziell betrieben werden können.

Ausgehend von diesen beiden Dimensionen lassen sich Geschäftsmodelle für Elektromobilität in Bezug auf ihre Umsetzungspotentiale wie folgt kategorisieren (siehe auch Abb. 1):

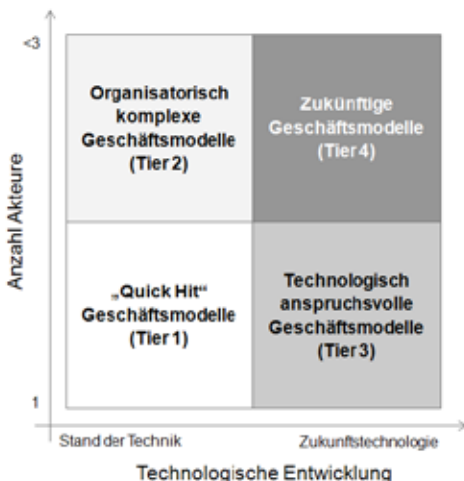


Abb. 1: Klassifizierung der Geschäftsmodelle nach ihrer Komplexität



“Quick Hit” Geschäftsmodelle: niedrige technologische und organisationale Komplexität - im Wesentlichen Abwandlungen bisheriger Geschäftsmodelle, die schnell umgesetzt werden können

- Abrechnungsmodelle über Festvertrag
- E-Mobility Dienste über Smart Phone

Organisational komplexe Geschäftsmodelle: Niedrige technologische und hohe organisationale Komplexität - kann nur durch gemeinsame Anstrengungen unterschiedlicher Akteure umgesetzt werden

- Verknüpfung von Fahrzeug und Ökostromangebot
- Internetapplikationen
- Kombinierte Abrechnung von parken und laden
- Multimodale Mobilitätsangebote
- Batterieleasing
- „Mobility on Demand“

Technologisch anspruchsvolle Geschäftsmodelle: Hohe technologische und niedrige organisationale Komplexität - erfordert technologische Durchbrüche

- Schnellladung
- Induktive Ladung

Zukünftige Geschäftsmodelle: hohe technologische und organisationale Komplexität - schwierige Umsetzung, hohe technische und organisationale Hürden

- Vehicle-to-Grid Dienste
- Einbindung in Smart Home Systeme

4 Fazit

Die Entwicklung und Umsetzung tragfähiger Geschäftsmodelle und Geschäftsprozesse sind für den Erfolg der Elektromobilität von zentraler Bedeutung. Deren Umsetzung erfordert den Einsatz von entsprechender Informationstechnik, unterstützt durch eine zuverlässige Kommunikationsinfrastruktur. Die beschriebenen neuen Mobilitätskonzepte erfordern IT-gestützte Prozesse wie die Reservierung und Buchung von Fahrzeugen. Den reibungslosen Ladeprozess gewährleisten die Einbindung zusätzlicher Services wie standortbasierte Informationen zu Lademöglichkeiten, Parkplatzreservierungen und eine energieoptimierte Routenplanung. Auch die Entwicklung multimodaler Geschäftsmodelle (Verknüpfung mit öffentlichem Nah- und Fernverkehr oder „Charge & Rent“-Verträgen mit Autovermietungen, die konventionelle Fahrzeuge für längere Strecken bereitstellen) wird an Bedeutung gewinnen und wird durch IKT maßgeblich ermöglicht. Für alle angebotenen Services zur Elektromobilität werden Verträge mit Endkunden geschlossen und bearbeitet. IT unterstützt und ermöglicht hier die Abwicklung von Massenprozessen sowie den benutzerfreundlichen automatisierten Betrieb.



5 Literatur

- [1] R. Follmer, D. Gruschwitz, B. Jesske, S. Schulte, A. Schulz, C. Nobis, K. Köhler (2008): *Mobilität in Deutschland 2008, Dritter Zwischenbericht.*
- [2] Frost & Sullivan (2010). *Sustainable and Innovative Personal Transport Solutions - Strategic Analysis of Carsharing Market in Europe, Studie M4FA-18.*
- [3] Stähler, P. (2002): *Business Models as a Unit of Analysis for Strategizing, International Workshop on Business Models, Lausanne.*
- [4] Timmers, P (1998): *Business Models for Electronic Markets, Electronic Markets 8, S. 3-8.*
- [5] Osterwalder, A (2005) *The Business Model Ontology - A Proposition in a Design Science Approach, Doktorarbeit, Université de Lausanne.*
- [6] Chesbrough, B. H., R S. Rosenbloom (2002): *The Role of the Business Model in Capturing Value from Innovation: Evidence from Xerox Corporation's Technology Spinoff Companies, Industrial and corporate change 11 (3), S. 529.*
- [7] Boehnke, J. and R. Wüstenhagen (2007): *Business Models for Distributed Energy Technologies - Evidence from German Cleantech Firms, Academy of Management Annual Meeting, Philadelphia.*
- [8] Stiller, S., F. Collani, R. Kapherr, M. Lange, L. Leschus, D. Schwarz, H. Vöpel (2009): *Strategie 2030 - Mobilität, Strategie 2030 - Vermögen und Leben in der nächsten Generation, Nr. 10, Berenberg Bank & HWWI (Hrsg.), Hamburg.*
- [9] Stier, W (1996): *Empirische Forschungsmethoden, Springer Verlag, Berlin.*
- [10] Kempton, W. and J. Tomic (2005): *Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue, Journal of Power Sources 144 (1), S. 268-279.*

Dieser Artikel basiert u.a. auf Arbeiten von Sebastian Walther, Ivan Markovic, Isabel Thomas und Martin Johns, denen an dieser Stelle herzlich gedankt wird.



Wasserstoff und Elektromobilität - ein Zukunftsmodell ?

Hubert Landinger, Dr. Ulrich Bünger
Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH
Daimlerstr. 15, 85221 Ottobrunn
Tel.: (089) 608110-37, Fax: (089) 6099731
E-Mail: hubert.landinger@lbst.de

1 Einleitung

Zurzeit wird sowohl in der Öffentlichkeit als auch in Politik und Industrie sehr intensiv über das Thema Elektromobilität diskutiert. Dabei wird häufig übersehen, dass Elektromobilität neben den reinen Batteriefahrzeugen auch noch weitere Antriebsarten zum Beispiel Plug-in-Hybride und Brennstoffzellenfahrzeuge umfasst. Dieser Beitrag wird vergleichend auf die verschiedenen Technologien eingehen und darlegen, in welchen Fahrzeugsegmenten sich welche Technologien anbieten werden. Zunächst wird aber kurz erläutert, warum ein Übergang von einem Kraftstoffbasiertem Energiesystem auf ein strombasiertes Energiesystem stattfinden wird. Im letzten Teil wird dann anhand verschiedener Beispiele aus der Automobilindustrie aufgezeigt, wie sich die Automobilhersteller dem Thema Wasserstoff- und Brennstoffzellenfahrzeuge stellen und wie weit sie auf diesem Weg bereits vorangeschritten sind.

2 Von fossiler zu regenerativer Energieerzeugung

Unsere Energieversorgung ist dabei, sich grundlegend zu verändern. Dieser Wandel ist aus Ressourcensicht erforderlich und umweltpolitisch begrüßenswert, da er einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann, indem der Ausstoß schädlicher Treibhausgase durch die Einsparung fossiler Energieträger reduziert wird. Ursächlich für diese Veränderungen ist das Erreichen der Fördermaxima von Öl, Erdgas, Kohle und Uran. Der unmittelbar darauf folgende Rückgang bei diesen Energieträgern kann nur kompensiert werden durch den Zubau von erneuerbaren Energiequellen, der derzeit, begünstigt durch die zunehmende Wirtschaftlichkeit insbesondere bei Windenergie und Photovoltaik, neue Möglichkeiten, aber auch Herausforderungen für eine nachhaltigere Energieversorgung schafft. Wie in Abb. 1 zu sehen ist, wird zukünftig der überwiegende Anteil der Energie bereits in Form von Strom „gewonnen“ (Solarthermische Kraftwerke, Photovoltaik, Windkraft, Wasserkraft) wohingegen die Biomasse, die einzige erneuerbare Energiequelle, die als Brennstoff zur Verfügung stehen wird, zwar mittelfristig von hoher Bedeutung sein wird, aber langfristig nur einen relativ überschaubaren Anteil an der gesamten Energieversorgung übernehmen können wird.



3 Entwicklungsstand Fahrzeuge und Infrastruktur

Zunächst kann festgehalten werden, dass sich bis zum heutigen Zeitpunkt kein nennenswerter Markt für Elektrofahrzeuge etablieren konnte - weder für Plug-in-Hybride (PHEV), noch für Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV), noch für Batteriefahrzeuge (BEV). Die größte Marktaktivität ist bei den BEV zu verzeichnen, da dort zum einen verschiedene Kleinfahrzeuge mit meist konventioneller Batterietechnik angeboten werden (z.B. CityEl, ThInk, Twike, etc.) und zum anderen erste Fahrzeuge im Hochpreissegment kommerziell angeboten werden (z.B. Tesla Roadster). Darüber hinaus gibt es erste Fahrzeuge von Umrüsterfirmen (z.B. Karabag).

Für alle Antriebstechnologien gilt - sofern überhaupt Demonstrationsfahrzeuge oder Fahrzeuge aus Kleinserien zur Verfügung stehen - die Fahrzeuge sind entweder teuer oder man ist in deren Nutzung stark eingeschränkt.

Plug-in-Hybridfahrzeuge eignen sich zwar hervorragend als Brückentechnologie, da sie auch vollkommen ohne neue Infrastruktur auskommen. Allerdings werden auch langfristig die Fahrzeugkosten im Vergleich zu den Alternativen hoch sein, da zwei separate Systeme integriert werden müssen. Verschiedene Hersteller bereiten derzeit die Markteinführung von Plug-in-Hybridfahrzeugen vor.

Batteriefahrzeuge (BEV) eignen sich zunächst und grundsätzlich für den Kurzstreckenverkehr. Bei der Eroberung weiterer Einsatzfelder spielt die Lösung eines umfangreichen Zielkonflikts eine entscheidende Rolle. Das Erreichen kombinierter Ziele, die sich teilweise sogar umgekehrt proportional beeinflussen, wird maßgeblich den Erfolg der Batteriefahrzeuge bestimmen. Als wesentliche Einflussfaktoren sind hier zu nennen: Reichweite, Schnellladefähigkeit, Sicherheit, Zuladung, Betriebstemperatur und Lebensdauer Batterie, Heizung / Klimatisierung und nicht zuletzt die Kosten des Fahrzeugs.

Die Entwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) läuft bereits seit längerer Zeit auf einem mehr oder weniger konstanten Niveau. Prototypen und Kleinserien haben bereits eindrucksvoll bewiesen, dass Brennstoffzellenfahrzeuge über alle Fahrzeugklassen hinweg, den heutigen Modellen in Sachen Performance und Fahrkomfort gewachsen, wenn nicht sogar überlegen sind. Bereits mit heutiger Technologie könnten, entsprechende Stückzahlen in der Fertigung vorausgesetzt, die erforderlichen techno-ökonomischen Ziele, nämlich die Erreichung der Performance und das Kostenniveau eines Diesel-Hybrids erreicht werden.

Mit der Markteinführung beziehungsweise der Produktion nennenswerter Stückzahlen ist für Batteriefahrzeuge und Plug-in-Hybrids bereits im nächsten Jahr (2011) zu rechnen, bei Brennstoffzellenfahrzeugen nennen einige Hersteller das Jahr 2015, in dem Fahrzeuge in 1.000er Stückzahlen gebaut und in Kundenhand gegeben werden sollen.

Vergleichstudie Strom / Wasserstoff [1]

Im Rahmen einer Studie für einen deutschen Energieversorger wurde für ausgewählte Anwendungen die Verwendung von Strom und Wasserstoff miteinander verglichen. Es sollte die Frage beantwortet werden, wo welcher der beiden Energieträger am sinnvollsten einzusetzen ist. Dies schloss auch den Vergleich zu den konventionellen Lösungen ein. Die Analysen gelten für Deutschland und wurden für die Jahre 2015 und 2030 durchgeführt.

Die Ergebnisse für den Einsatz von beiden Energieträgern im Bereich der Mobilität ergaben bezüglich der Wirtschaftlichkeit ein differenziertes Bild. Der Einsatz beider Energieträger wird dabei stark vom Antrieb dominiert (Batterie bzw. Brennstoffzelle). Von heutigen Zahlen ausgehend müssen für beide Technologien die Kosten noch deutlich gesenkt werden; bei Batterien etwa von heute rund 700 bis 1.000 €/kWh auf 250 bis 300 €/kWh, bei den Brennstoffzellen-Systemkosten auf unter 100 €/kWh_{el}, von denen heutige Kosten noch weit entfernt sind. Weiterhin sind auch noch entscheidende technische Zielsetzungen, z. B. bezüglich der Lebensdauer, zu erreichen. Stimmen zusätzlich noch die energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen z. B. bezüglich hoher fossiler Energiepreise, ambitionierte Umweltziele für den Verkehr, die Förderinstrumente und die Kundenakzeptanz, so können beide alternativen Antriebe in den nächsten fünf bis zehn Jahren wirtschaftlich werden. Dies gilt insbesondere bei PKW mit höherer jährlicher Laufleistung. Diese ist notwendig, damit die höheren Anschaffungsausgaben gegenüber einem konventionellen verbrennungsmotorischen Fahrzeug über die Kostenvorteile während der Nutzungsphase kompensiert werden können.

Reine Batteriefahrzeuge (BEV) mit geringer Batteriekapazität (ca. 20 kWh) sind derzeit am nächsten an der Wirtschaftlichkeit. Dann folgen Plug-in-Hybride (PHEV) und später auch Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV). Die Kostenentwicklungsperspektiven für BEV und FCEV sind in Abb. 2 dargestellt. Allerdings sind reine BEV aus Gründen der Wirtschaftlichkeit (höhere Batteriekapazitäten, um vergleichsweise wenige Langstreckenfahrten zusätzlich damit abdecken zu können, sind vergleichsweise teuer), der Reichweitenbeschränkung und der beschränkten Option einer Beladung in akzeptabler Zeit auf das Marktsegment mit geringeren täglichen Fahrtstrecken beschränkt, z. B. auf Zweitfahrzeuge für Berufspendler mit Garage/Stellplatz oder Car-Sharing, die wiederum auf die oben angesprochenen jährlichen Fahrleistungen kommen.

In den anderen PKW-Segmenten stehen PHEV und FCEV miteinander im Wettbewerb. Während die PHEV von der bestehenden Stromladeinfrastruktur und der Option anforderungsspezifische Auslegungen bezüglich der Batteriegröße realisieren zu können profitieren, haben die FCEV das Potenzial bzgl. ihrer Wirtschaftlichkeit zu dominieren. Dies ist u. a. mit der prinzipiell geringeren Systemkomplexität gegenüber PHEV zu begründen.

Generell ist anzumerken, dass die FCEV als Demonstrationsfahrzeuge derzeit in der 2. bis 4. Generation betrieben werden und hier entsprechende Betriebserfahrungen bereits vorliegen. Diese liegen für Batteriefahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterien noch nicht vor und gerade die Lebensdauer der Batterie (kalendarische und Zyklenfestigkeit) und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit - wie oben erwähnt sind die Batteriekosten bei der Gesamtwirtschaftlichkeit entscheidend - stellen ein Risiko dar.

Die Beladungsinfrastruktur für BEV und PHEV ist am Anfang günstig auszubauen, solange private und halböffentliche Beladung dominieren. Bei Wasserstoff hingegen besteht die Herausforderung, zu Beginn in eine stark unterausgelastete kapitalintensive Infrastruktur investieren zu müssen. Bei höherer Marktpenetration von FCEV spielen allerdings dann die Infrastrukturkosten keine wichtige Rolle mehr (siehe Abb. 3).

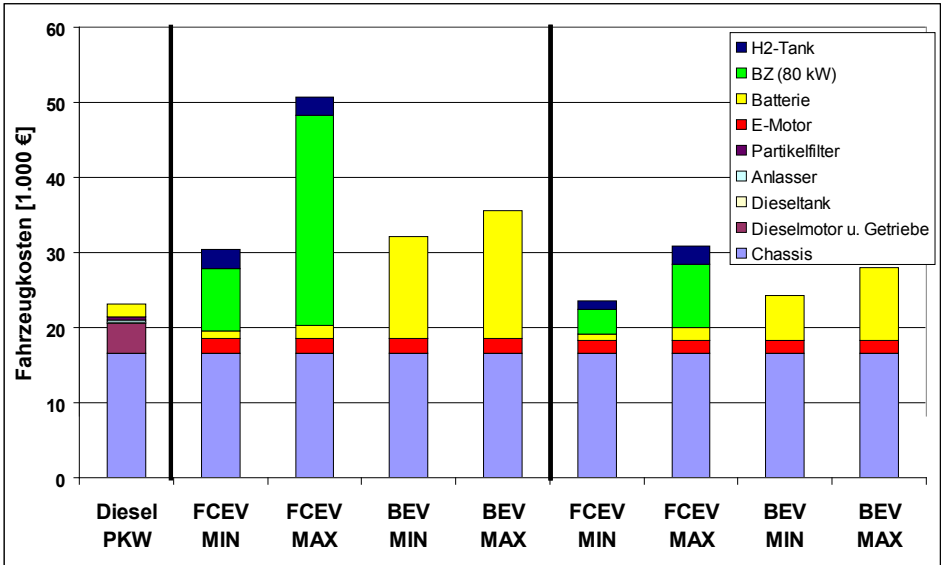


Abb. 2: Kostenentwicklungsperspektiven BEV und FCEV [1], [2], [3]

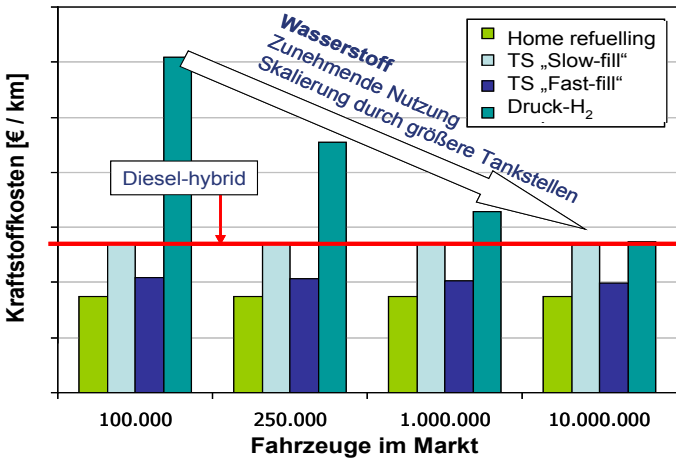


Abb. 3: Kraftstoffkosten in Abhängigkeit der im Markt befindlichen Fahrzeuge

4 Aktivitäten der Industrie

Wichtigste Aktivitäten im Bereich Wasserstoff und Mobilität in der jüngsten Zeit ist die Verständigung der Energieindustrie über den Aufbauplan einer flächendeckenden Infrastruktur zur Versorgung mit Wasserstoff in Deutschland (Memorandum of Understanding, 10. September 2009) sowie die Bemühungen zu dessen Umsetzung. Zunächst ist der deutliche Ausbau des Wasserstofftankstellennetzes bis Ende 2011 geplant. Gesamtziel des Aktionsplans ist der bundesweite Aufbau eines Wasserstofftankstellennetzes, um die ab etwa 2015 vorgesehene Kommerzialisierung von Elektrofahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb in Deutschland mit der entsprechenden Infrastruktur zu flankieren. Dieser Aktivität unter dem Namen H2 Mobility gehören die Energieversorger EnBW und Vattenfall, die Mineralölkonzerne OMV, Shell und Total, die Gaseunternehmen Air Liquide, Air Products und Linde, der Automobilhersteller Daimler sowie die Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellen (NOW) an.

Parallel dazu hat die Automobilindustrie eine Absichtserklärung zur Entwicklung und Markteinführung von elektrischen Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb (09. September 2009) abgegeben. Ab 2015 kann eine nennenswerte Zahl von Brennstoffzellen-Fahrzeugen angeboten werden. Ab dann werden einige hunderttausend Stück erwartet. Eine Übersicht über die Pläne der Auto-OEMs gibt Abb. 4. Voraussetzung für die erfolgreiche Markteinführung ist der Aufbau eines ausreichend engmaschigen Wasserstoff-Tankstellennetzes. Deutschland gilt als Startmarkt für Europa; USA, Japan und Korea sind weitere Ausgangspunkte.

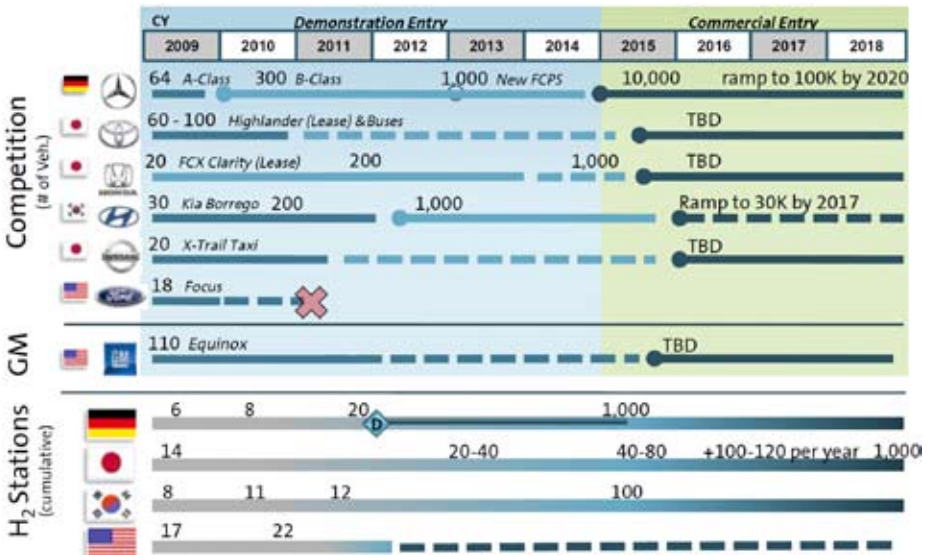


Abb. 4: Übersicht über die FCEV-Kommerzialisierungspläne der Automobilhersteller [4]

In Deutschland werden die Industrieaktivitäten in der Elektromobilität unterstützt durch die Bundesregierung, maßgeblich durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) sowie durch das Bun-



des Umweltministerium (BMU) und das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Nach den Zielen des BMVBS sollen bis zum Jahr 2020 500.000 Brennstoffzellenfahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren [5]. Insgesamt stellt das BMVBS bis 2016 700 Millionen Euro im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff und Brennstoffzellen (NIP) für die Kommerzialisierung von Wasserstoff und Brennstoffzellen zur Verfügung. Im Förderprogramm Modellregion Elektromobilität, Teil des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität der Bundesregierung, wurde das Ziel formuliert, ebenfalls bis 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen zu bringen [6]. Für den Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität stehen bis 2011 insgesamt 500 Millionen Euro aus dem Konjunkturpaket II zur Verfügung.

Im Bereich der Batteriefahrzeuge wurden zur Durchführung der ersten Demonstrationsprojekte Kooperationen zwischen Auto-OEMs und Energieversorgern eingegangen. So arbeitet zum Beispiel Daimler mit RWE und Vattenfall, BMW mit E.ON und Vattenfall sowie VW bzw. Audi ebenfalls mit E.ON zusammen. Eine Übersicht über die kommunizierten Pläne der Auto-OEMs zur Markteinführung von batterie-elektrischen Fahrzeugen gibt Abb. 5. Es ist zu beachten, dass die Übersicht nur die aktivsten der im konventionellen PKW-Markt tätigen Unternehmen berücksichtigt. Darüber hinaus gibt es weitere Unternehmen, zum Teil Start-Ups und Umrüster, die erst zu nehmende Kommerzialisierungsaktivitäten verfolgen wie z.B. BYD, Chery, Fisker, Karabag, Tesla Motors, Nice, Thlink, TQEV und einige weitere.

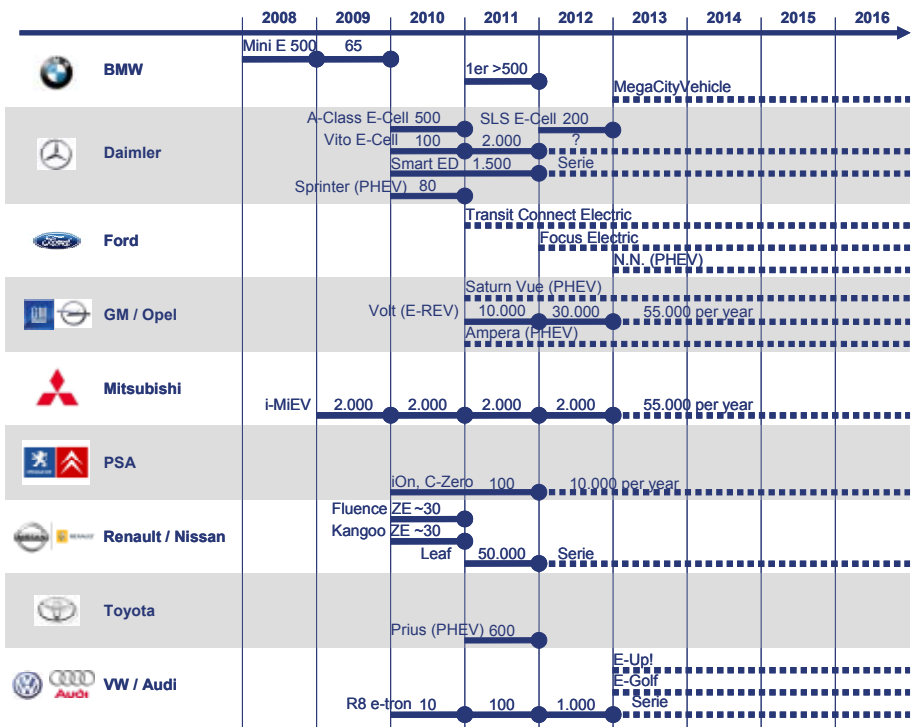


Abb. 5: Übersicht über die BEV-Kommerzialisierungspläne der Automobilhersteller

5 Schlußfolgerungen

Plug-in-Hybride (PHEVs) können, zumindest in einer Übergangsphase, zu einer universellen Alternative werden. Allerdings ist das Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasen durch den Einsatz von konventionellen Kraftstoffen im Verbrennungsmotor langfristig eingeschränkt.

Batteriefahrzeuge (BEVs) können eine sinnvolle Option für den Kurzstreckenverkehr werden, soweit langfristig Strom aus erneuerbaren Quellen eingesetzt wird.

Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEVs) haben das Potenzial zur universellen Lösung für alle PKW-Segmente, wenn die Anfangsinvestitionsrisiken für die Wasserstoff-Infrastruktur überwunden werden können.

Ein schneller Marktdurchbruch der universell nutzbaren Brennstoffzellenfahrzeuge könnte Batteriefahrzeuge überflüssig machen. Allerdings ist hierzu der flächendeckende Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur zwingend erforderlich und stellt derzeit den Flaschenhals dar.

Batteriefahrzeuge können eine Option darstellen sofern die Kunden das „home refuelling“ mit „slow fill“ und die hohen Fahrzeugpreise bei gleichzeitig reduzierter Performance (Betankung, Reichweite, etc.) akzeptieren.

Alle Arten von Elektrofahrzeugen bieten Potenzial für neue Geschäftsmodelle und neue Spieler.

6 Literatur

- [1] Bünger, U.; Weindorf, W.; Wietschel, M.: Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO₂-freie Endenergieträger, Studie für RWE AG, Karlsruhe, 2010.
- [2] CONCAWE/EUCAR/JRC: Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context, TANK-TO-WHEELS Report Version 2c, TTW APPENDIX 1 “Vehicle retail price estimation”, 2007.
- [3] Kalhammer, F.R.; Kopf, B.M.; Swan, D.H.; Roan, V.P.; Walsh M.P.: Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology, Report of the ARB Independent Expert Panel 2007 for State of California Air Resources Board, Sacramento, California, 2007.
- [4] Freese, C.: Hydrogen Fuel Cell Propulsion System, Hydrogen Technical Advisory Committee, 2010
- [5] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): <http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Artikel/IR/elektromobilitaet-alt.html?view=renderDruckansicht&nn=35748>, abgerufen am 09 September 2010
- [6] Die Bundesregierung: Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung, August 2009



**Institut für Windenergie und
Energiesystemtechnik**

Königstor 59

34119 Kassel

Tel: 0561 7294-0

Fax: 0561 7294-100

www.iwes.fraunhofer.de