

E-Mobilität kann auf den Stromüberschuss setzen

Bei der Hochschule Furtwangen nehmen Studien zu Elektrofahrzeugen und ihrem Energiebedarf Fahrt auf.

Um 1900 waren in den USA 38 Prozent der Autos elektrisch- und nur 22 Prozent benzintrieben, aber ab 1912 ging der Absatz der „Elektrischen“ rapide zurück. Nur in ganz vereinzelt Nischen konnten sich von den 20er-Jahren bis in die 1980-er Elektrofahrzeuge halten, etwa für die tägliche Milchflaschenauslieferung in Großbritannien und in Teilen der amerikanischen Staaten sowie im gesamten innerstädtischen Verkehr des schweizerischen Zermatt (dort seit 1931) [1].

Primärenergieeinsatz bei fossil und elektrisch angetriebenen Kompaktklasswagen

Basierend auf dem derzeitigen Stand der Technik ist elektrisch angetrieben nicht zwangsweise effizienter und umweltfreundlicher als mit Verbrennungsmotor. Der Vorteil der „Elektrischen“ zeigt sich aber im dynamischen Betrieb.

Wir vergleichen daher nachfolgend für den Fahrbetrieb (ohne Berücksichtigung des Herstellungsaufwands) den fossilen Primärenergieeinsatz eines Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor mit einem etwa gleich großen elektrisch angetriebenen Fahrzeug unter zwei vollkommen unterschiedlichen Einsatzbedingungen. Dies sind einerseits eine „Überlandfahrt mit gemäßigt Tempo ohne größere Dynamik“ und andererseits ein Einsatz in einem „Start/Stop-Zyklus hoher Dynamik“, was Beispielsweise einer innerstädtischen Fortbewegung entspräche:

Überlandfahrt (stau-frei und ergonomisch)

<p>Otto-Pkw (z.B. Golf VI 1.2 TSI BlueMotion)</p> $P_{prim} = 4,3 \text{ L}/100\text{km} (\text{Benzin}) \cdot 10 \text{ kWh}/\text{L} = 43 \text{ kWh}/100\text{km}$
<p>E-Fahrzeug (z.B. Opel Ampera rein elektrisch)</p> $P_{prim} = \frac{P_{el.}}{\eta_{EL}} \approx \frac{16 \text{ kWh}/100\text{km}}{40\%} \approx 40 \text{ kWh}/100\text{km}$

η_{EL} = Mittlerer Erzeugungs- und Verteilungswirkungsgrad (Kraftwerke, Stromnetz) in D [2][3], der Fahrzeugwirkungsgrad inklusive Batterie und Elektronik findet sich aufgrund des Messprinzips bereits in der Verbrauchsangabe der E-Fahrzeuge
 Beispiel: Opel Ampera im New European Drive Cycle (NEDC): 16,9 kWh/100km [4][5]

Zum NEDC, bestehend aus einem städtischen und einem außerstädtischen Fahrzyklus, Verbrauchsermittlung ohne Nebenaggregate, nahmen wir folgende Anpassungen vor: Überlandfahrt = 16 kWh/100 km (statt 16,9 kWh/100km) und Stadtfahrt = 18 kWh/100km.

Stadtfahrt mit vielen Start/Stop-Zyklen

<p>Otto-Pkw (z.B. Golf VI 1.2 TSI BlueMotion)</p> $P_{prim} = 6,3 \text{ L}/100\text{km} (\text{Benzin}) \cdot 10 \text{ kWh}/\text{L} = 63 \text{ kWh}/100\text{km}$
<p>E-Fahrzeug (z.B. Opel Ampera rein elektrisch)</p> $P_{prim} = \frac{P_{el.}}{\eta_{EL}} \approx \frac{18 \text{ kWh}/100\text{km}}{40\%} \approx 45 \text{ kWh}/100\text{km}$

Obige Verbrauchsdaten werden auch von den Verbrauchsmessungen von ADAC und diversen Autozeitschriften bestätigt.

Der Umsetzungswirkungsgrad des E-Antriebs wurde hierbei für den Start/Stop-Betrieb um 15 Prozent schlechter als bei der ergonomischen Überlandfahrt eingeschätzt. Diese sind begründet in einem schlechteren Akku-, Leistungselektronik- und Motorwirkungsgrad, sowie etwas höheren Leitungsverlusten.

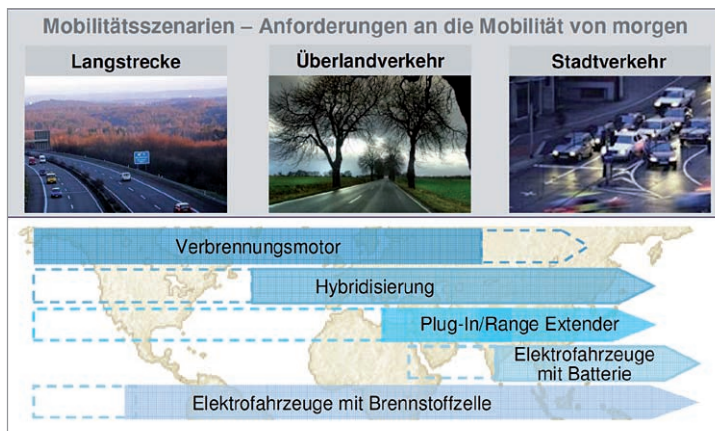
Der mittlere Lade-Entlade-Wirkungsgrad eines modernen Li-Ion-Akkus im Leistungsbereich von zehn bis 50 Kilowattstunden liegt bei normaler Betriebsweise und Temperaturregelung zwischen >90 und 96 Prozent [6] und selbst bei sehr hoher Belastung fällt dieser kaum auf 85 Prozent [6]. Hier sei angemerkt, dass ein reines E-Fahrzeug das volle Leistungsvermögen seiner Akkus in der Regel nie beansprucht, da die Akkugröße durch die erforderliche Speicherkapa-



bestimmt wird. Bei Hybridfahrzeugen ist das nicht der Fall, die Akkumulatoren sind beim Hybrid wesentlich kleiner.

Die Vorteile eines Elektroantriebs gegenüber einem Antrieb mit Verbrennungsmotor steigen mit der zu bewegenden Masse und dem abverlangten Beschleunigungsprofil (beziehungsweise noch etwas mehr bei Verzögerungen).

Besonders negativ fällt bei einem reinen E-Fahrzeug an kalten Tagen der Betrieb der eigentlich selbstverständlichen Heizung auf: Beim Verbrennungsmotor steht Abwärme zur Heizung zur Verfügung, elektrisch hingegen muss diese durch das „Verheizen“ des teuren Akkustroms gewonnen werden. Andere leistungshungrige Nebenaggregate wie Klimaanlage, „Akku-Vorwärmung“ (bei sehr kalten Außentemperaturen), Servolenkung, Kühlwasserpumpe oder Ähnliches benötigen zwar ebenfalls Energie, können



Langstrecke, Überlandverkehr und Stadtverkehr - welche Antriebsart sich wo am besten bewährt zeigt dieses Szenario. Das batteriebetriebene E-Fahrzeug beispielsweise hat seine Stärken ganz klar im Stadtverkehr.



Prof. Dr.-Ing. Franz Aßbeck, Leiter des Labors für Angewandte Mechatronik und Systemkonstruktion / Hochschule Furtwangen



Dipl.-Ing.(FH) Simon Grigull, GF der Grigull GmbH (pausierend zur Vorbereitung einer Dissertation), Mitarbeiter im Labor für Angewandte Mechatronik und Systemkonstruktion

in einem E-Fahrzeug aber sparsam und dynamisch über dessen Hochvoltsystem versorgt werden.

E-Fahrzeug mit Akku oder mit Brennstoffzelle (+Akku) oder als Hybrid

Der Einsatz des reinen E-Fahrzeugs sollte auf den Kurzstreckenverkehr begrenzt sein, zumindest solange Akkuwechsel- oder Schnellladestationen entlang der Verkehrsadern nicht realisiert werden. Während hier repräsentative zehn Kilowattstunden Tages-Energiedurchsatz in einem Benzin- oder Dieseltank knapp zehn Kilogramm wiegen (inklusive Behälter), belasten derzeit modernste Li-Ion-Akkus damit ein E-Fahrzeug mit zusätzlichen knapp 100 Kilogramm.

Für Anforderungen eines Mischprofils aus Kurz- und Mittelstrecken empfiehlt sich eine der vielen Hybrid-Versionen, wobei die größere Flexibilität mit einem Mehrgewicht und Mehrpreis erkaufte werden muss. Da der Hybrid aber den

bisherigen Verbraucheransprüchen am nächsten kommt (zum Beispiel als Range-Extender), sollte er mittelfristig noch das größere Marktpotential haben.

Für Kurz-, Mittel- und Langstrecken prinzipiell geeignet sind elektrische Fahrtriebe, welche aus Brennstoffzellen gespeist werden. Allerdings sind diese Fahrzeuge derzeit noch im Erprobungsstadium und die Produktion von Druckwasserstoff (≈ 750 bar) ist sehr aufwändig und teuer (zum Beispiel $9,5 \text{ €/kg H}_2 \approx 0,29 \text{ €/kWh}$ an OMV-Tankstellen am 30.08.2012).

So müssen zur Elektrolyse bis zu 20 Prozent großtechnisch und 40 Prozent bei Kleinanlagen^[8] sowie zur Kompression (≈ 750 bar) etwa zehn Prozent der eingesetzten Primärenergie aufgewendet werden, was den Wasserstoff-Umwandlungswirkungsgrad aus der „Edelenergie“ Strom schon auf maximal 70 Prozent begrenzt. ...

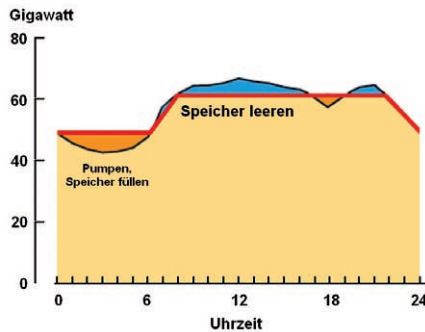
Fortsetzung nächste Seite

Die Wirkungsgrade von Brennstoffzellen- und Dieselmotor-Antrieben im Vergleich

Theoretisch sollte man Wirkungsgrade von Akkus und von Brennstoffzellen aber nicht gegenüber stellen, da der Akku ein Energiespeicherspeicher und die Brennstoffzelle ein Energieumsetzer ist.

Das sieht man auch anschaulich beim Betanken: Während der reine Tankvorgang an einer konventionellen Tankstelle etwa zwei Minuten dauert (≈ 400 kWh/Minute) und das Daimler F-Cell-Testfahrzeug seine knapp vier Kilogramm Wasserstoff in etwa fünf Minuten in den Tank bringt (an Solar-Wasserstoff-Tankstelle in Freiburg erst ≈ 2 kg mit 450 bar, dann ≈ 2 kg mit 950 bar) und damit rund 44 Kilowattstunden pro Minute zustande bringt, sollte selbst ein sehr moderner Li-Ion-Akku derzeit nicht schneller als in 40 Minuten vollgeladen werden^[6].

Wollte man den Energiefluss einer konventionellen Tankstelle folglich über eine



Deutschland verfügt derzeit über eine Pumpspeicherkapazität von ca. 40 GWh.

Stromtankstelle bewerkstelligen, so würde das eine Ladestation mit einer Anschlussleistung von knapp 20 Megawatt erfordern (= größerer Mittelspannungs-Transformator).

Daimler gibt für seine aktuellen F-Cell-Testfahrzeuge im NEDC 0,97 kg H₂ (Wasserstoff) /100km entsprechend 32 kWh/100km

an^[10] (noch bessere Verbrauchswerte sollen in Vorbereitung sein).

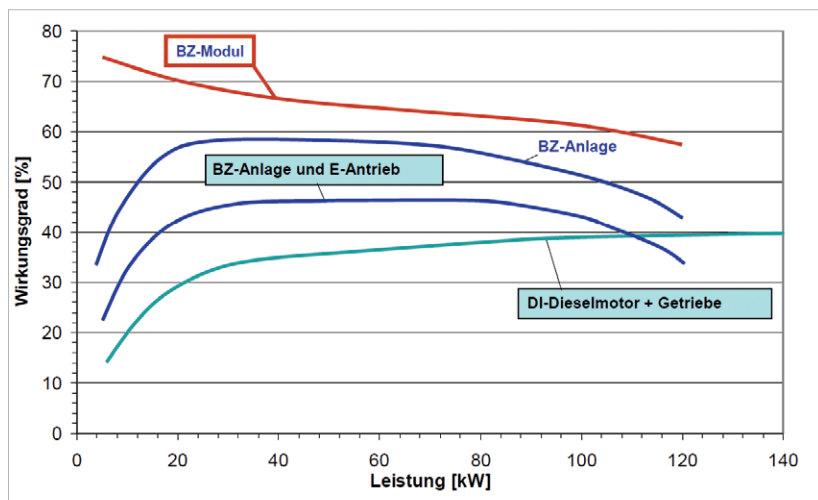
Dieser Wert bestätigt die Verbrauchswerte des E-Fahrzeugs in den eingangs dargestellten Rechenbeispielen, wenn man berücksichtigt, dass der mittlere Wirkungsgrad der Brennstoffzelle im Leistungsbereich von 40 bis 50 Kilowatt bei über 50 Prozent (BZ alleine) liegt, während der in der Beispielrechnung angenommene Li-Ion-Akku auf etwa 90 bis 95 Prozent kommt.

„Smart Grid“ und der Beitrag von regenerativem Überschussstrom zur Elektrifizierung des Verkehrs^[11]

Der steigende Strombedarf infolge einer zunehmenden Elektrifizierung des Verkehrs sollte weit möglichst aus dem inzwischen für die Versorger problematisch gewordenen regenerativen Stromüberschuss gedeckt werden. Dabei könnten zum Beispiel für den Überschussstrom die Akkus der ohnehin meist am Stromnetz angeschlossenen E-Fahrzeuge als Elektrizitäts-Tagesspeicher mit genutzt werden.

Derzeit gibt es in der Bundesrepublik etwa 47 Millionen Pkw und rund zwei Millionen Nutzfahrzeuge. Wären in mittelfristiger Zukunft 25 Prozent davon, also etwa 12,5 Millionen, an eine derartige netzgekoppelte Lade-/Entladeinfrastruktur angebunden, so könnten hier täglich bis etwa 20 Prozent x 16 kWh x 12,5 Mio. ≈ 40 GWh genutzt werden. (Annahmen: nur 20 Prozent der nominellen Akkukapazität werden pro Tag als Netzpuffer genutzt, 16 Kilowattstunden wurde als repräsentative Akkugröße für derzeitige E-Fahrzeuge eingesetzt.)

Aktuell^[12] verfügt Deutschland über eine Pumpspeicherkapazität von ca. 40 GWh und dies mit massivem Steigerungsbedarf aufgrund von rasantem Zubau der Erneuerbaren, sowie der Abschaltung von AKWs.



Vergleich des Wirkungsgrads von Brennstoffzellen-Antrieben mit Dieselmotor-Antrieben^[9]



Für einen beispielhaften Vergleich des Primärenergieverbrauchs wurden veröffentlichte Daten von Opel Ampera (Elektrofahrzeug, rechts) und Golf VI 1.2 TSI (konventionelles Benzinfahrzeug, links) verwendet.

Aus obigem Rechenbeispiel ergäbe sich also eine zusätzlich abrufbare Speicherkapazität aus den E-Fahrzeugen in Höhe aller derzeitigen deutschen Pumpspeicherwerke!

Die in obigem Rechenbeispiel angenommene „25%-ige Elektrifizierung“ würde außerdem einen zusätzlichen elektrischen Jahres-Energiebedarf von etwa 7 % der derzeitigen deutschen Bruttostromlieferung (≈ 500 TWh) erfordern.

Ausblick und Wertung der Elektromobilität

Elektromobilität ist weit mehr als „ein Fahrzeug mit einem elektrischen Antrieb“. Sie ist ein Mobilitäts- und Energiemanagement-Konzept.

Dieses Konzept muss neben alltagstauglichen Fahrzeugen vor allem auch eine Betankungs- und Kommunikationsinfrastruktur beinhalten. Dazu gehören Akku-Ladesäulen, Wasserstofftankstellen, gegebenenfalls Akkuwechselstationen und innovative, kontaktlose Ladeplätze auf Parkplätzen (Resonanzladung mittels an Standplätzen in den Boden eingelassener Spulen) inklusive der dazu notwendigen Kommunikationstechnik sowie die mögliche Funktion des E-Fahrzeugs als zusätzlicher Netzpuffer.

Fußnoten:

- [1] <http://de.wikipedia.org/wiki/Elektroauto>
- [2] <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodent=2849>
- [3] Energieflussbild 2009 der AGEB
- [4] <http://www.opel-blog.com/2011/10/06/wirklich-wichtige-werte/>
- [5] <http://www.spritmonitor.de/de/detailansicht/490137.html?cdetail=1>
- [6] Detlev Repenning, ecc REPENNING GmbH, Li-Ion-Hersteller aus Geesthacht
- [7] Daimler AG, Lothar Ulsamer, Präsentationsfolie im Vortrag „Das Auto neu erfinden“ beim Netzwerk Auto-Mobil an Hochschule Furtwangen in Villingen-Schwenningen am 30.11.2011.
- [8] NOW-Studie: „Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien“, 22.12.2010
- [9] Energieagentur NRW, Bernd Höhlein, <http://www.brennstoffzelle-nrw.de/index.php?id=38>
- [10] Daimler-Wasserstoffverbrauchsangabe F-Cell Fahrzeug
- [11] Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, IPP
- [12] VDE, „Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger“, 24.03.2009

KONTAKTDATEN

Hochschule Furtwangen, Prof. Dr. Aßbeck
 – Labor für Angewandte Mechatronik
 und Systemkonstruktion
 Robert-Gerwig-Platz 1, D-78120 Furtwangen
 Tel.: 07723 / 920-0 (Zentrale), Durchwahl -2172
 E-Mail: ass@hs-furtwangen.de
 URL: www.hs-furtwangen.de