

Elektromobilität: Brennstoffzelle mit Wasserstoff¹

VON GOTTFRIED ILGMANN, BERLIN

1. PKW mit Brennstoffzelle: der HydroGen4

Wer auf dem Brennstoffzellenkongress „f-cell“ letztes Jahr in Stuttgart das Brennstoffzellenauto HydroGen4 von Opel Probe fuhr, fragt sich, warum dieses Auto eine Vision sein soll. Der *Softroader* der Mittelklasse, ein Zwitter zwischen Pkw und **Sport Utility Vehicle** (SUV), bezieht 93 Kilowatt aus seiner Brennstoffzelle und weitere 35 Kilowatt aus einem als Puffer dienenden Nickel-Metallhydrid-Akku (Energieinhalt: 1,8 Kilowattstunden). Von den knapp 130 Kilowatt Bruttostrom kommen letztlich etwa 100 Kilowatt als mechanische Leistung auf die Antriebsräder. Charakteristisch für Elektroantrieb: Ob die Drehzahl hoch oder bei Null liegt, es steht die volle Leistung zur Verfügung. So beschleunigt der Zweitonner in 12 Sekunden auf 100 Kilometer pro Stunde, sehr viel flinker als mit Benzinmotor oder Turbodiesel bei gleicher Leistung. Die Höchstgeschwindigkeit von 160 Kilometer pro Stunde kann ohne Stromentnahme aus dem Akku gehalten werden. Die Drucktanks fassen bei 700 bar (!) 4,2 Kilogramm Wasserstoff, ausreichend für eine 320 Kilometer lange Fahrstrecke. Mehr Reichweite durch mehr Drucktanks steht nichts im Wege. Der HydroGen4 basiert auf dem Chevy Equinox, einem in den USA marktgängigen Softroader von General Motors.²

Anschrift des Verfassers:
Dr.-Ing. Gottfried Ilgmann
Habersaathstraße 36 B
10115 Berlin

¹ Teile dieses Aufsatzes erschienen in der Rubrik ‚Wissenschaft‘ der Frankfurter Allgemeinen Sonntagszeitung vom 10. Januar 2010, S. 48 und 51.

² Der Brennstoffzellen-Abkömmling ist rund 10 Prozent schwerer. Von vornherein als Brennstoffzellen-Fahrzeug konzipiert, wäre er etwa gleich schwer. Vorgestellt wurde der HydroGen4 erstmals auf der Internationalen Automobilausstellung im September 2007 in Frankfurt. Ein Jahr später wurde er zur Erprobung ausgeliefert. Das beste State-of-the-art-Brennstoffzellen-Auto der Welt soll gegenwärtig der Honda FCX Clarity sein, so ein unabhängiger Fachmann (Reinhold Wurster von der Ludwig-Bölkow Systemtechnik LBSt), der sowohl das Honda- als auch das Opel-Fahrzeug getestet hat. Der FCX Clarity ist ein sogenanntes Purpose Design Vehicle – also ein Fahrzeug, das von Grund auf als Brennstoffzellen-Fahrzeug konstruiert wurde. Es ist der Designgeber des heutigen Honda Insight.

2. Die Akku-Konkurrenz: der Opel Ampera

Nächstes Jahr kommt in Europa der Opel Ampera an den Markt.³ Er ist vom Gewicht (1,8 Tonnen) und der Leistung (111 Kilowatt) dem HydroGen 4 vergleichbar. Das gilt auch für die Höchstgeschwindigkeit. Sie ist bei 160 Kilometer pro Stunde abgeregelt, um eine zu schnelle Entladung des Akku zu vermeiden. Bis zu einer Strecke von 60 Kilometer zieht der Elektromotor seinen Strom aus einem 180 Kilogramm schweren Lithium-Ionen-Akku, der 16 Kilowattstunden an der heimischen Steckdose „tanken“ kann. Um aber eine wirtschaftliche Lebensdauer des Akku zu garantieren (10 Jahre und mindestens 240 000 Kilometer), wird er nur bis zur Hälfte entladen und dann wieder binnen dreier Stunden aufgeladen. Die nutzbare Speicherenergie beträgt also nur 8 Kilowattstunden. Wer sollte eine solche Renn-Reise-Limousine mit 60 Kilometer Reichweite kaufen? Als „Nur-Stadtauto“ überdimensioniert und für weite Fahrten untauglich! Deshalb hat Opel in den Ampera einen so genannten *Range Extender* eingebaut, ein Zusatzaggregat, das bei Bedarf die Reichweite verlängert. Es ist ein Corsa-Motor mit 55 Kilowatt, der über einen Generator Strom für den Elektroantrieb erzeugt. Im Fachjargon wird dieses Konstrukt als „serieller Hybrid“ bezeichnet, Spötter nennen es „Elektroauto mit Notstromaggregat“. Vielleicht ist der Spott unangebracht, denn Gherardo Corsini, Entwicklungsingenieur bei Opel, weiß, „wie beklemmend die Sorge vor einem leeren (Strom-)Tank sein kann“, und „dass 80 Prozent der Europäer täglich nicht mehr als 50 Kilometer fahren“⁴, die Reichweite von 60 Kilometern an vier von fünf Tagen also völlig ausreichend ist. Ein weiteres Kalkül: Der Markt für Nur-Stadtautos ist gering. Ein Vielfaches so groß ist er für Autos, die auch gelegentlich weiter fahren können – insbesondere dann, wenn sich ein Haushalt nur einen Pkw leisten will oder kann.

3. Gewohnte Reichweite aus Pkw mit Akku: Gewichtsexplosion

Müsste der Opel Ampera 320 Kilometer weit von Akkustrom zehren, wöge der Speicher etwa eine Tonne. Der Zwei- würde zum Dreitonner. Dadurch würde wiederum die Reichweite sinken, oder es müsste ein noch schwererer Akku eingesetzt werden, denn eine Tonne Mehrgewicht erhöht den Rollwiderstand (proportional zum Gewicht). Auch steigt der Energieaufwand zur Beschleunigung der Fahrzeugmasse.⁵ Der Akku-Dreitonner wäre auf nicht absehbare Zeit unbezahlbar, die normale Steckdose für den Ladestrom nicht brauchbar. Ein Durchbruch in der Akkutechnik könnte alles ändern, aber die Skepsis ist groß. Tapfer wird das Ziel proklamiert, die speicherbare Energiemenge pro Kilogramm Akku-

³ In den USA wird dieses Fahrzeug noch in 2010 als Chevrolet Volt auf den Markt kommen.

⁴ Spiegel online 4.9.2009 von Tom Grünweg.

⁵ Nur ein Teil davon kann beim Bremsen wieder gewonnen werden, wenn der Elektromotor als Generator fungiert, der den Akku lädt (Rückspeisung).

Gewicht von derzeit knapp 100 auf 200 Wattstunden anzuheben – ein höchst ambitioniertes Ziel angesichts der Grenzen, die die Natur setzt.⁶ Wird es erreicht, wäre das von den Kosten her noch nicht einmal ein entscheidender Durchbruch. Ist damit der Elektro-Pkw mit Akku (ohne „Notstromaggregat“) entgegen aller verbreiteter Hoffnung schon am Ende? Ja, wenn an ihn der Anspruch wie an die Alleskönner Benzin- und Diesel-Pkw gestellt wird! Seine Stärke hat der Akku-Pkw bei folgenden Anforderungen: 1. geringe Reichweite 2. geringe Fahrzeugmasse 3. überwiegend Stop-and-Go-Zyklus. Diese Kombination trifft auf das Nur-Stadtauto zu. Größte Vorteile verspricht der Elektroantrieb aus einem Akku beim Fahrrad, denn da sind alle Anforderungen ideal erfüllt.

4. „Trilemma“ des Brennstoffzelle-Pkws

Eher zufällig entdeckte der deutsch-schweizerische Chemiker Christian Friedrich Schönbein im Jahre 1838 die Brennstoffzelle. Ein Jahr später führte der britische Naturwissenschaftler Sir William Grove erste Experimente damit durch. Danach geriet die Entdeckung in Vergessenheit. Erst in der Raumfahrt der fünfziger Jahre erlebte sie ein Comeback. Unter Brennstoffzelle wird heute die Wasserstoff-Brennstoffzelle verstanden. Das ist nicht ganz korrekt, denn es könnten statt Wasserstoff und (Luft-)Sauerstoff auch andere Elemente direkt in elektrische Energie umgesetzt werden (zum Beispiel Methan). Diese Brennstoffzellen spielen aber für elektrische Mobilität derzeit kaum eine Rolle. Erreicht werden Wirkungsgrade von 55 Prozent, 60 bis 64 Prozent sind schon im Visier der Entwickler, jedenfalls in geringen Lastbereichen, will heißen, bei kontinuierlicher Fahrt und mäßigen Geschwindigkeiten. Die restliche Energie fällt als Abwärme an, beim Pkw verwendbar für die Fahrzeugheizung. Das Brennstoffzellen-Auto wird nicht nur von Opel, sondern von allen großen Playern wie zum Beispiel Toyota, Honda, Nissan oder Daimler entwickelt. „Wir sind bereits auf der Zielgeraden zur Kommerzialisierung“ so Andreas Truckenbrodt von der Automotive Fuel Cell Corporation, einer mehrheitlich von Daimler getragenen Brennstoffzellen-Entwicklungsinitiative mit Ford und Ballard als weiteren Anteilseignern. Im Jahr 2015 soll die Markteinführung sein. Das klingt so, als wären wir bereits am Ziel, unsere gewohnte Mobilität mit Benzin- und Diesel-Pkw mittels Brennstoffzelle in die Zukunft zu retten. Wirklich?

Ikuo Kasahara, Manager von Toyota Motor Europe, zeigt, welche Herkules-Arbeit den Entwicklern der Brennstoffzelle noch bevorsteht. Die Kosten müssten um zwei Größenordnungen, will heißen auf ein Hundertstel der Ausgangslage von 2005 gedrückt werden. Die erste Kostensenkung auf ein Zehntel ist die schwierigste: Als Katalysator des elektrochemischen Prozesses wird Platin verwendet, ein knappes und teures Metall. Gefragt ist die gleiche Ka-

⁶ Theoretisch sind Zellspeicherdichten von 225 Wh/Kg für Li-Ionen-Akkus denkbar, was nach 2012 zu nutzbaren Batteriesystemspeicherdichten von maximal 100 Wh/Kg in der Serie führen kann.

talysatorwirkung mit einem Zehntel des Platinbedarfs von 2005, und das bei höherem Wirkungsgrad und längerer Lebensdauer. Fünfzehn Jahre, mindestens aber 240.000 Kilometer sollen die Brennstoffzellen ohne wesentlichen Leistungsverlust arbeiten.

Als „Trilemma“ bezeichnet Kasahara diese Aufgabe, weil sich nicht nur zwei Ziele widersprechen („Dilemma“), sondern drei (Tri): Unter sonst gleichen Bedingungen führt die Reduktion von Platin im Katalysator zu geringerer Leistung und kürzerer Lebensdauer. Möglicherweise kann nur ein anderer Katalysator als Platin das Geforderte möglich machen. Kenichiro Ota von der Yokohama National University experimentiert zum Beispiel mit Niobium- und Titandioxid.⁷ Niob und Titan sind im Vergleich zu Platin spottbillig. Der Anspruch auf einen Durchbruch bei den Kosten um den Faktor zehn erfordert eine Portion Verrücktheit. Merkwürdigerweise sind viele gestandene Entwickler so verrückt. Was macht sie so zuversichtlich? Es ist die Überzeugung, dass das Ziel erreichbar ist, weil das Potenzial vorhanden ist – ganz im Gegensatz zum Durchbruch bei der Akku-Entwicklung.⁸ Dort wird das Potenzial als gering eingeschätzt. Beim Faktor zwei wird es schon als ausgeschöpft angesehen. Die zweite Kostensenkung für die Brennstoffzelle auf ein weiteres Zehntel wird aus der Massenfertigung resultieren. Werden Kasaharas Ziele erreicht, wäre es der finale Garaus für die meisten Verbrennungsmotoren der Pioniere Nikolaus Otto und Rudolf Diesel. Nicht einmal das ausschließlich mit Akku gespeiste Stadtauto könnte mithalten. Aber sind die Ziele des Toyota-Managers zu ambitioniert, um bis 2015 Realität zu werden? Toyota stapelt traditionsgemäß tief, um später die Konkurrenz mit unerwartetem Markteintritt zu verblüffen. Charles Freese, Manager von General Motors, liefert Fakten, wie schnell die Fortschritte in der Brennstoffzellentechnik tatsächlich

⁷ Showa Denko K.K. (SDK) hat unter dem NEDO Projekt (New Energy and Industrial Technology Development Organization), das von Professor Kenichiro Ota von der Yokohama National University geleitet wird, neue Platin-Ersatz-Katalysatoren für Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen (engl. polymer electrolyte fuel cell, PEFC) entwickelt. Diese neuen Katalysatoren bestehen aus einem auf Niobiumoxid basierendem Katalysator und einem auf Titandioxid basierendem Katalysator. Beide enthalten Kohlenstoff- und Stickstoffatome. Sie gehören damit zu den Platin-Ersatz-Katalysatoren mit der weltweit höchsten Effizienz in Bezug auf Leerlaufspannung und Lebensdauer.

⁸ Nach Analysen des Department of Energy der US-Regierung sind bei angenommenen 500.000 pro Jahr gefertigten Einheiten eines Brennstoffzellenfahrzeugs für 2009 US\$ 73 pro kW Antriebsleistung erreichbar, 2015 dann US\$ 30 pro kW Antriebsleistung und damit die Wettbewerbsfähigkeit mit dem Diesel (J. Garche, Elektromobilität – Brennstoffzellen- und Batterietechnologie, 8. Brennstoffzellenforum Hessen, 9.11.2009). Sowohl Daimler als auch General Motors gehen davon aus, dass sich das Brennstoffzellenauto in 2020 in 100.000er Stückzahlen zu etwa 10 Prozent Mehrpreis eines sauberen Diesel herstellen lässt (das wären dann die etwa 50 US\$/ kW). Auch die CONCAWE/EUCAR/JRC-Zahlen gehen in dieselbe Richtung. (<http://ies.jrc.ec.europa.eu/uploads/media/V3.1%20TTW%20App%201%2007102008.pdf>, Seite 7). Im Vergleich zum Diesel (21.600 €) und Benzin-Hybrid (25.900 €) liegt das Brennstoffzellenauto bei 31.200 € und das Hybrid-Brennstoffzellenauto bei 34.500 €, also rund 50 % teurer – aber dies ist 2010+ Technik in 100.000 Einheiten, die 2020 sicher noch etwas günstiger wären.

verlaufen.⁹ Die neueste Generation von Brennstoffzellenautos von General Motors benötigt im Vergleich zu 2005 (100 Testfahrzeuge) statt 80 nur noch 30 Gramm Katalysator-Platin, Volumen und Gewicht der Brennstoffzelleneinheit haben sich halbiert – und alles bei 20% Leistungssteigerung. Das Serienprodukt nach 2015 soll dann nur noch 10 Gramm Platin enthalten.

5. Wer macht das Rennen?

Die Brennstoffzelle ist noch teuer, die Akkus sind noch schwer und teuer. Große Verbesserungen, eher Durchbrüche sind vonnöten, um den Markt aus Diesel und Benzinern schnell aufzurollen. Kühn sind die Prognosen. Um den CO₂-Ausstoß aus Mobilität im Zeithorizont von heute bis 2025 erheblich zu senken, sollten wir die Chinesen imitieren. Von den 1,3 Milliarden sind bereits 100 Millionen mit einem Elektrofahrrad unterwegs, unter anderem mit Radtaxi, die bei Staus im Vorteil sind, und mit Lastenfahrrädern. Mit dem E-Rad würden wir unseren Aktionsradius höchst bequem und preiswert erweitern. Der Energieverbrauch ist so gering, dass es nicht einmal lohnt, über die Herkunft des Stroms aus der Steckdose zu diskutieren. Bei den Olympia-Winterspielen in Vancouver hat das Unternehmen Horizon Fuel Technology aus Hongkong den Besuchern ein Elektrofahrrad mit Brennstoffzellen-Zusatzantrieb angeboten. Die Leistung beim Anfahren und die Reichweite des handelsüblichen chinesischen Akku-Elektrofahrrads werden durch einen zugeschalteten Brennstoffzellen-Antrieb vergrößert. Als Wasserstoffspeicher dient ein Metallhydrid, das Wasserstoff einzulagern vermag und ihn bei Erwärmung freigibt. Da konnten gut Betuchte schon mal einen Schnupperkurs für nachhaltige Mobilität belegen. Gefragt sind noch Modeschöpfer, die eine Designer-Kluft für Elektro-Radfahrer entwerfen, die wind- und wetterfest ist, und die den Träger als modischen Avantgardisten erkennen lässt. Weniger Betuchte konnten in Vancouver einen der 20 Brennstoffzellenbusse benutzen, die im Liniendienst ins Skigebiet führen.

So kühn die Prognosen zum Brennstoffzellenauto sein mögen, wahrscheinlich ist dennoch, dass der mit fossilen Brennstoffen angetriebene Pkw ein Produkt von gestern sein wird. Vorbote könnte ein Verfall der Gewinnmargen sein, insbesondere bei hochwertigen Fahrzeugen. Automobilhersteller sind sich dessen bewusst. Die Furcht ist groß, im Wettbewerb um die Elektromobilität rückständig zu sein. Deutschland wäre tief betroffen, denn keine andere Industrienation hat eine so hohe Wertschöpfung pro Kopf im Automobilsektor. Und auch die vielen deutschen Patente der Automobil- und Zulieferindustrie könnten weniger wert sein. Bei den Automobilherstellern hat ein Run eingesetzt, sich Kompetenz für Elektromobilität zu verschaffen. Gefragt sind glückliche Ehen mit Firmen, die über ent-

⁹ Freese, Charles, Executive Director, Fuel Cell Activities, General Motors: Hydrogen Fuel Cell Vehicles – Surviving the Advanced Tech “Valley of Death”, Nov. 2009.

sprechende Kompetenz verfügen, zum Beispiel bei Elektromotoren und deren Steuerung, bei Akkus, Brennstoffzellen, Wasserstoffspeichern, Energieversorgung und einer Vielzahl von Komponenten. Das Rennen in der Automobilindustrie könnten diejenigen machen, die rechtzeitig Ehen mit den produktivsten Bräuten geschlossen haben. Die besten dürften schon versprochen sein.

6. Elektromobilität: Wettlauf der Nationen

Die Bundesregierung hat ein Forschungs- und Investitionsprogramm über 500 Millionen Euro innerhalb des Konjunkturpaketes II aufgelegt, Laufzeit bis Ende 2011,¹⁰ bedeutungsschwangerer Name: *Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung*¹¹, „um möglichst zügig den technologischen Anschluss der deutschen Industrie im Bereich Elektromobilität an die Weltspitze zu ermöglichen“. Das klingt so, als hinke die deutsche Automobilindustrie bereits hinterher. Seit Mitte 2008 läuft bereits ein *Nationales Investitionsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik (NIP)* in Höhe von 700 Millionen Euro, das weitere 700 Millionen Euro Co-Mittel der Industrie generieren soll, Laufzeit bis Ende 2016. Auch andere Nationen klotzen, die USA mit 2,4 Milliarden US\$ über zehn Jahre zuzüglich 25 Milliarden US\$ für Kredite an die Automobilhersteller und Zulieferer für kraftstoffsparende Fahrzeuge. China will von 2009 bis 2011 zwei Milliarden Euro für Pilotprojekte mit 10.000 Fahrzeugen ausgeben. Noch 2009 erhielt China 68 Millionen Euro jährliche deutsche Entwicklungshilfe...¹²

Nach Art und Umfang fließen in die Förderung von Elektromobilität durch die Bundesregierung mehr Mittel in Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie als in die Akku-basierte Forschung – ein Hinweis darauf, dass die Brennstoffzellenlinie strategisch bedeutender ist? Wenn ja, warum? Brennstoffzellen-Fahrzeuge decken ein sehr viel größeres Anforderungsspektrum des Verkehrs ab, nämlich auch große Teile des Güterverkehrs – ein in der Öffentlichkeit und damit auch in der Politik ewig unbeachtetes Segment. Politiker fahren Pkw, nicht Lkw.

7. Brennstoffzellen bei Bus und Bahnen

Daimler forscht und entwickelt für dreierlei Produktlinien: Der Pkw ist das Haupteinsatzfeld. Es werden 200 Brennstoffzellen-Pkw der 2. Generation produziert (Basis: Mercedes

¹⁰ Hinzu kommen werden zirka 250 Millionen Euro so genannte Co-Mittel der industriellen Antragsteller.

¹¹ Er umfasst „Zell- und Batterieentwicklung, Komponenten und deren Standardisierung für Elektro-Fahrzeuge, Stromnetze, Netzintegration, Batterierecycling, Informations- und Kommunikationstechnologie, Ausbildung und Kompetenzaufbau“.

¹² Das sei längst Wirtschaftsförderung, will heißen Sponsoring der Exportindustrie, so die matte Replik der Bundesregierung auf diese Komik. Dann aber wäre die Haushaltswahrheit verletzt, denn Wirtschaftsförderung an den Wettbewerber China wäre Sache des Wirtschafts-, nicht des Entwicklungshilfeministers.

B-Klasse), um die Kundenakzeptanz zu testen. Zugleich werden auch Transporter und Busse für den Nahverkehr mit mehreren baugleichen Brennstoffzellen-Elementen der Pkw-Version getestet. Die Fortschritte auf dem Massenmarkt der Pkw werden unmittelbar auf die Busse übertragen, freut sich Günter Elste, Chef der Hamburger Hochbahn, die bereits seit 2003 Wasserstoffbusse im Linienverkehr einsetzt. Ab 2011 kommen zehn Busse der neuesten Generation hinzu. Noch in 2010 begann außerdem ein Feldversuch mit sogenannten „seriellen Dieselhybridbussen“. Da treibt ein Dieselmotor, der immer im Bereich des höchsten Wirkungsgrades läuft, einen Generator an, der Fahrstrom erzeugt. Ein relativ kleiner Akku puffert diesen Vorgang. Er nimmt den im Generator gewonnenen Strom aus der Bremsenergie auf und gibt ihn beim Anfahren ab. In anderen Modellen werden zusätzlich, nämlich für eine sehr kurzfristige Pufferung weit unter einer Minute, Kondensatoren eingesetzt – sogenannte Supercaps. Sie erzeugen kaum Verluste bei Speicherung und Entnahme, sind billig und verschleifen nicht. Durch Pufferung mit dem Akku kann der Dieselmotor kleiner, sparsamer und preiswerter ausfallen. Erwartet wird eine Senkung des Energieverbrauchs um 25 Prozent, noch stärker sinken die Schadstoffe im Abgas. In späteren Fahrzeuggenerationen kann der Dieselmotor durch Brennstoffzellen ersetzt werden. Der übrige Antriebsstrang braucht dann kaum mehr verändert zu werden. Für Brennstoffzellenfahrzeuge hat die Pufferung mit dem Akku eine ebenso große Bedeutung beim Energiesparen, denn auch die Brennstoffzelle hat Leistungsbereiche mit schlechterem Wirkungsgrad. So wird bei sehr geringer Leistungsabforderung der Strom ausschließlich aus dem Akku entnommen, bei hoher Leistungsabforderung, also beim Beschleunigen, fließt der Strom sowohl aus der Brennstoffzelle als auch aus dem Akku.

Interessant könnte die Brennstoffzelle im Schienenverkehr werden. Auf den Hauptstrecken wird zwar mit Oberleitung gefahren, aber mit Wasserstoff im Tank und Akku-Pufferung (Rückspeisung von Bremsenergie für den Anfahrvorgang) könnte man sich so manche Oberleitung auf Nebenstrecken sparen, jedenfalls für Züge mit geringer Last. Auch manche Oberleitungsstörung ließe sich leichter überbrücken. Das deutsche Schienennetz könnte besser ausgenutzt werden, weil überlastete (elektrifizierte) Knoten auf nicht elektrifizierten Nebenstrecken umfahren werden könnten.

8. Wasserstoff in den Tank

Die anfangs nur wenigen Wasserstofffahrzeuge benötigen ein Minimum an flächendeckendem Tankstellennetz. Zunächst werden die Ballungsräume, dann die Achsen zwischen ihnen mit Tankstellen ausgestattet, so „H₂-Mobility“, eine Initiative der führenden Unternehmen von Fahrzeugherstellern, Tankstellenketten und Energieversorgern. Bis 2017 sollen auch die übrigen Räume erschlossen sein. Die Etablierung von Wasserstofftankstellen gleicht der von Erdgastankstellen. Die Grundausstattung von 1000 H₂-Tankstellen ist vorzufinanzieren, bis die Zahl der Nutzer groß genug ist, um das Tankstellennetz kostende-

ckend zu betreiben. Investitionsbedarf: zirka zwei Milliarden €, knapp die Hälfte der Abwrackprämie für Kfz, also kein strategisches Hindernis für einen Durchbruch von Brennstoffzellenfahrzeugen.

9. Woher kommt der Wasserstoff?

Wasserstoff kann aus fossilen Energien hergestellt werden, zum Beispiel aus Erdgas, bis zu 98% Methan (CH_4). In einem sogenannten Dampfreformer finden nacheinander folgende Reaktionen statt: Aus Methan (CH_4) und Wasserdampf (H_2O) wird Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (3 H_2). Anschließend wird aus Kohlenmonoxid (CO) und weiterem Wasserdampf (H_2O) Kohlendioxid (CO_2) und Wasserstoff (H_2). Dem Klima hilft diese Art der Wasserstoffherzeugung überhaupt nicht. Würde das Erdgas in einem umgerüsteten Benziner (Otto-Motor) verbrannt werden, ergäbe sich etwa die gleiche Energie- und CO_2 -Bilanz. Es kann aber trotzdem sinnvoll sein, eine solche Wasserstoffproduktion eine Zeit lang zu „dulden“, um der Etablierung von Elektromobilität Schub zu verleihen. Ein pedantisches Vorgehen, zunächst die vollständige Wasserstoffkette aus regenerativen Energien darzustellen und erst dann Brennstoffzellenautos an den Markt zu bringen, würde die Konversion zur Elektromobilität behindern. Die gleichzeitigen Entwicklungen von Wasserstoffkette und Brennstoffzellenauto beflügeln einander.

Auch aus Biomasse lässt sich Wasserstoff erzeugen, denn Biogas besteht überwiegend aus Methan und kann wie das Methan des Erdgases durch einen Dampfreformer geleitet werden. Aber es ist wirtschaftlicher und damit umweltfreundlicher, dezentral anfallende Biomasse wie Gülle oder Stroh dezentral zu verstromen und mit der dabei anfallenden Abwärme vor Ort zu heizen (Kraft-Wärme-Kopplung). Biomasse anzubauen, zum Beispiel schnell wachsende Hölzer, um in großen zentralen Anlagen Strom oder Treibstoffe zu erzeugen, ist wegen der Nutzungskonkurrenz zu Nahrungs- und Futtermitteln in Verruf geraten. Faszinierend, aber noch Zukunftsmusik ist die biotechnische Wasserstoffproduktion mit Grünalgen, die oxygene Photosynthese. Letztlich wird durch die Energie des Sonnenlichtes Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Die Algen stellen allerdings hohe Ansprüche an ihren Lebensraum. Deshalb versuchen zum Beispiel die Forscher der Max-Planck-Gesellschaft die Arbeitsweisen der kleinen Lebewesen zu imitieren, um auf ihre biologischen Ansprüche keine Rücksicht nehmen zu müssen.

„Grüner Wasserstoff“ wird heute hauptsächlich durch Elektrolyse, also die Aufspaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mit regenerativ erzeugtem Strom produziert. So geschieht es auch in der von Vattenfall betriebenen Wasserstofftankstelle für die Busse der Hamburger Hochbahn. Die energetischen Potenziale in Europa sind größer als die fossilen Energien, die heute von allen Verkehrsarten im Personen- und Güterverkehr zu Lande, zu Wasser und in der Luft verbraucht werden. Das größte deutsche Potenzial ist der Wind-

strom vor der Küste (off-shore), noch größer als das an Land (on-shore). Weltweit dominiert die Solarthermie (SOT) mit den größten Potenzialen in Afrika. Die Sonnenenergie der Sahara wird durch viele große Spiegel gebündelt und erzeugt Wasserdampf, der in Turbinen Strom erzeugt. Desertec ist das bisher größte Ökostrom-Projekt: Bis zum Jahr 2050 sollen Sonnenkraftwerke in der Sahara bis zu 15 Prozent des europäischen Strombedarfs decken und auch Nordafrika versorgen. Die Planungsgesellschaft Desertec Industrial Initiative (DII) wurde am 30. Oktober 2009 in München gegründet, mit dabei die Solarbranche, Siemens, E.ON, RWE und die Deutsche Bank, um nur die deutschen Gesellschafter zu nennen.

10. Windstrom bald konkurrenzfähig, weil Öl-, Kohle- und Erdgaspreise gleichzeitig explodieren

Windstrom wird bereits 2020 im Vergleich zu Steinkohlestrom konkurrenzfähig sein, so die Prognose der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik – ohne Einspeisevergütung, versteht sich, weil die spezifischen Kosten der Windmühlen in Euro pro installierter Leistung durch Innovation und Massenfertigung andauernd sinken.¹³ Gegenläufig dazu steigen die Kosten für Steinkohle. Bis zum Einbruch der Weltwirtschaft in Folge der Finanzkrise ist der Weltmarktpreis für Steinkohle ebenso stark wie der Ölpreis gestiegen, so das Hamburgische Weltwirtschaftsinstitut (HWWI). Ursache: Die Investitionen in Bergwerke, Transport- und Umschlaganlagen haben mit der Ausweitung der Förderung nicht mithalten. Neue Infrastruktur ist zudem teuer, denn bislang sind die Filet-Lagerstätten ausgebeutet worden, Filet im Sinne Wirtschaftlichkeit von Förderung und Transport, so Werner Zittel von der Energy Watch Group. Deutschland könnte auf seine riesigen Braunkohlevorkommen zurückgreifen – nach Russland die zweitgrößten der Welt.¹⁴ Aber die Braunkohleverstromung produziert am meisten Kohlendioxid. Dieses in großem Umfang zurück in ausgebeutete Erdgasfelder zu drücken, hat bisher den Status einer langfristigen Option, deren Nachhaltigkeit („CO₂ für immer versenkt“) noch in Zweifel gezogen wird. Strom aus Erdgas wird sich kurz und langfristig ebenfalls verteuern, weil es auf vielfältige Weise Öl ersetzen kann. Ein nur wenig umgerüsteter Pkw kann statt mit Benzin mit Erdgas betrieben werden, die Hausheizung mit Erdgas statt Dieselöl. Auch Grundsubstanzen für die chemische Industrie werden oft alternativ aus Erdgas oder Öl erzeugt. Der Erdgaspreis wird daher dem Ölpreis weitgehend folgen.

¹³ Der Zeitpunkt, an dem die Kosten von Windstrom mit denen von Steinkohlestrom gleichziehen, wird schon vor 2020 eintreten, je höher sich der Preis an den Börsen für die Emission von CO₂ einpendelt, desto früher.

¹⁴ Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover. Deutschland verfügt über 14 % der Weltreserven.

11. Test: Windstrom ins Netz oder für Elektromobilität?

Ist es vernünftig, aus Nordsee-Windstrom Wasserstoff für Elektromobilität zu erzeugen? Oder wäre es besser, den Windstrom ins Netz zu speisen, damit fossile Kraftwerke einzusparen und dadurch weniger CO₂ in die Atmosphäre zu blasen? Da kann ein Test helfen. Die Versuchsanordnung:

1. Windstrom aus der Nordsee (Wechselstrom) wird in Gleichstrom umgewandelt und in einen Elektrolyseur geschickt. Der erzeugte Wasserstoff gelangt über Rohrleitungen und Zwischenspeicher zu den Tankstellen. Dort fließt er – auf 700 bar verdichtet – in die Druckspeicher der Pkw und wird dann über die Brennstoffzellen in Strom für die Fahrmotoren und schließlich in mechanische Energie am Rad umgewandelt.
2. Windstrom aus der Nordsee wird an der Küste in das öffentliche Stromnetz eingespeist und ersetzt auf diese Weise ein (Erd-)Gas-Dampf-Kraftwerk (Wirkungsgrad: 58 Prozent). Das dadurch eingesparte Erdgas wird als Treibstoff für Erdgasautos verwendet.

Welche Verwendung von Windstrom lässt weniger CO₂ entstehen? Über die Wasserstoffkette kommt gut 25 Prozent als mechanische Energie am Pkw-Rad an, bei Einspeisung des Windstroms ins Netz könnte man mit dem eingesparten Erdgas für das Gas-Dampf-Kraftwerk über 30 Prozent an mechanischer Energie erzeugen. Das hieße, jede erzeugte Kilowattstunde Windstrom gehört zunächst einmal ins Netz! Stimmt aber nicht! Wind richtet sich nicht danach, wann Strombedarf im Netz herrscht. Er bläst nachts etwa genauso stark wie am Tag. Wir haben schon nachts zu viel Strom, weil wir Grundlastkraftwerke, zum Beispiel Braunkohle- und Atomkraftwerke, nur geringfügig herunterfahren können. Im Winterhalbjahr bläst der Wind doppelt so stark wie im Sommerhalbjahr, aber der Strombedarf im Winter ist nicht doppelt so hoch wie im Sommer. Bei manchen Wetterlagen in Deutschland und sogar in ganz Europa fällt Windstrom mehrere Tage, manchmal Wochen lang entweder üppig oder nur dürrig an. Strom kann aber nur in vernachlässigbarem Ausmaß gespeichert werden, sodass ein großer Anteil von Windstrom überhaupt nicht oder nur sehr ineffizient genutzt werden kann. Damit verkehrt sich das Ergebnis des Tests ins Gegenteil: Weil der Wind „wetterwendisch“ bläst und sich nicht darum schert, wann Strom im Netz benötigt wird, ist Windstrom für die Erzeugung von Wasserstoff erste Wahl, weil sich Wasserstoff speichern lässt – ähnlich unproblematisch wie Erdgas, relativ preiswert und in großem Umfang. „Der Konflikt in Georgien zeigt, dass wir uns auch beim (Erd-) Gas nicht noch stärker einseitig abhängig machen dürfen“, erklärte im Sommer 2008 der damalige Wirtschaftsminister Michael Glos der Frankfurter Allgemeinen Zeitung. Auf 90 Tage des jährlichen Verbrauchs wollte der Minister die strategische Erdgasreserve ausweiten und damit verdoppeln, ebenso lang wie die gesetzliche Ölreserve. Etwa 40 Euro hätte dies einen Privathaushalt bei einem Jahresverbrauch von 20.000 Kilowattstunden

gekostet, lamentierte der deutsche Außenhandelsverband für Mineralöl und Energie. 20.000 Kilowattstunden Erdgas haben etwa den gleichen Energieinhalt wie knapp 2.300 Liter Benzin¹⁵, mit denen man bei einem Verbrauch von 7 Litern pro 100 Kilometer rund 33.000 Kilometer im Jahr fahren könnte. Die mittlere Fahrleistung in Deutschland beträgt etwa ein Drittel davon. Eine strategische Wasserstoffreserve der Elektromobilität würde also wenig kosten, sogar dann, wenn sich die Wasserstoffspeicherung teurer als die von Erdgas erweisen sollte.

12. Es geht nicht so weiter, weil es nicht so weitergehen kann

Im Flyer ihres Buches „Postfossile Mobilität“ konstatieren die Autoren Jörg Schindler und Martin Held: „Das Ölangebot wird in naher Zukunft kontinuierlich abnehmen. Die Krise der Automobilindustrie ist in diesem Kontext zu sehen.“¹⁶ Einfacher: Die Automobilindustrie hat angesichts der Knappheit von Öl „nichts Passendes im Angebot“. Die Mobilitätsstrategie mit Wasserstoff ist eine glaubhafte Antwort, und sie passt mit der Energiestrategie zusammen, fossilen und nuklearen Strom durch grünen, aber wetterwendischen Strom zu ersetzen. Doch da ist das Problem, die neue Strategie umzusetzen. Was tun, bis sie greift? Da helfen wohl nur Zumutungen wie Umsteigen aufs Elektrofahrrad und auf Pkw erheblich geringerer Masse („Downsizing“). „Es geht nicht so weiter, weil es nicht so weitergehen kann“, schreiben Schindler und Held. Das ist kein Kassandrarufer, sondern – schlimmer – eine Feststellung.

Abstract

Electric vehicles propelled with electricity generated by hydrogen in fuel cells are usually regarded as representing just a long-term goal. However, hardly noticed by the public, nearly all important car manufacturers are developing passenger cars, light duty vehicles and buses with hydrogen and fuel cell drive systems. In most cases these developments have already proceeded to 3rd generation prototypes. Several companies are planning the market introduction of such vehicles in 2015. There are big challenges but also big opportunities which justify these costly and comprehensive R&D efforts. In spite of hydrogen as a fuel for transport needing a new fuel infrastructure, there are also systemic advantages with regard to the use of renewably generated electricity: hydrogen (like methane) is perfectly suited as an energy storage in underground caverns for electricity derived from wind power. E-mobility based on hydrogen and fuel cells is matching perfectly with German strategic goals for the future supply of renewable electricity.

¹⁵ Unterer Heizwert von russischem Erdgas: rund 11,2 kWh/m³, das entspricht einem Energieinhalt von knapp 1,23 Litern Benzin.

¹⁶ Jörg Schindler und Martin Held: Postfossile Mobilität, VAS –Verlag für Akademische Schriften, Bad Homburg 2009.