

## Am Ende bleibt der Wasserstoff

Alle reden vom Elektroauto. Doch Strom aus Akkus wird die nötige Mobilität nicht bringen. Bei der Brennstoffzelle sieht das schon anders aus. Wer von den Automobilherstellern bislang nicht dabei ist, für den ist es allerdings zu spät. Eine Analyse

*Von Gottfried Ilgmann*

Neulich in Stuttgart. In der Metropole der deutschen Traumatourindustrie fand Ende September eine Fachtagung mit paralleler Messe namens "f-cell" statt. Fuel Cells, zu Deutsch Brennstoffzellen, waren das Thema: jene Apparate, die aus Luft und Wasserstoffgas auf direktem Wege elektrischen Strom gewinnen - zum Beispiel um Elektroautos damit anzutreiben und so in einem nachfossilen Zeitalter die individuelle Mobilität zu sichern. Statt eines Akkus, oder zusätzlich zu einem solchen, hat solch ein Gefährt einen Wasserstofftank.

Auf der "f-cell" konnte man ein mit Brennstoffzellen bestücktes Elektroauto auch Probe fahren: den HydroGen4 von Opel. Der Zwitter aus Mittelklassewagen und Sport Utility Vehicle bezieht 93 Kilowatt aus seiner Brennstoffzelle und weitere 35 Kilowatt aus einem Puffer aus Nickel-Metallhydrid-Akkus. Wie es für Elektroantriebe typisch ist, steht immer die volle Leistung zur Verfügung, egal, ob die Drehzahl hoch ist oder bei null liegt. So beschleunigt der Zweitonner sehr viel flinker als ein Benziner oder Turbodiesel gleicher Leistung. Seine Höchstgeschwindigkeit beträgt 160 Kilometer pro Stunde, die Drucktanks fassen bei 700 bar 4,2 Kilogramm Wasserstoff, das reicht für 320 Kilometer Fahrstrecke. Mehr Reichweite durch mehr Drucktanks stände nichts im Wege.

Aber warum Wasserstofftanks, wenn man den Fahrstrom auch ganz in Akkus speichern

kann? Tatsächlich kommt in zwei Jahren in Europa der Opel Ampera auf den Markt. Nach Gewicht und Leistung ist er dem HydroGen4 vergleichbar. Das gilt auch für die Höchstgeschwindigkeit. 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 Akkus 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.

Doch wer sollte eine solche Renn-Reise-Limousine mit 60 Kilometer Reichweite kaufen? Als "Nur-Stadtauto" ist sie überdimensioniert, für weite Fahrten untauglich. Deshalb hat Opel in den Ampera einen "Range Extender" eingebaut, ein Zusatzaggregat, das bei Bedarf die Reichweite verlängert: einen 55-Kilowatt-Corsa-Motor, 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 um einen leeren Tank sein kann" - auch bei

jenen 80 Prozent der Europäer, die täglich nicht mehr als 50 Kilometer fahren, für die also eine Reichweite von 60 Kilometern völlig ausreichend wäre. Zugleich ist jedoch der Markt für Nur-Stadtautos gering. Ein Vielfaches so groß ist er für Autos, die gelegentlich weiter fahren können. Doch müsste der Opel Ampera 320 Kilometer weit von Akkustrom zehren, wöge die Batterie etwa eine Tonne. So ein Akku-Dreitonner wäre unbezahlbar, die normale Steckdose für den Ladestrom nicht brauchbar.

Unabhängig vom fossilen Kraftstoff wäre also auch ein so elektrifizierter Individualverkehr nicht. Ein technischer Durchbruch bei den Akkus könnte alles ändern, aber ob es den geben wird, ist mehr als fraglich. Ist damit der Elektro-Pkw entgegen aller verbreiteten Hoffnung schon am Ende?

Die Antwort lautet: ja. Jedenfalls dann, wenn an ihn derselbe Anspruch wie an die Alleskönner Benzin- und Diesel-Pkw gestellt wird. Akku-Autos entfalten ihre Stärken bei geringen Reichweiten, geringer Fahrzeugmasse und Situationen, in denen überwiegend stop-and-go gefahren wird. Diese Kombination trifft auf das Nur-Stadtauto zu.

Doch Elektroantriebe können mehr, wenn der Strom statt aus Akkus aus Brennstoffzellen kommt. Die Technik ist keineswegs neu. Bereits 1838 entdeckte der Chemiker Christian Friedrich Schönbein das Prinzip, nach dem sich Wasserstoff gewissermaßen still verbrennen lässt. Statt durch Flammenhitze oder Explosionsknall wird die Energie hier als elektrischer Strom frei (siehe nebenstehende Grafik "So funktioniert eine Brennstoffzelle").

Ein Jahr nach Schönbeins Entdeckung führte der britische Naturforscher William Grove

erste praktische Experimente durch. Danach geriet die Brennstoffzelle in Vergessenheit. Erst dank der Raumfahrt erlebte sie ein Comeback.

Dabei wird unter dem Begriff "Brennstoffzelle" heute in erster Linie die Wasserstoff-Zelle verstanden, obwohl auch andere Stoffe mit Luftsauerstoff unter direkter Freigabe von elektrischer Energie umgesetzt werden können, beispielsweise Methan oder Methanol. Zellen für diese Brennstoffe aber spielen für die elektrische Mobilität derzeit kaum eine Rolle.

Die Wasserstoff-Brennstoffzellen dagegen schon. Damit ausgestattete Elektroautos werden nicht nur von Opel, sondern auch von anderen großen Automobilbauern, etwa Toyota, Honda, Nissan oder Daimler, entwickelt. "Wir sind bereits auf der Zielgeraden zur Kommerzialisierung", sagt Andreas Truckenbrodt von der Automotive Fuel Cell Corporation, einer mehrheitlich von Daimler getragenen Entwicklungsinitiative. Im Jahr 2015 soll die Markteinführung sein - das klingt so, als wären wir bereits dabei, unsere gewohnte Mobilität mittels alternativer Technik in die Zukunft zu retten. Wirklich?

Ikuo Kasahara, Manager von Toyota Motor Europe, zeigte auf der "f-cell" in Stuttgart, welche Herkulesarbeit den Entwicklern in Wahrheit noch bevorsteht. Die Kosten müssten um zwei Größenordnungen, also auf ein Hundertstel gegenüber dem Bezugsjahr 2005 gedrückt werden. Die erste Kostensenkung auf ein Zehntel ist dabei die schwierigste. Wie etwa kommt man ohne das teure Platin aus, das als Katalysator in den Elektroden die Gasmoleküle aufzubrechen hilft? Gefragt ist die gleiche Katalysatorwirkung mit einem Zehntel des

Platinbedarfs von 2005, und das bei höherem Wirkungsgrad und längerer Lebensdauer.

Als "Trilemma" bezeichnet Kasahara diese Aufgabe, weil sich nicht nur zwei Ziele widersprechen, sondern drei: 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 Oxiden des Niobs und Titans, die im Vergleich zu Platin spottbillig sind. Dennoch: Der Glaube, die Kosten schon um einen Faktor zehn drücken zu können, erfordert eine Portion Verrücktheit. Merkwürdigerweise sind aber viele Entwickler so verrückt. Was macht sie so zuversichtlich? Die Tatsache, dass das Potential vorhanden ist - ganz im Gegensatz zu den Einsparungspotentialen bei der Akku-Entwicklung.

Die zweite Kostensenkung für die Brennstoffzelle auf ein weiteres Zehntel wird die Massenfertigung bringen. Werden Kasaharas Ziele erreicht, wäre das tatsächlich der Garaus für die meisten Verbrennungsmotoren. Nicht einmal das ausschließlich aus Akkus 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 mit unerwartetem Markteintritt zu verblüffen. Charles Freese von General Motors dagegen sagt unverblümt, wie schnell die Fortschritte in der Brennstoffzellentechnik tatsächlich verlaufen: Die neueste Generation von Brennstoffzellenautos von General Motors benötigt im Vergleich zu 2005 statt 80 nur noch 30 Gramm Katalysator-Platin. Volumen

und Gewicht der Brennstoffzelleneinheit haben sich halbiert - und das alles bei 20 Prozent Leistungssteigerung. Das Serienprodukt nach 2015 soll dann bereits mit 10 Gramm Platin auskommen.

So kühn die Prognosen heute noch wirken mögen, so wahrscheinlich ist es dennoch, dass der mit fossilen Brennstoffen angetriebene Pkw ein Produkt von gestern sein wird. Die Automobilhersteller sind sich dessen bewusst. Entsprechend groß ist die Furcht, im Wettbewerb zurückzubleiben. Deutschland wäre besonders betroffen, denn keine andere Industrienation hat eine so hohe Wertschöpfung pro Kopf im Automobilsektor. Unter den Herstellern hat ein Run eingesetzt, sich elektrische Kompetenzen zu verschaffen. Gefragt sind Allianzen mit Firmen, die über entsprechende Erfahrung verfügen, zum Beispiel bei Elektromotoren und deren Steuerung, bei Akkus, Brennstoffzellen, Wasserstoffspeichern. Das Rennen könnten jene Autobauer machen, die rechtzeitig Ehen mit den produktivsten Bräuten geschlossen haben. Die attraktivsten unter ihnen dürften längst versprochen sein.

Unterdessen hat die Bundesregierung in der ersten Hälfte 2009 den "Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität" vorgelegt, ein 500 Millionen Euro schweres Forschungs- und Investitionsprogramm im Rahmen des Konjunkturpaketes II. Sein erklärtes Ziel lautet, "möglichst zügig den technologischen Anschluss der deutschen Industrie im Bereich Elektromobilität an die Weltspitze zu ermöglichen" - was so klingt, als hänge die deutsche Automobilindustrie bereits hinterher. Dabei läuft seit Mitte 2008 bereits ein Nationales Investitionsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik (NIP) in Höhe von 700 Millionen Euro, das

weitere 700 Millionen Euro aus der Industrie generieren soll, Laufzeit bis Ende 2016.

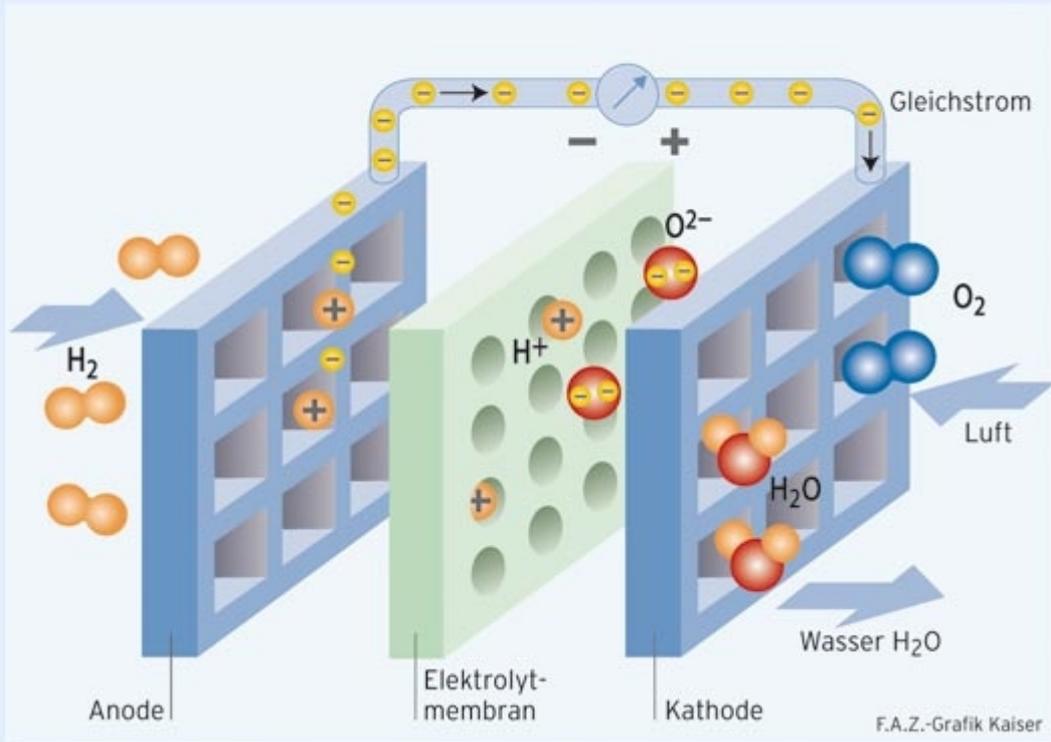
Auch andere Nationen klotzen, die Vereinigten Staaten mit 2,4 Milliarden Dollar über zehn Jahre zuzüglich 25 Milliarden für Kredite an die Automobilhersteller und Zulieferer für kraftstoffsparende Fahrzeuge. China, ein Land, das derzeit noch jährlich 68 Millionen Euro deutsche Entwicklungshilfe bezieht, will von 2009 bis 2011 zwei Milliarden Euro für Pilotprojekte mit 10 000 Fahrzeugen ausgeben.

Nach Art und Umfang der Förderung fließen dabei durch die Bundesregierung mehr Mittel in die Erforschung der Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie als in die Akku-Forschung. Ist das nun ein Hinweis darauf, dass die Brennstoffzellenlinie strategisch bedeutsamer ist?

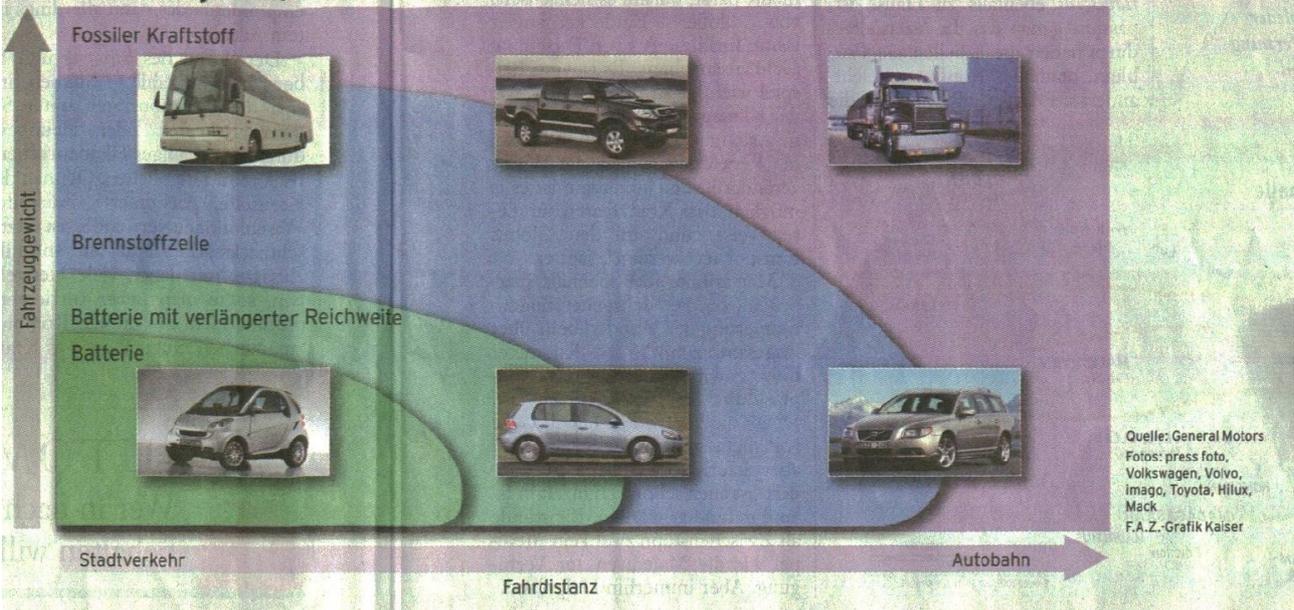
Nebenstehende Grafik ("Auf die Anwendung kommt es an") wurde auf der "f-cell" in Stuttgart gleich von drei Referenten bemüht. Sie zeigt auch, warum von dieser Technik in der öffentlichen Debatte so viel seltener die Rede ist als von den Lithium-Ionen-Akkus. Brennstoffzellen-Fahrzeuge decken ein weit größeres Anforderungsspektrum ab als Akku-Gefährte, und sie taugen dabei nicht nur für den Personennahverkehr (siehe: "Brennstoffzelle in Bus und Bahn"), sondern auch für den leichten Güterverkehr über kurze und mittlere Distanzen - ein in der Öffentlichkeit notorisch unbeachtetes Segment. Warum? Ganz einfach: Kaum ein Politiker oder auch nur eine Minderheit der Wähler fahren Lieferwagen.

Veröffentlicht in: Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung, 10.1.2010, Nr. 1 / Seite 48

# So funktioniert eine Brennstoffzelle



## Auf die Anwendung kommt es an



Illustrationen: Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung, 10.1.2010, Nr. 1 / Seite 48

## Woher kommt das gute Gas?

Brennstoffzellenautos passen gut zur Vision einer nachfossilen Stromwirtschaft

Wasserstoffgas kann aus fossilen Energien hergestellt werden, zum Beispiel aus Erdgas, das bis zu 98 Prozent aus Methan besteht.

Dazu wird es in einem sogenannten Dampfreformer mit Wasserdampf zu Wasserstoff und Kohlenmonoxid umgewandelt, aus Letzterem zusammen mit mehr Wasserdampf zu Kohlendioxid und noch einmal Wasserstoff.

Dem Klima hilft diese Art der Wasserstofferzeugung allerdings überhaupt nicht. Würde das Erdgas einfach so in einem umgerüsteten Benzinmotor verbrannt, ergäbe sich etwa die gleiche Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz. Es kann aber trotzdem sinnvoll sein, eine solche Wasserstoffnutzung eine Zeitlang zu dulden. Denn die vollständige Wasserstoffkette aus nichtfossilen Energien darzustellen und erst dann Brennstoffzellenautos auf den Markt zu bringen würde die Konversion zur Elektromobilität behindern.

Auch aus Biomasse lässt sich Wasserstoff erzeugen, denn Biogas besteht ebenfalls überwiegend aus Methan. Aber es ist wirtschaftlicher und damit umweltfreundlicher, Biomasse wie Gülle oder Stroh dezentral zu verstromen und mit der dabei anfallenden Abwärme vor Ort zu heizen. Biomasse anzubauen, zum Beispiel in Form schnell wachsender Hölzer, um damit in großen zentralen Anlagen Strom oder Treibstoff zu erzeugen, ist wegen der Nutzungskonkurrenz zu Nahrungs- und Futtermitteln in Verruf geraten. Faszinierend, aber noch Zukunftsmusik ist die biotechnische Wasserstoffproduktion mit Grünalgen. Auf dem Wege der Photosynthese wird dabei durch Sonnenlicht Wasser in Wasserstoff und

Sauerstoff gespalten. Die Algen stellen allerdings hohe Ansprüche, deshalb versuchen zum Beispiel die Forscher der Max-Planck-Gesellschaft, die biochemischen Photosynthesewege künstlich zu imitieren.

Heute wird "Grüner Wasserstoff" hauptsächlich durch Elektrolyse, also Aufspaltung von Wasser in Wasser- und Sauerstoff, mit regenerativ erzeugtem Strom produziert - so auch in der Wasserstofftankstelle für die Busse der Hamburger Hochbahn. Die Potentiale für den Ausbau dieser Wasserstoffquelle sind erheblich, in Europa sind sie größer als alle fossile Energie, die heute vom Personen- und Güterverkehr zu Lande, zu Wasser und in der Luft verbraucht wird. Das größte deutsche Potential liegt in der Windenergie aus Generatoren vor der Küste. Weltweit, vor allem in Afrika, ist es die Solarthermie. Dabei wird die Sonnenstrahlung durch Spiegel gebündelt und liefert Dampf, der in Turbinen Strom erzeugt. Würde etwa die Vision des im vergangenen Oktober initiierten Desertec-Projektes Wirklichkeit, könnten Sonnenkraftwerke in der Sahara bis zum Jahr 2050 bis zu 15 Prozent des europäischen Strombedarfs decken und gleichzeitig auch noch Nordafrika versorgen.

Ohne so etwas wie Desertec (und ohne Kernenergie) bleibt für die nichtfossile Stromerzeugung in Deutschland nur der Wind. Hier fragt sich aber, was im Sinne des Klimaschutzes vernünftiger ist: mit dem Nordseewindstrom Wasserstoff für Elektromobilität zu erzeugen - oder den Strom ins Netz zu speisen, um damit fossile Kraftwerke einzusparen? In ersterem Fall würde der Windstrom in einen Elektrolyseur

geschickt. Der erzeugte Wasserstoff gelangte anschließend über Rohrleitungen und Zwischenspeicher zu den Tankstellen. Dort flösse er - auf 700 bar verdichtet - in die Druckspeicher der Fahrzeuge und würde über die Brennstoffzellen in Strom für die Fahrmotoren und schließlich in mechanische Energie am Rad umgewandelt. Im zweiten Fall würde der Windstrom an der Küste in das öffentliche Stromnetz eingespeist und ersetzt auf diese Weise zum Beispiel ein Erdgaskraftwerk mit einem Wirkungsgrad von 58 Prozent. Das dadurch eingesparte Erdgas würde dann als Treibstoff für Erdgasautos verwendet.

Welche dieser beiden möglichen Nutzungen von Windstrom für den Individualverkehr ließe weniger CO<sub>2</sub> entstehen? Über die Wasserstoffkette kämen gut 25 Prozent als mechanische Energie am Pkw-Rad an. Bei Einspeisung des Windstroms ins Netz dagegen könnte man mit dem eingesparten Erdgas für das Gas-Dampf-Kraftwerk mehr als 30 Prozent an mechanischer Energie erzeugen. Das hieße also, jede erzeugte Kilowattstunde Windstrom gehört zunächst einmal ins Netz.

Doch die Rechnung stimmt so nicht. Wind richtet sich nicht danach, wann Strombedarf im Netz herrscht. So bläst er nachts etwa genauso stark wie am Tag. Deutschland hat aber schon jetzt nachts zu viel Strom, weil die vorhandenen Grundlastkraftwerke, zum Beispiel Braunkohle- und Kernkraftwerke, nur geringfügig heruntergefahren werden können. Auch weht der Wind im Winterhalbjahr gut 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 wochenlang entweder üppig oder nur dürftig an. Elektrischer 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 ins Gegenteil: Weil der Wind sich nicht darum schert, wann Strom im Netz benötigt wird, ist Windstrom für die Erzeugung von Wasserstoff erste Wahl, denn Wasserstoff lässt sich ähnlich unproblematisch speichern wie Erdgas - in großem Umfang und relativ preiswert. Als der frühere Wirtschaftsminister Michael Glos die strategische Erdgasreserve einmal auf 90 Tage des jährlichen Verbrauchs verdoppeln wollte, lamentierte der deutsche Außenhandelsverband für Mineralöl und Energie, dass dies einen Privathaushalt bei einem Jahresverbrauch von 20 000 Kilowattstunden etwa 40 Euro kosten würde. 20 000 Kilowattstunden Erdgas haben nun etwa den gleichen Energieinhalt wie knapp 2300 Liter Benzin, mit denen man bei einem Verbrauch von sieben Litern pro 100 Kilometer rund 33 000 Kilometer im Jahr fahren könnte. Die mittlere Fahrleistung in Deutschland beträgt etwa ein Drittel. Eine strategische Wasserstoffreserve für Elektromobilität würde also nur wenig kosten, sogar dann, wenn sich die Wasserstoffspeicherung als teurer als die von Erdgas erweisen sollte.

*Gottfried Ilgmann*

## Brennstoffzelle in Bus und Bahn

Eine wasserstoffbasierte Treibstoffwirtschaft taugt nicht nur fürs Auto

Auf dem Weg in die mineralöllose Mobilität ist der Pkw das Haupteinsatzfeld der Brennstoffzelle. Daimler beispielsweise produziert zurzeit 200 Brennstoffzellen-Pkw der zweiten Generation auf der Basis der Mercedes-B-Klasse, um die Akzeptanz bei den Kunden zu untersuchen. Zugleich testet man aber auch Transporter und Busse für den Nahverkehr mit weitgehend baugleichen Brennstoffzellen. Fortschritte auf dem riesigen Massenmarkt der Pkw werden unmittelbar auf die Busse übertragen, freut sich etwa Günter Elste, der Chef der Hamburger Hochbahn, die seit 2003 Wasserstoffbusse im Linienverkehr einsetzt. Ab 2011 kommen zehn Busse der neuesten Generation hinzu. Noch dieses Jahr beginnt 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 einer Phase, in welcher der Motor die Energie des Diesels nicht optimal in Antrieb umsetzen kann.

In anderen Modellen werden für eine sehr kurzfristige Pufferung Kondensatoren, sogenannte Supercaps, eingesetzt. Sie erzeugen kaum Verluste bei Speicherung und Entnahme, sind billig und verschleifen nicht. Durch die Pufferung mit Akku und Supercap

kann der Dieselmotor kleiner, sparsamer und preiswerter ausfallen. Erwartet wird eine Reduzierung des Energieverbrauchs um 25 Prozent, noch größer wird die Reduzierung der Schadstoffe im Abgas ausfallen.

Wird der Dieselmotor durch Brennstoffzellen ersetzt, braucht der übrige Antriebsstrang kaum mehr verändert zu werden. Für Brennstoffzellenfahrzeuge hat die Pufferung mit Akku und Kondensator eine ebenso große Bedeutung beim Energiesparen, denn auch die Brennstoffzelle hat Leistungsbereiche mit schlechterem Wirkungsgrad. So wird bei sehr geringer Belastung der Strom ausschließlich aus Akku und Supercap entnommen, bei hoher Belastung, also beim Beschleunigen, fließt der Strom sowohl aus der Brennstoffzelle als auch aus Akku und Supercap.

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

*Gottfried Ilgmann*

