

# Wasserstoff – Treibstoff der Zukunft?

Fast schien es, als hätten Biokraftstoffe und Batterien ihre stärkste Konkurrenz – die lange als Hoffnungsträger gehandelten Brennstoffzellen – aus dem Markt der alternativen Antriebstechnologien gedrängt. Doch nun kündigt sich ein Comeback an.

Von Jeff Tollefson

»Das erste Auto, das ein in diesen Tagen geborenes Kind einmal fahren wird, könnte vollkommen schadstofffrei mit Wasserstoff angetrieben werden«, erklärte der damalige US-Präsident Georg W. Bush, als er 2003 eine mit 1,2 Milliarden Dollar geförderte Brennstoffzelleninitiative ankündigte. Ihr Ziel: marktreife Fahrzeuge bis zum Jahr 2020.

Eine ansprechende Idee. Diese Technik versprach mehr Unabhängigkeit von fremdem Öl, und aus dem Auspuff käme Wasser statt diverser Schadstoffe, insbesondere keine Treibhausgase. Das Vorhaben passierte problemlos den amerikanischen Kongress; das Energieministerium und andere Forschungseinrichtungen gingen an die Arbeit. Dann aber zogen Biokraftstoffe und batteriebetriebene Fahrzeuge alle Aufmerksamkeit auf sich, da beide Techniken versprachen, den Kohlendioxid ausstoß im Transportwesen schneller und billiger zu reduzieren.

Das Ende der Brennstoffzellentechnik schien besiegelt, als Steven Chu 2009 sein Amt als Energieminister antrat. Er brandmarkte vier ungelöste Probleme der Wasserstofftechnik. Die Autobauer suchten erstens immer noch nach einer Brennstoffzelle, die robust, haltbar und obendrein billig war, zweitens nach einer Möglichkeit, genug Wasser-

stoff für Langstrecken zu speichern. Man benötige drittens eine neue Infrastruktur für den Vertrieb von Wasserstoff. Und selbst wenn alle diese Hindernisse überwunden seien, mangle es an einer Technologie, Wasserstoff aus weitgehend CO<sub>2</sub>-neutralen Quellen zu erzeugen statt wie bisher aus Erdgas. Im Mai 2009, vier Monate nach seiner Vereidigung, kündigte Chu an, die Forschungsgelder für Brennstoffzellenfahrzeuge im ersten Budget seines Ministeriums zu kürzen. Investitionen in Biokraftstoffe und Batterien seien lohnender. Auch manch ein Umweltschützer war erleichtert. Bushs Initiative werteten sie als Versuch, den Status quo einer erdölbasierten Mobilität durch ein Ablenkungsmanöver zu bewahren – durch die Fokussierung auf eine unerreichbare Alternative.

Doch die Kürzungen mobilisierten die Befürworter der Wasserstofftechnologie, und in den nächsten Monaten zeigte sich, dass die Debatte noch lange nicht vorbei war. Dank effektiver Lobbyarbeit erlitt der Energieminister im Kongress eine Niederlage, und die Fördermittel standen wieder zur Verfügung.

Am 9. September 2009 unterzeichneten neun wichtige Autohersteller – Daimler, Ford, General Motors, Honda, Hyundai, Kia, Renault, Nissan und Toyota – in Stuttgart eine gemeinsame Erklärung, bis 2015 Brennstoffzellenfahrzeuge auf den Markt bringen zu wollen. Auf eine Initiative von Daimler hin

versprochen zudem Shell und das schwedische Unternehmen Vattenfall am Tag darauf, die notwendige neue Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland aufzubauen.

## Die gedrosselte Knallgasreaktion

Nicht jeder begrüßt den neuerlichen Ansporn und findet so harsche Worte. »Das ergibt keinen Sinn«, meint beispielsweise Don Hillebrand, der Leiter des Center for Transportation Research am Argonne National Laboratory in Illinois. Doch die Verfechter der Brennstoffzellentechnologie strotzen nun vor Zuversicht. »Diese gemeinsame Absichtserklärung unterstreicht den Willen der Industrie, Fortschritte zu machen«, freut sich Klaus Bonhoff, der die Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) leitet. Die Bundesregierung hatte diese Einrichtung 2008 ins Leben gerufen, um das

deutsche Wasserstoffprogramm weltweit an die Spitze zu bringen.

Wenn man die von Steven Chu aufgelisteten vier wichtigsten Herausforderungen genauer unter die Lupe nimmt, zeigt sich, dass tatsächlich beide Seiten gute Argumente haben: Einige der Schwierigkeiten sind schon beinahe gelöst, bei anderen steht die Forschung noch am Anfang.

Im Prinzip ist eine Brennstoffzelle einfach eine Vorrichtung, in der eine gedrosselte Knallgasreaktion stattfindet: Sauerstoff aus der Luft reagiert mit Wasserstoff aus einem Tank, jedoch ohne starke Hitzeentwicklung. Dabei gibt Letzterer ein Elektron ab, diffundiert durch eine Membran zum Sauerstoff und bildet mit ihm Wasser. Die Elektronen fließen gleichzeitig durch einen äußeren Stromkreis von der Wasserstoff- zur Sauerstoffseite – und treiben über einen Elektromotor Räder an.

BEIDE FOTOS: AIR PRODUCTS AND CHEMICALS, INC.



**Kraftstoff, wann und wo immer er gebraucht wird – für die Vermarktung des Brennstoffzellenantriebs ist die fehlende Infrastruktur ein Problem (Fotos: ein GM Equinox an einer Wasserstofftanksäule auf Long Island).**



**»Es wird ganz bestimmt ein Auto sein, das sich viele Menschen leisten können«**

*Craig Scott, Toyota*

Die Realität ist leider deutlich verzwickter. Um die chemische Reaktion kontrollieren und daraus Strom gewinnen zu können, ist eine komplizierte Anordnung aus Leitungen, Membranen, Katalysatoren und anderen Bauteilen notwendig. Und genau darin liegt die große Herausforderung: Wie verpackt man all dies zu einem leichten, billigen und robusten Gerät, das lange und verlässlich seinen Dienst verrichtet, darüber hinaus aber auch noch genügend Leistung bereitstellt, um ein Auto gemäß den Anforderungen des heutigen Verkehrs zu beschleunigen und obendrein alle jetzt schon in Fahrzeugen vorhandenen elektrischen Verbraucher zu versorgen, als da sind Beleuchtung, Sicherheitssysteme wie ABS, Klimaanlage, Radio und all die sonstigen Annehmlichkeiten, die ein Kunde heute von seinem Auto kennt?

Vor zehn Jahren schien dieses Ziel noch in weiter Ferne. Die Entwickler wagten es nicht einmal, ihre Versuchsfahrzeuge allzu kaltem Wetter auszusetzen, und verluden sie in geheizte Transporter. Sie fürchteten, in den Zellen verbliebener Wasserdampf könne gefrieren und die Eiskristalle würden dem empfindlichen Innenleben schaden.

Doch im Lauf der Zeit gab es bemerkenswerte Fortschritte. »Niemand rief: Hier ist der herausragende Durchbruch!«, kommentiert Byron McCormick, der bis Januar 2009 das Brennstoffzellenprogramm von General Motors leitete. »In Wirklichkeit war es eine Unmenge kleiner Schrittschritte.«

Das Problem mit dem kalten Wetter etwa lösten die Ingenieure von GM, indem sie das Abluftsystem der Zellen noch ein bis zwei Minuten nach dem Abschalten des Motors weiterlaufen ließen; die Resthitze verdrängte das Wasser aus dem System. Auch Toyota hat offenbar einen Weg gefunden: Sein Versuchsfahrzeug, eine Geländelimousine vom Typ Highlander, könne noch bei minus 37 Grad Celsius starten.

Teure Katalysatormaterialien, notwendig, um Wasserstoff in Elektronen und Protonen zu spalten, trieben die Preise in die Höhe. Inzwischen kommen Brennstoffzellen von General Motors mit ungefähr 80 Gramm Platin aus. Derzeit kostet das Edelmetall um die 40 Euro pro Gramm (Stand 15. Juli 2010), schlägt also bei den Gesamtkosten pro Zelle mit 3200 Euro zu Buche. Aber das Unternehmen verspricht, dank immer dünnerer Katalysatorschichten in der nächsten Brennstoffzellengeneration nur noch 30 Gramm Platin zu benötigen. Eine Strukturierung des Katalysators auf der Nanometerskala soll seine Oberfläche derart vergrößern, dass der Materialbedarf im Lauf des nächsten Jahrzehnts auf zehn

Gramm Platin sinkt – ein wichtiger Schritt hin zur Wettbewerbsfähigkeit.

Das amerikanische Energieministerium schätzt inzwischen, dass die Kosten für die Erzeugung von einem Kilowatt Strom durch Brennstoffzellen von 2002 bis 2008 um fast 75 Prozent gefallen sind. Das sollte sich in den Marktpreisen niederschlagen. Doch darüber reden die Firmen noch nicht gerne, höchstens darüber, dass sie Mitte dieses Jahrzehnts Fahrzeuge auf den Markt bringen werden, die sich gegen ihre Konkurrenten – mit Verbrennungsmotor, Hybrid- oder Batterieantrieb – behaupten können. »Ich mache das schon seit zehn Jahren, und die Zahlen überraschen sogar mich«, versichert Craig Scott, ein Manager der Toyota-Abteilung für neue Technologien in Torrance (Kalifornien). »Es wird ganz bestimmt ein Auto sein, das sich viele Menschen leisten können.«

Mitte vergangenen Jahres stiegen Ingenieure des Unternehmens gemeinsam mit Regierungsbeamten in zwei Brennstoffzellen-Highlander und legten damit 533 Kilometer auf öffentlichen Straßen zurück – mit nur einer Tankfüllung. Berechnungen zufolge hätten sie sogar 693 Kilometer weit kommen können, das wäre in etwa gleichauf mit der Reichweite eines Benziners.

### **Das einfachere Verfahren setzt sich durch**

Vor zehn Jahren noch stand man ziemlich entmutigt vor der Frage der Wasserstoffspeicherung. Als Gas lässt er sich zwar relativ einfach in einem Drucktank speichern, doch der hätte entweder inakzeptabel groß oder ungewöhnlich stabil sein müssen – mit mehreren hundert Bar ließe sich Wasserstoff auf ein akzeptables Volumen verdichten. Eine Alternative ist flüssiger Wasserstoff, der eine viel höhere Dichte besitzt, doch den Raumgewinn erkaufte man sich mit der erforderlichen Kryotechnik und Tankisolation, denn das Gas wird erst bei minus 253 Grad Celsius flüssig. Auch dies hätte das Gewicht des Fahrzeugs vergrößert, seinen Aufbau komplizierter gemacht und den Preis nach oben schnellen lassen.

Letztlich machte die Druckspeicherung das Rennen, weil es das einfachere Verfahren ist. Die meisten Unternehmen verwenden kohlenstofffaserverstärkte Tanks, die einem Innendruck von 680 Bar standhalten und trotzdem vergleichsweise leicht sind. Um die Reichweite noch weiter zu erhöhen, statten die meisten Autobauer ihre Fahrzeuge außerdem mit einer Rekuperationsbremse aus, wie sie bei Hybridautos und Batteriefahrzeugen zum Einsatz kommt, um beim Bremsen elektrische Energie zurückzugewinnen.

Weil Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge Elektromotoren haben, nutzen sie vielfach die gleichen Technologien. Der einzige große Unterschied liegt im Energiespeicher: Brennstoffzelle beziehungsweise Batterie. Scott glaubt, dass Elektroautos mit Lithiumionenbatterien kaum über eine Reichweite von 150 bis 250 Kilometer pro Ladung hinauskommen werden. Dies genüge zwar für den Stadtverkehr, nicht aber für weite Strecken über Land. Deshalb könnte die Batterie zwar durchaus ihre Nischen finden, die größere Reichweite sichere langfristig aber dem Brennstoffzellenantrieb einen höheren Marktanteil.

Wie weit ein Fahrzeug auch kommen mag, irgendwann muss es wieder betankt werden. Geeignete Zapfsäulen lassen sich in bestehenden Anlagen nachrüsten, das ist vereinzelt schon geschehen. Auf den ersten Blick sehen sie kaum anders aus als konventionelle Systeme. Doch das Gas muss unter Hochdruck in die Tanks gefüllt werden. Da reicht es nicht, eine Zapfpistole in den Einfüllstutzen einzuhängen und der Schwerkraft den Rest zu überlassen. Kräftige Pumpen sind vonnöten, zudem eine gut abgedichtete Verbindung. Das alles gibt es bereits, und es hat sich in Praxistests als einfach und sicher erwiesen. Wenn Tanks aber bis zum Höchstdruck gefüllt werden sollen, müssen alle Komponenten perfekt arbeiten – noch schwankt die Leistung der Pumpen zu sehr.

Eine sehr wichtige Frage für die Autobauer ist, wie schnell das Wasserstofftankstellennetz aufgebaut wird. Und hier liegt das Henne-

und-Ei-Problem dieser Technologie: Ohne eine entsprechend dichte Infrastruktur scheuen die meisten Autofahrer vor dem Kauf eines Autos mit Brennstoffzelle zurück, andererseits fließt erst dann Kapital in den Aufbau eines solchen Netzes, wenn sich die Investition lohnt, wenn also bereits eine ausreichend große Fahrzeugflotte unterwegs ist.

In den USA gibt es derzeit nur einige Dutzend Wasserstofftankstellen (siehe Foto auf S. 87), und es scheint kaum koordinierte Anstrengungen zu geben, um daran etwas zu ändern. Und bis vor Kurzem sah es überall in der Welt ganz ähnlich aus.

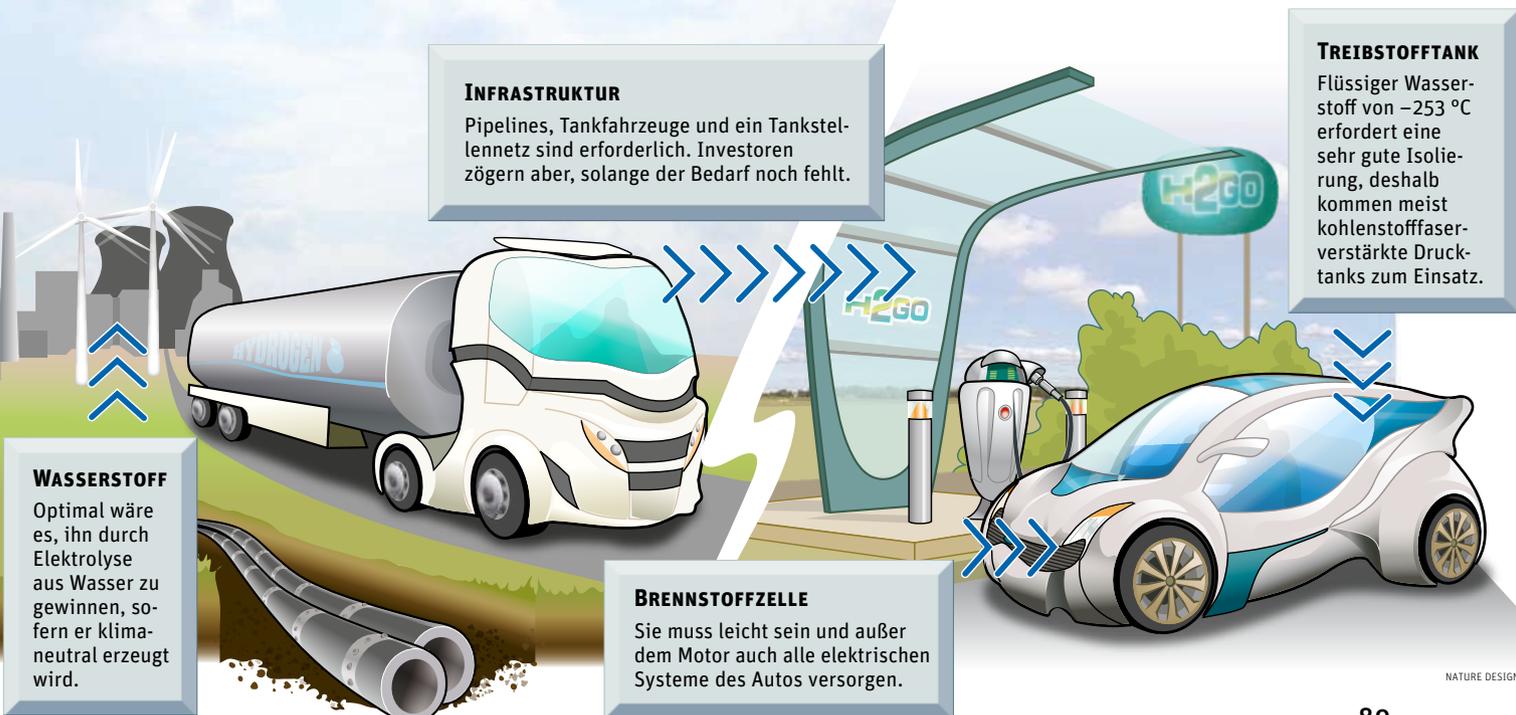
### Perspektiven für die Infrastruktur

Das ist auch der Grund, warum Verfechter der erwähnten Übereinkunft in Deutschland eine so große Bedeutung beimessen. Die Automobilbauer haben die Fahrzeuge versprochen, und NOW will innerhalb weniger Jahre ein Netz von einigen hundert Tankstellen aufbauen, bis zu 1000 sollen es Ende des Jahrzehnts sein. Dies dürfte immerhin genügen, um Ballungszentren und Autobahnen mit dem neuen Sprit zu versorgen. NOW-Leiter Bonhoff zufolge liegen die Kosten für das Vorhaben im Bereich dessen, was Tankstellenbetreiber im gleichen Zeitraum für Wartung und Erneuerung der Benzin- und Dieselinfrastuktur ausgeben müssen.

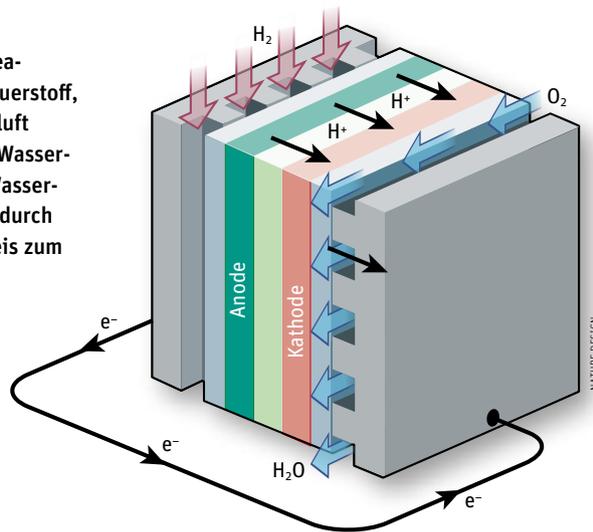
Charlie Freese, seit 2009 Leiter des Brennstoffzellenprogramms bei General Motors, vertritt die Ansicht, dass auch in größeren

Die Zukunft der Brennstoffzellenfahrzeuge hängt von Fortschritten in vier Bereichen ab: der Erzeugung und der Verteilung von Wasserstoff, dem Tanksystem im Fahrzeug und dem Kernelement des gesamten Konzepts – der Brennstoffzelle.

## DIE HERAUSFORDERUNG WASSERSTOFF



In der Brennstoffzelle reagiert Wasserstoff mit Sauerstoff, der aus der Umgebungsluft stammt, kontrolliert zu Wasserdampf. Dabei gibt der Wasserstoff Elektronen ab, die durch einen äußeren Stromkreis zum Elektromotor fließen.



Ländern, wie den Vereinigten Staaten, die Anwendungen in vergleichbaren Grenzen gehalten werden könnten. In einem frühen Einführungsstadium könnte das Los-Angeles-Becken mit 50 Tankstellen zu Gesamtkosten von ungefähr 200 Millionen US-Dollar versorgt werden. Mit etwa 11 000 Tankstellen wären die USA bis in abgelegene Gebiete versorgt. »Das würde ungefähr genauso viel kosten wie die Alaska-Gas-Pipeline.« Er spielt damit auf Planungen für ein 30 Milliarden Euro teures Projekt an, Erdgas aus dem Norden Alaskas zu den nordamerikanischen Märkten zu leiten.

Ausgangspunkt all dieser Entwicklung war und ist die Klimaproblematik (wobei auch das von manchen prophezeite baldige Ende billigen Erdöls eine Rolle spielt). Fragt sich nur, wie klimafreundlich man den Wasserstoff gewinnt. Im Augenblick ist Erdgas, das zu 90 Prozent aus Methan besteht, die billigste Quelle. Doch bei der als Reformierung bezeichneten Aufbereitung mit heißem Wasserdampf bildet sich im Zuge einer chemischen Reaktion Kohlendioxid; zudem entsteht es bei der Wasserdampferzeugung. Der Gesamtausstoß an klimaschädlichen Gasen ist bei einem Brennstoffzellenfahrzeug deshalb nicht per se geringer als bei einem konventionellen Benzinfahrzeug. Ohne weitere Maßnahmen wird lediglich der Ort der Emissionen verlagert.

Teurer ist die Elektrolyse, bei der Wasser durch elektrischen Strom in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt wird. Vattenfall sieht darin seine Chance. Das Unternehmen baut in Hamburg ein Windkraftwerk, das Stromüberschuss für die Wasserstoffproduktion nutzt. Auf diese Weise lösen die Ingenieure das Problem schwankender Windstärken; das Brenngas speichert in Hochzeiten die elektrische Energie, die den Bedarf der Stromverbraucher übersteigt. Die anfallende Gas-

menge soll genügen, eine Flotte von 20 Bussen zu versorgen.

Die Kosten dafür sind allerdings immer noch zu hoch, räumt Oliver Weinmann ein, der Leiter Innovationsmanagement bei Vattenfall Deutschland. Der Kilogrammpreis wird in Hamburg drei bis vier Euro betragen. Wasserstoff aus Erdgas kostet aber nur zwei Euro. Doch da Europa die Verwendung von erneuerbaren Energien im Lauf des nächsten Jahrzehnts ausbauen möchte, warnt Charlie Freese: »Es stellt sich nicht die Frage, ob wir uns die Wasserstoffinfrastruktur leisten können, sondern ob wir es uns leisten können, darauf zu verzichten.«

Nicht jeder lässt sich von solchen Argumenten überzeugen. Selbst wenn es die Automobilbauer schaffen, bis 2015 ihre Brennstoffzellenfahrzeuge auf den Markt zu bringen, wird es Jahre dauern, einen Kundenstamm aufzubauen, die Produktionszahlen zu erhöhen und die Fertigungskosten zu senken. Nur wenige Unternehmen werden bis 2020 oder gar 2025 in diesem Sektor Profite erwirtschaften. Deshalb fahren die Hersteller mehrgleisig und treiben gemeinsam mit Energieversorgungsunternehmen auch Biotreibstoffe und batterieelektrische Fahrzeuge voran. Allerdings erfordern auch die jeweils ihr eigenes Verteilungssystem, und all diese Infrastrukturen gleichzeitig aufzubauen, dürfte illusorisch sein.

Ford hat das Brennstoffzellenfahrzeug deshalb als langfristiges Ziel definiert, beschränkt sich derzeit auf die Forschung und verzichtet auf konkrete Produktpläne. Und BMW treibt momentan Autos mit konventionellen Verbrennungsmotoren voran, die sowohl mit Wasserstoff als auch mit Benzin betrieben werden können.

Manche Befürworter der Wasserstofftechnologie malen für die Zukunft ein vielfältiges Szenario, bei dem Elektrofahrzeuge mit Batterien die Kurzstrecken in Ballungsräumen bewältigen, solche mit Wasserstoffantrieb die Langstrecken. John Heywood, Direktor des Sloan Automotive Lab am MIT in Cambridge, glaubt ohnehin, dass die ersten Fahrzeuge Prototypen sein werden, mit denen die Leistung in der Praxis und nicht zuletzt die Reaktion der Kunden getestet werden kann. Toyota verfolgte diesen Ansatz 1997 mit seinem Hybridfahrzeug Prius. Es könnte drei oder mehr Jahrzehnte dauern, um weltweit das Automobil auf elektrisch angetriebene Räder zu stellen, so glaubt Heywood, und das sei der Zeitrahmen, in dem Autobauer derzeit denken. »Sie werden in Batterien und Brennstoffzellen investieren, bis klar ist, welche Technik der anderen überlegen ist. Heute aber kennt auf diese Frage noch niemand die Antwort.«



Jeff Tollefson arbeitet als Reporter für »Nature« in Washington D. C.

© Nature Publishing Group  
[www.nature.com/nbt](http://www.nature.com/nbt)  
 Aktualisierte und erweiterte Fassung eines Artikels aus: Nature 464, S. 1262–1264, 29. April 2010.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1040561](http://www.spektrum.de/artikel/1040561).

# Abschied vom eigenen Tank

Gegen begrenzte Reichweiten und lange Ladezeiten setzen Ingenieure auf ausgetüftelte Wechselkonzepte und betankbare chemische Batterien.

Von Bernd Müller

**W**er schon mal ein Elektroauto fahren durfte, schwärmt vom geräuschlosen Dahingleiten und vom enormen Drehmoment schon beim Anfahren. Dennoch steht die Elektromobilität noch in den Startlöchern, denn viele Autofahrer fürchten auf längeren Strecken mit leerer Batterie liegen zu bleiben. Tatsächlich kommen aktuelle Elektroautos, wie sie etwa im E-Mobility-Pilotversuch durch Berlin kreuzen, mit einer Ladung nur etwa 135 Kilometer weit.

Das wäre zwar genug für mehr als 80 Prozent der deutschen Autofahrer, die pro Tag weniger als 55 Kilometer zurücklegen. Doch die psychologische Barriere bleibt: Laut einer Studie von Aral fordern die potenziellen Kunden eine Reichweite von mindestens 300 Kilometern. Überdies wären sie allenfalls bereit, maximal 2000 Euro mehr für die umweltfreundliche Technik zu investieren. Auch davon sind Elektroautos noch weit entfernt – der Batteriepack kostet derzeit rund 15000 Euro zusätzlich. Das liegt am vergleichsweise geringen Energieinhalt: In 100 Kilogramm einer Lithiumionenbatterie steckt die Energie von fünf Litern Benzin, allerdings ist der Wirkungsgrad eines Elektromotors erheblich höher.

Revolutionäre Sprünge sind nicht zu erwarten. Die Lithiumionentechnik bleibt das Maß der Dinge, wird zwar verbessert, dürfte aber auch langfristig nicht die Reichweite und das geringe Gewicht eines herkömmlichen Benzintanks bieten. Lautet die Devise also: Wenn die Batterie zu wenig Kapazität hat, muss sie eben öfter geladen werden? Zigtausende öffentliche Stromzapfsäulen wären dazu nötig. Hinzu kämen Steckdosen in privaten Garagen, sofern vorhanden: Etwa 40 Prozent

der Fahrzeughalter haben an ihrem Stellplatz keinen Zugang zum Stromnetz.

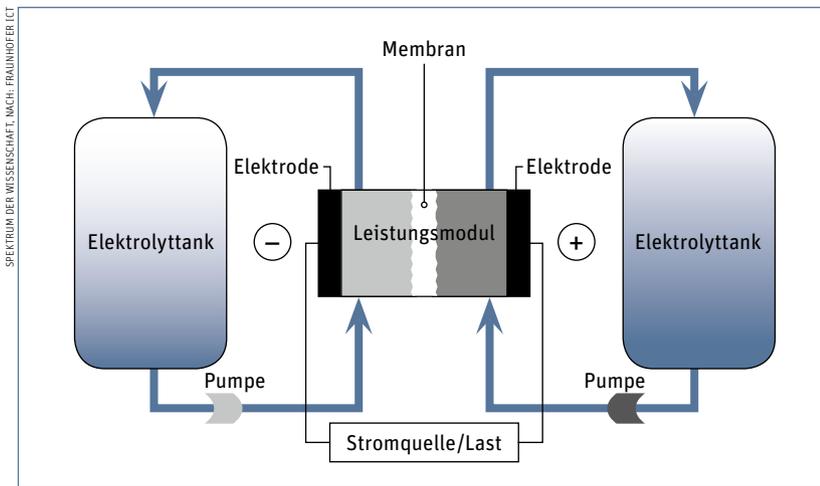
Vor allem aber beträgt die Ladezeit bis zu acht Stunden. Wird der Vorgang beschleunigt, verliert man Kapazität, da mit dem dann höheren Ladestrom leider auch Alterungsprozesse verstärkt werden. Eine Urlaubsfahrt von Flensburg an den Bodensee würde so mit einem Elektroauto wahrscheinlich zu einer mehrtägigen Geduldsprobe. Wie soll dann das Ziel der Bundesregierung erfüllt werden, die bis 2020 eine Million Elektroautos – das wäre jedes 50. Fahrzeug – auf Deutschlands Straßen sehen möchte?

## Batterie, wechsele dich!

Ein interessantes Konzept ist »Better Place«, erdnen von der kalifornischen Firma gleichen Namens. Es sieht zum einen ein dichtes Netz aus öffentlichen und privaten Ladesta-

Strom aus der Zapfsäule ist ein Teil des Better-Place-Konzepts, ein anderer das Auswechseln einer gemieteten Batterie an einer vollautomatischen Station.





**Das Redoxflow-System ist eine modular aufgebaute, chemisch wieder aufladbare Batterie.**

tionen in Ballungsräumen vor, wobei auf 2,5 Fahrzeuge eine solche Station kommen soll. Das Herzstück des Konzepts aber sind Wechselstationen, die leere Batterien in nur zwei Minuten gegen volle tauschen – vollautomatisch, denn so ein Akkupack wiegt etwa zwei Zentner. Die leeren Batterien kommen zum Aufladen in ein Lager.

Das Better-Place-Konzept erfordert vom Kunden freilich ein Umdenken. Insbesondere statusbewusste Autofahrer könnten sich daran stören, dass ein Teil ihres Fahrzeugs »nur« gemietet ist. Doch das hat auch Vorteile: Gibt die Batterie ihren Geist auf, muss sich das Unternehmen darum kümmern und nicht der Kunde. Der bezahlt lediglich eine Pauschale pro gefahrenem Kilometer, im Preis sind die Gebühren für Batterietausch und Abnutzung schon eingerechnet.

### Das Elektroauto als mobiler Stromspeicher

Das Ganze wird derzeit in Pilotprojekten in Israel und Dänemark getestet, und auch in Tokio gibt es neuerdings eine Wechselstation für Taxis. Dänemark ist deshalb so interessant, weil Better Place zudem Teil eines intelligenten Stromnetzes (Smart Grid) sein soll und das Land 20 Prozent des Stroms aus Windkraft gewinnt. Smart Grids sollen eines der dringendsten Probleme regenerativer Energieerzeugung lösen: dass elektrische Energie oft dann nachgefragt wird, wenn keine Sonne scheint oder der Wind nicht weht, und die entsprechenden Anlagen zu anderen Zeiten mehr Strom erzeugen, als die Versorgungsnetze gerade abnehmen können. Das Better-Place-Konzept sieht vor, dass die Leihbatterien Strom zwischenspeichern, also bei Bedarf wieder ins Netz speisen, während die Fahrzeuge an der Steckdose hängen. Vor allem die Wechselstationen könnten größere Energiemengen puffern und so die Attraktivität

grünen Stroms steigern. Ein Kontrollzentrum zapft die mobilen Speicher gezielt an und erstellt die Abrechnung, denn natürlich hat ein Kunde Anrecht auf eine Vergütung, wenn sein Auto gerade als Netzspeicher gedient hat.

Technologisch ist das Verfahren einsatzreif, doch bis die Infrastruktur flächendeckend aufgebaut ist, dürften noch etliche Jahre vergehen. Das eröffnet Chancen für eine konkurrierende Technologie, die so genannte Redoxflow-Batterie. Sie besteht aus einem Stapel Keramikzellen, durch die zwei Elektrolyte fließen. Chemische Redoxvorgänge setzen Ionen in Bewegung, und durch eine Membran fließt elektrischer Strom. Das erinnert an das Prinzip der Brennstoffzelle, doch bei der Redoxflow-Batterie wird nichts verbraucht, es kommt lediglich zu einem Ausgleich der Konzentration von Ladungsträgern in den zwei Flüssigkeiten. Der Prozess lässt sich umkehren, indem man eine Spannung an den Stapel anlegt. Der Nachteil: Auch das dauert etliche Stunden. Der Vorteil: Weil es sich um Flüssigkeiten handelt, lassen sich Autos wie bisher minutenschnell mit neuer Elektrolytlösung betanken, wobei allerdings zwei Tanks befüllt werden müssen.

Der Besitzer eines Elektroautos mit Redoxflow-Batterie hätte also die Wahl – er könnte sie wie jede andere Batterie an einer Steckdose aufladen oder an einer Tankstelle frische Elektrolyte tanken. Die Flüssigkeiten würden dort regeneriert und stünden wieder zur Verfügung; der chemische Vorgang ist in beiden Fällen gleich. Wie bei Better Place wäre eine solche Elektrolyttankstelle ein geeigneter Energiepuffer in einem intelligenten Stromnetz. Und genau dafür wird die Technologie auch entwickelt. So bauen drei Fraunhofer-Institute derzeit Anlagen mit Leistungen bis zu einigen Megawatt, die, in kleineren Hallen untergebracht, Sonnen- und Windstrom speichern, um zum Beispiel kleinere Betriebe ökologisch korrekt mit Strom zu versorgen.

Fürs Auto ist das allerdings noch nicht einsatzreif. Dafür müsste die Energiedichte der Elektrolyte ein Mehrfaches als derzeit betragen, denn allein schon um es mit der Reichweite einer Lithiumionenbatterie aufnehmen zu können, wäre ein 1000-Liter-Tank nötig. Neue Mixturen dürften dieses Problem lösen, doch Jens Tübke vom Fraunhofer-Institut für Chemische Technologien in Pfaffenhofen rechnet erst in fünf bis zehn Jahren mit der Einsatzreife im Straßenverkehr. Die Politik sieht offenbar Potenzial: Baden-Württemberg fördert die Redoxflow-Forschung in den nächsten zwei Jahren mit 1,5 Millionen Euro. <



**Bernd Müller** ist Wissenschaftsjournalist in Esslingen.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1040560](http://www.spektrum.de/artikel/1040560).