

Potenziale und  
Marktchancen von  
Wasserstoff

Perspektiven einer  
globalen Energiewende

Speicher- und  
Transportalternativen

Brennstoffzelle versus  
Verbrennungsmotor

Wasserstoff –  
so sicher wie Benzin

Auf dem Weg  
zu einer Wasserstoff-  
Infrastruktur





# Linde Technology

## Editorial



Liebe Leserinnen, liebe Leser,

die Vision einer machbaren Wasserstoffwirtschaft braucht eine hoch entwickelte Technik, aussichtsreiche Absatzmärkte für die Industrie, politische Rahmenbedingungen und vor allem Akzeptanz bei den Verbrauchern. Genau um diese Themen ging es beim Medienforum Deutscher Wasserstofftag, das die Linde AG mit der Beteiligung wichtiger Partner aus der Wasserstoff-Community am 1. Oktober 2003 in München organisiert hat. Namhafte Referenten aus allen gesellschaftlichen Gruppen – Politik, Wirtschaft und Wissenschaft – bezogen Stellung zu den zentralen Fragen des anbrechenden Wasserstoff-Zeitalters:

Ist die Brennstoffzelle der Schlüssel zu einer gerechteren Wirtschaftsordnung? Welche Speicher- und Antriebstechnologien werden sich durchsetzen? Wie sicher ist der Umgang mit Wasserstoff? Wie stellen sich die Mineralölunternehmen den Übergang von der fossilen zur regenerativen Energieerzeugung vor, und welche staatlichen Förderprogramme gibt es?

Mit der vorliegenden Ausgabe von Linde Technology laden wir Sie ein, die lebhafteste Diskussion um die Zukunft unserer Mobilität aus nächster Nähe mitzuverfolgen und wünschen Ihnen eine anregende Lektüre.

A handwritten signature in black ink that reads "Belloni". The script is cursive and elegant, with the first letter 'B' being particularly large and stylized.

Dr.-Ing. Aldo Belloni,  
Mitglied des Vorstands  
Linde AG  
Gas und Engineering

## Titelbild



Drei Pufferspeicher für gasförmigen Wasserstoff in Burghausen.

# 2 / 2003

## Inhalt



Linde-Steamreformer in Burghausen



Prüfstand für Motoren und Antriebsstränge



Moderner Flüssigwasserstoff-Trailer

<b>Eine Vision für die Wirtschaft</b>	<b>4</b>
Potenziale und Marktchancen von Wasserstoff DR. WOLFGANG REITZLE	
<b>Der Startschuss ist gefallen</b>	<b>10</b>
Perspektiven und Elemente für eine Energiewende REINHARD KAISER	
<b>Die Wasserstoff-Revolution</b>	<b>14</b>
Plädoyer für eine Wasserstoff-Gesellschaft JEREMY RIFKIN	
<b>Die neuen Entwicklungen der Technik</b>	<b>20</b>
Wasserstoff-Infrastruktur: von der Herstellung zum Tank DR. JOACHIM WOLF	
<b>Höchst effizienter Antrieb</b>	<b>25</b>
Die Brennstoffzelle wird das Auto grundlegend verändern DR. ERWIN WÜCHNER	
<b>Bewährtes mit Zukunftspotenzial</b>	<b>29</b>
Verbrennungsmotor erleichtert Übergang vom Benzin zum Wasserstoff DR. KLAUS SCHEUERER	
<b>Deutschland hat seinen Vorsprung verloren</b>	<b>33</b>
Zahl der Wasserstoffprojekte wächst weltweit rasant REINHOLD WURSTER	
<b>Wasserstoff – so sicher wie Benzin</b>	<b>38</b>
Einführung im Straßenverkehr birgt kein zusätzliches Risiko DR. AXEL STEPKEN	
<b>Einstieg in den Umstieg</b>	<b>44</b>
Großprojekte leiten den Übergang zum Wasserstoff ein DR. PHILIPPE SCHULZ	
<b>Es ist Zeit für Unternehmer!</b>	<b>48</b>
Die nächsten Schritte für Wirtschaft, Wissenschaft und Politik PROF. DR. CARL-JOCHEN WINTER	
<b>Impressum</b>	<b>53</b>

# Eine Vision für die Wirtschaft

**Es reicht nicht allein, etwas Neues zu entdecken oder gar zu erfinden, es muss vielmehr der unternehmerische Wille und Wagemut hinzukommen. Nur dann kann das Neue seinen Nutzen entfalten. Das gilt insbesondere für den Aufbruch in die Wasserstoff-Gesellschaft – eine Vision, die jetzt konkrete Züge annimmt. Es ist nun an der Zeit, die Dinge beherzter anzugehen.**

Die Lernphase bei Wasserstoff geht zu Ende. Wir müssen jetzt in die Umsetzungsphase gehen. Die Entdeckung des Wasserstoffs liegt schließlich schon mehr als 230 Jahre zurück. Das Potenzial dieser Entdeckung erahnten zuerst Visionäre wie Jules Verne. Schon 1875 ließ er einen seiner Romanhelden, den Ingenieur Cyrus Harding, prophezeien: „Wenn die Kohle zu Ende geht, werden die Menschen Wasser verbrennen. Wasser, das mittels Elektrizität in seine Bestandteile zerlegt wurde. Wasser wird die Kohle der Zukunft sein.“

Technisch beschäftigte sich dann beispielsweise der Engländer James Dewar mit dem Wasserstoff. Er war der Erste, dem es vor 103 Jahren gelang, Wasserstoff zu verflüssigen. Also selbst die Handhabung von Wasserstoff in seiner flüssigen Form ist alles andere als neu. Die wirklich industrielle Nutzung des Wasserstoffs setzte erst später ein, insbesondere seit den dreißiger Jahren des letzten Jahrhunderts kamen immer neue Anwendungsgebiete hinzu. Linde zum Beispiel produziert Wasserstoff seit 1910.

**„Was alle angeht,  
können auch nur alle lösen.“**

**Friedrich Dürrenmatt**

## Wasserstoff: Überall in der Industrie zu Hause

Eingesetzt wird Wasserstoff in sehr vielen und sehr unterschiedlichen Industriebereichen. Die Palette reicht von der Halbleiterproduktion über den Einsatz in der Petrochemie bis hin zur Erzeugung von Margarine.


Die Weltjahresproduktion von Wasserstoff beträgt aktuell ca. 600 bis 700 Milliarden Kubikmeter, was einem fiktiven Wert von etwa 100 Milliarden Euro entspricht. Die Wachstumsrate liegt jährlich bei bis zu 10 Prozent. Größte Anwender sind die chemische Industrie u. a. für die Düngemittelproduktion, Raffinerien bei der Kraftstoff-Entschwefelung sowie die Stahlindustrie, die zusammen ca. 60 Prozent der Produktion verbrauchen. Nur bei einem geringen Anteil von höchstens vier Prozent der Weltproduktion handelt es sich um so genannten „merchant hydrogen“, der frei gehandelt wird, während der ganz überwiegende Anteil nicht in den Handel kommt, sondern am selben Ort erzeugt und verbraucht wird.

Die Verwendung als Automobilkraftstoff macht wiederum nur einen kleinen Bruchteil dieses Handelsvolumens aus, stellt also zurzeit nicht mehr als eine winzige Marktnische dar. Aber eben eine, die ein enormes Wachstumspotenzial vor sich hat.

Müsste die gesamte Energiemenge, die der Straßenverkehr in Deutschland erfordert, von heute auf morgen durch Wasserstoff aufgebracht werden, entspräche der Bedarf dem zehnfachen der heutigen deutschen Jahresproduktion von 22 Milliarden Kubikmetern. Aber noch bevor das Wasserstoff-Zeitalter auch für den Individualverkehr angebrochen ist, sind kurzfristig die weltweit steigenden Umweltauflagen ein wichtiger Wachstumsmotor, da sie einen zunehmenden Bedarf für Entschwefelungsanlagen mit sich bringen.

Der Umgang mit industriellen Anwendungen des Wasserstoffs ist erlernt und vielerorts selbstverständlich, aber natürlich ist das erst ein Bruchteil dessen, was der Wasserstoff an Potenzial bietet. Rund 100 Jahre industrielle Erfahrungen mit Wasserstoff hat die Menschheit gesammelt. So lange wird der Aufbruch in das Wasserstoff-Zeitalter nicht noch einmal dauern, und so lange darf er auch nicht mehr dauern!

Es gibt schon heute funktionierende Systeme, die mit Wasserstoff und Brennstoffzellen operieren – zum Beispiel bei kleinen Elektrogeräten. Toshiba und NEC etwa haben Brennstoffzellen für tragbare elektronische Geräte vorgestellt, die sie bis 2004 auf den Markt bringen wollen. Auch Forscher der Fraunhofer-Gesellschaft



**H<sub>2</sub>-Speicherbehälter:** In Burghausen stehen diese drei Behälter zur Wasserstoff-Versorgung der Wacker Chemie GmbH. Die Tanks haben ein geometrisches Volumen von fast 240 m<sup>3</sup> und sollen Verbrauchsschwankungen in dem Chemiewerk kompensieren. Mit der gespeicherten Menge können bis zu fünf Stunden überbrückt werden.

**„Die Linde AG versteht sich als  
Wegbereiter und Schrittmacher ins  
Wasserstoff-Zeitalter.“**

haben einsatzbereite Mini-Kraftwerke für Laptops und Camcorder entwickelt, die vom Büro für Technik-Folgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag bereits für tauglich erklärt wurden.

Und natürlich hat auch die Verwendung von Wasserstoff im Automobil enorme Fortschritte gemacht. Bei den ersten Versuchsfahrzeugen waren die Tanks für den Wasserstoff so groß, dass gerade mal Kleinlastwagen genügend Platz boten, um diese Tanks zusammen mit den Brennstoffzellen unterzubringen. Heute passt die Technik in ein A-Klasse Modell von Mercedes hinein.

## Verantwortung für nachfolgende Generationen übernehmen

Weil das Thema Wasserstoff für uns gerade aus gesellschaftspolitischer Verantwortung wichtig ist, haben wir jetzt eine strategische Wasserstoffgruppe gebildet, die direkt dem Vorstand zugeordnet ist. Als Unternehmen sehen wir unsere besondere Verantwortung darin, nicht nur innovative technische Lösungen wie Flüssigwasserstoff-Tanks für Fahrzeuge zu entwickeln, sondern für uns

geht es darum, Verantwortung für nachfolgende Generationen zu übernehmen und gemeinsam mit Partnern dafür zu sorgen, dass die Weichen für eine effiziente, dauerhafte und ökologisch sinnvolle Energieversorgung der Zukunft jetzt gestellt werden. Weil es ein langer Weg sein wird, müssen wir heute handeln, damit der vorhersehbare Energiemangel erst gar nicht eintritt. Einen Vorgeschmack, was passiert, wenn die Energieversorgung plötzlich ausbleibt, hat im vergangenen Herbst der Stromausfall in Italien gegeben.

Wir sind deshalb alle gefordert, die Wasserstoff-Technologie voranzubringen. Die Industrie insgesamt hat hier bereits erhebliche Vorleistungen erbracht. Weltweit fahren schon viele Fahrzeuge in den großen Flottenversuchen der Automobilhersteller. So hat sich General Motors öffentlich festgelegt, bis zum Jahre 2010 das serienreife Wasserstoff-Auto mit Brennstoffzellen-Antrieb auf die Straße zu bringen.

Die Europäische Union hat zwei Dutzend wasserstoff-gespeiste Brennstoffzellen-Busse in zehn europäischen Großstädten auf den Weg geschickt. Ähnliche Busse sind auch am Münchner Flughafen im Einsatz. Was den Sicherheitsstandard der Wasserstoff-Technologie betrifft, so sind alle relevanten Hürden genommen.

Alle Fakten sprechen für schnelles und entschlossenes Handeln:

- Ein Drittel der Menschheit hat noch heute keinen Stromanschluss. Dies wird sich aber ändern.
- Allein die westliche Welt hat in den letzten zweihundert Jahren mehr Energie verbraucht als alle anderen Völker zusammen seit Erfindung der Schrift.
- Die Volksrepublik China würde täglich 81 Millionen Barrel Öl verbrauchen, wenn dort jeder Einwohner denselben Lebensstandard genießen wollte wie in den USA, das ist mehr als dreimal soviel, wie die OPEC-Staaten zusammen täglich fördern.
- Die förderbare Menge an Erdöl- und Erdgas wird schon in zehn, auf jeden Fall aber in 40 Jahren ihren Zenit überschreiten und danach drastisch teurer werden.

Das wird dramatische Konsequenzen haben. Nicht nur in Form langer Schlangen an den Tankstellen. Auch auf politischem Gebiet. Schließlich werden schon 2010 rund zwei Drittel der Erdöllieferungen aus der Golfregion kommen.

Insgesamt soll die Abhängigkeit der EU von Ölimporten Prognosen zufolge von derzeit 50 Prozent bis zum Jahr 2020 auf 70 Prozent steigen, sofern keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden – eine Entwicklung, von der es bei der EU heißt: „Die damit verbundenen Unwägbarkeiten hinsichtlich der Versorgungskontinuität und Preisfluktuation können ernste Auswirkungen haben.“

Und selbst wenn es die Perspektive der Energieverknappung nicht gäbe: Auch die Verbrennung fossiler Energieträger ist auf Dauer nicht möglich. Der weltweite CO<sub>2</sub>-Ausstoß muss weiter drastisch sinken, wenn die Erdatmosphäre nicht dauerhaften Schaden nehmen soll. Auch Erdgas ist langfristig keine Alternative, obwohl es spezifisch weniger CO<sub>2</sub> erzeugt als Benzin und Diesel. Denn auch hier sind die Vorräte begrenzt.

## „Zersplitterte Entscheidungswege und kleinteilige Organisation sind schädlich für den Erfolg einer großen Sache.“

Diese beiden Aspekte – Energieverknappung und CO<sub>2</sub>-Ausstoß – machen die industrielle Entwicklung der Wasserstoff-Technologie so dringend und drängend. Und dazu gibt es schlicht keine Alternative. Wasserstoff als Energieträger bildet zusammen mit Brennstoffzellen eine Brücke hin zur Einführung kohlenstofffreier Energien, insbesondere erneuerbarer Energien. Sie eröffnet den Weg hin zu einer flexiblen und umweltverträglichen Energieversorgung, die so keine andere Technik leisten kann.

Wie verschiedene Studien gezeigt haben, ist gerade der Einsatz der Brennstoffzelle der Grund für einen wesentlich höheren Systemwirkungsgrad, als er bei der direkten Verwendung von Erdgas zu erzielen wäre.

## Übergangslösung: Wasserstoff aus Erdgas

Wir kennen heute bereits Hybridfahrzeuge, die den Gesamtwirkungsgrad, das heißt also vom Bohrloch bis zu den Rädern oder, wie die Fachleute sagen „well to wheel“, gegenüber einem konventionellen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor fast verdoppeln. Darüber hinaus ermöglicht es der Brennstoffzellen-Antrieb, je nach Fahrzeugtyp und Fahrzyklus, auch wenn der Wasserstoff aus Erdgas hergestellt ist, den Gesamtwirkungsgrad maximal zu verdreifachen.

Obwohl es also zunächst widersprüchlich klingt, ist es für einen Übergangszeitraum durchaus sinnvoll, Wasserstoff aus Erdgas herzustellen. In dieser Zeit können wir die notwendige Infrastruktur aufbauen und gleichzeitig daran arbeiten, dass Wasserstoff auch mit regenerativen Verfahren wirtschaftlich erzeugt werden kann. Denn regenerativ erzeugter Wasserstoff ist heute noch um ein Vielfaches teurer als der aus Erdgas hergestellte.

Neben dem Wasserstoff gibt es zwar andere, kurzfristig preiswertere Alternativen. Beispielsweise sind Bio-Kraftstoffe kurzfristig verfügbar und könnten eine Erleichterung bei den Emissionen bringen. Sie decken aber höchstens fünf bis acht Prozent des Gesamt-Energiebedarfs ab und bleiben damit nur eine Teillösung für die künftige Energieversorgung.

Fakt ist auch, dass bei der Gewinnung von Wasserstoff Energie eingesetzt wird. Und solange die nicht aus regenerativen Quellen wie Erdwärme, Wasser, Wind und Sonne erzeugt wird, ist die Wasserstoff-Technik nicht wirklich „sauber“.

Aber auch hier wirkt sich der Einsatz der Brennstoffzelle mit ihrem höheren Wirkungsgrad positiv aus. So wurden zum Beispiel bei einer Testfahrt quer durch Kanada vier Versionen eines Mittelklassefahrzeugs miteinander verglichen. Ein Benzinfahrzeug der heutigen Produktion und drei Brennstoffzellen-Fahrzeuge, wobei eines direkt mit Wasserstoff betrieben wurde und die beiden anderen je einen Methanol- bzw. Benzinreformer an Bord hatten. Unter Berücksichtigung aller anfallenden Emissionen der gesamten Kette erzielte das direkt mit Wasserstoff betriebene Fahrzeug den geringsten CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Selbst beim Vergleich eines modernen Diesel-Direkteinspritzers mit einem Wasserstoff betriebenen Brennstoffzellen-Fahrzeug zeigt sich immer noch eine sehr deutliche CO<sub>2</sub>-Einsparung.

## Wasserstoffbasierte Energieversorgung ist keine Utopie

Wasserstoff ist ein wirtschaftlicher Energiespeicher: Anders als Strom, für den oft unwirtschaftliche Überkapazitäten bereitgestellt werden müssen, um Verbrauchsspitzen abdecken zu können, kann Wasserstoff gespeichert und je nach Bedarf abgerufen werden.

Eine wasserstoffbasierte Energieversorgung ist keine Utopie mehr, wie noch Jules Verne sie beschrieb. Wir sind gefordert, sie zu realisieren und wir geben dafür viel Geld aus. Eine Parallele drängt sich auf, auch wenn sie einen Teilaspekt, nämlich den Aufbau einer komplett neuen Infrastruktur, unberücksichtigt lässt: das Internet. „Nicht einmal 3.000 Tage ist es her, seit das Internet in seiner heutigen Form startete“, schreibt Kevin Kelly, Mitbegründer des amerikanischen Kultmagazins „wired“. Und er fragt: „Hätte damals irgendjemand geglaubt, dass es möglich ist, drei Milliarden interaktive, grafisch opulente, verlinkte Textseiten über so gut wie jedes dem Menschen bekannte Thema zu kreieren?“ Natürlich nicht. Heute wissen wir, dass es geht – und finden es schon ganz selbstverständlich.

Das zeigt, wie wichtig es ist, dem Neuen gezielt auf die Sprünge zu helfen, Innovationen aktiv an den Start zu bringen, und zwar nach dem von Friedrich Dürrenmatt formulierten Prinzip: „Was alle angeht, können auch nur alle lösen.“

In den USA und auch in Japan wurde dieses Prinzip schneller verstanden als in Europa. Denn während dort umfangreiche Förderprogramme für den Start in die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie aufgelegt wurden, beginnt Europa eigentlich erst jetzt, die ganze Tragweite des Themas zu erfassen.

In den USA zum Beispiel hat Präsident Bush dieses Frühjahr angekündigt, die Forschung für Wasserstoff betriebene Fahrzeuge zusätzlich mit 1,2 Milliarden US-Dollar zu fördern. Damit stellen dann die USA insgesamt 1,7 Milliarden US-Dollar für die automobilen Brennstoffzellen- und Wasserstoff-Forschung zur Verfügung. Auch die japanische Regierung setzt auf neue Brennstoffzellen- und Wasserstoff-Projekte.

Erfreulich ist, dass sich die EU-Kommission seit verganginem Jahr deutlich stärker als zuvor mit dem Thema Brennstoffzellen und Wasserstoff beschäftigt.

Die Bildung einer „High Level Group“ und ein in diesem Sommer geschlossenes Abkommen mit den USA über eine umfassende Kooperation auf den Gebieten der Weiterentwicklung von Brennstoffzellen und der Förderung von Wasserstoff als Energieträger sind in der Tat erfreuliche Ansätze. Sie müssen jetzt ausgebaut werden.

## Der politische Rahmen muss stimmen

Wichtig ist deshalb die Schaffung eines politischen Rahmens, der in der Verkehrs-, Energie-, Umwelt- und Unternehmenspolitik durchgehend kohärent ist und Technologien belohnt, die die Ziele der nachhaltigen Entwicklung verwirklichen. Dazu muss eine strategische Forschungsagenda mit einem erheblich aufgestockten Budget für Forschung und Entwicklung erstellt werden. Diese Forderungen stellt auch die „High Level Group“ in ihrem Bericht auf.



Dr. Reitzle auf dem Medienforum Deutscher Wasserstofftag in München.

Es ist aus meiner Sicht dringend erforderlich, dass der flächendeckende Einstieg in die Brennstoffzellen- und Wasserstoff-Wirtschaft steuerpolitisch flankiert wird. Denn Wirtschaft und Verbraucher müssen Klarheit darüber haben, wie der Energieträger Wasserstoff zukünftig steuerlich behandelt wird. Vorstellbar wäre hier – ähnlich wie bei Erdgas betriebenen Fahrzeugen – die Mineralölsteuer deutlich zu senken oder für einen bestimmten Zeitraum sogar auszusetzen. Erdgas als Treibstoff wird derzeit nur mit 20 Prozent Mineralölsteuer belegt und dies befristet bis zum Jahr 2020. Für Wasserstoff-Fahrzeuge muss es entsprechende Anreizsysteme geben.

Darüber hinaus bedarf es zum Einstieg in die Wasserstoff-Wirtschaft verlässlicher Rahmenbedingungen zum Beispiel bei der Genehmigung und beim Bau von großtechnischen Anlagen zur regenerativen Wasserstoff-Erzeugung. Das gleiche gilt für eindeutige Standards zum Betrieb und für die Sicherheit einer flächendeckenden Wasserstoff-Infrastruktur. Es gilt aber auch für das Thema der Zuständigkeiten. Nichts ist schädlicher für den Erfolg einer großen Sache als zersplitterte Entscheidungswege und kleinteilige Organisationen. Es sollte – insbesondere in Deutschland – nicht dazu kommen, dass über die Genehmigung von Wasserstoff-Tankstellen, über den Bau von Wasserstoff-Produktionsanlagen oder ähnlichem jeweils auf Stadt- oder Kreisebene neu und einzeln entschieden wird.

Linde ist der weltweit größte Hersteller von Wasserstoffanlagen. Das Bild zeigt eine Linde-Wasserstoffanlage in Brunsbüttel.



Die Wasserstoff-Wirtschaft braucht klar strukturierte Entscheidungslinien und eindeutig definierte Ansprechpartner in der Politik. Dass es einen Wasserstoff-Minister auf Bundesebene nicht geben wird, ist klar. Aber wenn alle Aktivitäten zu diesem Thema beispielsweise in einem Ministerium gebündelt werden könnten, würde das schon helfen.

## H<sub>2</sub>-Vorreiter: Hydrogen Village in Michigan/USA

Wie man dem Wasserstoff politisch auf die Beine helfen kann, macht derzeit die Regierung des US-Bundesstaates Michigan vor: Sie will, dass der Staat langfristig zum führenden Standort für die Entwicklung, die Produktion und die Vermarktung von Brennstoffzellen wird und natürlich auch der damit zusammenhängenden Wasserstoff-Technologie. Die Hightechzone, das so genannte „Hydrogen Village“, ist dabei ausdrücklich als Steueroase konzipiert. Die Administration in Michigan schafft auf diese Weise Anreize für die Ansiedlung von Unternehmen aus aller Welt. Aber Förderung allein hilft nicht. Auch das staatliche Erziehungswesen muss den Lehrplan umstellen und die heranwachsende Generation mit den technischen Kenntnissen und Fähigkeiten ausstatten, die sie für eine Spitzenstellung im Wettbewerb um die besten Wasserstoff-Produkte und -Dienstleistungen benötigt.

Die deutschen Ministerpräsidenten und Bundespolitiker könnten aus dem Beispiel Michigan eine Menge lernen. Aber die Formulierung von Forderungen und Vor-

schlägen allein ist nicht ausreichend. Die Gesellschaft hat auch ein Recht darauf, dass die Unternehmen weiterhin selbst etwas unternehmen, dass sie mit konkreten Taten zeigen, wie das Wasserstoff-Potenzial gehoben werden kann.

Denn nicht Parteien, Regierungen, Stadträte und Verwaltungen werden die erforderliche Soft- und Hardware entwickeln und dafür sorgen, dass im Sinne eines funktionierenden Kundenservices die neuen Energiedienstleistungen gebündelt werden. Vielmehr muss die Industrie die Wasserstoff-Wirtschaft antreiben – im partnerschaftlichen Zusammenwirken mit den Organen und Repräsentanten der Gemeinwesen. Denn am Ende werden beide Seiten davon profitieren. In Michigan beispielsweise schätzt man das Wertvolumen, das mit der Entwicklung der Brennstoffzellen- und Wasserstoff-Technologie allein dort verbunden ist, auf rund 100 Milliarden Dollar. Für Europa, Deutschland oder gar ein einzelnes Bundesland liegen derartige Schätzungen bezeichnenderweise nicht vor. Aber man muss kein Prophet sein, um vorauszusagen, dass sich hier ein ungeheures Potenzial auftut. Nicht umsonst investieren weitsichtige Unternehmen schon heute enorme Summen in die Wasserstoff-Technik.

Phil Watts, Chairman von Royal Dutch/Shell, erklärte vor ziemlich genau zwei Jahren in New York, dass sein Unternehmen derzeit den „Ausstieg aus dem Kohlenwasserstoff-Zeitalter“ vorbereite. Im 21. Jahrhundert würden Kohle, Erdöl und Erdgas einer völlig neuen Form der Energieversorgung auf Wasserstoffbasis Platz machen. Shell habe bereits, so erklärte Watts, fast eine Milliarde US-Dollar in den Übergang zu der erneuerbaren Ressource investiert.

## Die Linde Wasserstoff-Zukunft

Auch wir bei Linde investieren zwischen 50 und 100 Millionen Euro jährlich in die Zukunft des Wasserstoffs und für entsprechende Anlagen. Wir verstehen uns als Wegbereiter und Schrittmacher in das Wasserstoff-Zeitalter für die heutigen Öl- und Energieversorgungsunternehmen sowie für die Automobilhersteller. Wir sehen unsere Rolle als die des Wasserstoff-Technologie- und -Systempartners.

Kein anderes Unternehmen verfügt über ein vergleichbar großes Wasserstoff-Know-how. Vom „Bohrloch“ bis zum Tankstutzen beherrschen unsere Ingenieure jeden Aspekt der Wasserstoff-Wertschöpfungskette: die Produktion, die Verflüssigung und Reinigung, die Lagerung, die Distribution und die Betankung. Das ist auch seit Jahren ein wichtiger Schwerpunkt unserer Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Sachen Wasserstoff. Dabei gehen wir davon aus, dass in der Übergangsphase der Wasserstoff weiter zentral produziert, verflüssigt und per Tieftemperatur-Container zu den Tankstellen geliefert wird. Erst an der Tankstelle erfolgt dann die Trennung in Flüssig- und Druckgaswasserstoff. Mit diesen Verfahren ist es möglich, Automobile an einer

öffentlichen Tankstelle gefahrlos mit Wasserstoff zu befüllen. Trotzdem werden wir weder ein eigenes Tankstellennetz aufbauen und betreiben, noch Pipelines verlegen. Wir können uns durchaus vorstellen, hier mit internationalen Partnern zusammenzuarbeiten.

Auch mit unserem Medienforum Deutscher Wasserstofftag am 1. Oktober 2003 in München haben wir ein wichtiges Zeichen gesetzt. Denn in der Medien- und Informationsgesellschaft des 21. Jahrhunderts sind neue technische Errungenschaften allein längst nicht mehr ausreichend, um Innovationen wirklich nach vorne zu bringen oder gar zu beschleunigen. Sozusagen als „Treibstoff“ braucht man dazu heute auch die breite Unterstützung in der Öffentlichkeit. Und auch auf diesem Gebiet gibt es für die Wasserstoff-Zukunft noch viel Pionierarbeit zu leisten. Denn bisher verbindet die Öffentlichkeit in Deutschland mit dem Begriff Wasserstoff wohl nicht viel mehr als eine recht unscharfe Vorstellung von einem alternativen Energieträger. Das wirkliche Potenzial und die wirkliche Tragweite dieser Technologie sind kaum bekannt.

Dabei schlummert an dieser Stelle ein weiteres Potenzial des Wasserstoffs, nämlich Wasserstoff als faszinierendes Zukunftsthema. Ein Thema, das mit den wirklichen Problemen der Menschen zu tun hat und dazu Lösungen zeigt – ein Thema, das den Begriff Zukunft zur Abwechslung positiv belegt. Ein Thema, das für die Zukunft so etwas wie eine „agenda-setting-function“ hat. Es wird Menschen mobilisieren, die sich engagieren wollen, Menschen, die nach einer sinnvollen Anwendung für ihr Fachwissen suchen, Menschen mit Ideen und Visionen. Beispiel: das Mondlandungsprojekt des US-Präsidenten John F. Kennedy. Aus heutiger Sicht war das Wichtigste daran nicht die Landung auf dem Mond. Viel wichtiger war die Entfesselung fortschrittlicher Kräfte und die Suche nach neuen technischen Lösungen, die es bis dahin nicht gab.

## Ausblick

Der Wasserstoff könnte also im doppelten Sinne zum Energiespender werden, der die fossilen Brennstoffe ablöst. Aber eben auch zu einem Energielieferanten für die gesellschaftliche Dynamik in Deutschland und in Europa – wenn er denn in seiner ganzen Bedeutung und Tragweite kommuniziert wird.

Dazu sollte sich über alle Einzelinteressen hinweg – politische ebenso wie wirtschaftliche – eine Koalition der Verantwortung zusammenfinden. Denn die mittelfristige Neuorganisation unserer Energieversorgung verlangt verantwortliches Handeln. Es geht um einen Generationenvertrag zur Energieversorgung, zur Sicherung von individueller Mobilität und persönlicher Freiheit. Nicht noch einmal darf die Gesellschaft gestatten, dass lebensnotwendige Entscheidungen über Jahrzehnte hinweg aufgeschoben werden.

Deshalb sind jetzt vor allem die Unternehmen und Unternehmer gefordert. Ihnen muss es gelingen – wie anderen vor ihnen – die Chancen der neuen Technologie in konkrete Wirklichkeit zu übersetzen. Bei ihnen liegt es am Ende, ob das Thema Wasserstoff Gegenstand utopischer Entwürfe in kleinen Zirkeln bleibt oder ob es endlich vom Kopf auf die Füße gestellt wird. Die Zeit ist reif dafür, dass der Wasserstoff aus seinen industriellen Kinderschuhen herauswächst und mit großen Schritten sein ganzes Potenzial für unsere Zukunft entfaltet.

## Abstract

Der umweltfreundliche Wasserstoff wird bereits seit langem zu den unterschiedlichsten industriellen Zwecken eingesetzt. Angesichts versiegender Erdölquellen bricht nun auch im mobilen Einsatz die technische Umsetzungsphase an, was den Bedarf an Wasserstoff vervielfachen wird. Linde versteht sich dabei als Wegbereiter und Schrittmacher in das Wasserstoff-Zeitalter. Das Unternehmen verfügt wie kein anderes über ein umfassendes Know-how entlang der gesamten Wertschöpfungskette: Produktion – Verflüssigung – Reinigung – Speicherung – Transport – Betankung. Zum Einstieg in die Wasserstoff-Wirtschaft bedarf es neben technischen Entwicklungen aber auch klarer politischer Zuständigkeiten und verlässlicher Rahmenbedingungen. Angesichts der gesellschaftlich bedeutsamen Weichenstellungen, die nun gefragt sind, ruft Linde zu einer Koalition der Verantwortung auf.

## Der Autor



### Dr. Wolfgang Reitzle

Dr.-Ing. Wolfgang Reitzle ist seit Mai 2002 Mitglied des Vorstands der Linde AG. Im Januar 2003 hat er das Amt des Vorstandsvorsitzenden übernommen.

Von 1967 bis 1975 studierte Wolfgang Reitzle an der TU München. Sein erstes Studium, Fachrichtung Maschinenbau, schloss er 1971 als Diplom-Ingenieur ab. 1974 promovierte er im Bereich der Metallphysik. Sein Zweitstudium der Arbeits- und Wirtschaftswissenschaften beendete er 1975 als Diplom-Wirtschaftsingenieur. 1976 trat Wolfgang Reitzle als Fertigungsspezialist bei der BMW AG ein. Nach verschiedenen Positionen wurde er dort 1987 ordentliches Vorstandsmitglied, zuständig zunächst für Forschung und Entwicklung, später zusätzlich für Einkauf, Marketing und Vertrieb weltweit.

1999 wechselte er zur Ford Motor Group, Dearborn (USA), wo er als Group Vice-President der Ford Motor Company sowie Chairman und CEO der Premier Automotive Group, London, arbeitete.

# Der Startschuss ist gefallen

**Die Wasserstoff-Wirtschaft eröffnet neue Perspektiven. Dabei dürfen die noch bestehenden Hemmnisse, Schwierigkeiten und Herausforderungen auf dem Weg in die Wasserstoff-Zukunft nicht übersehen werden. Aber die Bundesregierung und das Umweltministerium haben klare Strategien und Taktiken für eine Energiewende, um den Herausforderungen gerecht zu werden.**

Die Perspektive der Wasserstoff-Wirtschaft ist eine wirklich nachhaltige, zukunftssichere fast emissionsfreie Energieversorgung. Wasser und Sonnenenergie sind annähernd unbegrenzt vorhanden. Zerlegen wir Wasser per Elektrolyse mit Hilfe von Sonnenenergie in Wasserstoff und Sauerstoff, dann verfügen wir mit dem Wasserstoff über einen leistungsfähigen Energiespeicher mit vielfältigen Einsatzmöglichkeiten, sei es zur direkten Verbrennung, bei der chemischen Produktion oder zur Stromerzeugung mit Hilfe der Brennstoffzelle.

Emissionen entstehen dann nur noch bei der Erstellung und Entsorgung der damit verbundenen technischen Anlagen. Aber im ganzen energetischen Prozess arbeiten wir praktisch emissionsfrei. Diese Perspektive ist unabhängig von fossilen Rohstoffen, was sowohl weltpolitisch von Interesse ist, weil es gewisse Krisenherde strategisch entzerrt, als auch und vor allen Dingen ökologisch. Denn es ist müßig zu diskutieren, ob das letzte Erdgas in 60 oder 100 Jahren und die letzte Steinkohle in 50 oder 250 Jahren verbrannt ist. Es ist in jedem Fall so, dass wir das, was in Jahrillionen an fossilen Rohstoffen gewachsen ist, nun in Jahrzehnten oder in wenigen Generationen verbrennen werden, wenn wir den Kurs nicht ändern und zu einer nachhaltigen, langfristig tragfähigen Energiewirtschaft kommen. Und diese Perspektive zeichnet die Wasserstoff-Wirtschaft aus, eine Perspektive wirklicher Nachhaltigkeit.

**„Die Wasserstoff-Wirtschaft zeigt eine Perspektive wirklicher Nachhaltigkeit auf.“**

Ist diese Perspektive auch realistisch? Dass sie denkbar ist, das wissen wir schon lange, das hat schon Jules Verne einem seiner Romanhelden in den Mund gelegt. Wenn wir heute energiepolitische Szenarien ansehen, egal von wem beauftragt und erstellt, stellen wir fest: Alle diese Szenarien enthalten einen relevanten Beitrag

der Wasserstoff-Wirtschaft. Sie unterscheiden sich „nur“ darin, mit welchem Umfang und vor allem wann dieser Beitrag geleistet wird. Da gibt es durchaus Unterschiede in der Größenordnung von Jahrzehnten. Dass wir aber im Grundsatz auf dem richtigen Weg sind, das kann heute nicht mehr in Frage stehen.

Und das zeigt sich doch auch schon in der Praxis. Wir haben Fahrzeuge, die mit Wasserstoff betrieben werden, auf verschiedenen technologischen Linien. Gerade die Firma Linde spielt da eine wichtige tragende Rolle. Wir haben Anwendungen der Brennstoffzellen im Haushalts- und Gebäudebereich. Und solche Anwendungen werden wir in Kürze in bestimmten Segmenten im breiten Massenmarkt finden. In der Informationstechnologie steht die breite Einführung unmittelbar bevor. Also könnte man zusammenfassen: „Der Weg in die Wasserstoff-Wirtschaft liegt weit geöffnet vor uns, der Startschuss ist längst gefallen.“

## Ernüchterung folgt auf die Euphorie

Die Wirklichkeit sieht allerdings weniger rosig aus. Schon im Jahr 2002 sagte der CDU-Abgeordnete Grill, Vorsitzender der Enquête-Kommission „Neue Energiestruktur“ des damaligen Deutschen Bundestages, nach einer langen Anhörung zum Einsatz von Wasserstoff im Verkehrsbereich: „Die Brennstoffzellentechnik ist dabei, nach hinten zu rücken.“ Die Stuttgarter Zeitung zitierte den Entwicklungschef von DaimlerChrysler, Thomas Weber, mit dem Satz: „Die ursprüngliche Euphorie ist gewichen.“ Und ein Kollege aus dem Umweltministerium Baden-Württemberg wird dort mit den Worten zitiert: „Es macht sich eine gewisse Ernüchterung breit.“ Da rächt sich ein wenig die starke Ankündigungspolitik der vergangenen Jahre. Wir haben in den vergangenen Jahren eine Fülle von Erklärungen vernommen, dass in unmittelbarer Zukunft dieses oder jenes Produkt serienweise, in hoher Stückzahl im Markt sein, flächendeckend durchgesetzt werden würde. Diese Erklärungen haben in jedem Fall eine belebende Wirkung gehabt, Optimismus ausgelöst, die Diskussionen vorangetrieben. Sie haben sich aber leider in den seltensten Fällen auch durch Realität unterlegen lassen, wenn die Zeitziele erreicht waren.

In einer Zeitungsanzeige vom Juli 2001 ist zu lesen: „Die technischen Probleme haben wir gelöst. Jetzt fehlt nur noch der politische Konsens und die Infrastruktur.“ Es

geht um Fahrzeuge mit Wasserstoff-Technik. Wir wissen alle, das war ein bisschen vollmundig. Solche Ankündigungen haben und hatten zweifelsfrei zunächst einen gewissen positiven Effekt für die Platzierung des Wasserstoffthemas. Aber von einer solchen Taktik der Ankündigungen geht auch eine Gefahr aus. Denn sie lässt sich nicht auf Dauer fortsetzen. Irgendwann folgt dann auf die Euphorie zwangsläufig die Skepsis. Und der nächste Schritt in der unerbittlichen Logik unserer Mediengesellschaft nach der Skepsis ist: Hohn und Spott. In der Politik nennt man das den „Ankündigungsminister“. Ein solches Schicksal kann auch Konzernvorständen und Forschungschefs drohen, wenn sie nicht gut auf sich aufpassen.

Unser Rat als Umweltministerium ist: Lassen Sie uns optimistisch, lassen Sie uns tatendurstig und kämpferisch über diese Technologie reden, aber immer realistisch.

Denn wenn wir das nicht tun, drohen uns zwei Gefahren:

Die eine ist die Gefahr für die Branche selber, die Frage der Glaubwürdigkeit der eigenen Ankündigungen. Die andere ist nicht minder groß. Wenn wir in der Politik und in der Öffentlichkeit zu sehr den Eindruck erwecken, dass wir Dinge morgen realisieren werden, von denen wir selber wissen, dass sie realistischweise noch einige Jahre dauern, versperren wir den Blick auf erforderliche Übergangstrategien. Wir machen es schwerer, über realistische Übergänge überhaupt zu reden, an manchen Stellen vielleicht sogar fast unmöglich. Und auch das wird sich für unser eigenes Anliegen zu gegebener Zeit möglicherweise bitter rächen.

Hinter dieser allgemeinen Ernüchterung stehen drei sehr einfache, nicht sehr erfreuliche, aber ganz offensichtliche Sachverhalte:

- Die Wasserstoff-Technik ist in weiten Bereichen noch nicht reif für den Massenmarkt.
- Sie ist in weiten Bereichen zu teuer.
- Der ökologische Wert für heute ist erläuterungsbedürftig.

Dazu jeweils ein Beispiel:

Am Münchner Flughafen fahren bereits Wasserstoff-Busse. Es werden jetzt auch Brennstoffzellen-Busse ausgeliefert an eine Reihe von Verkehrsbetrieben quer durch Europa, gefördert durch Mittel der Europäischen Union, und dort getestet. Diese Fahrzeuge haben eine für öffentliche Verkehrsbetriebe sehr geringe Reichweite, im unteren Rand des Akzeptablen. Dafür haben sie sehr lange Tankzeiten. Das Betriebsverhalten soll erst noch getestet werden, sie kosten mindestens das Fünffache wie hochmoderne Diesel- oder Erdgasbusse, und über die Kraftstoffkosten reden wir besser nicht. Aber wir befinden uns im Bereich von Forschung und Entwicklung, also ist es völlig normal, dass wir genau diese Phänomene haben.

Die Produkte sind noch nicht so fit wie in einer Technologie, die seit Jahren immer weiter fein geschliffen wird. Und natürlich sind sie störungsanfällig, das ist bei jeder neuen Technologie so, die man das erste Mal einsetzt und austestet. Das liegt in der Natur von Prototypen, und bleibt auch noch eine ganze Weile in der Serienproduktion so. Dass man bei etwas Neuem mehr Störungen hat als bei Langerprobtem, und dass es am Anfang teuer ist, ist ebenfalls selbstverständlich. Alles



was man neu macht, ist teurer, weil man es in mühevoller Handarbeit als Einzelstück fertigt. Die Kostendegression kommt mit der Masse und mit der Erfahrung.

Alles das ist selbstverständlich. Man darf nur nicht den Eindruck erwecken, dass man mit dem, was man tut, bereits die Reife für den Massenmarkt erreicht hat.

## Übergangstrategien sind nötig

Ein großer deutscher Verkehrsbetrieb sagt sinngemäß: „Unsere Dieselbusse rußen, lärmern und stinken. Das ist aber nicht schlimm. Da braucht man nichts tun. Wir setzen auf die Brennstoffzelle.“ Keiner der Manager, der so etwas sagt, wird einen Einsatz von Brennstoffzellen-Bussen in einem für die Fahrgäste relevantem Umfang in diesem Verkehrsbetrieb noch während seiner aktiven Dienstzeit erleben. Auch nicht, wenn wir das Pensionsalter auf 67 erhöhen.

Diese Position verschlägt den Blick auf Übergangstrategien, auf die Frage, was können wir denn jetzt in der Dieselbusflotte tun? Oder sollten wir einen alternativen Kraftstoff prüfen? Beispielsweise über Erdgas nachdenken bis die Brennstoffzellen-Busse soweit sind.

Gerade im Verkehrsbereich ist die Position des Umweltministeriums: Erdgas eröffnet eine sehr geeignete Übergangstrategie. Sie haben ein Gas und bekommen ein Infrastrukturnetz, gebaut von der Gaswirtschaft - tausend neue Tankstellen bis 2006. Und der Akteur Gaswirtschaft selber ist ebenfalls nicht uninteressant, was Wasserstoff angeht.

Man kann Brennstoffzellen-Fahrzeuge zunächst auch durchaus mit Erdgas bespeisen, bei entsprechender Auslegung an der Tankstelle und im Fahrzeug. Wir reden über einen mittleren Zeithorizont. Die Steuerbegünstigung für Erdgas steht bis 2020 im Bundesgesetzblatt. Es

klings aus unserer Sicht sehr vernünftig, hier eine synergetische Ergänzung zu sehen und nicht eine Konkurrenz, sich Bündnispartner zu suchen für die Verfolgung seines Anliegens, statt sich gegenseitig zu paralysieren, indem man gegeneinander redet oder sich durch überzogene Ankündigungen lähmt.

Und auch der ökologische Wert sollte betrachtet werden. Der Einsatz von Wasserstoff hat in der Regel einen hohen lokalen ökologischen Wert. Ein Wasserstoff-Fahrzeug hat lokal sehr begrenzte oder keine Emission, jedenfalls solange es nicht sehr schnell fährt – dann haben Sie das übliche Problem mit dem Reifengeräusch. Ähnlich ist es mit anderen Einsatzformen. Aber sehen wir uns die Sache von der globalen Ökobilanz an, die uns als Umweltministerium natürlich besonders interessiert.

## „Die Durchsetzung der Wasserstoff-Wirtschaft ist ein echtes Generationenprojekt.“

Die große Herausforderung, vor der wir stehen, ist weniger die lokale Emission, sondern der Klimaschutz, d.h. die Verringerung der Klimagasemissionen in großem Stil. Wenn wir dieser Herausforderung nicht gerecht werden, dann werden die Generationen nach uns noch ganz andere Probleme haben als das Knappwerden von fossilen Rohstoffen.

Wenn wir uns die globale Bilanz ansehen, dann ist Wasserstoff natürlich extrem sinnvoll, wenn wir mit regenerativ erzeugtem Strom durch Elektrolyse Wasserstoff aus Wasser herstellen. Elektrolyse machen wir gegenwärtig bei etwa 5% des Wasserstoffs im deutschen Markt, 19% machen wir aus Erdgas, 30% aus Kohle und 46 % aus Erdöl. Übrigens mit sehr unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Bilanzen – die Gasreformierung aus Erdgas schneidet nach der Elektrolyse noch bei weitem am besten ab. Aber auch unabhängig vom Vorprodukt muss bei jedem dieser Prozesse eine Menge Energie hineingesteckt werden.

Beim Einsatz fossiler Energien kann Wasserstoff im Grunde genommen in der globalen Bilanz nicht ökologisch effizient sein. Beispiel Verkehrsbereich: Man kann aus Mineralöl erst Wasserstoff erzeugen und diesen dann im Auto verbrennen oder durch die Brennstoffzelle schicken. Aber das kann nie wirklich effizient werden, wenn man gleichzeitig das Mineralöl auch direkt verbrennen kann. Der Wasserstoffeinsatz erfordert zusätzliche Zwischenstufen, aber die verschlechtern natürlich die Bilanz. Der ökologische Wert kommt erst dann heraus, wenn wir regenerative Energien einsetzen können, um diesen Wasserstoff zu erzeugen. Und wir brauchen einen relativ großen Anteil an regenerativen Energien, wenn man genauer hinsieht. Wenn wir durch regenerativ erzeugten Strom Wasserstoff herstellen, müssen wir uns die Frage stellen: Würden wir diesen Strom nicht besser

ins Netz speisen und damit fossil erzeugten Strom ersetzen? Was ist in der ökologischen Bilanz günstiger?

Nach den Gutachten, die bei uns vorliegen, über deren Zahlen man sicher diskutieren kann, müssten wir etwa 30% regenerativen Strom im Netz haben, damit es sich ökologisch lohnt, den darüber hinausgehenden Strom direkt für die Wasserstoff-Produktion einzusetzen. Mögen es nun 30, 25 oder 20% sein, wir brauchen jedenfalls einen gegenüber 8% im Jahr 2002 weit größeren Anteil an regenerativem Strom.

## Regenerative Energien ausbauen

Der entscheidende Beitrag, den das Umweltministerium bzw. die Bundesregierung zur Durchsetzung und Akzeptanz der Wasserstoff-Wirtschaft leisten will, ist die Wende in der Energiepolitik. Wir wollen den Anteil an regenerativem Strom bis 2010 gegenüber 2000 verdoppeln auf 12,5%, und bis zum Jahre 2050 etwa 50% der Strom- und der Primärenergieerzeugung regenerativ leisten. Und das müssen wir tun, damit unsere gemeinsame Perspektive einer ökologisch fundierten Wasserstoff-Wirtschaft auch trägt.

Es ist natürlich völlig richtig, dass wir das nicht alles durch Windkraft erreichen können. Die Windenergie an Land boomt im Moment, wird aber in den nächsten Jahren etwas weniger boomen, weil uns die guten Standorte ausgehen. Windkraftanlagen im Meer werden am Ende dieses und im nächsten Jahrzehnt noch einmal einen Boom erfahren. Außerdem brauchen wir weitere, zusätzliche, ergänzende Formen regenerativer Energie, beispielsweise Energie aus Erdwärme (Geothermie), eine Energiequelle, die in Deutschland vom Potenzial her reichlich vorhanden und, ist sie einmal erschlossen, jederzeit verfügbar ist – also eine „grundlastfähige“ Energie. In München-Unterhaching fördern wir ein Pilotprojekt in diesem Zusammenhang. Es gibt in Deutschland bisher noch keine Kilowattstunde Strom aus Erdwärme. Allerdings wird sich das noch in diesem Jahr ändern.

Auch die Biomassenutzung können wir weiter ausbauen. Wasserkraft wollen wir ebenfalls fördern. Die Photovoltaik hat noch dasselbe Problem wie der Wasserstoff: Sie ist zu teuer. Wir müssen die bemerkenswerte Kostendegression der letzten Jahre hier rasch fortsetzen, sonst werden wir die großen Beiträge, die wir von der Photovoltaik ab etwa 2025 erwarten, nicht darstellen können.

Wir müssen das ganze Spektrum regenerativer Energien nutzen und wir müssen dabei auf die Wirtschaftlichkeit achten. Die Windenergie wird nach unserer Erwartung etwa im Jahr 2012 wirtschaftlich werden. Diese Erwartung stützt sich auf Gutachten, die wir haben anfertigen lassen im Zusammenhang mit der Arbeit am Erneuerbaren Energiengesetz (EEG), wo wir gerade eine Novelle im Referentenentwurf vorgelegt haben. Wir hoffen, dass wir mit dieser Novelle im kommenden Frühjahr durch Bundestag und Bundesrat kommen.

Wir brauchen diese Energiewende, wir brauchen den Ausbau erneuerbarer Energien dringend und wir haben die Chance hier viel zu erreichen, weil ein großer Teil unseres Kraftwerksparks aus Altersgründen bis 2020 vom Netz gehen wird. Nach groben Schätzungen sind das etwa 50%. Dieser Teil unseres Kraftwerksparks muss ersetzt werden, sei es durch Energiesparen, höhere Energieeffizienz oder durch neue Kraftwerke, und dieser Prozess der Ersetzung gibt uns eine historische Chance, zu steuern und wenn nötig auch umzusteuern in der Energiepolitik.

Um mit unserer Strategie voranzukommen brauchen wir also drei Säulen:

- Das Vorantreiben der Energiewende
- Das Vorantreiben von Forschung und Entwicklung im Wasserstoffbereich im engeren Sinne und die Nutzung der vorhandenen Marktpotenziale
- Das Entwickeln von Übergangsstrategien in breite Anwendungsbereiche

Die Bundesregierung hat die Wasserstoff-Technologie schon immer gefördert im Rahmen ihrer Programme für Forschung und Entwicklung. Bedauerlicherweise sind die dafür eingesetzten Mittel im Laufe der 90er Jahre von einem Höhepunkt von etwa 28 Millionen DM im Jahre 1994 geschmolzen auf etwa ungefähr 14 Millionen im Jahr 1999. Wir haben das im Rahmen des Zukunftsinvestitionsprogramms umgekehrt und haben in den Jahren 2001 bis 2004 in diesem Bereich von Forschung und Entwicklung etwa 100 Millionen € investiert.

Im Koalitionsvertrag von 2002 findet sich eine Formulierung, die sagt: „Die Bundesregierung wird den Marktdurchbruch der Brennstoffzelle vorantreiben.“ Gehen wir gemeinsam davon aus, dass dies auch entsprechend unterlegt werden wird. Die politische Absicht besteht jedenfalls.

## Wasserstoff-Wirtschaft muss nachhaltig sein

Die Bundesregierung hat im Rahmen der „Verkehrswirtschaftlichen Energiestrategie“ eine Orientierung auf Wasserstoff als Kraftstoff der Zukunft vorgenommen. Darauf aufbauend hat sie im Rahmen der Nachhaltigkeitsstrategie das Clean Energy-Projekt in Berlin als Pilotvorhaben aufgelegt. Eine Wasserstoff-Tankstelle und etwa 100 Fahrzeuge unterschiedlichster Typen und verschiedene Hersteller sollen dort Praxiserfahrungen sammeln können.

Wir setzen sehr stark darauf, dass das, was wir in den verschiedensten Bereichen von der Energiewende über Praxistests bis hin zu Übergangsstrategien tun, synergetisch zusammenwirkt und wir für das Gesamtprogramm so eine hohe öffentliche Akzeptanz bekommen. Allerdings wird sich die Wasserstoff-Wirtschaft insgesamt nur durchsetzen, wenn sie tatsächlich nachhaltig ist.

Was wir tun, ist ein echtes Generationenprojekt. Bis die Wasserstoff-Wirtschaft wirklich durchgesetzt ist, werden noch erhebliche Zeiträume vergehen. Je nach

Studie und Einsatzfeld können es zwischen 30 und 40 Jahre werden. Aber das sollte für uns ein zusätzlicher Anreiz sein, heute das Richtige und Notwendige zu tun. Dies ist ein Bereich, bei dem der Blick in die Zukunft Freude macht und ermutigt. Die Wasserstoff-Wirtschaft ist ein Generationenprojekt, sowohl ökologisch als auch technologisch.

Es wäre natürlich nicht richtig, wenn wir als Bundesrepublik Deutschland anderen, auf dem Weltmarkt konkurrierenden Ländern dort freie Bahn lassen und selber nicht das uns Mögliche tun würden. Dies ist ein Wissens- und Technologiestandort, und wir müssen uns in dieser Zukunftsbranche selbstverständlich schon aus Standortgründen mit größtem Nachdruck engagieren. Die Straße in die Wasserstoff-Wirtschaft liegt breit vor uns, aber sie führt noch ein ganzes Stück steil bergauf. Das ist nicht ungewöhnlich, denn vor dem Erfolg liegt die Herausforderung.

## Abstract

Die Bundesregierung und das Umweltministerium haben klare Strategien für eine Energiewende: Erneuerbare Energien sollen weiter ausgebaut werden. Beim Weg in die Wasserstoff-Zukunft setzt das Umweltministerium auch auf geeignete Übergangsstrategien wie Fahrzeuge mit Erdgas-Betrieb. Und im Rahmen der „Verkehrswirtschaftlichen Energiestrategie“ hat die Bundesregierung eine Orientierung auf Wasserstoff als Kraftstoff der Zukunft vorgenommen.

## Der Autor



### Reinhard Kaiser

Reinhard Kaiser ist Leiter der Unterabteilung „Klimaschutz, Erneuerbare Energien“ (Z III) beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit in Berlin.

# Die Wasserstoff-Revolution

**Der Welt steht eine friedliche Revolution bevor: Der Energieträger Wasserstoff wird den Aufstieg einer globalen und gerechten Energiewirtschaft begleiten. Wasserstoff ist sauber, unbegrenzt verfügbar und auch für die Länder erschwinglich, die heute keinen Zugang zu Energie und Wohlstand haben. Die H<sub>2</sub>-Revolution wird die Macht der Ölkartelle beenden und der Ausgangspunkt sein für eine gerechte Weltwirtschaft.**

In der Energieversorgung auf der Erde stehen wir am Anfang einer neuen Ära. Das Industriezeitalter, das vor ein paar Hundert Jahren damit begann, dass Kohle in Newcastle (Nordengland) gefördert und überall hin transportiert wurde, sprudelt nun in den Ölfeldern des Nahen und Mittleren Ostens ganz langsam seinem Ende entgegen. Aber mittlerweile steht ein ganz neues Energiesystem in den Startlöchern. Wasserstoff – das leichteste und am häufigsten vorhandene Element in unserem Universum – wird zur nächsten großen Energierevolution führen. Wissenschaftler nennen ihn den „ewigen Brennstoff“, weil er tatsächlich unerschöpflich ist. Und wenn Wasserstoff zur Energieproduktion verwendet wird, dann entstehen als einzige Nebenprodukte reines Wasser und Wärme.

Es fällt schwer, sich eine Welt ohne Öl vorzustellen, wo doch ein so großer Teil unseres modernen Zeitalters ohne die Friedhöfe der Juraperiode nicht entstanden wäre. Wir verwenden fossile Brennstoffe zum Beheizen von Gebäuden und zum Betreiben von Fabriken, um uns vorwärts zu bewegen und unsere Städte zu beleuchten. Wir verwenden Substanzen aus fossilen Brennstoffen, damit unsere Nahrungsmittel wachsen können, und wir nutzen sie, um Häuser zu bauen.

**„Die Umstellung auf Wasserstoff ist die beste Versicherung gegen potenzielle zukünftige Ölkriege im Mittleren Osten.“**

In der Vergangenheit behaupteten die Experten, wir könnten uns noch ungefähr weitere vierzig Jahre auf die Verfügbarkeit von billigem Rohöl verlassen. Aber jetzt erklären einige der weltweit führenden Erdölgeologen, dass die Ölproduktion auf diesem Globus schon viel früher ihr Fördermaximum erreichen und dann rasch abneh-

men könnte, vielleicht schon ab 2020, was den Ölpreis in astronomische Höhen treiben würde. Die erdölproduzierenden Länder, die nicht der OPEC angehören, haben ihr Fördermaximum fast schon erreicht, was bedeutet, dass die verbleibenden Reserven überwiegend im politisch instabilen Nahen und Mittleren Osten liegen. Die zunehmenden Spannungen zwischen der islamischen Welt und dem Westen werden unseren Zugang zu erschwinglichen Ölquellen in Zukunft vermutlich noch mehr erschweren. Steigende Ölpreise werden Entwicklungsländer zweifellos noch tiefer in die Schuldenfalle treiben, wodurch die Dritte Welt noch jahrzehntelang in Armut verharren wird. In ihrer Verzweiflung könnten die Vereinigten Staaten und andere Nationen sich wieder schmutzigeren fossilen Brennstoffen zuwenden – Kohle, Ölsand und Schweröl – was die globale Erwärmung nur verstärken und das bereits bedrohte Ökosystem der Erde noch mehr gefährden würde. Durch eine drohende Ölknappeheit wird das industrielle Leben aufgrund von massiven Unterbrechungen oder gar einem kompletten Zusammenbruch des Systems stark gefährdet.

## Abhängigkeit vom Öl kann beendet werden

Wasserstoff kann dazu beitragen, dass sich die Welt nicht mehr ausschließlich auf das Öl aus dem Persischen Golf verlassen muss, der politisch instabilsten und am wenigsten berechenbaren Region auf unserem Globus. Die Umstellung auf Wasserstoff ist die beste Versicherung gegen potenzielle zukünftige Ölkriege im Mittleren Osten. Außerdem wird die Verwendung von Wasserstoff den Kohlendioxidausstoß drastisch verringern und damit die Auswirkungen der globalen Erwärmung dämpfen. Da Wasserstoff überaus reichlich vorhanden ist, werden Leute, die bisher keinen Zugang zu Elektrizität hatten, in der Lage sein, sie selbst zu produzieren.

Im Oktober 2002 gab die Europäische Union einen langfristigen Plan bekannt, der den Übergang von der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu erneuerbaren Energien, eben einer Wasserstoff-Wirtschaft, vorsieht. Romano Prodi, der Präsident der Europäischen Kommission, sagte damals, dass die Loslösung Europas aus der Abhängigkeit vom Öl des Mittleren Ostens und der Übergang zu einer Wasserstoff-Wirtschaft nach der Einführung des Euro die nächste große Integrationsaufgabe für Europa darstellen würde; er verglich die ehrgeizigen Bemühungen sogar mit dem amerikanischen Raumfahrtprogramm



Jeremy Rifkin berät unter anderem Romano Prodi bei einer neuen Energieinitiative auf der Basis von Wasserstoff.

**„Durch die Entwicklung der Wasserstoff-Technologie stehen wir am Anfang einer neuen historischen Epoche.“**

der 60er Jahre des 20. Jahrhunderts, dessen Ziel darin bestand hatte, einen Menschen auf den Mond zu bringen.

Und die Wasserstoff-Zukunft beginnt schon jetzt: Stationäre kommerzielle Brennstoffzellen auf Wasserstoffbasis werden für den Gebrauch zu Hause, in Büros und in der Industrie gerade eingeführt. In ein paar Jahren werden tragbare Brennstoffzellenpatronen auf den Markt kommen. Konsumenten werden dann in der Lage sein, ihre Handys, Laptops und sonstigen Geräte mit Hilfe einer einzigen Patrone für vierzig Tage oder länger mit Energie zu versorgen. Die führenden Automobilhersteller haben bereits über zwei Milliarden Dollar in die Entwicklung von Wasserstoffautos, -bussen und -lastwagen gesteckt, und man geht davon aus, dass die ersten dieser Fahrzeuge aus einer Massenproduktion Anfang 2009 auf unsere Straßen kommen werden.

Die Wasserstoffwirtschaft wird eine groß angelegte Umverteilung von Energie ermöglichen, was weitreichende Folgen für die Gesellschaft haben wird. Unser heutiger zentralisierter, von oben nach unten verlaufender Energiefluss, der von den internationalen Ölkonzernen und Versorgungsbetrieben gesteuert wird, könnte dann der Vergangenheit angehören. In dem neuen Zeitalter könnte jeder Mensch mit Zugang zu erneuerbaren Energiequellen mittels der so genannten „dezentralisierten Erzeugung“ sowohl zum Hersteller als auch Nutzer seiner eigenen Energie werden. Wenn Millionen von Endverbrauchern ihre Brennstoffzellen mithilfe der Konstruktionsprinzipien und der intelligenten Technik, die auch das Internet ermöglicht haben, zu lokalen, regionalen und nationalen Wasserstoff-Energienetzen verbinden, können

sie als gleichberechtigte Energie untereinander austauschen, wodurch eine neue dezentralisierte Form der Energieerzeugung und -verwendung entsteht.

Im neuen Zeitalter der Brennstoffzellen auf Wasserstoffbasis wird sogar ein Auto zum „Kraftwerk auf Rädern“ – mit einer Produktionskapazität von 20 Kilowatt. Ein durchschnittliches Haus benötigt nicht mehr als zwei bis vier Kilowatt Energie. Da Autos die meiste Zeit irgendwo geparkt sind, können deren Besitzer sie während der Stunden, in denen sie nicht benutzt werden, an ihr Heim, ihr Büro oder das interaktive Hauptelektrizitätsnetz anschließen und so die Elektrizität, die sie erzeugen, an das Netz verkaufen. Wenn nur fünfundzwanzig Prozent der Fahrer ihre Autos als Minikraftwerke nutzen, könnten wir auf all die riesigen, umweltverschmutzenden Kraftwerke verzichten, von denen wir jetzt abhängig sind.

### Verbindung von Software, Kommunikation und Wasserstoffenergie

Die wirklich großen wirtschaftlichen Revolutionen ereignen sich immer dann, wenn neue Kommunikationstechniken sich mit neuen Energiesystemen verbinden und dadurch ein völlig neues Wirtschaftsmuster entsteht. Die Einführung der Druckerpresse im 15. Jahrhundert schuf beispielsweise eine völlig neue Kommunikationsform, die Jahrhunderte später in Verbindung mit der Kohle- und

Dampfkraft zum Ausgangspunkt der industriellen Revolution wurde. Durch die Drucktechnik entstand eine Art der Kommunikation, die ein hohes Maß an Information schnell genug transportieren konnte, um ein Universum zu koordinieren, das mit Dampf betrieben wurde. Es wäre nicht möglich gewesen, die größere Geschwindigkeit, erhöhte Gangart, den rascheren Fluss und die höhere Dichte und Interaktivität des kommerziellen und sozialen Lebens, welche die Dampfenergie ermöglichte, mittels handschriftlichem Verkehr oder verbaler Kommunikation zu koordinieren. Auf ähnliche Weise boten der Telegraf und später das Telefon Kommunikationsmöglichkeiten, die schnell genug waren, um mit der nochmals erhöhten Gangart, dem rascheren Fluss und der höheren Dichte und Interaktivität Schritt zu halten, die durch den Übergang von der Kohle zum noch flinkeren Kohlenwasserstoff, dem Rohöl, möglich wurden.

Nun beginnen Wasserstoff und die neue, auf Brennstoffzellen basierende, dezentralisierte Erzeugungstechnik, sich mit der Computer- und Kommunikationsrevolution zu verbünden, um ein völlig neues Wirtschaftszeitalter zu schaffen. Ehe die dezentralisierte Erzeugung von Wasserstoff vollständig verwirklicht werden kann, muss das bestehende Stromversorgungsnetz verändert werden. An dieser Stelle wird die Software- und Kommunikations-

mobil waren.“ In vielerlei Hinsicht gleicht das heutige Versorgungsnetz dem Zustand der Rundfunk- und Fernsehbranche vor dem Siegeszug des Internets, als Verbindungen nur in einer Richtung genutzt wurden, von den Medien zu einem passiv zuschauenden Publikum. Auf ganz ähnliche Weise sind unsere jetzigen Verteilungssysteme nicht dafür eingerichtet, bestimmte Energiemengen an bestimmte Bereiche des Versorgungsnetzes zu leiten. Das bedeutet letztendlich, dass die Energie überall hin fließt, wodurch häufig Staus und Energieverluste entstehen. Eine neue von EPRI entwickelte Technik, die als FACTS (flexible alternative current transmission system = flexibles alternatives Stromübertragungssystem) bezeichnet wird, bietet Elektrizitätsanbietern die Kapazität, an bestimmte Bereiche des Versorgungsnetzes Strommengen bedarfsgerecht zu schicken.

Die Integration modernster Computer-Hardware und -Software verwandelt das zentralisierte Versorgungsnetz in ein vollständig interaktives intelligentes Energienetz. Sensoren und intelligente Hilfsprogramme, die an verschiedenen Stellen in das System eingebaut sind, können Informationen über die aktuellen Energiebedingungen liefern, wodurch der Strom genau dann und dort fließen kann, wo er gebraucht wird, und zum günstigsten Preis. Beispielsweise hat Sage Systems in den USA ein Softwareprogramm entwickelt, das es Versorgungsbetrieben möglich macht, „sofort die Belastung zu verringern“, wenn das System bereits Spitzenwerte und die Grenzen seiner Belastbarkeit erreicht, indem „mit einem einzigen Befehl übers Internet die Thermostate von ein paar Tausend Kunden um zwei Grad heruntersetzt werden.“ Ein anderes neues Produkt, Aladyn, gibt Benutzern die Möglichkeit, über einen Web-Browser den Energieverbrauch ihrer Haushaltsgeräte, Lampen und Klimaanlage zu beobachten und zu ändern.

In allernächster Zukunft werden Sensoren, die an jedem elektrischen Gerät angebracht sind – zum Beispiel an Kühlschränken, Klimaanlage, Waschmaschinen oder Alarmanlagen – ganz aktuelle Informationen über Energiepreise, die Temperatur, Lichtverhältnisse und andere Umweltbedingungen liefern, so dass Fabriken, Büros, private Haushalte, ganze Wohngegenden oder Gemeinden kontinuierlich und automatisch ihre Energieanforderungen an den jeweiligen Bedarf und die im Netz vorhandene Energiemenge anpassen können.

## „Die Integration modernster Computer-Technologie verwandelt das zentralisierte Versorgungsnetz in ein vollständig interaktives intelligentes Energienetz.“

revolution relevant. Die Verbindung von erst Tausenden und dann Millionen von Brennstoffzellen mit den Hauptversorgungsnetzen wird hoch entwickelte Verteilungs- und Steuerungsmechanismen erfordern, um sowohl während als auch zwischen den Spitzenbedarfszeiten den Energiestrom zu lenken. Encorp, ein US-amerikanisches Unternehmen, hat bereits ein Softwareprogramm für die Fernüberwachung entwickelt, das automatisch in Zeiten der Spitzenbelastung, wenn ein Bedarf an zusätzlicher Energie besteht, lokale Generatoren an das Hauptversorgungsnetz anschließen würde. Man schätzt, dass eine Nachrüstung bestehender Systeme etwa 100 US-Dollar pro Kilowattstunde kosten würde, was billiger käme als der Aufbau neuer Kapazitäten.

Das bestehende Versorgungsnetz hat das Problem, dass es entwickelt wurde, um den Energiefluss wie in einer Einbahnstraße von einer zentralen Quelle zum Endverbraucher zu ermöglichen. Es ist nicht verwunderlich, dass Kurt Yeager, der Präsident des Electric Power Research Institute (EPRI), vor kurzem bemerkte: „Die gegenwärtige Energieinfrastruktur ist mit der Zukunft genauso wenig vereinbar wie es Reitpfade mit dem Auto-

## Die Volksenergie

Ob Wasserstoff zur „Volksenergie“ werden wird, hängt in hohem Maße davon ab, wie er im Frühstadium der Entwicklung nutzbar gemacht wird. Vor allem muss man berücksichtigen, dass mittels der dezentralisierten Erzeugung jede Familie, jedes Unternehmen, jede Wohngegend und jede Gemeinde auf der Welt potenziell sowohl Anbieter als auch Konsument sowie Verkäufer ihres eigenen Wasserstoffs und ihrer eigenen Elektrizität werden kann. Da sich, geographisch gesehen, die Brennstoffzel-

len an den Orten finden werden, wo Wasserstoff und Elektrizität produziert und zumindest teilweise konsumiert werden, wobei der Überschuss an Wasserstoff als Brennstoff verkauft und nicht gebrauchte Elektrizität einfach wieder ans Energienetz zurückgeschickt wird, ist die Fähigkeit, eine große Anzahl von Produzenten/Konsumenten in Verbänden zusammenzuschließen, wesentlich für die Macht über die Energie und die Verwirklichung der Vision von demokratischer Energie.

Wenn man die Menschen entsprechend befähigen und die Energie demokratisieren will, müssen staatliche und gemeinnützige Organisationen – Kommunalregierungen, Kooperativen, Entwicklungsgesellschaften, Kreditgenossenschaften und dergleichen – schon ganz am Anfang der Energierevolution mitmischen und dabei helfen, dass in jedem Land Verbände von dezentralisierten Erzeugern ins Leben gerufen werden.

Letztendlich wird die kombinierte Produktion der Endverbraucher über das Energienetz den von den Versorgungsbetrieben in ihren zentralen Elektrizitätswerken produzierten Strom übersteigen. Wenn das geschieht, wird dies eine Revolution der Energieerzeugung und -verteilung bedeuten. Sobald ein Kunde, der Endverbraucher, auch Hersteller und Lieferant von Energie wird, werden die Versorgungsbetriebe rund um den Globus gezwungen sein, ihre Rolle neu zu definieren, wenn sie überleben wollen. Ein paar Stromversorger beginnen bereits, die Möglichkeiten einer neuen Funktion als Bündler von Energiedienstleistungen und Koordinator von energiebezogenen Aktivitäten in dem neu entstehenden Energienetz zu testen. In dem neuen Umfeld würden Stromversorger zu „virtuellen Versorgungsbetrieben“, welche die Endverbraucher unterstützen, indem sie sie miteinander verbinden und ihnen helfen, den jeweiligen Energieüberschuss Gewinn bringend und effizient untereinander auszutauschen. Im Zeitalter der dezentralisierten Erzeugung wird die Koordinierung der Energieeinspeisung an Stelle der reinen Produktion zum Mantra der Stromversorger.

Interessanterweise dürften Versorgungsbetriebe – zumindest kurzfristig – von der dezentralisierten Erzeugung profitieren, obgleich viele von ihnen bis vor kurzem gegen diese Entwicklung angekämpft haben. Da die dezentralisierte Erzeugung sich an den speziellen Energiebedürfnissen der Endverbraucher ausrichtet, kostet sie weniger und stellt eine effizientere Methode zur Bereitstellung von zusätzlichem Strom dar als das Angewiesensein auf eine zentrale Energiequelle. Es kostet ein US-amerikanisches Unternehmen zwischen \$365 und \$1.100 pro Kilowattstunde, eine sechs Meilen lange Stromleitung zu einem Dreimegawattkunden zu etablieren. Ein dezentralisiertes Erzeugungssystem kann den gleichen Elektrizitätsbedarf zu Kosten von \$400 bis \$500 pro Kilowattstunde decken. Die Stromerzeugung am Ort oder nahe am Ort, wo sich der Endverbraucher befindet, reduziert außerdem den Energiebedarf, weil zwischen fünf und acht Prozent der transportierten Energie bei der Übertragung über große Entfernungen verloren geht.



**„Keine wirtschaftliche Entwicklung wird in den nächsten Jahrzehnten einen ähnlich großen Effekt auf die Weltwirtschaft haben wie die Wasserstoff-Technologie.“**

## Auf dem Weg zu einer dritten industriellen Revolution

Die Nutzbarmachung von Wasserstoff wird unseren Lebensstil genauso grundsätzlich ändern, wie die Verwendung von Kohle und Dampfkraft im 19. Jahrhundert und der dann stattfindende Wechsel zu Öl, Benzin und dem Verbrennungsmotor im 20. Jahrhundert es taten. Das Engagement für einen 50-Jahre-Plan zum Aufbau einer Wasserstoff-Wirtschaft basiert auf einer ähnlich großartigen Wirtschaftsvision wie die erste und zweite industrielle Revolution. Indem sie beim Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur für ganz Europa federführend wird und erneuerbare Ressourcen, die Wasserstoff-Technik sowie damit verbundene Produkte und Dienstleistungen entwickelt, kann die Europäische Union hinsichtlich der wirtschaftlichen Entwicklung im 21. Jahrhundert dem Rest der Welt gegenüber den Ton angeben.

Investitionen in eine Wasserstoff-Wirtschaft werden die Kapitalmärkte wieder beleben, die Produktivität antreiben, neue Exportmärkte schaffen und das europäische Bruttoinlandsprodukt steigern. Laut einer kürzlich von Price Waterhouse Coopers durchgeführten Studie dürfte die Wasserstoff-Wirtschaft bis zum Jahr 2020 bis zu 1,7 Billionen Dollar an Neugeschäft generieren. Man muss dabei betonen, dass keine einzige andere wirtschaftliche Entwicklung während der nächsten Jahrzehnte einen ähnlich großen Effekt auf die Weltwirtschaft haben dürfte.

Der Übergang von einem Wirtschaftssystem, das auf fossilen Brennstoffen basiert, zum Zeitalter des Wasserstoffs bedingt eine dynamische Partnerschaft zwischen den europäischen Unternehmen und Regierungen auf

kommunaler, regionaler und nationaler Ebene. Von den Firmen Europas wird das unternehmerische Know-how kommen, um die neue Soft- und Hardware für das neue Wasserstoff-Zeitalter zu schaffen und das dezentrale Stromversorgungsnetz auf Wasserstoffbasis neu zu entwickeln und zu verwalten. Auf sämtlichen Ebenen werden Regierungen der Umstellung in Zusammenarbeit mit den Unternehmen den Weg ebnen müssen. Gerade am Anfang der Schaffung eines neuen Energiesystems und der Etablierung einer neuen Energieinfrastruktur sind die Unterstützung durch die Regierung, beispielsweise durch die Bereitstellung von Forschungs- und Entwicklungsgeldern, Steuervergünstigungen und -anreizen und frühe Vereinbarungen hinsichtlich der Übernahme der Technik durch Regierungsbehörden und deren Lieferanten, sowie sinnvolle Regulierungsänderungen, besonders wichtig, um die Umstellung zu bewerkstelligen.

Die Beschäftigten werden vom Umstieg auf die Wasserstoff-Wirtschaft auch profitieren. Während die Weltwirtschaft aufgrund neuer „intelligenter“ Techniken langfristig gesehen weniger Arbeiter für die Massenproduktion, aber viele kleine professionelle Teams brauchen wird, müssen kurz- und mittelfristig – während der nächsten 30 Jahre – Millionen neuer Arbeitsplätze geschaffen werden, um in allen Gemeinden erneuerbare Energietechniken zu etablieren, die Stromversorgungsnetze in allen Ländern zu ändern und die Infrastruktur für die auf Wasserstoff basierende Energie zu schaffen. In den Zeiten, in denen neue Energiesysteme etabliert und die dazu notwendigen Infrastrukturen geschaffen wurden, ist es bisher immer zu einem bedeutenden Beschäftigungsanstieg gekommen.

zungsrechnungen zu bezahlen und können sich auch die steigenden Benzinpreise nicht mehr leisten. Ein europaweiter Wasserstoff-Energieplan, der sich auf die Installation einer Technik zur Nutzung erneuerbarer Rohstoffe und einer Infrastruktur von Brennstoffzellen auf Wasserstoffbasis in armen städtischen und ländlichen Gegenden und Gemeinden konzentriert, kann dazu beitragen, den schwächsten Bevölkerungsgruppen Europas die Unabhängigkeit hinsichtlich der Energieversorgung zu bringen.

## Mehr Chancen für die Entwicklungsländer

Ein Drittel der Menschen kommt ohne Elektrizität aus. Der Pro-Kopf-Verbrauch an Energie in den Entwicklungsländern beträgt heutzutage nur ein Fünftel des Energiekonsums in den Vereinigten Staaten. Wenn man die Kluft zwischen den Besitzenden und den Habenichtsen schließen will, muss man erst den Unterschied zwischen den ans Elektrizitätsnetz Angeschlossenen und denen ohne Zugang zu diesem Netz verringern. Die mangelnde Elektrizitätsversorgung trägt wesentlich dazu bei, dass die Armut auf der Welt weiter bestehen bleibt. Umgekehrt bringt der Zugang zur Energie mehr wirtschaftliche Chancen. Der Umstieg auf die Wasserstoff-Energiewirtschaft, die erneuerbare Ressourcen und die entsprechenden Techniken verwendet, um Wasserstoff zu gewinnen, sowie die Schaffung von dezentralisierten Energieerzeugungsnetzen, die Gemeinden auf der ganzen Welt miteinander verbinden können, kann Milliarden von Menschen den Weg aus der Armut ebnen.

Ziel sollte es sein, jede Gemeinde in den Entwicklungsländern mit stationären Brennstoffzellen zu versorgen. Dörfer könnten Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energie – Sonne, Wind, Biomasse, usw. – nutzen, um ihre eigene Elektrizität zu erzeugen und dann diese Elektrizität dazu verwenden, um aus Wasser Wasserstoff zu gewinnen und ihn für die anschließende Nutzung in Brennstoffzellen zu lagern. In ländlichen Gegenden, in die kommerzielle Elektrizitätsleitungen noch nicht vorgezogen sind, weil dies zu teuer wäre, könnten unabhängige Brennstoffzellen schnell und billig Energie liefern. Sobald genügend Brennstoffzellen geleast oder gekauft und installiert worden sind, können Ministromversorgungsnetze städtische und ländliche Bereiche zu wachsenden Energienetzen verbinden. Diese Wasserstoff-Energienetze können organisch wachsen und sich mit zunehmender Nutzung dezentraler Erzeugung ausweiten. Größere Wasserstoff-Brennstoffzellen haben den zusätzlichen Vorteil, dass sie als Nebenprodukt reines Trinkwasser produzieren, ein beträchtlicher Vorteil in ländlichen Gemeinden auf der ganzen Welt, für die der Zugang zu sauberem Wasser häufig eine wesentliche Sorge ist.

Die Regierungen der einzelnen Staaten und internationale Organisationen für die Kreditvergabe müssen mo-

## „Die H<sub>2</sub>-Revolution wird der Ausgangspunkt sein für eine gerechte Weltwirtschaft.“

Grundlegende Veränderungen von Energiesystemen und die sie begleitenden Infrastrukturanpassungen führen traditionell zur Schaffung neuer Arbeitsplätze. Da die Einführung der Techniken zur Nutzung erneuerbarer Ressourcen und die Einrichtung einer Wasserstoff-Infrastruktur sowie die Neuordnung und Dezentralisierung der nationalen Stromversorgungsnetze in einem bestimmten geographischen Bereich stattfinden, werden die erwähnten Beschäftigungsmöglichkeiten alle in Europa geschaffen. Wenn sowohl die Techniken als auch das technische Wissen, die zur Wasserstoff-Wirtschaft dazu gehören, von europäischen Forschungsinstituten und in Firmen in Europa geschaffen werden, werden dadurch in diesem Raum weitere Beschäftigungsmöglichkeiten entstehen.

Die Wasserstoff-Wirtschaft wird auch das Los der am stärksten benachteiligten Menschen in Europa verbessern. Die steigenden Öl-, Benzin- und Gaspreise werden in den kommenden Jahren die Armen am stärksten treffen. Die Armen, von denen viele sogar ihre mit Mindestlöhnen bezahlte Teilzeitarbeit aufgrund des weltweiten Wirtschaftsabschwungs verloren haben, sind jetzt schon vielfach nicht in der Lage, ihre Elektrizitäts-, Gas- und Hei-

tiert und aktiviert werden, um für die Schaffung einer Wasserstoff-Energieinfrastruktur finanzielle Mittel und logistische Unterstützung zu gewähren. Genauso wichtig ist es, dass Gesetze erlassen werden, um die Einführung der dezentralisierten Energieerzeugung zu erleichtern. Von staatlichen Organisationen und privatwirtschaftlichen Unternehmen muss verlangt werden, dass sie den dezentralisierten Energieerzeugern den Zugang zum Hauptversorgungsnetz sowie das Recht, Energie zu verkaufen oder gegen andere Dienste einzutauschen, garantieren.

## Fazit: Zwei Ansätze für eine Wasserstoff-Zukunft

Die EU vertritt die Auffassung, dass in nächster Zukunft ein großer Teil des Wasserstoffs aus fossilen Brennstoffen gewonnen werden muss, aber langfristig verfolgt sie den Plan, sich zur Gewinnung von Wasserstoff zunehmend auf erneuerbare Energien zu verlassen. Die EU hat es sich zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2010 22 Prozent ihrer Elektrizität und zwölf Prozent ihrer gesamten Energie aus erneuerbaren Ressourcen zu gewinnen.

Unternehmen in den Vereinigten Staaten machen sich nun Sorgen, sie könnten im Vergleich zu Europa in Bezug auf die Wasserstoff-Zukunft ins Hintertreffen geraten, und üben daher Druck auf die Bush-Regierung aus, damit sie ähnliche Initiativen wie die EU ergreift. Obgleich sich der Präsident in seiner Ansprache zur Lage der Nation im Jahr 2003 für eine auf Wasserstoff basierende Zukunft aussprach, konzentriert sich das Energiegesetz, das er dem Kongress zur Beratung vorlegte, fast vollständig auf Subventionen für Forschung und Entwicklung von Möglichkeiten, Wasserstoff aus fossilen Brennstoffen zu gewinnen sowie die Atomkraft für diese Aufgabe zu nutzen, und kümmert sich wenig um die Nutzbarmachung erneuerbarer Energien zur Gewinnung von Wasserstoff. Anders ausgedrückt: Die Bush-Regierung wünscht den Aufbruch in eine Wasserstoff-Zukunft, ohne aber das auf fossilen Brennstoffen und Atomenergie basierende herkömmliche System aufzugeben. Bereits Mitte dieses Jahrhunderts könnte das Unvermögen, sich ein neues Energiezeitalter vorzustellen und die notwendigen Schritte zu seiner Erreichung zu unternehmen, die Vereinigten Staaten gegenüber Europa erbärmlich ins Hintertreffen bringen.

Die Gelegenheit, wesentliche Veränderungen der Energiesysteme zu bewirken, die grundlegende technische Infrastruktur neu zu gestalten und ganz neue Arten kommerzieller Aktivitäten in die Wege zu leiten, ergibt sich in der Geschichte nur selten. Nun ist einer dieser Augenblicke gekommen. Wir stehen am Anfang einer neuen historischen Epoche. Wasserstoff, der Stoff, aus dem die Sterne und unsere Sonne gemacht sind, wird nun zum Objekt des menschlichen Erfindungsgeists und für menschliche Zwecke eingesetzt. Gleich am Anfang der Reise den richtigen Kurs festzulegen ist wichtig, wenn Europa das große Versprechen eines Wasserstoff-Zeitalters für seine Kinder in die Tat umsetzen und es zu einem wertvollen Erbe für kommende Generationen machen will.

## „Jeder Mensch kann gleichzeitig

## Hersteller und Nutzer seiner eigenen

## Energie werden.“

### Abstract

Die Nutzbarmachung von Wasserstoff wird unseren Lebensstil genauso grundsätzlich ändern, wie die Verwendung von Kohle und Dampfkraft im 19. Jahrhundert und der dann stattfindende Wechsel zu Öl, Benzin und dem Verbrennungsmotor im 20. Jahrhundert es taten. Der Energieträger Wasserstoff ist die beste Versicherung gegen Ölkriege im Mittleren Osten. Jeder Mensch kann Hersteller, Verbraucher und Verkäufer von Energie sein. In Zukunft werden Wasserstoff-Autos zu Mini-Kraftwerken auf Rädern. Die Wasserstoff-Wirtschaft wird bis zum Jahr 2020 ein Neugeschäft generieren von bis zu 1,7 Billionen US-Dollar. Und es wird eine Politik der Reglobalisierung von unten nach oben stattfinden, die für Entwicklungsländer völlig neue und bisher ungeahnte Chancen bietet.

### Der Autor



## Jeremy Rifkin

Der Bestsellerautor Jeremy Rifkin ist einer der bekanntesten amerikanischen Zeitkritiker. Er hat bisher 16 Bücher über die Folgen von Wissenschaft und Technik veröffentlicht, die in über 20 Sprachen übersetzt worden sind. Zuletzt ist von ihm „Die H<sub>2</sub>-Revolution“ erschienen, mit der er den Energieträger Wasserstoff in den Mittelpunkt der Diskussion rückt. Zugleich ist Jeremy Rifkin Präsident und Gründer der Foundation on Economic Trends, die sich mit den Folgen neuer Technologien in der Weltwirtschaft befasst. Derzeit berät er unter anderem Romano Prodi, den Präsidenten der Europäischen Kommission, bei einer neuen Energieinitiative auf der Basis des Energieträgers Wasserstoff.

# Die neuen Entwicklungen der Technik

**Wasserstoff wird in den nächsten Jahren und Jahrzehnten sukzessive die fossilen Brennstoffe als Energieträger ersetzen. Für alle Bereiche des Energieverbrauchs – von der portablen Elektronik über Blockheizkraftwerke bis hin zum Verkehr – ist Wasserstoff der Energieträger der Zukunft. Die technischen Voraussetzungen dafür sind in den vergangenen Jahren geschaffen worden: Produktionsanlagen für die verschiedensten Energiequellen, leichte und sichere Tanks sowie compatible Zapfsysteme für Tankstellen.**

Zur Herstellung von Wasserstoff werden auf absehbare Zeit fossile Rohstoffe die wichtigste Quelle bleiben. Die derzeit wirtschaftlichste Methode ist die so genannte Dampfreformierung oder Steam-Reforming: Wasserdampf und Erdgas werden bei Temperaturen von etwa 800°C über einem Katalysator zu Wasserstoff und Kohlendioxid umgesetzt. Die Produktion von Wasserstoff aus Erdöl und Kohle verläuft ähnlich. Die Dampfreformierung ist technisch etabliert und wird schon heute im großindustriellen Maßstab eingesetzt. Die Kapazitäten können dabei auch kurzfristig ausgebaut werden: Ein neuer großer Dampfreformer von Linde wurde beispielsweise im Juni 2003 in Leuna eingeweiht. Die gesamte Versorgungseinheit in Leuna kann bis zu 140.000 Kubikmeter Wasserstoff pro Stunde produzieren.

Der Prozess der Reformierung ist nicht nur großtechnisch von Bedeutung. Grundsätzlich bietet er die Möglichkeit, auch im kleinen Maßstab Wasserstoff aus Quellen wie Erdgas oder Methanol zu gewinnen. Auf diese Weise könnte man zum Beispiel in der Hausenergieversorgung auf die bestehende Erdgasinfrastruktur zurückgreifen und aus dem Erdgas vor Ort Wasserstoff herstellen. Auch am Auto wird zum Teil daran gearbeitet, von dieser Möglichkeit Gebrauch zu machen.

Neben der Dampfreformierung entsteht Wasserstoff heute auch als Beiprodukt der Produktion anderer Gase und in der chemischen Industrie. Für einen Hersteller technischer Gase wie die Linde AG ergeben sich bedeutende Synergien: Das „Abfallgas“ Wasserstoff wird unversehens zu einem gefragten Produkt. Wichtig ist bei diesem Verfahren jedoch die Reinigung des Gases. Wird Wasserstoff verbrannt, ist keine hohe Reinheit nötig, die Brennstoffzelle dagegen verträgt kein unreines Gas. Die steigende Nachfrage nach Wasserstoff wird auch ganz andere Produktionsmöglichkeiten voranbringen. Dazu gehören in erster Linie die erneuerbaren Energien wie Wind-, Wasser- und Sonnenkraft. Hier erschließt der Energieträger Wasserstoff völlig neue Quellen. Schon in den 80er Jahren war viel von Solarwasserstoff die Rede,

aber damals waren die technischen Voraussetzungen für eine weltweite Wasserstoff-Energiewirtschaft noch nicht gegeben. Heute sieht das anders aus: Elemente wie effiziente Energiewandler, Elektrolyseure, Verflüssiger, Pumpen und Speicher sind technisch weitgehend ausgereift. In einigen Jahren werden erneuerbare Energien sicherlich einen deutlich steigenden Anteil an der weltweiten Wasserstoff-Produktion haben.

## Speicherung: Flüssig ist die Zukunft

Vor allem zwei Eigenschaften machen Wasserstoff zu einem idealen Energieträger: Er kann aus den verschiedensten Primärenergiequellen hergestellt werden – und er ist speicherbar. Wasserstoff kann also wie Erdöl und im Gegensatz zu Elektrizität beliebig gespeichert und unabhängig vom Produktionsort verwendet werden. Allerdings ist Wasserstoff ein extrem leichtes Gas. Unter normalem Druck enthalten 3.000 Liter Wasserstoff die gleiche Energiemenge wie ein Liter Benzin. Um das Gas trotzdem effektiv zu speichern und zu transportieren, muss es daher stark verdichtet werden. Dafür wird es entweder unter Druck gesetzt (CGH<sub>2</sub>, Compressed Gaseous Hydrogen) oder bis auf -253°C abgekühlt, so dass es flüssig ist (LH<sub>2</sub>, Liquid Hydrogen). Beide Möglichkeiten stellen hohe Anforderungen an Technik und Sicherheit – und sie kosten auch Energie. Der sichere und möglichst verlustarme Transport von Wasserstoff ist daher eine der wichtigsten technologischen Herausforderungen auf dem Weg in die Wasserstoff-Zukunft. Auch hier sind in den vergangenen Jahren große Fortschritte gemacht worden. Für Industriekunden sind bislang große Tanks für Druckgas die gängigste Lösung. Der Wasserstoff wird dabei unter 50 bis 70 bar Druck gesetzt, wofür etwa sechs bis sieben Prozent der im Wasserstoff gespeicherten Energie benötigt wird. Im Fall von Hochdruckspeichern mit beispielsweise 350 oder 700 bar, wie sie in Automobilen eingesetzt werden, steigt dieser Energieaufwand auf 12 bis 15 Prozent des ursprünglichen Energieinhalts, da ein entsprechender Aufwand für die Temperaturkompensation berücksichtigt werden muss. Der Nachteil von Druckgas-Speichern liegt im hohen Gewicht und dem großen Raumbedarf der Tanks: Je größer der Tank, umso dicker muss dessen Wand sein – und je kleiner der Tank, umso mehr davon sind zur Speicherung der gleichen



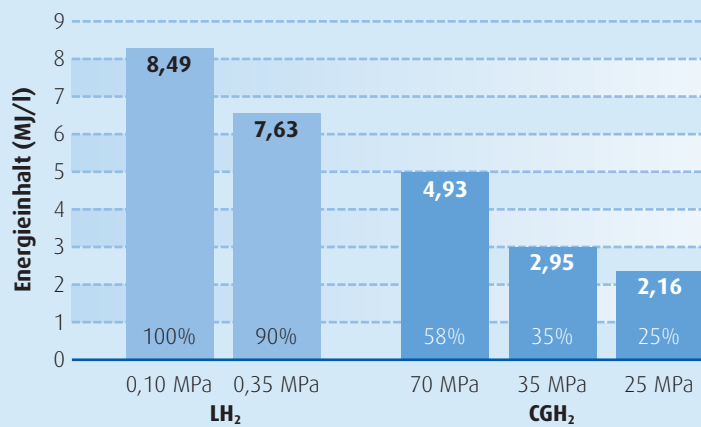
Die derzeit wirtschaftlichste Methode zur Herstellung von Wasserstoff ist die sogenannte Dampfreformierung (Steam-Reforming). Im Juni 2003 wurde ein neuer großer Linde-Dampfreformer in Leuna eingeweiht.

Menge Wasserstoff nötig.  $\text{CGH}_2$ -Tanks enthalten daher bei relativ hohem Gewicht und Eigenvolumen relativ wenig Wasserstoff – schlechte Voraussetzungen für einen Transport großer Mengen über große Distanzen. Linde sieht die Zukunft von Druckwasserstofftanks daher überall dort, wo Volumen und Gewicht keine Rolle spielen, etwa bei Speichern auf großen Firmengeländen.

Muss der Wasserstoff dagegen transportiert werden, bietet sich die flüssige Speicherform an. Bei Tanks für Flüssigwasserstoff haben wir einen Technologiesprung hinter uns: Unsere heutigen  $\text{LH}_2$ -Speicher halten das Gas bis zu zwei Wochen lang bei  $-253^\circ\text{C}$ , ohne dass etwas davon entweicht. Kryostate und doppelwandige, superisolierte Behälter verhindern fast vollständig jede Form von Wärmeübertragung. Ausgestattet mit dieser Technik transportieren unsere Lkw heute bei weniger als 40 Tonnen Gesamtgewicht fast dreieinhalb Tonnen Wasserstoff – das ist etwa zehn Mal mehr als die herkömmlichen, noch schwereren Trailer für unter Druck gespeicherten Wasserstoff.

Für die Verflüssigung von Wasserstoff muss derzeit noch etwa 30 Prozent seines Energieinhalts aufgebracht werden – das sind 15 Prozentpunkte mehr als für die Speicherung unter Druck bei ca. 350 bar. Betrachtet man allerdings den gesamten Energieaufwand für die Speicherung und den Transport des Gases, so ist Flüssigwasserstoff fast immer die bessere Lösung: Was die Verflüssigung an Energie mehr kostet, spart der Transport schnell wieder ein, wenn man statt zehn nur noch einen Lkw auf die Straße schicken muss.

Alternative Speichermethoden für Wasserstoff – etwa die chemische Bindung in Alanaten und Metallhydriden oder die aus der Nanotechnologie stammenden Graphit-



**Energieinhalt verschiedener Wasserstoff-Speicher:**  
 Unter normalem Druck enthalten 3.000 Liter Wasserstoff die gleiche Energiemenge wie ein Liter Benzin. Um Wasserstoff effektiv zu speichern und zu transportieren, muss er stark verdichtet werden.

speicher – sind noch in der Entwicklungsphase und derzeit weit von der Leistungsfähigkeit der Druckgas- oder Flüssiggas-Speicher entfernt. Linde beobachtet und fördert die Entwicklung dieser Speicher. Zumindest für spezielle Anforderungen können solche Techniken in einigen Jahren sinnvolle Ergänzungen der vorhandenen Speichermöglichkeiten sein.



**Moderne, doppelwandig isolierte Flüssigwasserstoff-Trailer transportieren bei weniger als 40 Tonnen Gesamtgewicht 3.370 Kilogramm Wasserstoff – das ist etwa zehn Mal mehr als die herkömmlichen Trailer für unter Druck gespeicherten Wasserstoff fassen.**

## Transport: Die bewährten Wege bleiben erhalten

Der Transport von Wasserstoff wird sich nicht grundlegend von dem der heutigen Energieträger, wie vor allem Erdgas, unterscheiden. Das heißt: Tankschiffe, Tankwaggons und Tanklaster bleiben uns erhalten, wenn auch mit den nötigen Anpassungen für die Speicherung von Flüssigwasserstoff. Auch Wasserstoff-Pipelines werden schon heute betrieben, etwa im Rhein-Ruhr-Gebiet oder von Linde rund um Leuna. Das Gas wird darin unter einen Druck von 30 bis 100 bar gesetzt. Allerdings ist der Wasserstoff recht unrein. Die Pipelines erfordern außerdem einen großen baulichen und wartungstechnischen Aufwand.

Anders als Erdöl oder Erdgas kann Wasserstoff auch direkt vor Ort hergestellt werden. Grundsätzlich genügt zur Wasserstoff-Produktion ein Stromanschluss und eine Wasserleitung – die Wirtschaftlichkeit dieser Methode (Elektrolyse) wird jedoch vom zukünftig steigenden Strompreis begrenzt. Wir sehen für die Vor-Ort-Herstellung daher nur dort Chancen, wo regenerative Energien im Überfluss zur Verfügung stehen, etwa in sonnen- oder windreichen Gegenden. Anders sieht es mit der Vor-Ort-Produktion von Wasserstoff aus Erdgas aus: Diese Möglichkeit wird sicherlich zumindest in der Übergangszeit überall dort genutzt werden, wo wie in der Haus-technik eine Erdgasinfrastruktur vorhanden ist.

## Verwendung: Gestern Raumfahrt, heute Chemie, morgen Verkehr

Eine treibende Kraft für die Wasserstoff-Technik war in der Vergangenheit die Raumfahrt. Viele Konzepte, etwa zur Verflüssigung des Gases, haben hier ihren Ursprung. Zudem war dies bislang nahezu der einzige Bereich, in dem Wasserstoff als Energieträger verwendet wurde. Doch der Wasserstoff-Absatz in dieser Branche stagniert. Außerdem sind nicht alle Konzepte auf andere Einsatzgebiete übertragbar: Zum Beispiel wird eine Rakete 15 Minuten vor dem Start mit 100 bis 150 Tonnen flüssigem Wasserstoff betankt, der dann in weniger als drei Minuten verbraucht wird – eine starke und dauerhafte Isolierung ist daher weit weniger wichtig als in anderen Einsatzbereichen von flüssigem Wasserstoff.

Aktuell ist die Chemie der größte Abnehmer für Wasserstoff. Unter anderem dient er als Rohstoff bei der Aufarbeitung von Erdöl, zur Härtung von Fetten, in chemischen Synthesen und zur Düngemittelherstellung. Je nach Anwendungsbereich sind unterschiedliche Mengen und Reinheitsgrade erforderlich. Die chemische Industrie wird weiterhin ein Hauptabnehmer für Wasserstoff bleiben. Auch hier erwarten wir in den nächsten Jahren Wachstumsraten von sieben bis zehn Prozent.

Die Zukunft aber liegt in der breiten Verwendung von Wasserstoff als Energieträger. Die Schlüsseltechnologie ist dabei die Brennstoffzelle: Sie setzt Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser um und produziert dabei Elektrizität und Wärme. Das Grundprinzip ist einfach und entspricht einer umgekehrten Elektrolyse. Eine Brennstoffzelle besteht aus drei Grundelementen: einer Anode, einer Kathode und einem Elektrolyt dazwischen. An der Anode gibt ein Wasserstoff-Molekül zwei Elektronen ab und wird dabei in zwei positiv geladene Wasserstoff-Ionen (Protonen) gespalten. Diese Protonen wandern durch den Elektrolyten zur Kathode, wo sie sich mit einem negativ geladenen Sauerstoff-Ion zu Wasser vereinigen. Die negative Ladung erhält der Sauerstoff wiederum vom Wasserstoff: Dessen Elektronen fließen über einen elektrischen Leiter von der Anode zur Kathode. Dieser Stromfluss kann für elektrische Arbeit genutzt werden.

Dieses Prinzip ist seit 1839 bekannt – aber erst jetzt werden seine Potenziale sichtbar und auch nutzbar. Weil eine einzelne Zelle nur eine sehr geringe Spannung erzeugt, werden heute viele Zellen zu einem Stapel („Stack“) hintereinander geschaltet. So erreicht der Brennstoffzellen-Stack hohe Leistungen, wie sie beispielsweise zum Antrieb von Fahrzeugen nötig sind. Die Elektroden können je nach Art und Einsatzgebiet der Brennstoffzelle platten- oder röhrenförmig sein. Die Elektrolyte stehen für verschiedene Anforderungen in flüssiger oder fester Form oder als Membran zur Verfügung. Die Arbeitstemperatur kann je nach Funktionsprinzip zwischen Raumtemperatur und 1.000°C liegen. Und neben Wasserstoff können teilweise auch wasserstofffreie Stoffe wie Erdgas, Biogas oder Methanol verwendet werden.



Für Industriekunden wird Wasserstoff meist in großen Druckgas-Tanks gespeichert. Dabei wird das Gas unter 50 bis 70 bar Druck gesetzt. Hochdruckspeicher, wie sie beispielsweise in Autos eingesetzt werden, enthalten dagegen Wasserstoff bei 350 oder sogar 700 bar.

Entsprechend unterschiedlich sind die Einsatzgebiete der Brennstoffzelle und damit des Energieträgers Wasserstoff: Sie reichen vom Akkueratz in elektronischen Kleingeräten wie Handys und Laptops über die Strom- und Wärmeversorgung von Haushalten und Industrieanlagen bis hin zum Antriebssystem im Verkehr. Gerade dem Straßenverkehr wird in Zukunft eine zentrale Rolle beim Umstieg auf den Energieträger Wasserstoff zukommen.

## Wasserstoff im Verkehr: Neuer Treibstoff für die Mobilität

Damit Wasserstoff sich als Kraftstoff im Verkehr durchsetzen kann, muss er genauso sicher, zuverlässig und bequem zu handhaben sein wie die heutigen Kraftstoffe. Zudem müssen die nötigen Investitionen für Mineralölindustrie, Tankstellenbesitzer und Autofahrer finanzierbar sein. Nach jahrzehntelangem Zweifeln und Zögern wird nun deutlich, dass diese Ansprüche in absehbarer Zeit erfüllbar sind – und dass es Zeit für den Umstieg ist. Fortschritte bei der Technik für Tankstellen und Autos belegen diesen Trend beispielhaft.

Der Aufbau eines flächendeckenden Tankstellennetzes ist die Voraussetzung für einen kommerziellen Erfolg von Wasserstoff-Fahrzeugen. Hier muss die neue Technik mit den vorhandenen Strukturen kompatibel sein – das heißt, sie muss in die Tankstellen eingebettet werden können. Die LH<sub>2</sub>-Zapfanlage, die Linde in 2002 in Berlin installiert hat, erfüllt diesen Anspruch: Die Technik ist weitgehend äquivalent zur Benzinzapfsäule. Auch der Tankvorgang, der noch vor einigen Jahren fast eine Stunde gedauert hat, erfolgt jetzt in weniger als drei Minuten. Selbst der Preis – bei jeder neuen Technologie zunächst ein Investitionshemmnis – wird auf Dauer vergleichbar sein mit herkömmlichen Zapfanlagen, beispielweise für Erdgas.

Weil in den Fahrzeugen entsprechend den verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten vermutlich zwei Speichervarianten zum Einsatz kommen werden – Flüssigspeicher und Druckgasspeicher – müssen die Tankstellen sowohl LH<sub>2</sub> als auch CGH<sub>2</sub> anbieten. Um nicht auch zwei Lieferformen für Wasserstoff vorsehen zu müssen, schlägt Linde vor, den Wasserstoff flüssig zu den Tankstellen zu bringen, wo er dann wie Benzin in Tanks unter der Erde gespeichert werden kann. Aus dem LH<sub>2</sub>-Tank kann der Kraftstoff sowohl flüssig als auch gasförmig verteilt werden. Dieses Vorgehen hat sich bereits bewährt. Um aus dem flüssigen Wasserstoff beispielsweise gasförmigen bei 700 bar zu erhalten, werden so genannte „kryogene Druckerhöhungspumpen“ eingesetzt. Diese Pumpen drücken den tiefkalten, flüssigen Wasserstoff mit 700 bar in einen einfachen Wärmetauscher, wo er sich bis auf Umgebungstemperatur erwärmt. Weil Flüssigkeiten wesentlich leichter zu pumpen sind als Gase, sind kryogene Druckerhöhungspumpen deutlich kleiner, leiser, wartungsärmer und um bis zu 40 Prozent billiger als Kompressoren.

Diese sind vor allem dann notwendig, wenn der Wasserstoff vor Ort erzeugt und unter Druck gesetzt wird. Aber auch wenn gasförmiger Wasserstoff aus einem Vorrattank in den Fahrzeugtank gepumpt werden muss, kommen Kompressoren zum Einsatz – ein klarer Nachteil von Druckgastanks an Tankstellen. Auch ist es schwierig und meist nicht wirtschaftlich, aus CGH<sub>2</sub> an der Tankstelle LH<sub>2</sub> zu gewinnen. Zudem benötigen Druckspeicher für Wasserstoff wesentlich mehr Platz als LH<sub>2</sub>-Tanks.

Gerade weil die Technik zur Verteilung von Flüssigwasserstoff der von Benzin ähnelt, werden auch die anderen alltäglichen Anforderungen an eine Tankstelle erfüllt: So können die Zapfanlagen 24 Stunden am Tag, sieben Tage pro Woche in Betrieb sein – selbst während der Anlieferung von Wasserstoff. Auch die üblichen Verbrauchsspitzen am Morgen und am späten Nachmittag werden problemlos abgedeckt, ohne während der verkaufsschwachen Zeiten teure Überkapazitäten zu haben.

## Effizient speichern im Auto

Für die Speicherung im Auto haben sich in den vergangenen Jahren zwei Systeme herausgebildet. Dabei kann der Wasserstoff ebenfalls tiefkalt flüssig oder gasförmig unter Druck gespeichert werden.

Flüssigspeicher erlauben größere Reichweiten, erfordern aber eine aufwändigere Technik. Zudem muss nach einem längeren Zeitraum ohne Verbrauch mit geringen Gasverlusten gerechnet werden. Druckspeicher halten das Gas dagegen theoretisch unbegrenzt zurück, sind aber schwerer und können bei gleichem Platzbedarf deutlich weniger Wasserstoff speichern, was die Reichweite des Fahrzeugs deutlich begrenzt.

Beide Technologien hat Linde in jüngster Zeit erheblich weiter entwickelt. So konnten unsere Ingenieure die Standzeit der Flüssigspeicher – das ist der Zeitraum, in dem ein Tank stehen kann, ohne dass Wasserstoff entnommen werden muss – deutlich erhöhen. Heute kann ein Wasserstoff-Fahrzeug mit Flüssigspeicher zwei Wochen lang unbenutzt parken, ohne dass Verluste auftreten – und selbst nach kurzen Fahrzeiten beginnt diese Frist von neuem. Die Speicher haben zudem in diversen Crashtests absolute Sicherheit bewiesen. Gleiches gilt für die Druckgas-Speicher. Mit der neuen 700 bar-Technologie können die Hersteller die Reichweite ihrer Fahrzeuge fast verdoppeln gegenüber den bislang üblichen 350 bar-Speichern. Im September 2002 hat Linde die weltweit erste 700 bar-Tankstelle auf dem Gelände der Adam Opel AG in Dudenhofen bei Offenbach installiert und in Betrieb genommen. Trotz des höheren Drucks sind die heutigen Speicher deutlich leichter als ihre Vorgänger: Moderne Compound-Flaschen aus Kohle- und Glasfasern, die innen einen dünnen Metallüberzug tragen, wiegen nur halb so viel wie herkömmliche Stahl-tanks. Das reduzierte Gewicht schlägt sich direkt in einem niedrigeren Wasserstoff-Verbrauch der Autos nieder.

## Fazit: Die Technik ist die treibende Kraft

Die Technik für den Schritt in die Wasserstoff-Zukunft steht also bereit und ist zur treibenden Kraft und wichtigsten Argument für den Durchbruch von Wasserstoff als Energieträger geworden. Die wirtschaftlichen und technischen Bedenken, die noch vor zehn Jahren dem Umstieg kategorisch im Wege standen, sind heute einer vorsichtig optimistischen Einschätzung gewichen. Überall in der Welt – mit einer besonderen Dynamik in Japan und den USA – wächst die Wasserstoff-Technik aus dem Nischenmarkt heraus. Diese Chance werden wir nutzen.

## Abstract

Wasserstoff wird die fossilen Brennstoffe als Energieträger in Zukunft ersetzen. Bereits heute stellen Produktionsanlagen Wasserstoff in großtechnischem Maßstab her. Auch für die Speicherung sowohl von gasförmigem als auch von flüssigem Wasserstoff existieren bereits alltags-taugliche technische Lösungen. Die bewährten Transportwege bleiben auch für die Wasserstoff-Technologie erhalten. Betrachtet man den gesamten Energieaufwand für Speicherung und Transport des Gases, so stellt Flüssigwasserstoff fast immer die beste Lösung dar. Die Technik für den Schritt in die Wasserstoff-Zukunft steht bereit und ist zur treibenden Kraft und zum wichtigsten Argument für den Durchbruch von Wasserstoff als Energieträger geworden.

## Der Autor



### Dr. Joachim Wolf

Dr. Joachim Wolf leitet seit Mai 2003 als Executive Director den neu geschaffenen Arbeitsbereich „Hydrogen Solutions“.

Seit 1987 arbeitet er für die Linde AG. Zu Beginn bei Linde Engineering, wo er als Projektleiter für das weltraumtaugliche Heliumsystem des Satelliten ISO (Infrared Space Observatory) der Europäischen Raumfahrtagentur arbeitete. 1990 wurde er Leiter der Weltraumtechnik bei Linde Engineering, im Jahr 2000 Leiter „Alternative Kraftstoffe und Helium Systeme“ bei Linde Gas. Er ist außerdem stellvertretender Vorsitzender des Deutschen Wasserstoff-Verbands.

Die Brennstoffzelle wird das Auto grundlegend verändern

## Höchst effizienter Antrieb

**DaimlerChrysler arbeitet seit Anfang der 90er Jahre intensiv an der Entwicklung der Brennstoffzellentechnik. Das Unternehmen ist überzeugt: Mit der Brennstoffzelle als Antrieb werden die Autos der Zukunft wesentlich sparsamer und umweltfreundlicher als heutige Fahrzeuge sein. Auf dem Weg in den Markt ist die Technik bereits ein großes Stück vorangekommen. Bis Ende 2004 werden 60 Wasserstoff-PKWs von DaimlerChrysler in der Welt unterwegs sein.**

Mit der Entwicklung von Wasserstoff-Fahrzeugen hat DaimlerChrysler weit reichende Erfahrungen. Schon 1975 wurde auf der IAA das erste Mercedes-Versuchsfahrzeug mit Wasserstoff-Antrieb vorgestellt: Ein Kleinbus des Typs L 306 mit Metallhydridspeicher und Wasserstoff-Motor als Antrieb. Es folgten mehrere Demonstrations- und Versuchsfahrzeuge, bevor die Weiterentwicklung des Wasserstoff-Motors Ende der 80er Jahre zugunsten der Brennstoffzelle eingestellt wurde – eine Reaktion auf die Erkenntnis, dass mit dem Verbrennungsmotor kein vergleichbarer Wirkungsgrad und keine völlige Emissionsfreiheit zu erreichen sind. Mit NECAR 1 („New Electric Car“) kam dann 1994 das erste Brennstoffzellenfahrzeug aus dem Haus DaimlerChrysler auf die Straße. Der Mercedes-Benz-Transporter war bis unter das Dach mit Speichern und Technik ausgefüllt. Schon sein Nachfolger NECAR 2 bot bis zu sechs Personen Platz, die beiden großen Wasserstofftanks mussten allerdings noch auf dem Dach angebracht werden. Bei den „F-Cell“ Wasserstoff-Fahrzeugen auf Basis der neuen A-Klasse, die inzwischen die NECAR-Konzeptfahrzeuge abgelöst haben, findet das ganze Antriebssystem im Motorraum und Unterboden Platz.

Doch nicht nur bei Größe der Antriebssysteme hat sich in den letzten zehn Jahren einiges getan. Auch Leistung, Höchstgeschwindigkeit und Reichweite der Autos sind deutlich gestiegen: Der mit Methanol betriebene NECAR 5 hat Geschwindigkeiten von über 150 km/h und eine Reichweite von 450 km erreicht. Das Auto war im vergangenen Jahr 5.250 km quer durch Amerika unterwegs und stellte dabei einen Langstrecken-Weltrekord für Brennstoffzellenfahrzeuge auf. Der Treibstoff Methanol wird durch einen Reformer im Fahrzeug in Wasserstoff und CO<sub>2</sub> umgewandelt. Neben Methanol hat DaimlerChrysler auch gasförmigen, flüssigen und chemisch gebundenen Wasserstoff als Treibstoff getestet. Die Ergebnisse sprechen insgesamt für Wasserstoff-Druckgas-tanks, die DaimlerChrysler sowohl in der „Citaro“-Busflotte als auch in den F-Cell-Fahrzeugen einsetzt.

Neben der Entwicklung von Wasserstoff-PKWs sind Wasserstoff-Busse eine wichtige Zukunftsperspektive für DaimlerChrysler. Im öffentlichen Nahverkehr sind große Reichweiten und eine flächendeckende Infrastruktur nicht entscheidend: Schließlich fahren die Busse ohnehin täglich ins Depot zurück und können dort betankt werden. In Bussen können die Wasserstoff-Tanks auch problemlos auf dem Dach untergebracht werden. Zugleich werden die Vorteile des Brennstoffzellenantriebs – zum Beispiel der geräuscharme, komfortable und saubere Betrieb – hier umso deutlicher wahrgenommen. Busse haben daher eine Pionierstellung für den Einsatz von Wasserstoff als Energieträger. Nach NEBUS („New Electric Bus“), der 1997 zum ersten Mal auf die Straße rollte, beweist gerade der neue Mercedes-Benz Citaro als Wasserstoff-Bus seine Alltagsauglichkeit. Im Rahmen des Projektes CUTE (Clean Urban Transportation for Europe) werden 30 dieser Busse in zehn europäischen Großstädten von Reykjavik bis Madrid im innerstädtischen Linienverkehr eingesetzt.

### Neue Konzepte für das Auto von morgen

Die Brennstoffzelle ist also auf dem Weg in den Markt ein gutes Stück vorangekommen. Schien noch 1988 der Massenbetrieb von Wasserstoff-Fahrzeugen technisch enorm schwierig und wirtschaftlich kaum machbar, bietet heute der Brennstoffzellenantrieb beste Zukunftsaussichten. Mit seiner Größe und Leistung erfüllt er heute die wesentlichen Anforderungen des Automobilbaus.

Bei der Gestaltung von Brennstoffzellenfahrzeugen ergeben sich jedoch wesentliche Veränderungen gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Der Aufbau heutiger Fahrzeuge ist im Wesentlichen durch Motor und Getriebe einerseits sowie den Kraftstofftank andererseits bestimmt. Der Elektromotor von Brennstoffzellen-Fahrzeugen ist sehr viel kleiner als ein Verbrennungsmotor – der Motorraum muss daher nicht mehr in seiner bisherigen Form beibehalten werden. Allerdings müssen in diesen Fahrzeugen neben Elektromotor, Getriebe und Wasserstoffspeicher auch noch die Brennstoffzellen und die begleitende Technik untergebracht werden. Das kann zum Beispiel im bisherigen Motorraum oder unter dem Fahrzeugboden geschehen.

Auch das Fahrverhalten der Autos wird sich ändern. Der Antrieb reagiert insbesondere im unteren Drehzahlbereich unmittelbar und kraftvoll. Die Leistung des

Insgesamt 60 Exemplare der Mercedes-Benz A-Klasse „F-Cell“ von DaimlerChrysler werden ab 2003 unter anderem in Berlin, Kalifornien, Japan und Singapur unterwegs sein. Die Brennstoffzellen-Fahrzeuge werden mit komprimierten Wasserstoff (350 bar) angetrieben.



Foto: DaimlerChrysler AG

Antriebs ist modular und kann bei Bedarf durch Größe und Anzahl der Brennstoffzellen angepasst werden. Wenn man entsprechende Batterien einsetzt, kann der Elektromotor wie in den aktuellen Hybrid-Fahrzeugen beim Bremsen oder Verzögern Energie zurückgewinnen. Die elektrische Leistung der Brennstoffzelle kann auch externe Elektrogeräte antreiben. Dank weniger bewegter Teile müssen die Fahrzeuge künftig seltener gewartet werden. Das alles geschieht sehr leise bei einem bislang unerreichten Wirkungsgrad und ohne Emissionen. Die einzige Emission ist Wasserdampf.

## Zwanzig Mal mehr Leistung seit 1994

Das Fahrzeug der Zukunft wird von Brennstoffzellen angetrieben, davon ist DaimlerChrysler überzeugt. Allerdings sind die Ansprüche an diese Schlüsseltechnologie der Wasserstoff-Welt im Auto hoch – schließlich tritt sie in Konkurrenz zum hoch entwickelten Verbrennungsmotor. Die bisherige Entwicklung hat gezeigt, dass diese Konkurrenz durchaus fruchtbar sein kann: In den vergangenen Jahren hat die Brennstoffzellentechnologie in Fahrzeugen von DaimlerChrysler gewaltige Fortschritte gemacht. Eine wichtige Orientierungsgröße ist dabei der Wirkungsgrad. Zieht man zum Vergleich den Neuen Europäischen Fahrzyklus NEFZ heran, dann erreichte NECAR 1 im Jahr 1994 einen Wirkungsgrad von 24 Prozent. Die F-Cell-Fahrzeuge liegen heute bei 37 Prozent. In nur zehn Jahren hat sich die Effizienz des Brennstoffzellen-Antriebs also um 50 Prozent erhöht – und das Ende der Möglichkeiten ist noch lange nicht erreicht.

Noch deutlicher sind die Erfolge bei einem anderen wichtigen Vergleichswert der Brennstoffzellentechnologie: der Leistungsdichte, also der Leistung der Brennstoffzelle im Verhältnis zu ihrem Gewicht. Die Brennstoffzelle im NECAR 1 brachte 48 Watt pro Kilogramm. Zwei Jahre später brachte NECAR 2 den dreieinhalbfachen Wert: 167 Watt. Die F-Cell-Fahrzeuge haben heute eine Leistungsdichte von 1.000 Watt pro Kilogramm – 20 Mal mehr als NECAR 1. Zukünftig sind Leistungsdichten von bis zu 1.500 Watt pro Kilogramm zu erwarten. Für einen Vergleich mit der Leistungsdichte eines Verbrennungsmotors muss man allerdings alle Komponenten des Brennstoffzellenantriebs berücksichtigen, also auch Kompressor, Lüfter, Wasserpumpe, Elektromotor usw. In diesem Fall liegt die Leistungsdichte eines Brennstoffzellenantriebs heute noch deutlich unter den Möglichkeiten eines Verbrennungsmotors: Ein moderner aufgeladener 4-Zylinder-Dieselmotor von Mercedes-Benz, wie er zum Beispiel in der Mercedes A-Klasse eingebaut ist, bringt inklusive Getriebe 450 Watt pro Kilogramm Gewicht, während die Leistungsdichte des kompletten Brennstoffzellenantriebs in der A-Klasse heute bei 180 Watt pro Kilogramm liegt. Wir gehen davon aus, dass dieser Unterschied bis 2010 durch eine erhöhte Leistungsdichte der Brennstoffzelle und durch optimierte Nebenaggregate weiter verringert werden kann.

Insgesamt ist die Brennstoffzelle als Kernkomponente der Wasserstoff-Fahrzeuge schon sehr weit entwickelt. Weitere Fortschritte erwarten wir im Betriebsverhalten. Außerdem können viele Nebenaggregate noch kleiner, leichter und leistungsfähiger werden. Hier liegt noch erhebliches Potenzial.

## In rund zehn Jahren so ausgereift wie der Verbrennungsmotor

Der Motor hat 100 Jahre Entwicklung hinter sich – das ist ein Vorsprung, den die Brennstoffzelle nicht von einem Tag auf den nächsten aufholen kann. Bei DaimlerChrysler rechnet man damit, dass das Antriebssystem Brennstoffzelle zwischen 2010 und 2015 ähnlich hoch entwickelt sein wird wie der Wasserstoff-Motor. Noch ist die Technik nicht völlig ausgereift: Die größten Herausforderungen erweisen sich erst im Alltagsbetrieb.

Die Kühlung gehört dabei sicherlich zu den anspruchsvollsten Aufgaben. Derzeit haben die Brennstoffzellen von DaimlerChrysler eine Betriebstemperatur von ca. 80°C. Um die leistungsstarken Brennstoffzellen ausreichend zu kühlen, müssen großflächige Kühler und verstärkte Lüfter eingesetzt werden. Dennoch reicht heute die Kühlleistung noch nicht für alle Fahrsituationen. Ein Ansatz für die Zukunft ist daher, die Betriebstemperatur der Brennstoffzelle zu erhöhen: Hier wird derzeit an Hochtemperatur-Membranen für Betriebstemperaturen zwischen 110°C und 120°C gearbeitet.

Beim Start müssen Brennstoffzellen rasch auf ihre Betriebstemperatur gebracht werden. Die F-Cell Fahrzeuge benötigen heute eine Vorwärmphase von etwa 40 Sekunden, um von 0°C auf Betriebstemperatur zu kommen – ein Problem, das noch vor einigen Jahren auch Dieselfahrzeuge hatten. Ähnlich wie dort wird sich die Startzeit künftig auch bei Brennstoffzellenfahrzeugen noch weiter reduzieren lassen.

Ein weiteres Problem stellen Minusgrade dar. Wenn das Wasser in den Brennstoffzellen gefriert, dehnt es sich aus – und kann dabei die Zellen beschädigen. Zurzeit wird das Brennstoffzellensystem nach dem Betrieb mit Luft gespült und so entfeuchtet.

## Druckwasserstoff ist die beste Lösung

Die größte Hürde für den Energieträger Wasserstoff im Straßenverkehr ist jedoch nicht technischer Natur: Ob Wasserstoff-Motor oder Brennstoffzelle, beide können sich nur dann durchsetzen, wenn es eine ausreichende Wasserstoff-Infrastruktur gibt und der Wasserstoff als Kraftstoff konkurrenzfähig ist. Zwar ist es nicht die Aufgabe der Automobilhersteller, Tankstellen zu bauen. Aber sie müssen sich klar für den neuen Energieträger und möglicherweise auch für eine bestimmte Speichertechnik entscheiden, damit die Mineralölindustrie Planungssicherheit hat. Aus Sicht von DaimlerChrysler sollte die Wahl dabei auf gasförmigen Wasserstoff fallen. Mehrere Aspekte gilt es bei dieser Entscheidung zu berücksichtigen:

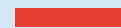
- Die erforderliche Reichweite der Autos,
- den nötigen technischen Aufwand,
- die Kosten und
- die Umweltbilanz.

Die größte Reichweite erreicht man zurzeit mit Methanol als Treibstoff, gefolgt von Flüssigwasserstoff. Allerdings macht Methanol teure und raumgreifende Reformer nötig, um an Bord den Wasserstoff zu gewinnen. Außerdem entsteht weiterhin CO<sub>2</sub>, und ein Umstieg auf regenerativ erzeugten Wasserstoff ist erheblich erschwert. Die flüssige Speicherung von Wasserstoff ist wiederum technisch schwierig und energetisch aufwändig. Im Hinblick auf die Energie- und Umweltbilanz, die Kosten und die Handhabung der Technik ist daher Druckwasserstoff im Auto die beste Lösung. Die neue 700 bar-Technologie wird zudem Reichweiten erlauben, die mit denen heutiger Benzinfahrzeuge vergleichbar sind.

### Brennstoffzelle: Vor- und Nachteile



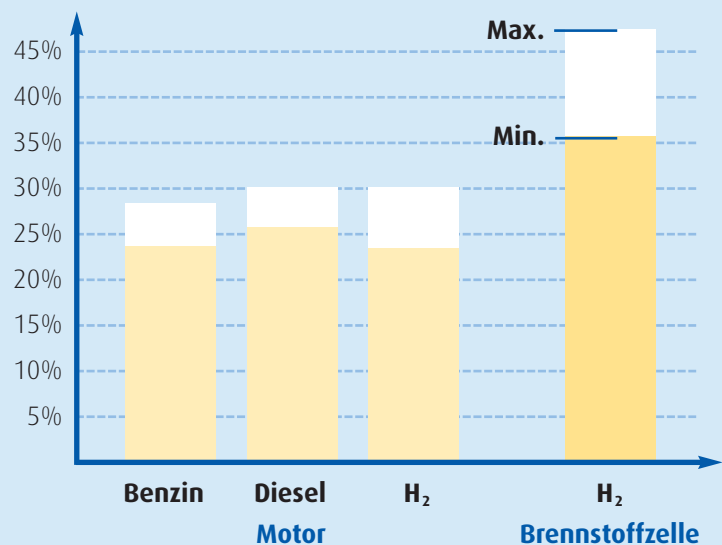
- + Hoher Wirkungsgrad
- + Null Emissionen
- + Mehrere Treibstoffe möglich
- + Geräuscharm
- + Wartungsarm
- + Modulare Leistung



- Früher Entwicklungsstand
- Hohe Investitionen
- Neue Infrastruktur nötig
- Noch hohes Gewicht
- Noch großes Volumen
- Alltagstauglichkeit steht noch aus

Die Entwicklung der Brennstoffzelle ist weit fortgeschritten, den Vorteilen stehen aber auch noch Nachteile gegenüber.

### Gesamtwirkungsgrade des Brennstoffzellen- und Motorantriebs



Brennstoffzellen-Fahrzeuge bringen über 50% mehr Leistung aus dem Kraftstoff auf die Straße als ein Motorantrieb.



Verbrennungsmotor erleichtert Übergang vom Benzin zum Wasserstoff

## Bewährtes mit Zukunftspotenzial

**Der Verbrennungsmotor ist eines der am höchsten entwickelten Massenprodukte. Über 100 Jahre Entwicklungsarbeit stecken in heutigen Motoren. Diese Erfahrung zahlt sich auch beim Übergang von Benzin und Diesel zu Wasserstoff als Kraftstoff aus. Im Vergleich zur Brennstoffzelle überzeugt der Wasserstoff-Motor durch sein einfaches und gewohntes Handling, durch geringeres Gewicht, niedrigeren Preis und höhere Leistung. Gesamtwirkungsgrade von 50 Prozent sind in absehbarer Zeit erreichbar. Für den Weg in die Wasserstoff-Welt bietet der Motor zudem die Möglichkeit, je nach Verfügbarkeit mit Wasserstoff oder Benzin zu fahren.**

Mobilität ist ein grundlegendes Bedürfnis unserer Gesellschaft. Dieses Bedürfnis treibt seit über 100 Jahren die Entwicklung von Automotoren voran: Moderne Benzin- und Dieselmotoren gehören zu den am höchsten entwickelten Massenprodukten der Welt. Beispielsweise verbraucht der aktuelle BMW 316i aus dem Modelljahr 2003 über 20 Prozent weniger Treibstoff als der BMW 316 aus dem Jahr 1983 – und das bei 30 Prozent mehr Leistungspotenzial und Gewicht. Gleichzeitig hat sich der Ausstoß an limitierten Abgasemissionen wie Kohlenmonoxid, Stickstoffoxiden und Kohlenwasserstoffen dank leistungsfähiger Katalysatoren und hoch entwickelter Motorsteuerung in diesem Zeitraum um rund 95 Prozent verringert. Die nächste Generation an noch leistungsfähigeren und noch saubereren Motoren steht schon bereit. Und man traut dem Motor noch Potenzial für weitere 100 Jahre Hochtechnologie zu.

Die nächste Entwicklungsstufe heißt Wasserstoff-Verbrennungsmotor. Nachdem Stickstoffoxide, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe in den Autoabgasen weitgehend reduziert sind, richtet sich das Hauptaugenmerk auf das klimawirksame Kohlendioxid. Das Gas entsteht unweigerlich bei der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Kraftstoffen wie Benzin oder Diesel. Die Vorteile dieser Kraftstoffe, etwa ihre einfache Handhabung und ihre hohe Energiedichte, treten daher zunehmend gegenüber ihren Nachteilen für Klima und Umwelt in den Hintergrund. Hinzu kommt, dass der Vorrat an fossilen Brennstoffen endlich ist. Wasserstoff dagegen verbrennt CO<sub>2</sub>-frei, ist ungiftig, hat keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt und kann langfristig aus regenerativen Energien wie Sonne, Wind, Wasser und Biomasse hergestellt werden. BMW ist überzeugt: Wasserstoff ist der Kraftstoff der Zukunft.

Seit über 20 Jahren forscht die BMW Group daher am Wasserstoff-Motor. Schon 1979 entstand in Zusammenarbeit mit der Deutschen Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt der erste Wasserstoff-PKW. Inzwischen rollt die fünfte Generation von BMW-Fahrzeugen mit Wasserstoff-Motor über die Straßen: 15 Limousinen des Typs BMW 750 hL sind gerade zwei Jahre lang auf CleanEnergy World Tour gewesen und haben in Städten wie Dubai, Brüssel, Mailand, Tokio, Los Angeles und Berlin mit großartiger Resonanz für den Energieträger Wasserstoff geworben. Über 100.000 Meilen haben die Autos dabei im Wasserstoffbetrieb zurückgelegt. Mit der sechsten Generation von Wasserstoff-Fahrzeugen werden wir uns noch im Lebenszyklus der aktuellen BMW 7er-Reihe erstmals direkt an unsere Kunden wenden.

### Wasserstoff-Autos müssen alltagstauglich sein

Dieser Schritt in den Markt ist für BMW die logische Konsequenz aus 20 Jahren pragmatischer Entwicklungsarbeit. Der Wasserstoffantrieb ist für das Unternehmen keine ferne Vision, sondern eine aktuelle Herausforderung. Ein Wasserstoff-Fahrzeug soll sich im täglichen Gebrauch nicht wesentlich von heutigen Fahrzeugen unterscheiden. Es muss den gleichen Ansprüchen genügen, denen auch die anderen Produkte aus dem Hause BMW unterworfen sind: Dazu gehört ein hohes Niveau an Sicherheit ebenso wie an Leistung, Komfort und Design – und dazu gehören auch Alltagstauglichkeit und Wirtschaftlichkeit. Der Wasserstoff-Motor ist das einzige Antriebskonzept, das diese Ansprüche in absehbarer Zeit erfüllen kann.

Grundsätzlich ermöglichen Wasserstoff-Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren einen bivalenten Antrieb. Das bedeutet, dass die Autos sowohl mit Wasserstoff als auch mit Benzin fahren können – eine notwendige Voraussetzung für den Alltagsbetrieb, solange es kein flächendeckendes Tankstellennetz gibt. Die BMW 750 hL haben zwei Tanks: Einen 140 Liter fassenden Flüssigwasserstoff-Tank für eine Reichweite von etwa 300 Kilometern und einen herkömmlichen Benzintank, der diese Reichweite auf über 900 Kilometer vergrößert. Flüssigwasserstoffspeicher haben den Vorteil, dass sie deutlich mehr Energie auf gleichem Raum speichern können als Druckgaspeicher. Sie erlauben daher akzeptable Reichweiten, ohne das Raumangebot im Auto zu sehr zu beschränken.

Der BMW 745 h gehört zur sechsten Generation von Wasserstoff-Fahrzeugen aus dem Hause BMW.



Die beiden Treibstoffe Benzin und Wasserstoff werden im selben Motor verbrannt. Im BMW 750 hL handelt es sich dabei um leistungsstarke Zwölf-Zylinder-Motoren mit 5,4 Liter Hubraum, die je nach Treibstoffart unterschiedlich gesteuert werden. Der Wasserstoff dient gleichzeitig zur Stromversorgung: In Zukunft können Brennstoffzellen als so genannte Auxiliary Power Unit (APU) die heutigen Bleibatterien ersetzen, da diese den stark angestiegenen Strombedarf moderner Fahrzeuge nicht mehr sinnvoll decken können. APUs dagegen versorgen das Fahrzeug unabhängig vom Motor jederzeit ausreichend mit Elektrizität und sind dabei wesentlich effizienter und vor allem leistungsfähiger als herkömmliche Batterien. BMW wird also die Vorteile der Brennstoffzelle ebenso nutzen wie jene des Motors. Bei der Entwicklung leistungsfähiger Brennstoffzellen hat BMW daher auch mit denjenigen Automobilherstellern gemeinsame Ziele, die das Antriebskonzept Brennstoffzelle verfolgen.

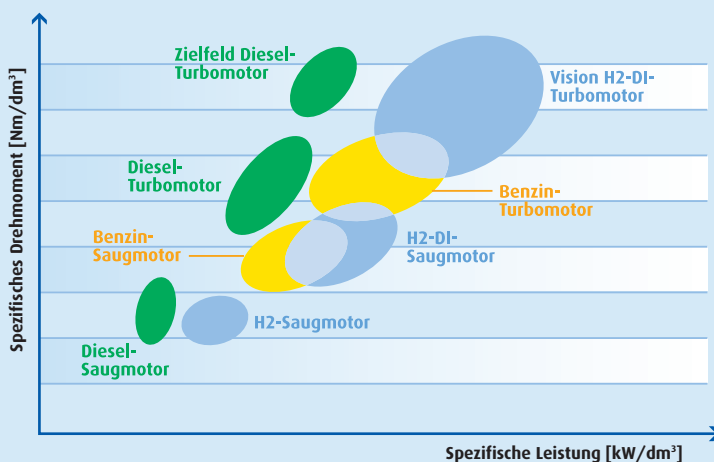
## Vorteile für den Motor gegenüber der Brennstoffzelle

Für den Antrieb setzt BMW allerdings auf den Wasserstoff-Verbrennungsmotor. Zwar setzt die Brennstoffzelle im Teillastbereich – also weit unterhalb der maximalen Leistung – den Wasserstoff mit einem höheren Wirkungsgrad in Antriebsenergie um als ein Motor. Jedoch ist nicht allein der Wirkungsgrad des Antriebs entscheidend, sondern der tatsächliche Energieverbrauch des Fahrzeugs. Heranziehen kann man dabei für einen Vergleich den Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ), der Landstraßen-, Autobahn- und Stadtfahrten-Anteile enthält. Um den Nutzen eines Antriebskonzeptes zu beurteilen, darf man zudem die Elemente Motor und Brennstoffzelle nicht isoliert betrachten, sondern muss das Zusammenspiel aller Komponenten des Antriebs berücksichtigen.

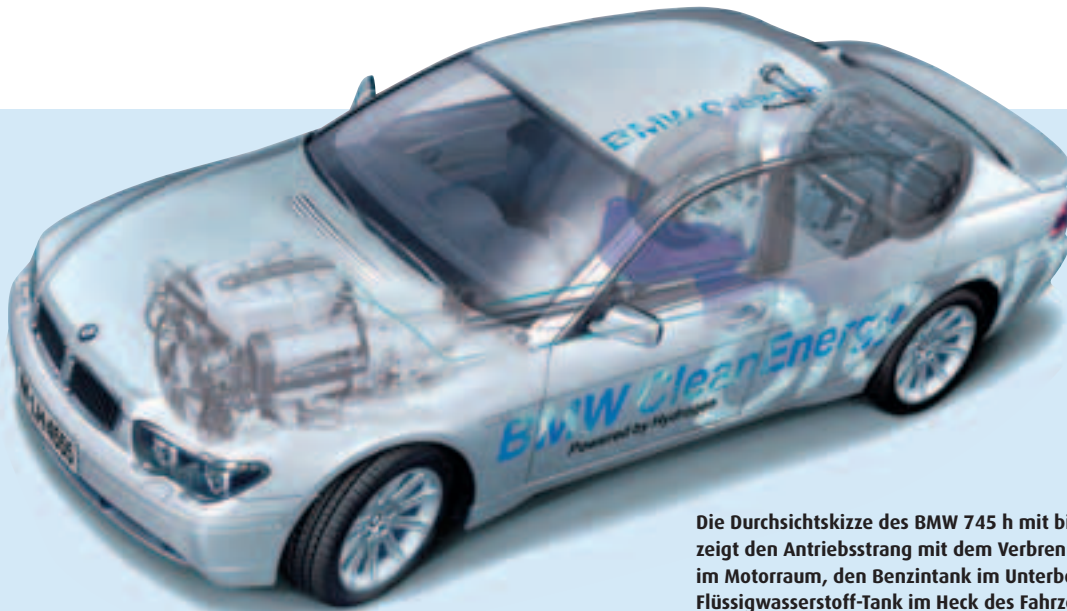
So bringt der Wasserstoff-Motor bei gleichem Gewicht wesentlich mehr Leistung als ein Antriebssystem bestehend aus Brennstoffzelle und Elektromotor. Das bedeutet, dass Brennstoffzellen-Fahrzeuge deutlich schwerer sein werden als heutige Automobile – eine Tatsache, die den Treibstoffverbrauch in die Höhe treibt. Wenn man dann noch die Energieverluste beim Elektromotor und anderen Komponenten des Antriebs berücksichtigt, wird der Wirkungsgradvorteil des Brennstoffzellenantriebs weiter geschmälert.

Dem gegenüber stehen die Konsequenzen eines Brennstoffzellen-Antriebssystems für die Konstruktion und den Alltagsbetrieb des Fahrzeugs. So ist nicht nur das Gewicht, sondern auch das Volumen von Brennstoffzellen bei gleicher Leistung größer als die eines Wasserstoff-Motors. Das geht zu Lasten des Platzangebots im Auto. Brennstoffzellen dürfen auch nicht einfrieren – wirklich alltagstaugliche Lösungen für einen durchschnittlichen deutschen Winter stehen noch aus. Und schließlich erfordert der Übergang zu Brennstoffzellen als Antrieb auch noch neue Fertigungsstätten und eine Umrüstung und Umschulung der Werkstätten. Produzenten, Händler, Werkstätten und auch die Autofahrer selbst besitzen dagegen mit Motoren genügend Erfahrungen, um sicher und routiniert damit umzugehen. Kunden

### Fortschritte im Motorenbau



Der Wasserstoff-Motor profitiert von der Weiterentwicklung herkömmlicher Motoren, weist aber ein höheres Leistungspotenzial auf. (Quelle: BMW)



Die Durchsichtsskizze des BMW 745 h mit bivalentem Antrieb zeigt den Antriebsstrang mit dem Verbrennungsmotor im Motorraum, den Benzintank im Unterboden und dem Flüssigwasserstoff-Tank im Heck des Fahrzeugs.

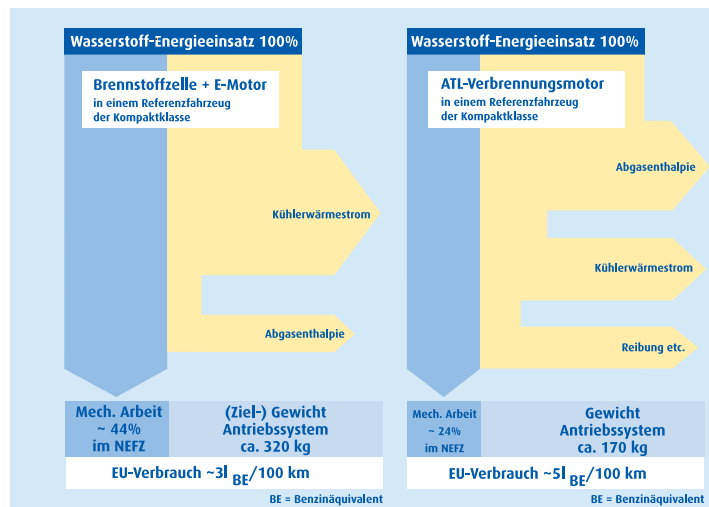
von Fahrzeugen mit Wasserstoff-Motor werden weiterhin die gewohnten Serviceleistungen in den üblichen Intervallen erhalten.

## Wasserstoff ist ein idealer Brennstoff

Die Potenziale des Wasserstoffs als Kraftstoff sind in den aktuellen Motoren noch lange nicht ausgereizt. Wasserstoff ist ein ideales Brenngas. Es kann in einem großen Konzentrationsbereich gezündet werden, weist eine hohe Brenngeschwindigkeit auf und ermöglicht somit eine hohe Flexibilität in der Verbrennungsführung. Langfristig erlaubt es der Wasserstoff, die jeweiligen Vorteile von Benzin- und Dieselmotoren zu kombinieren und den Motor zugleich viel flexibler und damit effektiver einzustellen.

Bei der Erschließung weiterer Potenziale kann BMW bereits heute auf den neuesten Entwicklungen des konventionellen Motorenbaus aufbauen. So kann beispielsweise ein variabler Ventilhub die Füllmenge der Zylinder und die Öffnungsdauer der Ventile steuern und damit die verlustreiche Arbeit der Drosselklappe ersetzen. Gerade bei niedriger Belastung kann man so den Kraftstoffverbrauch deutlich senken, ohne auf die Möglichkeiten eines leistungsstarken Motors verzichten zu müssen.

Auch der Ausstoß an Stickstoffoxiden kann durch solche Verbesserungen im Motorbau weiter drastisch gesenkt werden: Im unteren Lastbereich entstehen die Stickstoffoxide gar nicht erst in nennenswertem Umfang, im oberen Bereich werden sie vom Katalysator effektiv umgewandelt. Der Bereich, in dem die meisten Stickstoffoxide entstehen, wird durch eine entsprechende Motorsteuerung übersprungen. Die notwendige Technik stammt weitgehend aus der Entwicklung unserer konventionellen Motoren.



**Wasserstoffantriebe im Vergleich: Selbst bei optimistischer Kalkulation rechnen sich die Mehrkosten der Brennstoffzelle frühestens nach 15 bis 20 Jahren. (Quelle: BMW et al.)**

Das ist ein weiterer Vorteil des Wasserstoff-Motors: Er wird auch in Zukunft von der Weiterentwicklung herkömmlicher Benzin- und Dieselmotoren profitieren. Hier gibt es technologisch wie wirtschaftlich erhebliche Synergieeffekte. Mittels intensiver Forschungsarbeiten zum Wasserstoff-Verbrennungsmotor blickt BMW in die nächste Dekade des 21. Jahrhunderts und darüber hinaus. Wir wollen das Brennverfahren an die spezifischen Eigenschaften von Wasserstoff anpassen und den Motor weiterentwickeln. Zugleich optimieren wir die Nebenaggregate und das Gesamtenergiemanagement. Mit diesen Maßnahmen haben wir uns in der BMW Group das Ziel gesetzt, einen Gesamtwirkungsgrad von 50 Prozent für Antriebskonzepte mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren zu erreichen.

## Fazit

Technisch ist der Umstieg auf den Energieträger Wasserstoff heute möglich. Auch unternehmerische Argumente sprechen dafür, jetzt mit dem Wasserstoff-Motor als Antrieb in den Markt zu starten: Nach 20 Jahren Entwicklungsarbeit können wir das Antriebskonzept zügig umsetzen. Wir kennen die Technik und beherrschen die Fertigungsprozesse. Bei der Herstellung können wir uns auf die vorhandenen Produktionsstrukturen für herkömmliche Motoren stützen und damit die getätigten Investitionen optimal nutzen. Die Mehrkosten des Antriebs gegenüber heutigen Benzin- oder Dieselfahrzeugen sind daher akzeptabel und deutlich geringer als bei anderen Wasserstoff-Antriebskonzepten. Darüber hinaus wird der Motor in das allgemeine Netzwerk der Motorenentwicklung der BMW Group eingefasst und kann daher leicht und schnell in die Serie gehen. Insgesamt ist der Entstehungsprozess des Wasserstoff-Motors deshalb vergleichbar mit dem aktueller Neuentwicklungen der Benzin- oder Dieselmotortechnologie.

Am Ende wird die Wirtschaftlichkeit die tragende Säule für den Marktdurchbruch von Wasserstoff-Fahrzeugen sein. Auf der einen Seite gilt das für die Unternehmen, deren Investitionen in absehbarer Zeit wieder zurückfließen müssen. Auf der anderen Seite müssen die Verbraucher auch bereit sein, den notwendigen Aufpreis für die neue Technologie zu zahlen – und das wird nicht gelingen, wenn ihnen die neuen Fahrzeuge unsicher, unpraktisch, zu teuer oder einfach nur zu fremd erscheinen. Für die Ansprüche beider Seiten ist der Wasserstoff-Verbrennungsmotor die geeignete Technologie. Auch

steuerliche Anreize für umweltfreundliche Kraftstoffe und Technologien werden gerade in der Einführungsphase nötig sein.

Bei der Einführung des Wasserstoff-Motors verfolgt BMW eine „Top-Down“-Strategie. Die ersten kommerziellen Wasserstoff-Fahrzeuge von BMW im Premiumsegment müssen einen hohen Nutzen für den Kunden bringen und höchsten Ansprüchen genügen. Das sichert die Akzeptanz der neuen Technik und bringt ihr ein attraktives Image. Zudem sind Käufer der Fahrzeug-Oberklasse am ehesten bereit, Zusatzkosten für eine innovative Technologie zu tragen.

Der Erfolg der Technologie hängt allerdings nur zum Teil von den Fahrzeugen und ihrem Antrieb ab. Ein attraktives Fahrzeugangebot ist nur eine der Voraussetzungen für den Kauf. Noch wichtiger wird es sein, in den nächsten Jahren schrittweise eine ausreichend flächendeckende Wasserstoff-Infrastruktur aufzubauen. Unsere bivalenten Fahrzeuge mit Wasserstoff- und Benzinantrieb werden helfen, in der Übergangszeit Lücken zu überbrücken. Dennoch müssen Wirtschaft und Politik gemeinsam daran arbeiten, dass Wasserstoffautos nicht wie schon die Erdgasfahrzeuge an der fehlenden Infrastruktur scheitern. Wenn wir unsere heutige Mobilität erhalten wollen, ist langfristig der Umstieg auf den Energieträger Wasserstoff unumgänglich. Dieser Umstieg braucht Zeit – und um so wichtiger ist es daher, schon heute damit zu beginnen. Die Fortschritte in der Entwicklung unserer Wasserstoff-Motoren machen uns zuversichtlich, dass der Weg zum Markt nur noch kurz ist. Die BMW Group wird jedenfalls alle Anstrengungen unternehmen, um dem Wasserstoff als Energieträger und dem Wasserstoff-Motor als Antriebskonzept der Zukunft zum Durchbruch zu verhelfen. Wir sind überzeugt: Der Weg in die Wasserstoff-Zukunft ist unumkehrbar!

## Der Autor



### Dr. Klaus Scheuerer

Dr. Klaus Scheuerer ist seit 1986 Mitarbeiter der BMW AG. 1988 übernahm er die zentrale Projektkoordination und die

Assistenz der Geschäftsleitung bei der BMW Technik GmbH. Von 1989 bis 1995 arbeitete er dort als Referent für Computer Aided Engineering (CAE) und Fahrzeugauslegung. Von 1995 an war er als Abteilungsreferent „Konzernplanung Produkte“ der BMW AG tätig.

Seit 2002 ist er Beauftragter des Vorstands für Verkehr und Umwelt. Klaus Scheuerer ist Mitglied im Ausschuss Fahrzeugtechnik des Deutschen Verkehrssicherheitsrats.

## Abstract

Beim Übergang von Benzin und Diesel zu Wasserstoff als Kraftstoff zahlt sich die Erfahrung von über 100 Jahren Entwicklungsarbeit des Verbrennungsmotors aus. Bei der Erschließung weiterer Potenziale kann BMW bereits heute auf den neuesten Entwicklungen des konventionellen Motorenbaus aufbauen. Mittels intensiver Forschungsarbeiten zum Wasserstoff-Verbrennungsmotor blickt BMW in die nächste Dekade des 21. Jahrhunderts und darüber hinaus und will das Brennverfahren an die spezifischen Eigenschaften von Wasserstoff anpassen und den Motor weiterentwickeln. Die Zielsetzung der BMW Group ist es, einen Gesamtwirkungsgrad von 50 Prozent für Antriebskonzepte mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren zu erreichen.

Zahl der Wasserstoffprojekte wächst weltweit rasant

# Deutschland hat seinen Vorsprung verloren

**Mit der Eröffnung der ersten öffentlichen Wasserstoff-Tankstelle 1999 am Münchner Flughafen bewies Deutschland noch seine Vorreiterrolle in der Wasserstoff-Technologie. Mittlerweile gibt es weltweit mehr als ein Dutzend öffentlicher und insgesamt rund 70 Wasserstoff-Tankstellen. Und während seither in Deutschland eher Stagnation herrscht, sorgen die USA und vor allem Japan mit ausgiebigen Förderprogrammen für einen wahren Wasserstoff-Boom – und liefern dabei zugleich den Beweis für die Alltagstauglichkeit der Technik.**

Dank jahrzehntelanger Anstrengungen der Industrie gehörte Deutschland zu den Pionieren auf dem Gebiet der Wasserstoff-Technik im Verkehrsbereich. So fand zwischen 1984 und 1988 in Berlin der erste öffentliche Flottentest von Wasserstoff-Fahrzeugen (10 Stück) der Firma Mercedes-Benz zusammen mit Aral statt. 1999 wurde dann die weltweit erste öffentliche Wasserstoff-Tankstelle am Münchner Flughafen eröffnet – initiiert von der ARGEMUC, einer Arbeitsgemeinschaft von 15 verschiedenen Unternehmen. Seitdem gibt es dort Zapfanlagen für flüssigen und für gasförmigen Wasserstoff, wobei letzterer vor Ort durch Elektrolyse aus Wasser hergestellt und unter Druck gesetzt wird. Flüssiger Wasserstoff wird dagegen angeliefert und flüssig gespeichert. Drei MAN-



Die weltweit erste öffentliche Wasserstoff-Tankstelle wurde 1999 am Münchner Flughafen eröffnet. Initiator war die ARGEMUC, eine Arbeitsgemeinschaft von 15 verschiedenen Unternehmen. Drei MAN-Niederflurbusse und mehrere PKWs nutzen die Tankstelle.

Förderung der Wasserstoff-Technologie: Die USA und vor allem Japan unterstützen die Entwicklung von Wasserstoff-Technologie durch massive Förderprogramme. Die europäischen Ausgaben bleiben im internationalen Vergleich zurück. (Quelle: LBST)

	Förderung 2002 (in Mio. US \$)	Förderung 2003 (in Mio. US \$)	Förderung 2004 (in Mio. US \$)
<b>USA</b>	76	97	165
<b>Japan</b>	91	145	?
<b>EU</b>	32	> 60?	?

Niederflurbusse und diverse PKWs – vor allem Versuchsfahrzeuge von BMW – nutzen die Tankstelle. Alleine die Busse haben bis heute zusammen 300.000 Kilometer weitgehend problemlos zurückgelegt.

Mit Projekten in Berlin, Hamburg und Nordrhein-Westfalen soll dieser Erfolg nun fortgeschrieben werden. Ein Beispiel ist die Clean Energy Partnership (CEP) in Berlin: Die an der CEP beteiligten Partner – Aral, BMW, BVG, DaimlerChrysler, Ford, GHW, Linde und Opel – haben sich 2002 verpflichtet, eine Wasserstoff-Tankstelle mit einer auf etwa 30 Fahrzeuge anwachsenden Fahrzeug-Testflotte zu betreiben. Die CEP wäre damit das größte Wasserstoff-Verkehrsprojekt Europas. Geplant wird seit dem Jahr 2000 – doch fest steht heute lediglich, dass frühestens 2004 die ersten CEP-Fahrzeuge durch Berlin rollen werden. Die CEP ist damit nicht nur beispielhaft für die einstige Pionierstellung Deutschlands, sondern auch dafür, dass wenn auch nicht der technische, so doch zumindest der zeitliche Vorsprung, den das Land einmal hatte, inzwischen aufgezehrt ist.

## Massive Förderung in den USA

Die Rolle des Technologieführers haben die USA übernommen. Dort gehen die Pläne schon weit über einzelne Pilotprojekte hinaus: Einige Regionen sollen in den kommenden Jahren mit einer dünnen, aber flächendeckenden Wasserstoff-Infrastruktur ausgestattet werden. In Kalifornien ist dieses Vorhaben am weitesten fortgeschritten. Dort sollen im Ballungsraum Los Angeles und auf der Achse Sacramento – San Francisco schon in wenigen Jahren Wasserstoff-Fahrzeuge standortungebunden einsetzbar sein. Diese Achse soll sogar bis Denver, Colorado, ausgedehnt werden. Ähnliches ist in Kanada zwischen Windsor und Montreal geplant.

In der Californian Fuel Cell Partnership (CaFCP) haben sich bis heute etwa 30 Partner zusammengefunden, die mit zwei öffentlichen Wasserstoff-Tankstellen in Sacramento und Richmond sowie einigen kleineren, nicht-öffentlichen Tankstellen mehr als zwei Dutzend Brenn-

stoffzellenfahrzeuge auf Kaliforniens Straßen betreiben. Bis Ende 2003 soll diese Zahl auf bis zu 60 PKWs und Busse angewachsen sein. Spätestens 2005 wollen dann mehrere öffentliche Busbetreiber mindestens sieben Wasserstoff-Busse auf wichtigen Transitstrecken einsetzen.

Die CaFCP dient vor allem dazu, die Alltagstauglichkeit der Wasserstoff-Technologie zu testen, Gefahren- und Fehlerquellen aufzuzeigen, Standards zu entwickeln und Kooperationsmöglichkeiten auszuloten. Die Partner stehen unter Druck, vor allem die Automobilunternehmen: Ein kalifornisches Gesetz schreibt vor, dass bis 2010 mindestens drei Prozent aller Fahrzeuge auf den Straßen des Landes „Zero-Emission-Fahrzeuge“ sein müssen – und völlig emissionsfrei fahren nur Elektro- und Wasserstoff-Fahrzeuge. Auch deswegen will der weltgrößte Automobilhersteller General Motors bis 2010 mit der Serienfertigung von Wasserstoff-PKWs begonnen haben. 50.000 bis 100.000 solcher Autos sollen dann bereits verkauft sein. Bis spätestens 2020 will GM eine Million Brennstoffzellenfahrzeuge verkauft haben.

Um dieses Ziel zu erreichen, müssen natürlich auch die Autofahrer vom neuen Kraftstoff überzeugt sein. Ein bedeutender Nebeneffekt der Wasserstoff-Projekte ist daher die Werbung für den Energieträger Wasserstoff und die zugehörige Technologie: Nach einer Erhebung der CaFCP hatten beim Projektstart im Jahr 2000 nur 25 Prozent der Kalifornier von Brennstoffzellen gehört – heute sind es mehr als 80 Prozent. Wasserstoff-Projekte sind also auch eine wichtige Public-Relation-Maßnahme, damit die Technik möglichst schnell akzeptiert wird. Das gilt nicht nur für die Bevölkerung. Auch die Politik spielt für den Durchbruch von Wasserstoff als Energieträger eine große Rolle – und deshalb wird Washington sicher nicht mehr lange auf eine eigene Wasserstoff-Infrastruktur warten müssen. Denn dort sitzt mit Präsident George W. Bush der wohl wichtigste Förderer der Technologie. Im Frühjahr 2003 kündigte er an, 1,7 Milliarden US-Dollar in den nächsten fünf Jahren für seine „FreedomCAR and Fuel Initiative“ zur Verfügung stellen zu wollen. Noch wichtiger als der finanzielle Rahmen der Förderung ist jedoch das politische Signal: Die Regierung der USA sieht in Wasserstoff den Energieträger der Zukunft.

## USA:

- Californian Fuel Cell Partnership (CaFCP)
- FreedomCAR & Fuel Initiative
- Shell/GM Demonstration, Washington D.C.

## Europa:

- European Integrated Hydrogen Project (EIHP)
- Clean Urban Transportation for Europe (CUTE)
- Ecological City Transport System (ECTOS)
- CITYCELL



## Japan:

- Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project (JHFC)
- Millennium Project

## Deutschland:

- Arbeitsgemeinschaft Flughafen München (ARGEMUC)
- Clean Energy Partnership (CEP)

**Weltweit gibt es mittlerweile zahlreiche Wasserstoff-Projekte – hier ausgewählte Aktivitäten wichtiger Nationen.**

## Schon neun Tankstellen in Japan

Ähnliche Signale kommen aus Japan. Dort durften bis zum Jahr 2000 auf öffentlichen Straßen überhaupt keine wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge fahren. Dann wurde das entsprechende Gesetz geändert und die ersten Planungen für öffentliche Wasserstoff-Tankstellen im Großraum Tokio aufgenommen – zur gleichen Zeit als in Berlin die Vorbereitungen für die Clean Energy Partnership begannen. Heute sind die sechs geplanten Tankstellen eröffnet, der Großraum Tokio ist damit schon fast flächendeckend versorgt.

Im weltweiten Vergleich zeigt die Entwicklung der Wasserstoff-Technologie in Japan zurzeit die größte Dynamik. Mit dem WE-NET (World Energy Network) hatte Japan erst 1993 die Förderung der Wasserstoff-Technologie begonnen. Das Projekt wurde 2002 mit der Eröffnung dreier öffentlicher Wasserstoff-Tankstellen in Osaka, Takamatsu und Tokai abgeschlossen. Allein im Jahr 2003 fördert die japanische Regierung die Entwicklung von Brennstoffzellen für Fahrzeuge mit umgerechnet knapp 150 Millionen Dollar – das ist noch vor den USA die weltweit größte Summe. Als Standortvorteil kommt hinzu, dass die japanische Bevölkerung neuen Technologien generell sehr aufgeschlossen gegenübersteht – selbst wenn diese technisch noch nicht völlig ausgereift sind. Japan, das seinen gesamten, hohen Erdgasbedarf importieren muss, achtet auch traditionell stark auf Energieeffizienz.

Im Jahr 2004 werden vermutlich zwei weitere Wasserstoff-Tankstellen im Großraum Tokio eröffnet. Osaka, Nagoya und Sapporo folgen ab 2004 schrittweise. Der japanische Industriegase-Hersteller Iwatani will noch im gleichen Jahr beginnen, landesweit 170 Tankstellen von

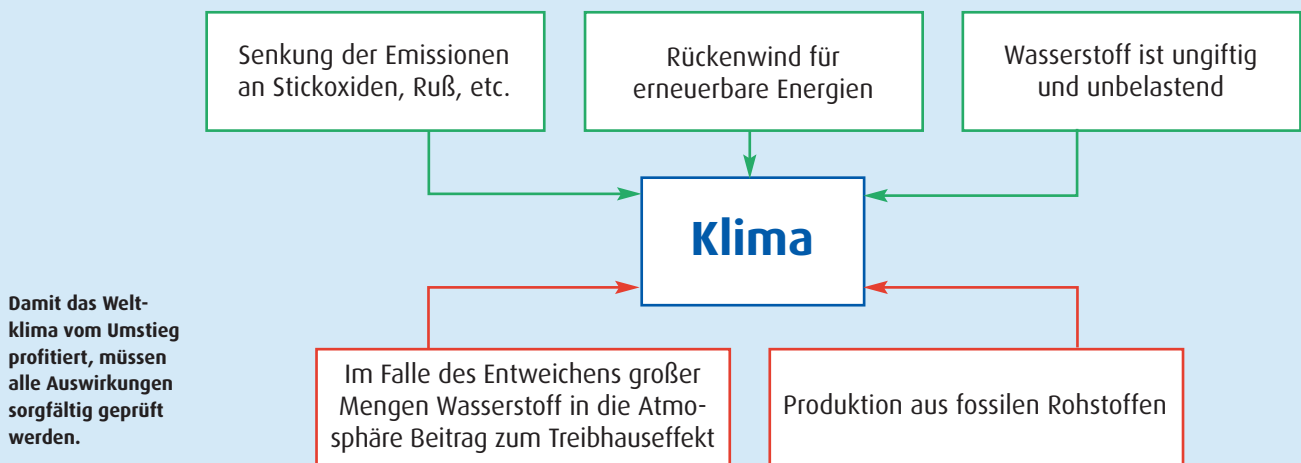
14 Fabriken aus mit Wasserstoff zu versorgen und dort Wasserstoff-Zapfsäulen einzurichten. Und die japanischen Automobilhersteller Toyota, Honda und Nissan treiben die Entwicklung von Wasserstoff-Fahrzeugen voran. Das japanische Wirtschaftsministerium erwartet, dass bis 2010 mindestens 50.000 Wasserstoff-Fahrzeuge auf Japans Straßen unterwegs sein werden, bis 2020 sollen bereits fünf Millionen dieser Fahrzeuge an etwa 4.000 Tankstellen betankt werden können.

## Fruchtbare Zusammenarbeit in Europa

In Europa sind es vor allem die vielen unterschiedlichen Gesetze und Regelwerke der einzelnen Staaten, die grenzüberschreitende Projekte schwierig machen. Doch darin steckt auch eine Chance: Europa ist das ideale Testfeld, um gemeinsame Standards zu entwickeln. Europäische Kooperationen können wichtige Erfahrungen liefern, um weltweite Sicherheitsstandards voranzubringen und die Alltagstauglichkeit der Wasserstoff-Technik zu demonstrieren. Ambitionierte europäische Kooperationen sind beispielsweise das European Integrated Hydrogen Project (EIHP), das sich der Harmonisierung der Regelwerke für den Einsatz von Wasserstoff im Straßenverkehr widmet, sowie die Projekte CUTE (Clean Urban Transportation for Europe), ECTOS (Ecological City Transport System) und CITYCELL.

CUTE, ECTOS und CITYCELL konzentrieren sich auf den öffentlichen Nahverkehr. In einer ersten Phase des Übergangs zu Wasserstoff als Treibstoff wird diesem Bereich

## Klimaeffekte durch Wasserstoff



sicherlich eine Schlüsselstellung zukommen. Die Projekte CUTE und ECTOS umfassen öffentliche Wasserstoff-Tankstellen in zehn europäischen Großstädten, in denen jeweils drei DaimlerChrysler-Citro-Busse betrieben werden. Eröffnet sind bereits die Anlagen in Madrid, Barcelona, Hamburg, Reykjavik, Luxemburg und Stuttgart. Amsterdam, Stockholm, Porto und London werden in den nächsten Monaten folgen. Die Tankstelle in Madrid wird zusätzlich von einem Brennstoffzellenbus der Firma Irisbus im Rahmen des CITYCELL-Projektes angefahren. Insgesamt werden also ab Mitte 2004 im Rahmen des CUTE-Projekts über zwei Dutzend Busse im alltäglichen Dauerbetrieb im Einsatz sein – und das unter unterschiedlichsten Bedingungen: Bei nordischer Winterkälte wie in spanischer Sommerhitze, im ebenen Hamburger Terrain ebenso wie auf den bergigen Stuttgarter Strecken.

Wenn sich der Energieträger Wasserstoff künftig im Verkehr durchsetzen soll, darf er nicht in eine Schönwetter-Technik eingebettet sein. Wasserstoff-Fahrzeuge müssen überall auf der Welt gleichermaßen zuverlässig und bequem zu betreiben sein wie heutige Benzin- oder Dieselfahrzeuge. CUTE wird dabei den Einfluss des Standorts und seiner Bedingungen auf die Tauglichkeit der Technik aufzeigen:

- Welches Klima ist problematisch?
- Welche Regelwerke fördern, welche behindern?
- Welche Sicherheitsvorschriften sind zu lasch?
- Wie nimmt die Bevölkerung die Technik auf?
- Wie verhält sich die Politik?

Wenn man außerdem bedenkt, dass an den verschiedenen Standorten jeweils unterschiedliche Partner mit ihrer Technik vertreten sind, darf man auf einen produktiven Wettbewerb der Standorte hoffen.

## Noch sind nicht alle Probleme gelöst

Auch wenn die bisherigen Erfahrungen aus den Pilotprojekten positiv sind: Bis Wasserstoff wirklich Benzin und Diesel aus den Autotanks verdrängt, sind auch auf technischer Seite noch einige Hürden zu nehmen. Zwei aktuelle Beispiele dafür sind die Problematik der Produktion und die möglichen Auswirkungen einer Wasserstoff-Welt auf das Klima.

„Wasserstoff macht als Energieträger nur dann Sinn, wenn er mithilfe regenerativer Energien hergestellt wird“ – diese Ansicht ist ebenso weit verbreitet wie unsinnig. Überspitzt dargestellt, hätte man genauso gut mit dem Bau der Glühbirne warten können, bis das erste Elektrizitätskraftwerk steht. Noch unsinniger ist die Annahme, dass nicht genug Wasserstoff für den Straßenverkehr produziert werden kann. Richtig ist: Wasserstoff ist kurzfristig in großen Mengen verfügbar und ökologisch sinnvoll.

So fällt Wasserstoff bei vielen Prozessen der chemischen Industrie an. Allein in Deutschland gibt es rund 15 Produktionsstellen, an denen der überschüssige Wasserstoff heute schlicht verfeuert wird und daher problemlos durch Erdgas ersetzt werden kann. Etwa eine Milliarde Kubikmeter Wasserstoff jährlich wären auf diesem Wege unmittelbar zum Preis von Erdgas erhältlich. Das reicht – je nach Verbrauch – für 350.000 bis 650.000 PKWs.

Eine andere billige Energiequelle ist die Überproduktion von Stromerzeugern, vor allem in Wasserkraftwerken. Die Nachfrage nach Energie schwankt täglich und saisonal stark; die Kraftwerke müssen jedoch auf den höchsten Bedarf ausgerichtet sein, damit das Netz nicht zusammenbricht. Wenn weniger Strom abgenommen wird als produziert werden kann, lässt man heute die Turbinen im Leerlauf laufen und leitet das Wasser ungenutzt ab. Diese Überkapazität könnte weltweit genutzt werden, um im großen Stil Wasserstoff aus regenerativen Energiequellen zu erzeugen - ohne dass dafür ein einzi-

ges neues Kraftwerk gebaut werden müsste. Pläne dafür gibt es bereits seit längerer Zeit, zum Beispiel in der kanadischen Provinz Québec und in Brasilien.

Regenerative Energiequellen dagegen werden in Ländern wie Deutschland auf absehbare Zeit nur eine untergeordnete Rolle in der Wasserstoff-Produktion spielen. So lange der Strombedarf in einer Region zu jedem Zeitpunkt größer ist als das Angebot an regenerativ gewonnenem Strom, sollte dieser besser direkt für elektrische Anwendungen verwendet werden. Das gilt jedoch nicht für alle Gegenden: An der Nordseeküste beispielsweise wird die Windkraft schon bald wesentlich mehr Energie liefern als dort benötigt wird, wie die GEO-Studie „Wasserstoff-Erzeugung in Offshore Windparks“ schon 2001 ergeben hat. Anstatt den Strom verlustreich über weite Strecken ins Netz einzuspeisen, könnte er sinnvoller für die Wasserstoff-Produktion eingesetzt werden.

Zunächst werden wir weiterhin in erheblichem Maße auf fossile Rohstoffe zurückgreifen müssen. Zwar bringt das im Vergleich zur direkten Verbrennung von Benzin oder Diesel Energieverluste mit sich – welche im Wasserstoffmotor größer, in der Brennstoffzelle aufgrund des höheren Wirkungsgrades kleiner ausfallen bzw. voll kompensiert werden – doch bietet dieser Weg die Möglichkeit, anfallendes CO<sub>2</sub> kontrolliert am Ort der Produktion abzufangen und einzulagern. Zudem fallen bei der Verwendung von Wasserstoff in Brennstoffzellen keine Schadstoffe wie Schwefeldioxid, Stickoxide oder Rußpartikel an.

## Treibhauseffekt durch Wasserstoff?

Mögliche Gasverluste bei der Produktion, dem Umfüllen und der Speicherung von Wasserstoff werfen eine weitere Frage auf: Was macht der Wasserstoff mit und in unserer Umwelt? Die Umstellung auf den neuen Energieträger hat auf verschiedenen Ebenen erheblichen Einfluss auf Klima und Umwelt.

Die wichtigste Wirkung des Energieträgers Wasserstoff ist, dass er aus jeder beliebigen Primärenergiequelle hergestellt werden kann – also auch aus regenerativen Energien, die den CO<sub>2</sub>-Haushalt der Erde nicht belasten. Zwar wird noch lange Zeit ein erheblicher Teil des weltweiten Wasserstoffbedarfs aus Kohle oder Erdgas produziert werden müssen, aber das dabei entstehende CO<sub>2</sub> kann einfacher als heute abgefangen und eingelagert werden, weil es zentral am Produktionsort und nicht im Automotor entsteht.

Ein weiterer positiver Effekt des neuen Treibstoffs: Katalysator, Rußfilter und ähnliche Einrichtungen werden unnötig. Bei der Verwendung von Wasserstoff in Brennstoffzellen entsteht nichts als Wasser – bei der Verbrennung im Motor können noch in geringem Umfang Stickoxide entstehen. Zudem ist Wasserstoff ungiftig und kann weder Boden noch Wasser verschmutzen.

Für die Umwelt sind daher auch Wasserstoff-Lecks in Pipelines und Tanks kein unmittelbares Problem. Entweichen jedoch große Mengen an Wasserstoff in die Atmo-

sphäre, kann das Gas tatsächlich auf verschiedenen Wegen zum Treibhauseffekt beitragen. Mehrere Studien und Berechnungen haben in den letzten Monaten auf diese Möglichkeit hingewiesen, allerdings dabei auch belegt, dass für einen negativen Effekt sehr viel Wasserstoff frei werden muss: In einem Aufsehen erregenden Artikel in der Zeitschrift „Science“ vom Juni 2003 gingen die Autoren von 120 Millionen Tonnen entweichendem Wasserstoff pro Jahr aus – das ist mehr, als ganz Europa verbrauchen würde, wenn der Straßen- und Luftverkehr in allen Ländern komplett auf Wasserstoff umgestellt wäre. Dennoch ist es sinnvoll, schon jetzt mögliche Nebenwirkungen des Übergangs zu Wasserstoff als Treibstoff zu bedenken: So sind die Klimabedenken ein weiteres Argument dafür, Transportwege und Speichersysteme möglichst dicht zu gestalten.

## Abstract

Deutschland hat seine Vorreiterrolle in Sachen Wasserstoff-Technologie mittlerweile eingebüßt. Die Rolle der Technologieführer haben die USA übernommen, gefördert durch staatliche Zuwendungen von rund 1,7 Milliarden Dollar. Die größte Dynamik bei der Entwicklung der Wasserstoff-Technologie zeigt derzeit Japan: Der Großraum Tokio ist fast flächendeckend mit Wasserstoff-Tankstellen versorgt. Europäische Kooperationen könnten allerdings wichtige Erfahrungen liefern, um weltweite Sicherheitsstandards voranzubringen und die Alltags-tauglichkeit der Wasserstoff-Technik zu demonstrieren. Verschiedene Programme sollen helfen, die Fragen nach förderlichen Regelwerken und sinnvollen Sicherheitsvorschriften zu klären. Auch wenn bisherige Erfahrungen aus Pilotprojekten positiv sind: Bis Wasserstoff wirklich Benzin und Diesel aus den Autotanks verdrängt, sind auch auf technischer Seite noch einige Hürden zu nehmen, die allerdings Forscher- und Ingenieuralltag sind.

## Der Autor



### Reinhold Wurster

Dipl.-Ing. Reinhold Wurster ist Project Manager Wasserstoff bei der L-B-Systemtechnik (LBST). In dieser Position hat er für die LBST verschiedene Projekte begleitet.

Unter anderem gehörten dazu: der europäische Teil des Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Projects, die Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages „Bedingungen und Folgen von Aufbaustrategien für eine solare Wasserstoff-Wirtschaft, das European Integrated Hydrogen Project und die European GM Wheel-to-Wheel-Studie. Er ist Gründungsmitglied des Deutschen Wasserstoff-Verbands (DWV) und seit 1996 auch DWV-Vorstandsmitglied.

Einführung im Straßenverkehr birgt kein zusätzliches Risiko

# Wasserstoff – so sicher wie Benzin

**Die Wasserstoff-Technik hat sich im Alltag bereits in vielen Pilotprojekten bewährt. Moderne Sicherheitstechnik und klare Vorschriften werden Wasserstoff als Treibstoff in Zukunft mindestens so sicher wie Benzin machen. Damit die Verbraucher den neuen Kraftstoff akzeptieren, muss er aber nicht nur sicher und zuverlässig, sondern auch wirtschaftlich und bequem zu handhaben sein.**

In den vergangenen Jahren haben die Automobilhersteller unterschiedliche Fahrzeugkonzepte mit Wasserstoffantrieb vorgestellt. Der TÜV Süddeutschland hat die meisten dieser Projekte schon während der Entwicklungsphase begleitet und bewertet: Firmen wie BMW, DaimlerChrysler, MAN, Opel, VW und IVECO gehörten dabei zu den Auftraggebern. Dieser Zusammenarbeit verdankt der TÜV Süddeutschland weit reichende Erfahrungen mit aktuellen Entwicklungen der Wasserstoff-Technik im Verkehrsbereich: Einerseits, was die Fahrzeuge betrifft, und dank

verschiedener Wasserstoff-Pilotprojekte andererseits auch mit der Infrastruktur, beispielsweise mit Tankstellen, Prüfständen, Wartungshallen und Garagen. Hinzu kommt die jahrzehntelange Erfahrung mit der industriellen Wasserstoff-Technik und verschiedenen – auch alternativen – Antriebskonzepten im Verkehr.

## Vorteile für Wasserstoff in Physik und Chemie

Für die Sicherheit jedes Kraftstoffs spielen Physik und Chemie eine entscheidende Rolle: Wie schnell verflüchtigt sich der Kraftstoff? Wie leicht ist er zu entzünden? Unter welchen Bedingungen ist eine Explosion möglich? Welche Schadstoffe entstehen bei der Verbrennung? Belastet er Gewässer und Böden? Und ist er für den Menschen giftig? In all diesen Punkten muss sich Wasserstoff dem Vergleich mit den heute gängigen Kraftstoffen stellen – und das ist in erster Linie Benzin.

Der wichtigste Unterschied zwischen Wasserstoff und Benzin besteht darin, dass Wasserstoff ein Gas und Benzin eine Flüssigkeit ist. Wasserstoff ist das leichteste Element auf der Erde – für die Sicherheit ist das ein großer Vorteil. Denn so verflüchtigt sich der Kraftstoff an der Luft sehr schnell und kann nur sehr kurz entzündet werden. Benzin dagegen verdampft langsamer und hat auch dann noch eine größere Dichte als Luft. Benzindampf bleibt daher oft lange Zeit am Boden und damit dort, wo er sich am ehesten entzünden kann.

Ein weiterer zentraler Punkt ist die Frage, unter welchen Bedingungen ein Kraftstoff-Luft-Gemisch explodiert – etwa wenn nach einem Unfall oder aufgrund eines Lecks Kraftstoff austritt. Hier ist grundsätzlich von Nachteil, dass Wasserstoff in einem sehr großen Konzentrationsbereich von vier bis 75 Prozent gezündet werden kann. Wirklich bedeutend ist dabei allerdings nur die untere Grenze, also jene vier Prozent Wasserstoff in der Luft, ab denen sich das Gemisch entzünden kann. Allerdings brennt Wasserstoff mit hoher Wahrscheinlichkeit ab, bevor überhaupt ein explosives Gemisch entsteht – denn dafür sind mindestens 18 Prozent Wasserstoff in der Luft nötig. Bei Benzin dagegen liegt diese Detonationsgrenze bei nur 1,1 Volumenprozent.

Damit es überhaupt zur Explosion oder zum Brand kommt, muss in beiden Fällen ein entstandenes Kraftstoff-Luft-Gemisch erst einmal entzündet werden. Im Fall von Wasserstoff ist dafür eine geringere Energie nötig als bei Benzin – allerdings reicht schon die Energie eines

	Benzin	Wasserstoff	Schlussfolgerung
<b>Dichte im Verhältnis zu Luft</b>	3,2 – 4	0,09	Wasserstoff verflüchtigt sich schnell, Benzin bleibt am Boden
<b>Zündbereich</b>	0,6 – 8 %	4 – 75 %	Wasserstoff kann in einem großen Bereich gezündet werden
<b>Detonationsgrenze</b>	1,1 %	18 %	Wasserstoff verbrennt, bevor er explodiert
<b>Zündenergie</b>	0,24 mj	0,02 mj	Ein Funke reicht aus, um Wasserstoff oder Benzin zu zünden
<b>Zündtemperatur</b>	220 – 280 °C	585 °C	Benzin kann sich an heißen Oberflächen entzünden
<b>Flamme</b>	breit, strahlt heiß	steil, wenig Wärmestrahlung	Verbrennungsgefahr neben Wasserstoff-Flamme gering
<b>Gesundheitsgefährdung</b>	giftig	ungiftig	Wasserstoff stellt keine Gefahr für Böden und Gewässer dar

**Für die Sicherheit jedes Kraftstoffs spielen seine physikalischen und chemischen Eigenschaften eine entscheidende Rolle. Im direkten Vergleich mit Benzin zeigt sich, dass Wasserstoff keinesfalls gefährlicher ist: Er verflüchtigt sich sehr schnell, verbrennt anstatt zu explodieren, entzündet sich nicht so leicht an heißen Oberflächen und ist im Gegensatz zu Benzin ungiftig für Mensch und Umwelt. (Quelle: TÜV Süddeutschland)**

elektrischen Funkens aus, um selbst Benzindämpfe zu entzünden. Daher müssen auch beim Betanken von Benzinfahrzeugen spezielle Sicherheitsvorkehrungen, z.B. Erdungsmaßnahmen getroffen werden. Aufgrund der niedrigen Zündtemperatur kann sich Benzin zudem wesentlich leichter als Wasserstoff an heißen Oberflächen entzünden, etwa am Autokatalysator oder dem Auspuffkrümmer.

Hat sich ein Kraftstoff-Luft-Gemisch entzündet, beeinflussen weitere Faktoren den Ablauf. So hat Wasserstoff im Gegensatz zu Benzin eine sehr hohe Verbrennungsgeschwindigkeit. Eine Wasserstoff-Flamme brennt also sehr schnell und – aufgrund der geringen Dichte – steil nach oben ab. Darüber hinaus hat Wasserstoff eine geringere Wärmestrahlung als Benzin. Neben einer frei verbrennenden Wasserstoff-Flamme wird es aus diesem Grund weniger heiß als neben einer Benzinflamme – mit dem Vorteil, dass benachbarte Gegenstände wie Autositze oder andere Fahrzeuge nicht so leicht Feuer fangen. Auch für Personen in der Nähe ist somit die Gefahr geringer, Verbrennungen zu erleiden. Weil eine Wasserstoff-Flamme jedoch zugleich kaum sichtbar ist, kann man unabsichtlich hinein geraten.

## Sicherheitsversuche für die Praxis

Demonstrieren und überprüfen kann man diese Eigenschaften mit Hilfe von Sicherheitsversuchen, etwa durch die Unterfeuerung von gefüllten Tanks. Im Straßenverkehr zugelassene Treibstofftanks müssen auch Temperaturen von mehreren hundert Grad Celsius, wie sie zum Beispiel bei einem Fahrzeugbrand entstehen können, überstehen, ohne ernsthaft Schaden zu nehmen. Das gilt für herkömmliche Benzintanks ebenso wie für einen Flüssigwasserstofftank. Bei einem Leck im Tanksystem zeigen sich jedoch die unterschiedlichen Eigenschaften der gespeicherten Treibstoffe: Während das entweichende Benzin sich in einem breiten, heiß strahlenden Feuerball entzündet, brennt der Wasserstoff mit einer kaum sichtbaren, leicht rötlichen Flamme steil nach oben ab, ohne dabei viel Wärme abzustrahlen.

Der Versuch zeigt, dass Wasserstoff als Treibstoff keineswegs gefährlicher ist als Benzin: Im Gegenteil, in vielen Punkten ist Wasserstoff dem Benzin sicherheitstechnisch überlegen. Das gilt vor allem im Freien. Für die Verwendung in geschlossenen Räumen stellt Wasserstoff andere Ansprüche als Benzin, aber diese sind nicht schwierig zu erfüllen: Wichtig ist hier vor allem eine ausreichende Belüftung.

Daneben gibt es eine Reihe weiterer, für die Sicherheit wichtiger Eigenschaften von Treibstoffen. So ist Wasserstoff im Gegensatz zu Benzin ungiftig – ein Liter Mineralöl kann eine Million Liter Trinkwasser ungenießbar machen. Für Gewässer und Böden ist der Transport



Foto: TÜV Süddeutschland

**Für die Beratung der Industrie in Sicherheitsfragen schon während der Entwicklungsphase neuer Wasserstoff-Technologien steht dem TÜV Süddeutschland seit Januar 2003 in Garching ein moderner Prüfstand für Motoren und Antriebsstränge von Fahrzeugen zur Verfügung.**

Moderne Wasserstoff-Speicher, wie sie in Fahrzeugen verwendet werden, haben in zahlreichen Crashtests und anderen Versuchen ihre Sicherheit bewiesen. Ihre Handhabung deckt sich weitgehend mit den gängigen Systemen in heutigen LPG- oder Erdgasfahrzeugen: Überfüllen, mechanische Beschädigungen, Brand, menschliches Fehlverhalten und interne Systemfehler sind die häufigsten Gefahrenquellen.

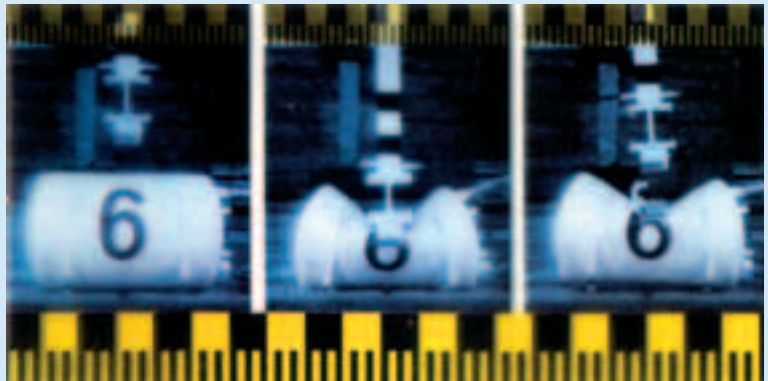


Foto: BMW AG

von Erdöl, etwa in Pipelines, Tankschiffen und Tankwagen, ein erhebliches Risiko. Wasserstoff birgt diese Umweltgefahr nicht. Andere gebräuchliche Kraftstoffe liegen mit ihren Eigenschaften meist zwischen Wasserstoff und Benzin. Gase wie Erdgas und Autogas (also Propan) ähneln dabei eher dem Wasserstoff, flüssige Kraftstoffe wie Diesel und Methanol eher dem Benzin.

## Jahrzehntelange Erfahrungen mit gasbetriebenen Fahrzeugen

Bei allem Wissen um die physikalischen Eigenschaften des Wasserstoffs lassen sich praktische Erfahrungen beim Einsatz als Kraftstoff nicht ersetzen. Neben den zahlreichen Wasserstoff-Pilotprojekten der vergangenen Jahre sind daher vor allem die Erfahrungen aus dem Massenbetrieb von gasbetriebenen Fahrzeugen wichtig. In Europa, insbesondere in Italien (600.000 Fahrzeuge) und den Niederlanden (400.000 Fahrzeuge), haben Flüssiggasfahrzeuge (LPG) in den 70er und 80er Jahren beachtenswerte Anteile am Fahrzeugbestand erreicht. Meist handelte es sich dabei um umgerüstete Fahrzeuge mit bivalentem Antrieb, die sowohl Gas als auch Benzin als Treibstoff nutzen konnten. Die Technologie für den Einsatz von Gasen in Fahrzeugen ist also vorhanden, und mit der Sicherheit von Gasfahrzeugen und der entsprechenden Infrastruktur liegen seit fast 30 Jahren Erfahrungen vor.

Diese Erfahrungen bilden heute das Fundament für den routinierten und sicheren Einsatz von Wasserstoff als Treibstoff.

Die Sicherheit von Gasfahrzeugen ist in der Vergangenheit mehrfach untersucht worden. So ergab eine Auswertung von Unfällen bei LPG-Fahrzeugen, die in den 80er Jahren für die Niederlande durchgeführt worden ist, dass dabei in erster Linie Ausrüstungsteile wie Rohrleitungen und Füllschläuche beschädigt waren. Das deckt sich weitgehend mit den bekannten Schwachstellen benzinbetriebener Fahrzeuge. Schwere Unfallfolgen aufgrund des Gasantriebs waren den Untersuchungen zufolge offenbar nicht aufgetreten. Die Erfahrungen zeigen also: Flüssiggasgetriebene Fahrzeuge stellen kein erhöhtes Risiko dar, solange die geltenden Vorschriften eingehalten werden – und das sollte ebenso für Wasserstoff gelten.

Diese Einschätzung wird dadurch untermauert, dass auch international bisher keine schwerwiegenden Schäden bekannt geworden sind. Weltweit betrug der Bestand an Erdgasfahrzeugen (CNG bzw. NGV) im Jahr 2000 etwa 1,1 Mio. Fahrzeuge, wobei auf Argentinien ca. 460.000, auf Italien 350.000, auf die USA 90.000 und auf Deutschland etwa 10.000 Fahrzeuge entfielen. Wasserstoff-Busse und eine Kleinserie von Wasserstoff-PKWs sind zudem seit Anfang der 90er Jahre ohne bekannte Sicherheitsprobleme im Probeinsatz.

Bei der Interpretation der Ergebnisse muss man allerdings bedenken, dass der Anteil von Gasfahrzeugen am Gesamtfahrzeugbestand bisher relativ klein ist. Bevor Wasserstoff-Fahrzeuge im großen Maßstab eingeführt werden, sollte man deshalb auf jeden Fall eine systematische Unfallforschung durchführen – schon um etwaige Verbesserungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Denn es geht nicht nur um die Sicherheit: Um von den Verbrauchern akzeptiert zu werden, müssen die Fahrzeuge genauso

zuverlässig sein und ähnlich einfach und zu vergleichbaren Preisen gewartet und repariert werden können wie die heutigen Benzinfahrzeuge. Sie müssen auch eine mindestens ebenso lange Lebensdauer und Reichweite aufweisen.

## Sicher speichern in Fahrzeugen

Es bleibt daher noch genug zu tun, auch bei der Sicherheit. Im Fahrzeug ist vor allem eine sichere Speicherung des Wasserstoffs notwendig. Gasförmige Treibstoffe haben dabei im Vergleich zu Diesel oder Benzin eine sehr geringe Energiedichte: 3.000 Liter gasförmiger Wasserstoff enthalten die gleiche Energiemenge wie ein Liter Benzin. Damit man mit Wasserstoff im Tank trotzdem vergleichbare Reichweiten wie mit Benzin- und Dieselfahrzeugen erreicht, muss das Gas daher entweder in flüssiger Form (bei  $-253^{\circ}\text{C}$ ) oder unter hohem Druck (bis zu 700 bar) gespeichert werden. Propangas (LPG) dagegen ist beispielweise schon bei 20 bar flüssig. Die Speicherung von Wasserstoff stellt daher erhöhte Anforderungen an die Technik.

Kritisch sind bei allen Wasserstoff-Systemen besonders diejenigen Teile, die vom Gas durch- oder umströmt werden, beispielsweise Behälter, Rohrleitungen, Füllanschluss und Ventile. Auch fehlerhafte Elektrik, Mess-, Steuer- und Regeltechnik sowie elektronische Sicherheitseinrichtungen können Störungen hervorrufen. Diese Komponenten müssen mechanischen Beschädigungen ebenso standhalten wie Brand, aber auch Bedienungsfehlern wie Überfüllen oder falsche Montage. Hinzu kommt, dass Sicherheitseinrichtungen und Komponenten ausfallen oder eine Fehlfunktion aufweisen können.

Wasserstoff-Speicherbehälter sind daher schon heute einer nahezu lückenlosen Abfolge von Qualitätssicherungsmaßnahmen unterworfen. Das gilt für die Konstruktion (Werkstoffauswahl, Festigkeit, etc.) ebenso wie für die Herstellung und die Prüfung durch einen Sachverständigen. Auch Rohrleitungen und Bauteile wie Tankbefestigungen, Verdampfer, Armaturen, Fördereinrichtungen und elektrische Geräte werden geprüft.

## Sicherheit der Infrastruktur

Ebenso wie für die Systeme im Fahrzeug gibt es auch für die Infrastruktur strenge Sicherheitsvorschriften. Hier baut man auf weit reichende Erfahrungen: Erdgas, Flüssiggas (Autogas) und Wasserstoff werden schon seit Jahrzehnten zur Energieerzeugung und als Rohstoffe in der Industrie genutzt. Im Hinblick auf Sicherheit und Umweltschutz gibt es daher viele nationale und internationale Gesetze, Vorschriften und Regelwerke, die bei Erzeugung, Lagerung, Transport und Nutzung derartiger Gase zu beachten sind. In Deutschland sind das insbesondere das Bundesimmissionsschutz-, das Gefahrgut- und das Gerätesicherheitsgesetz.

In Deutschland gibt es ca. 200 Tankstellen für Autogas und verdichtetes Erdgas, in den USA sogar schon 1.200 CNG-Tankstellen, die als Referenzen auch für den flächendeckenden Einsatz von Wasserstoff dienen können. Pilotprojekte wie die weltweit erste öffentliche Wasserstoff-Tankstelle – sie ging schon 1999 am Flughafen München in Betrieb – haben zudem bewiesen, dass Wasserstoff-Tankstellen bei entsprechenden sicherheitstechnischen Vorkehrungen wie herkömmliche Tankstellen im Alltag genutzt werden können.

Allgemein müssen die bestehenden Sicherheitskonzepte überall dort angepasst werden, wo Wasserstoff als Energieträger eine Rolle spielt: Für den Einsatz im Verkehr, also auf Straßen und Brücken, in Tunnels und Garagen, in Werkstätten, bei der Feuerwehr und den Notdiensten und so weiter. Was gilt es zu beachten, was zu vermeiden, was ist möglich, nötig, wichtig? Derart angepasste Konzepte sind darüber hinaus nicht nur für mobile Anwendungen wichtig, sondern in gleicher Weise auch für stationäre Systeme und Brennstoffzellen mit ihren verschiedenen Einsatzbereichen, Typen und Betriebstemperaturen von  $80^{\circ}\text{C}$  bis  $1.000^{\circ}\text{C}$ .

Grundlage für die Sicherheitskonzepte sind die technischen Regeln und Standards, wie sie schon heute gelten. Sie bilden den Rahmen für das Design und die Überprüfung neuer Komponenten und Systeme. Mindestanforderungen ergeben sich zum einen aus dem Gerätesicherheitsgesetz und den damit verbundenen Verordnungen und technischen Regeln. Zum anderen gelten weitere Normen und Vorschriften. Angesichts der weltweit zunehmenden Bedeutung von Wasserstoff und Brennstoffzellen müssen diese Standards und Richtlinien künftig international abgestimmt werden.

In der Praxis bilden drei Punkte das Grundgerüst für den sicheren Umgang mit Wasserstoff:

1. Mögliche Gefahrenquellen müssen für die betreffende Anwendung identifiziert werden. Diese können sich aus der Anlage selbst ergeben, also aus Störungen, Schäden und Mängeln einzelner Teile. Genauso wichtig ist jedoch die Analyse der unmittelbaren und mittelbaren Umgebung der Anlage: Etwa andere Geräte und bauliche Risiken, aber auch alle Personen, die mit den Systemen arbeiten.



**Benzin brennt im Gegensatz zu Wasserstoff flächig und langsam ab. Es entsteht schwarzer Rauch und in der Umgebung große Hitze. Selbst wenn die Benzingleitung geschlossen wird und der Strahl rechts neben dem Ständer versiegt, brennt das Benzin in der Auffangwanne weiter.**



**Wasserstoff brennt sehr schnell und aufgrund seiner geringen Dichte steil nach oben ab. Die Wasserstoff-Flamme ist nachts gut sichtbar, tagsüber ist sie an der „flirrenden“ Luft erkennbar. Sobald die Leitung geschlossen wird und kein Wasserstoff mehr auströmt, erlischt die Flamme.**

2. Zuverlässige technische Möglichkeiten müssen zur Verfügung stehen, um Fehler und Störungen in Komponenten und Systemen zu erkennen – etwa ein Leck, einen Druckabfall, Hitze, Kälte oder Stromausfall.
3. Die möglichen Auswirkungen eines Gasaustritts müssen analysiert werden – und das unter allen Bedingungen, unter denen die Anwendung arbeiten soll. Für Fahrzeuge bedeutet das zum Beispiel im Freien, auf Brücken, in Tunneln, Garagen und Werkstätten, während der Fahrt und im Ruhezustand.

Wichtig ist es vor allem, mögliche Fehler, Störungen und Schäden bereits bei der Entwicklung neuer Wasserstoff-Anwendungen zu analysieren – und nicht erst, wenn diese in der Praxis auftreten. Mit Hilfe moderner Mess- und Analyseverfahren kann man auf diese Weise Gefahren von vornherein abwehren oder begrenzen, indem man Konstruktionen, Werkstoffe und Sicherheitssysteme entsprechend anpasst.

Eine weitere Anforderung an die Technik ist, dass sie Bedienungsfehler weitgehend ausschließt. Ein Wasserstoff-Auto muss ebenso einfach, sicher und fehlerfrei zu bedienen sein wie ein Benzinfahrzeug. Dasselbe gilt auch für die Reparatur: Die Technik muss so ausgereift sein, dass in Werkstätten möglichst keine verhängnisvollen Fehler passieren können.

## Kernpunkt Gefahrenvermeidung

Eine effektive Gefahrenvermeidung ist die zentrale Grundlage für die Sicherheit von Wasserstoff als Energieträger. Wichtig ist es vor allem, gefährliche Ansammlungen des Gases zu vermeiden; darüber hinaus müssen mögliche Auswirkungen eines Gasaustritts, etwa infolge eines Unfalls, bedacht werden.

Sollen zum Beispiel Wasserstoff-Systeme oder Brennstoffzellen-Anlagen in Gebäuden oder in Containern aufgestellt werden, müssen vor allem die Systeme dicht und der betreffende Raum ausreichend belüftet sein. Nur so lässt sich vermeiden, dass sich Gas in größeren Mengen ansammelt. Weitere Anforderungen hängen dann von den jeweiligen baulichen Gegebenheiten und den Betriebsabläufen ab: Gegebenenfalls können spezielle Brandschutzeinrichtungen nötig sein oder man muss elektrische Geräte vor Explosionen schützen und die Gaskonzentration messen.

Mögliche Auswirkungen eines Gasaustritts lassen sich heute sehr zuverlässig mit Rechenmodellen beurteilen.

len. Sie simulieren vor allem die Ausbreitung und Verbrennung eines Gases. Die Größe eines etwaigen Lecks und damit die Menge freigesetzten Gases ist dabei ebenso von Bedeutung wie die Art der Freisetzung, Form und Eigenschaften des Raumes und so weiter. Modellrechnungen sollten daher immer auf die jeweilige Situation bezogen durchgeführt werden – so wie es heute schon zum Teil beim Neubau von Garagen und Tunnels für benzinbetriebene Fahrzeuge geschieht.

## Sicherheitsfaktor Mensch

Technische Vorkehrungen und Sicherheitssysteme können Gefahren vermeiden und Problemsituationen meistern helfen. Einen erheblichen Anteil an der sicheren Verwendung von Wasserstoff als Energieträger hat jedoch der Mensch: Diejenigen, die mit ihm umgehen, müssen entsprechend geschult sein. Das gilt auch für jeden, der mit einem Wasserstoff betriebenen Auto fahren soll.

Bedacht werden muss dabei jedes mögliche menschliche Fehlverhalten: Bedienungsfehler an Fahrzeugen und Tankstellen, Montagefehler und unsachgemäße Arbeiten an den Systemen, Nichteinhaltung von Wartungs- und Reparaturvorschriften und so weiter. Um die Sicherheit und die Qualität von Wasserstoffanwendungen daher über deren ganzen Betriebszeitraum zu gewährleisten, sind spezielle Sicherheitskonzepte für die Anwender wichtig. Autofahrer müssen mit den neuen Systemen vertraut gemacht werden, um Bedienungsfehler zu vermeiden und Vertrauen in die neue Technik zu schaffen.

## Ausblick

Die Sicherheitstechnik für die mobilen Anwendungen der Wasserstoff-Technik ist heute vorhanden. Erfahrungen aus Pilotprojekten und der jahrzehntelangen industriellen Verwendung zeigen: Wasserstoff ist als Fahrzeugtreibstoff sicher einsetzbar. Der seit Jahren stagnierende Einsatz von Flüssiggasfahrzeugen zeigt jedoch, dass für den Durchbruch eines alternativen Kraftstoffs dieser flächendeckend verfügbar sein muss – das erfordert ein dichtes Tankstellennetz nicht nur national, sondern auch international. Schon aus diesem Grund besteht daher ein deutlicher Harmonisierungsbedarf bezüglich internationaler Standards und Sicherheitsanforderungen.

Das gilt auch im Hinblick auf eine künftige Serienfertigung von Komponenten: Hier müssen schon heute Sicherheitsstandards gesetzt werden. Die Speichersysteme müssen während der ganzen Lebensdauer des Fahrzeugs dicht sein. Flüssigwasserstoff-Tanks und Tankkuppelungen müssen standardisiert sein. Auch müssen Sicherheit und Zuverlässigkeit der neuen Systeme und

Komponenten durch eine gezielte Unfallforschung noch weiter verbessert werden.

Doch nicht nur die Technik muss auf die neuen Anforderungen vorbereitet sein: Mindestens ebenso wichtig sind die Menschen, die mit der neuen Technologie umgehen sollen – sei es beruflich oder sei es als Autofahrer. Wichtig ist es daher, rechtzeitig die betreffenden Handwerker zu schulen und die Ausbildungsgänge an Schulen und Hochschulen auf die neuen Technologien auszurichten. Für die Autofahrer dagegen gilt: Wenn man erst eine mehrtägige Schulung benötigt, um ein Wasserstoffauto sicher zu bedienen, wird es niemand kaufen. Für sie muss die Technik daher ebenso einfach und sicher zu bedienen sein.

## Abstract

Wasserstoff erfüllt alle Bedingungen, um als Treibstoff verwendet werden zu können. Viele seiner physikalischen Eigenschaften sind sogar vorteilhafter für die Sicherheit als die des Benzins. In zahlreichen Pilotprojekten hat sich die heute vorhandene Wasserstoff-Technik bereits im Alltagsbetrieb bewährt.

Gasförmige Treibstoffe erfordern besondere Sicherheitsvorkehrungen. Das gilt für Wasserstoff genauso wie für Erdgas und Flüssiggas. Zentrales Element im Fahrzeug ist dabei die Speicherung. Die speziellen Behälter und die zugehörige Technik müssen leicht und sicher zu handhaben sowie zu warten und reparieren sein. Zudem müssen Brücken, Tunnels und Garagen mit wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen risikolos zu befahren sein. Die Technik muss auch ebenso einfach und sicher zu bedienen sein wie die Elemente der heutigen Benzinsysteme.

## Der Autor



### Dr. Axel Stepken

Dr.-Ing. Axel Stepken ist seit Oktober 2002 Mitglied des Vorstands der TÜV Süddeutschland Holding AG. Er ist dort für den Unternehmensbereich Industrie mit den Geschäftsbereichen Industrie Service, Produkt Service und Management Service zuständig. Von 1998 bis 2002 war er als Geschäftsführer von ABB Airport Technologies weltweit für das Flughafengeschäft verantwortlich.

Großprojekte leiten den Übergang zum Wasserstoff ein

# Einstieg in den Umstieg

**Nur durch gemeinsame Großprojekte von Wirtschaft, Politik, Mineralölunternehmen, Tankstellenbetreibern, Gasindustrie, Automobilherstellern und Verkehrsverbänden kann eine sinnvolle Wasserstoff-Infrastruktur für den Straßenverkehr aufgebaut werden. Denn: Ohne Wasserstoff-Autos keine Wasserstoff-Tankstellen und ohne Tankstellen keine Autos. In Kooperationsprojekten müssen gemeinsam die Sicherheitsstandards erarbeitet werden, die Wasserstoff weltweit zum Kraftstoff der Zukunft machen.**

Benzin und Diesel, Erdgas und Flüssiggas, Biodiesel und sogar Diesel-Wasser-Emulsionen: Die Vielfalt an Kraftstoffen an unseren Tankstellen ist groß. Auch Wasserstoff kann die Mineralölindustrie liefern – wenn sicher ist, dass sie ihn auch verkaufen kann. Für eine einigermaßen flächendeckende Wasserstoff-Versorgung an Europas Tankstellen sind mehrere Milliarden Euro an Investitionen nötig. Diese enorme Aufbauleistung kann nicht ohne konkrete Ziele und auch nicht in kurzer Zeit passieren. Aber sie muss heute beginnen, wenn wir in 10 oder 15 Jahren so weit sein wollen, dass man im Wasserstoff-Auto von Berlin nach Rom fahren kann.

Auf dem Weg in eine Wasserstoff-Zukunft ist noch viel zu tun. Zuerst steht noch immer die Grundsatzentscheidung der Politik und der Automobilindustrie für den neuen Energieträger aus – auch wenn hier mit der Empfehlung der Verkehrswirtschaftlichen Energiestrategie (VES) ein großer Schritt nach vorne gemacht worden ist. Dann fehlen in der Praxis in fast allen Ländern noch verbindliche technische Regelwerke für den alltäglichen Umgang mit Wasserstoff als Kraftstoff. Auch internationale Standards vor allem für die Sicherheit werden gerade erst entwickelt. Fünf bis acht Jahre dauert es, bis ein neuer, internationaler Tankstellen-Standard eingeführt ist. Hinzu kommt, dass Wasserstoff aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften immer schwieriger zu transportieren sein wird als die heute üblichen Kraftstoffe. Das bedeutet, dass Wasserstoff auch langfristig vor Steuern mindestens viermal so teuer sein wird wie Benzin und Diesel heute. Diese Mehrkosten müssen die Verbraucher erst einmal akzeptieren – oder sie müssen durch entsprechende Steuerergünstigungen ausgeglichen werden.

Das sind Aufgaben, aber keine Hindernisse auf dem Weg in die Wasserstoff-Welt. Was der Lösung dieser Aufgaben heute vor allem im Wege steht, ist ein klassischer Henne-Ei-Konflikt: Erst wenn viele Wasserstoff-Fahrzeuge auf den Straßen unterwegs sind, lohnt es sich, auch die Tankstellen umzurüsten – und umgekehrt kauft niemand

ein Wasserstoff-Auto, wenn es nicht genügend Tankstellen dafür gibt. Beide Seiten, Tankstellenbetreiber wie Autohersteller, sind voneinander abhängig und beide warten, dass die andere Seite sich bewegt. Der Weg aus diesem Konflikt führt über eine enge Zusammenarbeit: Nur in gemeinsamen Großprojekten von Wirtschaft und Politik, von Mineralölunternehmen, Tankstellenbetreibern, Gasindustrie, Automobilherstellern und Verkehrsverbänden können wir genug Erfahrung sammeln und Vertrauen aufbauen, um die Mammutaufgabe Umstieg zu bewältigen.

## Übergangsphase 1: Kleine Schritte, große Projekte

Die Betonung bei den Projekten liegt auf dem Wort „groß“. Zum jetzigen Zeitpunkt hilft es nicht viel, wenn jedes Bundesland sein eigenes Wasserstoff-Prestigeprojekt hat. In dieser frühen Phase der Entwicklung sollten wir uns auf etwa zehn Großstädte in Europa konzentrieren. Hundert Tankstellen bringen dabei nicht mehr Erfahrung als zehn, solange sie alle nur von zehn Wasserstoff-Fahrzeugen angefahren werden. Einige Dutzend Betankungen pro Woche können dabei noch nicht als Alltagstest bezeichnet werden. Wenn die Technik reif werden soll, muss sie auch alltäglichen Bedingungen ausgesetzt werden, und diese fangen frühestens bei 100 Fahrzeugen pro Tankstelle an.

Es ist kein Kunststück, ein Tanksystem, einen Speicher und ein Wasserstoff-Auto so aufeinander abzustimmen, dass die Technik einwandfrei läuft – diese frühe Entwicklungsphase gehört bereits der Vergangenheit an. Im Alltag muss eine Tankstelle mit ein und derselben Zapfsäule nicht nur alle erdenklichen PKW-Marken und – Modelle bedienen können, sondern möglichst auch gleichzeitig Lieferwagen, LKW, Busse und Motorräder. Individuelle Lösungen sind teuer und selten wirtschaftlich. Eine breite und internationale Basis an Partnern in den Pilotprojekten ist daher unabdingbar.

## Phase 2: Flottenbetrieb in Ballungsräumen

Die Phase der Großprojekte hat bereits begonnen. Die Modelle und Erfahrungen aus der Zusammenarbeit zum Beispiel in Berlin, aber auch in Kalifornien und Japan

müssen auf andere Städte übertragen werden. Der nächste Schritt ist dann der Ausbau dieser isolierten Projekte.

Für private Kunden werden Wasserstoff-Fahrzeuge erst dann attraktiv sein, wenn wenigstens national ein akzeptables Versorgungsnetz für den neuen Kraftstoff besteht. Deshalb muss nach der Phase der Pilotfahrzeuge der Flottenbetrieb die tragende Säule der Entwicklung sein: Im öffentlichen Nahverkehr, von Lieferdiensten und von Unternehmen mit einem starken lokalen Außendienst können Flotten von Wasserstoff-Fahrzeugen in Großstädten betrieben werden. Weil die Fahrzeuge von Unternehmen wie der Post, Versandhäusern oder den Stromversorgern immer wieder zu ihrem Standort zurückkehren und nicht für Transitstrecken benutzt werden, ist ein nationales Tankstellennetz nicht notwendig. In dieser Flotten-Phase sollte es zwei bis drei Tankstellen pro Stadt geben, die von insgesamt mehreren Hundert Wasserstoff-Fahrzeugen angefahren werden. Ab dieser Phase kann man von einem echten Alltagsbetrieb sprechen.

### Phase 3: Übergang zum wirtschaftlichen Tankstellenbetrieb

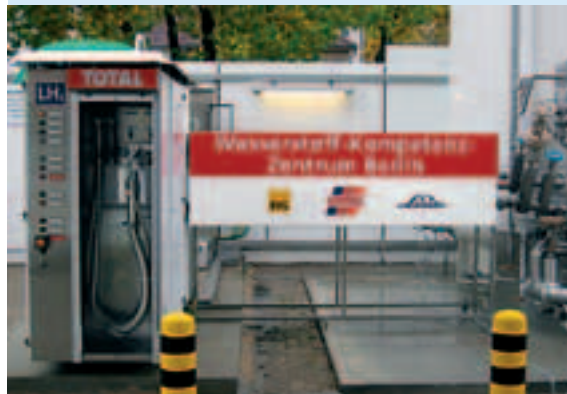
Mit dem Ausbau der Fahrzeugflotte kann dann auch das Tankstellennetz erweitert werden: Wenn man zum Beispiel Verkehrsverbünde mit einbezieht und wenn man in großen Ballungsräumen wie dem Ruhrgebiet oder der Ile-de-France rund um Paris agiert, können die Wasserstoff-Inseln sehr schnell auf acht bis zehn Tankstellen für mindestens 1.000 Fahrzeuge anwachsen. Je größer dabei die mit Tankstellen abgedeckte Fläche ist, um so attraktiver werden die Wasserstoff-Fahrzeuge auch für die Kunden, weil sie nicht mehr auf zwei oder drei zentrale Betankungspunkte angewiesen sind, sondern die Fahrzeuge auch dauerhaft in den äußeren Bereichen des Ballungsraumes unterwegs sein können.

Spätestens dann wird man auch nicht mehr von Pilotprojekten sprechen können. In dieser Phase müssen die Einnahmen durch den Kraftstoffverkauf zumindest schon sichtbar zum Betrieb der vorhandenen und dem Aufbau neuer Tankstellen beitragen. Derzeit versorgt eine Tankstelle durchschnittlich zwischen 1.000 und 1.500 Fahrzeuge. Nach TOTAL-internen Berechnungen könnte eine Wasserstoff-Tankstelle bei einem Wasserstoff-Preis von vier bis fünf Euro pro Kilogramm ab etwa 500 von ihr versorgten Fahrzeugen wirtschaftlich betrieben werden. Bei 1.000 Wasserstoff-Fahrzeugen in einem Ballungsraum mit zehn Tankstellen kann also von Wirtschaftlichkeit noch nicht die Rede sein – zumindest wenn der Kraftstoff-Preis für die Kunden vertretbar sein soll. Es ist klar, dass der Aufbau des Tankstellennetzes dem Ausbau der Fahrzeugflotte noch mindestens zehn bis fünfzehn Jahre lang voran eilen muss – zu diesem langfristigen Impuls muss und wird TOTAL bereit sein.



Mit der ersten Wasserstoff-Tankstelle von TOTAL auf dem Busbetriebshof der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) will das von der BVG und TOTAL initiierte Wasserstoff-Kompetenz-Zentrum Berlin den Einsatz von Wasserstoff im Nahverkehr stufenweise erproben.

Foto: TOTAL



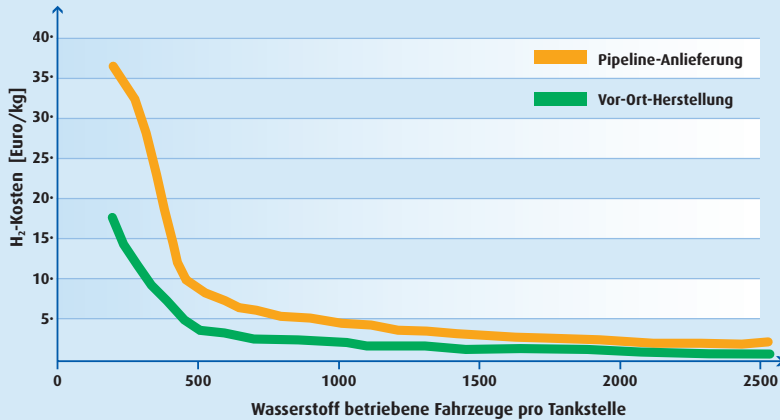
An der TOTAL-Wasserstoff-Tankstelle in Berlin können sowohl Busse als auch PKW mittels der hier abgebildeten Linde-Technologie für tiefkalt verflüssigten Wasserstoff betankt werden.

### Phase 4: Erste Wasserstoff-Korridore in Europa bis 2010 möglich

Das Argument der Wirtschaftlichkeit wird allerdings in der vierten Phase des Übergangs zum Wasserstoff als Treibstoff deutlich an Bedeutung gewinnen. Der weitaus größte Teil aller Autofahrten findet in den Ballungsräumen und auf den Hauptverkehrsachsen dazwischen statt. Daher sollte man, nachdem zehn bis zwanzig Ballungsräume in Europa mit Wasserstoff-Tankstellen versorgt sind, diese durch Wasserstoff-Korridore verbinden. Auch wenn man dabei einen Abstand zwischen den Tankstellen von zwei- bis dreihundert Kilometer kalkuliert, wird dies die bis dahin dynamischste – und auch die teuerste – Ausbauphase sein. Wenn wir die Erfahrungen aus dem derzeitigen Aufbau der Flüssiggas-Infrastruktur beispielsweise in Frankreich anwenden, brauchen wir in Europa mindestens 100 Tankstellen für 10.000 bis 50.000 Wasserstoff-Fahrzeuge. Spätestens dann werden Wasserstoff-PKW auch für Privatkunden attraktiv sein.

Und sie werden es sein müssen: Die Phase des interregionalen und internationalen Ausbaus muss begleitet sein von einer starken jährlichen Zuwachsrate an Wasserstoff-Fahrzeugen. Mehrere große Fahrzeughersteller müssen mit ersten Serien am Markt sein und Großserien für die nächsten zwei oder drei Jahre angekündigt haben. Nur dann haben Mineralölindustrie und Tankstellenbetreiber die nötige Planungssicherheit für ihre Investitionen.

## Kostendegression bei Wasserstoff



**Wasserstoff-Kosten an der Tankstelle in Abhängigkeit von der Zahl beliefelter Fahrzeuge: Nach Berechnungen von TOTAL sind mindestens 500 Wasserstoff-Fahrzeuge nötig, um eine Wasserstoff-Tankstelle bei einem Wasserstoff-Preis von unter fünf Euro pro Kilogramm wirtschaftlich betreiben zu können. (Quelle: TOTAL)**

In diesem Fall wird der Ausbau über etwa fünf Jahre hinweg voran gehen und kann dann forciert werden, wenn die Erfahrungen entsprechend positiv sind. Wenn wir heute konzentriert und gezielt voran gehen, können im nächsten Jahrzehnt europäische Hauptverkehrsachsen mit Wasserstoff-Tankstellen versorgt sein.

## Wasserstoff-Roadmap für Europa

Das gilt allerdings nicht, wenn weiterhin gemütlich an kleinen Prestigeobjekten gearbeitet wird. In den USA und vor allem in Japan ist sichtbar, welche Dynamik sich entwickeln kann, wenn Wirtschaft und Politik gemeinsam den Energieträger Wasserstoff voran bringen wollen. Auch Europa braucht nun eine konzertierte Aktion. Nationale Aktionen sind dabei notwendig, aber lange nicht hinreichend. Nach der EU-Osterweiterung im Jahr 2004 werden wir 25 Staaten mit einem gemeinsamen Markt haben. Das bedeutet: 25 verschiedene politische Haltungen zum Wasserstoff, 25 verschiedene Energiewirtschaftssysteme, 25 verschiedene Pakete an Richtlinien und Gesetzen für den Umgang mit Wasserstoff, und nicht zuletzt 25 verschiedene Vorstellungen zur Steuer- und Subventionspolitik. Autos kennen jedoch keine Grenzen – wenn Europa bis 2010 in nennenswertem Umfang Wasserstoff tanken soll, müssen wir sehr schnell gemeinsame Strukturen für den Umstieg bilden.

Wir brauchen eine gemeinsame Wasserstoff-Roadmap für Europa. Derzeit sind hier bedeutende Anstrengungen im Gange: Unter dem Namen „HyWays“ arbeiten 30 Partner aus der Industrie – darunter auch TOTAL – an

einem gemeinsamen Plan für den Umstieg auf Wasserstoff als Energieträger. Dabei geht es nicht um unverbindliche Willenserklärungen: Bei „HyWays“ muss und wird über Zahlen gesprochen werden. Kosten müssen abgeschätzt, die Beiträge der einzelnen Industriesparten diskutiert werden. Das Ziel muss eine verbindliche, umfassende Roadmap für einen möglichen Umstieg auf den Energieträger Wasserstoff sein. Damit werden sich die Beteiligten dann an die Politik wenden – ein Bottom-Up-Vorgang, der in dieser Größenordnung beispiellos ist: Der Anstoß für den Umstieg geht von der Wirtschaft aus, sie ist die treibende Kraft und bindet die Regierungen ein. Im Jahr 2004 wollen die Partner erste Zahlen und Planungen vorlegen.

Um das erste Ziel dieser Entwicklung aufzuzeigen: Eine grob flächendeckende Versorgung Europas mit Wasserstoff-Tankstellen bedeutet, dass mindestens 10 bis 15% der Tankstellen Wasserstoff anbieten müssen – also etwa 13.500 Wasserstoff-Tankstellen in der EU-25. Ein Wasserstoffpreis von weniger als fünf Euro pro Kilogramm ist erst ab 500 Fahrzeugen pro Tankstelle zu erreichen. Das macht 6,75 Millionen Wasserstoff-Fahrzeuge in Europa, die insgesamt etwa 15 Milliarden Kubikmeter Wasserstoff pro Jahr verbrauchen werden – also ein knappes Drittel der heutigen Wasserstoff-Produktion in Europa. Das sind die Dimensionen, in denen wir denken müssen.

## Beispiel Berlin: Vorreiter in Europa

Einen guten Einblick in die Möglichkeiten der Zusammenarbeit bietet das Wasserstoff-Kompetenz-Zentrum Berlin. Im Mai 2002 haben die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) und TOTAL eine Kooperation vereinbart, um Wasserstofftechnologien in der Alltagspraxis einzuführen und einen wesentlichen Beitrag zum Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur zu leisten. Im Rahmen dieser Zusammenarbeit wurde das Wasserstoff-Kompetenz-Zentrum Berlin ins Leben gerufen und im Oktober 2002 die Wasserstoff-Tankstelle auf dem Busbetriebshof in der Usedomer Straße eingeweiht. Das Ziel dieser ersten Wasserstoff-Tankstelle von TOTAL ist es, den Einsatz von Wasserstoff im Nahverkehr stufenweise zu erproben und einen Überblick über die Akzeptanz des Themas Wasserstoff beim Kunden und in der Öffentlichkeit zu bekommen. Ein großer Vorteil des Standortes sind auch Synergien mit dem Clean Energy Partnership (CEP) in Berlin, im Rahmen dessen von 2004 an etliche Wasserstoff-Fahrzeuge in der Stadt unterwegs sein sollen.

An der Tankstelle auf dem Busbetriebshof der BVG können sowohl Busse als auch PKW mit Wasserstoff betankt werden. Dabei werden zwei verschiedene technische Systeme erprobt: Zum einen Linde-Technologie für tiefkalt verflüssigten Wasserstoff und zum anderen die Vor-Ort-Erzeugung von Druckwasserstoff mittels Elektrolyse. Derzeit erreichen wir einen Wasserstoff-Druck von 250 bar; bis Anfang 2004 soll das Druckniveau auf 350 bar und zugleich der Wasserstoff-Durchsatz auf

100 Kubikmeter pro Stunde erhöht werden. Dann werden wir die ersten Fahrzeuge mit dieser Technologie in Berlin betanken können.

Das Wasserstoff-Kompetenz-Zentrum Berlin soll möglichst lückenlos alle Kriterien und Maßnahmen aufführen, die für die Errichtung und den Betrieb einer Wasserstoff-Tankstelle relevant sind oder werden können. Dabei stellt das Projekt in mehrfacher Hinsicht eine europäische Premiere dar. So wird zum ersten Mal eine Wasserstoff-Tankstelle sowohl mit flüssigem als auch mit gasförmigem Wasserstoff auf einem Busbetriebshof betrieben und mit entsprechenden Kupplungen und Zapfpistolen für Busse und Pkw ausgerüstet. Auch kommt zum ersten Mal bei einem solchen Projekt ein PEM-Elektrolyseur zum Einsatz; sein Funktionsprinzip entspricht dem einer PEM-Brennstoffzelle, nur dass die Reaktion in umgekehrter Richtung, also vom Wasser zum Wasserstoff verläuft. Und eine weitere Neuerung ist schließlich die Einstufung des Projektes anhand des „International Small Site Safety Rating System“ (ISSRS), einem unabhängigen Sicherheitsmanagement-Bewertungssystem. Es soll einen unabhängigen Überblick über das gesamte Projekt ermöglichen.

## Die Sicherheit ist ein wichtiges Thema

Die Sicherheit ist eine der zentralen Herausforderungen dieser frühen Phase des Übergangs zum Wasserstoff als Energieträger. Unsere Erfahrungen mit Erdgas-Tankstellen zeigen, dass die Kunden mit gasförmigen Kraftstoffen weniger gern umgehen als mit flüssigen – und das wird mit Wasserstoff nicht anders sein. Auch wenn die reale Gefahr durch Wasserstoff sicherlich nicht größer, sondern anderer Natur als durch Benzin ist, dürfen wir bei der Sicherheit keine Abstriche machen. Nur wenn sich die Kunden im Umgang mit Wasserstoff absolut sicher fühlen, werden sie den neuen Kraftstoff akzeptieren. Dabei gilt es, nicht die Fehler zu wiederholen, die bei der Einführung von Erdgas bzw. Propangas (LPG) im Auto gemacht worden sind. Damals ist es nicht gelungen, rechtzeitig internationale Sicherheitsstandards einzuführen und durchzusetzen – mit der Folge von gefährlichen Unfällen in Ländern mit einem allgemein geringeren Sicherheitsstandard. In Ländern wie Frankreich, Italien und Deutschland dagegen ist der Umgang mit Gas im Auto genauso ungefährlich wie mit Benzin.

Deshalb müssen wir heute gemeinsame Sicherheitsstandards entwickeln, damit sie morgen tatsächlich weltweite Bedeutung erlangen. Aus diesem Anlass hat TOTAL beispielsweise im September 2003 in Berlin einen internationalen Sicherheitsworkshop veranstaltet, der die Sicherheit der Wasserstoff-Technologie zum Thema hatte.

## Fazit

TOTAL ist der Meinung, dass der Umstieg auf Wasserstoff als Energieträger höchst wahrscheinlich ist. Nur sollten wir nicht zu viel und zu schnell erwarten: Dieser Umstieg wird teuer, und er wird Zeit brauchen. Für ein gesellschaftliches und weltwirtschaftliches Projekt dieses Ausmaßes ist das auch kein Wunder. Das US-amerikanische Apollo-Programm hat 100 Milliarden Dollar verschlungen, und diese Summe hat eine einzige Nation erbracht – nur weil sie zum Mond wollte. Der Weg Europas in die Wasserstoff-Welt wird vermutlich weniger kosten, und diese Kosten können auch noch auf viele Schultern verteilt werden. Die Zeit des Zögerns ist daher vorbei: Soll eine weltweite Wasserstoff-Energie-Wirtschaft Wirklichkeit werden, müssen wir jetzt handeln.

## Abstract

Erste Voraussetzung auf dem Weg in die Wasserstoff-Zukunft ist die Grundsatzentscheidung der Politik und der Automobilindustrie für den neuen Energieträger. Nur in gemeinsamen Großprojekten von Wirtschaft und Politik, von Mineralölunternehmen, Tankstellenbetreibern, Gasindustrie, Automobilherstellern und Verkehrsverbänden kann dann eine entsprechend sinnvolle Wasserstoff-Infrastruktur für den Verkehr aufgebaut werden. Die verschiedenen Phasen auf diesem Weg beinhalten auch eine gemeinsame Wasserstoff-Roadmap für das erweiterte Europa. Um Erfahrungen für die Realisierung einer sinnvollen Infrastruktur zu sammeln, hat TOTAL im Rahmen einer Kooperation mit den Berliner Verkehrsbetrieben (BVG) das Wasserstoff-Kompetenz-Zentrum Berlin ins Leben gerufen und im Oktober 2002 eine Wasserstoff-Tankstelle eingeweiht.

## Der Autor



### Dr. Philippe Schulz

Dr. Philippe Schulz koordiniert seit 2001 das Wasserstoff-Programm der TOTAL-Gruppe. In dieser Funktion ist er auch für die Einrichtung der ersten Wasserstoff-Tankstelle von TOTAL im Rahmen des Wasserstoff-Kompetenz-Zentrums Berlin verantwortlich. 1994 übernahm er bei Elf Aquitaine das Projektmanagement des Bereichs Katalyse, zwei Jahre später das Projektmanagement „Kraftstoffverbrennung und alternative Kraftstoffe“. 1999 wechselte er in die Abteilung „Planung und Strategie“ von Elf France und übernahm anschließend das Management „Neue Energietechnologien“ bei TOTAL S.A. Philippe Schulz ist Co-Autor von 33 wissenschaftlichen Publikationen und hält acht Patente.

# Es ist Zeit für Unternehmer!

**Für den Energieträger Wasserstoff ist die Zeit der Unternehmer gekommen. Die Technik muss sich jetzt im Alltag bewähren. Mit Engagement und Weitsicht müssen neue Märkte erschlossen werden. Das erfordert Investitionen der Industrie. Der Staat muss dies fördern durch verlässliche Rahmenbedingungen, eine vorausschauende Außenwirtschaftspolitik und klare politische Bekenntnisse zum Wasserstoff als Energieträger der Zukunft.**

Wasserstoff steht als Energieträger vor dem Durchbruch. Aus Pilotprojekten und Demonstrationen gehen die ersten Serien hervor, Absatzmöglichkeiten werden ausgetestet, um Marktanteile wird gerungen. Die Zahl der stationären Brennstoffzellen geht weltweit inzwischen in die Tausende. Die großen Automobilhersteller investieren pro Jahr mehrere Hundert Millionen Dollar in Wasserstoff-Technologie und schicken inzwischen die fünfte Generation ihrer Wasserstoff-Fahrzeuge über die Straßen. Der Energieträger Wasserstoff wird zum Milliarden-Geschäft.

Forschung und Entwicklung haben bisher den größten Beitrag geleistet. Öffentliche Einrichtungen und private Unternehmen haben in beträchtlichem Umfang in Know-how investiert. Die Techniken haben einen guten Standard erreicht. Aber um wirklich alltagstauglich zu werden, müssen sie jetzt dem Alltagstest ausgesetzt werden. Die Zeit für Unternehmer ist gekommen. Neue Geschäftsfelder tun sich auf, in der Produktion, der Infrastruktur und der Nutzung von Wasserstoff. Damit sich die Investitionen lohnen, sind verstärkte Anstrengungen von Wirtschaft und Politik nötig. Neue Produktionsmöglichkeiten für Wasserstoff – etwa aus erneuerbaren Energien oder der Kohlevergasung – sind zu erschließen. Die Wissenschaft wird die Wirtschaft begleiten, wenn die neuen Technologien an den Markt gebracht werden. Der Staat muss durch eine kluge Außenwirtschaftspolitik und geeignete Förderungsmaßnahmen im Inneren die Energieversorgung der Zukunft sicherstellen.

## Produktion: Kurzfristig emissionsarm, langfristig erneuerbar

Der Übergang zum Energieträger Wasserstoff ist ein langfristiges Projekt. Nirgends wird das so deutlich wie bei der Produktion von Wasserstoff: Bis die Energieversor-

gung der Welt durch Wasserstoff aus erneuerbaren Energien gesichert ist, wird ein halbes Jahrhundert ins Land gegangen sein. Der Verdrängungskampf von Energien – Kohle, Öl, Gas und Uran – dauerte immer viele Jahrzehnte und hält an.

Erneuerbare Energien sind das Ziel, nicht die Voraussetzung des Übergangs. Mittelfristig werden fossile Energierohstoffe für Wasserstoff unverzichtbar bleiben. Die Technik der Wasserstoff-Erzeugung aus Erdgas ist etabliert: Heute werden jährlich etwa 600 Milliarden Kubikmeter Wasserstoff produziert – eine vermeintlich riesige Menge, die allerdings gerade einmal die Hälfte des jährlichen Endenergiebedarfs der Bundesrepublik Deutschland decken würde. Bei einer anziehenden Nachfrage nach Wasserstoff müssen die Hersteller der Produktionsanlagen mit einem Wachstumsschub rechnen. Investitionen in effizientere und billigere Anlagen werden sich rasch auszahlen.

Einen längeren Atem müssen Investoren haben, die auf Wasserstoff-Erzeugung aus erneuerbaren Energien setzen; dafür investieren sie in einen enormen Wachstumsmarkt. Bislang sind gerade die Weltregionen für Investoren unattraktiv, in denen Wind-, Wasser- und Sonnenenergie in großen Mengen zur Verfügung stehen: Zwar ist in diesen Regionen das Potenzial zur Stromproduktion groß, die Nachfrage ist jedoch meist gering. Sobald aber ein weltweit nachgefragter Energieträger dort billig zu produzieren ist, werden auch diese Standorte interessant. Deutschland gehört weltweit zu den Technologieführern bei der Nutzung erneuerbarer Energien – die Produktion von Wasserstoff bietet die Möglichkeit, dass dieser Vorsprung fortgesetzt wird und sich international auszahlt.

Geschäftsfelder mit wachsender Bedeutung sind dabei nicht nur Windräder und Solarkraftwerke. Ebenso wichtig sind Elektrolyseure, die Wasser mit Hilfe von Strom in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegen. Die Weiterentwicklung dieser Technik lohnt sich: Auch die Betreiber vorhandener Anlagen werden die Gelegenheit ergreifen, überschüssigen Strom für die Wasserstoff-Produktion zu nutzen, anstatt ins Netz zu speisen. Hinzu kommen als Geschäftsfelder Techniken zur Wasseraufbereitung, Entsalzungsanlagen, Verflüssiger, Pipelines, Tankschiffe für flüssigen Wasserstoff mit den zugehörigen Be- und Entladungseinrichtungen, stationäre Speicher, Kompressoren, Pumpen. Bei jedem dieser Infrastrukturelemente sind Verbesserungen möglich, die sich bei Anziehen der Nachfrage schnell wirtschaftlich lohnen werden.

Wasserstoff aus Kohle steht vor einer Renaissance. Kohle und Wasserdampf reagieren bei hohen Temperaturen zu Wasserstoff und Kohlenmonoxid, schließlich zu



**Dampfreformierungsanlage (Steam-Reformer) von Linde in Leuna: Mit steigender Nachfrage nach Wasserstoff wird auch innovative Technik zu Produktion, Speicherung, Transport und Verwendung des Gases in zunehmendem Maße gefragt sein.**

Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Die Technik wurde in den 30er und 40er Jahren in Deutschland angewendet und wird noch heute in Südafrika praktiziert. Der Energieträger Wasserstoff verschafft Kohle den Wiederzutritt zum Verkehr, aus dem sie mit den Dampflokomotiven verschwand. Weil Kohle auf allen Kontinenten der Welt vorkommt, werden sie auch solche Staaten nutzen, die weder über Erdgasvorräte noch über erneuerbare Energien verfügen. Die Technologie wird weltweit gefragt sein.

## Klimagase: Geschäftsfeld CO<sub>2</sub>-Entsorgung

Wasserstoff erlaubt nachhaltige Energiepolitik: Wasserstoff verschafft erneuerbaren Energien den uneingeschränkten Zutritt zum Welthandel. Wasserstoff bietet fossilen Energierohstoffen die Chance, klimaökologisch neutral genutzt zu werden, unter der Voraussetzung, dass das mitproduzierte CO<sub>2</sub> für die Atmosphäre schadlos endgelagert wird. Bislang entsteht CO<sub>2</sub> dezentral, etwa in Automotoren oder Heizanlagen; bei der Wasserstoff-Produktion entsteht es zentral in den Produktionsanlagen und kann dort abgefangen werden. Die Technik für die CO<sub>2</sub>-Entsorgung ist ein immer wichtiger werdendes Arbeitsgebiet für Unternehmen, die auf die zu erwartenden schärferen Verpflichtungen aus dem Kyoto-Vertrag vorbereitet sein wollen.

Um den Kyoto-Vertrag zu erfüllen und nicht Unsummen für Verschmutzungsrechte aufbringen zu müssen, ist Deutschland in den nächsten Jahren – ebenso wie die über 100 anderen Unterzeichnerstaaten des Kyoto-Vertrags – zunehmend auf CO<sub>2</sub>-freie Energieversorgung angewiesen. Das wird dadurch erschwert, dass die Kernener-

gie nach und nach ausscheiden soll und in Ermangelung anderer Perspektiven vor allem durch Gas- und Kohlekraftwerke ersetzt werden wird. Bis 2010 müssen nach Berechnungen der Kraftwerkswirtschaft Kraftwerke mit einer Gesamtleistung von etwa 40.000 MW neu installiert werden. Ein großer Teil dieser Leistung muss ohne CO<sub>2</sub>-Emissionen erbracht werden – eine Aufgabe, bei deren Bewältigung Wasserstoff und seinen sauberen Nutzungstechniken eminente Bedeutung zukommen wird.

Dazu bieten sich zwei Ansätze, die beide mit Wasserstoff zu tun haben: Der erste Ansatz lässt möglichst wenig oder gar kein CO<sub>2</sub> entstehen, der zweite hilft, entstandenes CO<sub>2</sub> zu binden und zu entsorgen. Ersterer wird durch die sukzessive Ausweitung der Produktion von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien erreicht, gegebenenfalls in Verbindung mit effizienter Speicherung. Der zweite Ansatz bezieht sich auf Wasserstoff aus fossilen Energierohstoffen: Sie werden entcarbonisiert, Kohlenstoff wird sequestriert und für die Atmosphäre schadlos endgelagert. Die Politik ist gefragt, Weichenstellungen zu setzen und den Unternehmen damit Planungssicherheit zu geben:

- Welche Art der Energieerzeugung wird bevorzugt?
- Wie wird sie gefördert?
- Welche Übergangslösungen sind vorgesehen?

Investitionen in eine verbesserte oder neue Technik wird es nur geben, wenn Investoren auf sicherem Boden stehen. Ein deutliches Bekenntnis der Politik zum Wasserstoff als Energieträger ist unverzichtbar.

Das Abfangen und Einlagern von CO<sub>2</sub> – Entcarbonisierung und Sequestrierung – ist ein Bereich, in dem die Wissenschaft noch Lösungen bieten muss. Derzeit konzentrieren sich die Forschungsansätze darauf, das CO<sub>2</sub> in ausgebeuteten Kohlelagerstätten, Öl- oder Gasfeldern einzulagern. Auf diese Weise ist es klimaneutral entsorgt. Nach heutigem Stand könnten die ersten Verfahren in wenigen Jahren marktreif sein. Sind Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Sequestrierung technisch etabliert, muss die Technik noch

<b>Wasserstoff aus</b>	<b>Dollar pro Gigajoule</b>
Erdgas mit CO <sub>2</sub> -Entsorgung	7 – 11
Kohle mit CO <sub>2</sub> -Entsorgung	8 – 11
Biomasse (Vergasung)	10 – 18
Windkraft an Land	17 – 23
Windkraft offshore	22 – 30
Solarthermie	27 – 35
Photovoltaik	47 – 75
Kernenergie	15 – 20
Hochtemperaturreaktoren	10 – 25

<b>zum Vergleich</b>	
Benzin/Diesel	6 – 8
Erdgas	3 – 5

**Die Kosten der Wasserstoff-Versorgung im Jahr 2020: Fossile Rohstoffe werden noch lange Zeit die billigste Möglichkeit der Wasserstoff-Produktion sein. (Quelle: IEA)**

den Maßstäben von Kraftwerken angepasst werden: Zulieferer von Komponenten müssen entsprechende Kapazitäten bereitstellen, die Lagerstätten müssen erschlossen und für die Einlagerung vorbereitet werden. Dieser Prozess wird letztlich Jahrzehnte dauern – da jedoch die Nachfrage nach CO<sub>2</sub>-Sequestrierung schon in wenigen Jahren massiv zunehmen wird, sind mutige Unternehmensentscheidungen gefragt.

## Energiepolitik: Technologie verringert die Importabhängigkeit

Im Kyoto-Vertrag ist vorgesehen, dass der Export klimafreundlicher Technologie für das exportierende Land einen CO<sub>2</sub>-Bonus bringt. Die Entwicklung von Techniken zur Erschließung erneuerbarer Energien, zur effizienten, wasserstoffgestützten Energienutzung oder zur CO<sub>2</sub>-Sequestrierung zahlt sich also gleich dreifach aus:

- Die CO<sub>2</sub>-Bilanz im Land wird verbessert
- Auf dem Weltmarkt wird gefragte Ware angeboten
- Für den Export gibt es zusätzlich eine Verschmutzungsgutschrift, die wiederum handelbar ist.

Der Käufer von Wasserstoff-Techniken profitiert, indem er seine Energieversorgung effizienter macht und zugleich die Kyoto-Vorgaben erfüllt.

Damit der klimafreundliche Welthandel funktioniert, sind die Unternehmen auf Unterstützung aus der Politik angewiesen. Der Staat muss durch vorausschauende Außenwirtschaftspolitik die Zusammenarbeit mit denjenigen Ländern vertiefen, die heute und zukünftig unseren Energiebedarf sichern werden. Klar ist, dass Deutschland

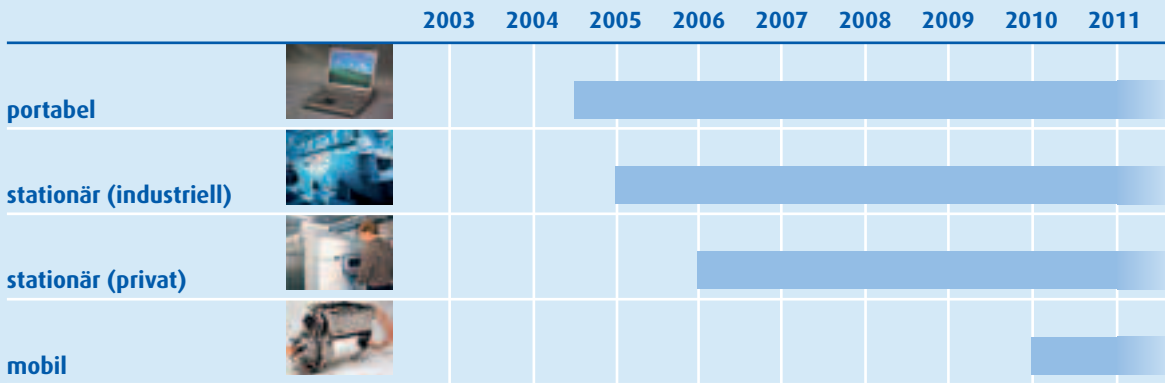
auch weiterhin von Energie aus dem Ausland abhängig bleiben wird. Drei Viertel unseres Energiebedarfs werden heute durch Importe gedeckt. Das beherrschende Thema der Energiepolitik der nächsten Jahrzehnte wird sein, unsere Energieversorgung angesichts endlicher Vorräte an fossilen Rohstoffen sicherzustellen und dabei die Kyoto-Vorgaben zu beachten. Und die aussichtsreichste Lösung bietet der Umstieg auf den Energieträger Wasserstoff.

Das hat mehrere Gründe. Zum einen wird der Energieträger Wasserstoff die Energiewirtschaft dezentralisieren. Wasserstoff ist, anders als Elektrizität, dauerhaft speicherbar und kann jederzeit in der benötigten Menge zur Erzeugung von Strom und Wärme verwendet werden. Damit entfallen Reservekapazitäten großer Kraftwerke und die verlustbehaftete Verteilung von Elektrizität über längere Strecken. Die dezentrale Wasserstoff-Energiewirtschaft wird effizienter sein als die heutige. Ein anderer Vorteil des Wasserstoffs für die Energieversorgung der Zukunft liegt in seiner Natur. Als universeller Energieträger kann Wasserstoff aus jeder Energieform hergestellt und in jede umgewandelt werden. Dadurch werden Energiepotenziale nutzbar, die an der Energiewirtschaft in der Welt bisher überhaupt nicht teilnehmen. Beispielsweise kann mithilfe von Wasserstoff Windenergie aus Patagonien in Deutschland Autos antreiben. Die Energiepotenziale der sonnenreichen Wüstenregionen der Welt können erst dann sinnvoll genutzt werden, wenn Wasserstoff als transportfähiger Energieträger nachgefragt wird. Neue Energielieferregionen werden die alten ergänzen.

Weltpolitisch sind Verschiebungen zu erwarten. Die großen Exporteure von Energierohstoffen werden zwar noch lange am Markt bleiben; Erdgas und andere fossile Rohstoffe werden auf absehbare Zeit zunächst die wichtigste, später eine wichtige Quelle für Wasserstoff bleiben. Doch kommt auf die erdöl- und erdgasreichen Länder wie die OPEC-Staaten zunehmend die Forderung zu, für die Entsorgung von Kohlendioxid zu sorgen: Das Ziel deutscher Außenwirtschaftspolitik muss es sein, ihnen in Zukunft nur noch Energie in Form von Wasserstoff abzunehmen, aber nicht mehr das teure Klimagas CO<sub>2</sub>. Denn technisch, wirtschaftlich und ökologisch ist es am sinnvollsten, wenn CO<sub>2</sub> zentral am Ort der Entstehung abgefangen und etwa in den ausgebeuteten Rohstofflagerstätten eingelagert wird. Internationale, völkerrechtlich bindende Verträge müssen sicherstellen, dass dies auch wirklich geschieht.

Zusammenfassend gilt: Energiepolitik wird zunehmend zur Technologiepolitik. Technologie reduziert den Energiebedarf, Technologie fördert die effiziente Wasserstoff-Energiewirtschaft und mindert letztlich die Abhängigkeit von ausländischen Rohstoffquellen. Die Enquete-Kommission des Deutschen Bundestags „Schutz der Erdatmosphäre“ hat schon 1990 in ihrem Abschlussbericht darauf hingewiesen, dass Deutschland mit dem vorhandenen technischen Wissen mit der Hälfte seines derzeitigen Primärenergiebedarfs auskommen könnte. Im verbrauchernahen Bereich sind damit große Absatzchancen für neue, besonders effiziente Systeme auf Basis des Energieträgers Wasserstoff verbunden. Nach außen kann durch den Export von Wasserstoff-Technologien die Basis an Energielieferanten verbreitert, die heimische

# Brennstoffzellen in der Anwendung



In vielen Bereichen steht der Markteintritt der Schlüsseltechnologie Brennstoffzelle kurz bevor.

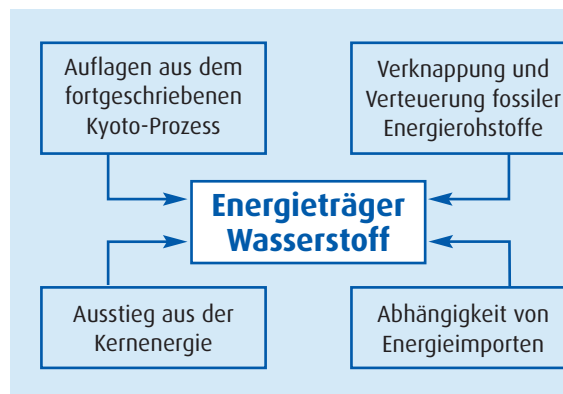
CO<sub>2</sub>-Bilanz verbessert und ein lukrativer Weltmarkt erschlossen werden. Nicht mehr der Zugang zu Primärenergiequellen wird entscheidend sein, sondern der Zugang zu der Technologie, welche diese Quellen erschließt und effektiv nutzt.

## Ausblick: Schrittmacher Brennstoffzelle

Wie nah diese Zukunft ist – und welche Hindernisse dennoch aus dem Weg geräumt werden müssen – kann an der Kerntechnologie der Wasserstoff-Energiewirtschaft demonstriert werden: der Brennstoffzelle. Auch wenn die einzelnen Anwendungen in diesem Bereich noch in sehr unterschiedlichen Entwicklungsstadien stecken, so ist noch in diesem Jahrzehnt der Eintritt in den Massenmarkt abzusehen. Auf jeden Fall wirken sich Fortschritte bei der Entwicklung von Brennstoffzellen am schnellsten auf die Marktchancen aus – Brennstoffzellen sind Schrittmacher der Wasserstoff-Technologie.

Am nächsten zur Serienreife stehen Portable Brennstoffzellen. Verschiedene Hersteller wie Toshiba und NEC haben für 2004 und 2005 Jahr angekündigt, Laptops mit Brennstoffzellen anstelle von Akkus auszustatten. Ähnliches gilt für Fernsehkameras, Camcorder und andere, heute batteriebetriebene elektronische Geräte. Die Technik arbeitet erfolgreich am Problem der Miniaturisierung. Gegenüber herkömmlichen Batterien sind Brennstoffzellen so viel leistungsfähiger, dass die Verbraucher schnell von der neuen Technik überzeugt sein werden. Bislang wird der Markt für portable Brennstoffzellen als Batterieersatz von einigen kleinen, spezialisierten Unternehmen bedient. Es ist aber nur eine Frage der Zeit, bis die ersten Akkulieferanten die neue Konkurrenz und die Wachstumschancen spüren werden.

Ebenfalls vor dem Markteintritt stehen viele stationäre Anwendungen von Brennstoffzellen. Das gilt vor allem für den industriellen Bereich mit Kraft-Wärme-Kopplung: Mehrere tausend solcher Systeme sind heute



Wasserstoff als Energieträger der Zukunft steht im Spannungsfeld der Energiepolitik.

weltweit installiert. Noch ist das wichtigste Argument für den Einbau eines Brennstoffzellen-Systems der positive Imagertransfer. Das wird sich ändern: Blockheizkraftwerke auf Brennstoffzellenbasis können Nutzungsgrade von bis zu 90 Prozent erreichen – mit hohem Stromanteil. Derzeit kosten Brennstoffzellen-Systeme ein Mehrfaches herkömmlicher Systeme, allerdings sinkt dieser Preis mit zunehmender Stückzahl spürbar. Noch im laufenden Jahrzehnt können die Vorteile der Brennstoffzelle ihren höheren Preis ausgleichen.

Auch in der Hausenergieversorgung werden in den nächsten zehn Jahren die Heizkessel von Brennstoffzellen ersetzt werden. Ähnlich wie in den letzten Jahren die meisten Hausbesitzer ihre alten Heizölanlagen durch moderne Erdgasheizungen ersetzt haben, können Brennstoffzellen von der Mitte dieses Jahrzehnts an einen für die Hersteller höchst profitablen Technologieschub bedeuten. Derzeit kostet eine Heizung – ein Serienprodukt – etwa 7.500 Euro, eine vergleichbare Brennstoffzellen-Anlage – eine Pilotentwicklung in kleiner Stückzahl – gut 20.000 Euro. Die Serienproduktion der Brennstoffzellen wird diesen Unterschied schnell ausgleichen.

Allgemein werden stationäre Brennstoffzellen zunächst weiterhin die vorhandene Erdgasinfrastruktur nutzen und aus dem Gas durch vorgeschaltete Reformer Wasserstoff gewinnen. Dabei werden viel Entwicklungsarbeit und erhebliche Investitionen in eine Technik gesteckt, deren Ende schon vor der Markteinführung absehbar ist – auf Dauer wird Wasserstoff das Erdgas als Energieträger ablösen. Zudem entsteht auf diese Weise weiterhin CO<sub>2</sub> beim Verbraucher, das nicht abgefangen werden kann. Solche Übergangslösungen sind zwar kurz-

fristig einfacher machbar als ein radikaler Umstieg, aber sie binden Investitionen und verzögern damit den ohnehin nötigen Übergang.

Das gilt ähnlich für mobile Brennstoffzellen in Fahrzeugen. Auch in diesem Bereich wird weiterhin mit anderen Energieträgern wie Erdgas oder Methanol experimentiert. Diese Brennstoffzellen-Systeme sind noch am weitesten von der tatsächlichen Marktreife entfernt. Das liegt auch an einem mächtigen Konkurrenten: Der Automotor ist eines der am weitesten entwickelten Massenprodukte der Welt. Das Rennen „Brennstoffzelle gegen Wasserstoffmotor“ ist nicht entschieden – aus Ingenieursicht ebenso wenig wie aus ökonomischer Perspektive. Betrachtet man den ganzen Lebenszyklus der Technologien, ist auch der ökologische Aspekt nicht ganz eindeutig. Kurzfristig wird der mit Wasserstoff und Benzin betriebbare „Bi-Fuel-Motor“ davon profitieren, dass es noch für lange Zeit keine flächendeckende Versorgung mit Wasserstoff geben wird. Und fest steht wohl, dass beide Antriebskonzepte zumindest eine Zeit lang gleichzeitig am Markt bestehen können – und sie sich dank des Wettbewerbs um so schneller fortentwickeln werden.

## Fazit: Mit Investitionen nicht auf den Staat warten!

Der Energieträger Wasserstoff steht vor einer rasanten Entwicklung. Wissenschaft, Wirtschaft und Politik müssen aus jeweiligem Interesse diese Entwicklung begleiten. Jetzt nicht zu investieren – sei es an Wissen, an Kapital oder an politischen Ressourcen – bedeutet, international ins Hintertreffen zu geraten.

Jede Seite der Triade aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik sollte konsequent ihre Aufgaben übernehmen und Chancen nutzen. Ingenieure und Wissenschaftler müssen die noch offenen technischen Fragen klären, etwa im Bereich der Produktion und der Speicherung von Wasserstoff. Vom ersten Pilotprojekt bis zum Massenmarkt ist ein weiter Weg. Zugleich müssen die Unternehmer, wenn sich ihre Forschungsmilliarden lohnen sollen, von der begleitenden zur treibenden Kraft der Entwicklung werden und die vorhandene Technik auf den Markt bringen – ohne dabei auf Geld vom Staat zu warten. Denn die Politik kann und soll der Wirtschaft ihre Investitionslast nicht abnehmen: Sie muss mit gesetzlichen und politischen Voraussetzungen den Unternehmen die nötige Planungssicherheit geben.

Vom Staat ist zu erwarten, dass er verlässliche Energie- und Außenwirtschaftspolitik betreibt und gesellschaftlich mithilft, in der Bevölkerung Akzeptanz für den neuen Energieträger mithilft. Der Umstieg muss gesellschaftliches Ziel sein. Deshalb ist ein klares Bekenntnis der Politik zum Wasserstoff sehr wichtig: Energiepolitik sollte nie mehr ohne Einbezug des zukünftigen Energieträgers Wasserstoff gemacht werden.

Für die Unternehmen ist Technologieführerschaft immer auch ein Imagegewinn. Die deutsche Automobilbranche hat hier Maßstäbe gesetzt. Es bietet sich an,

Pilotmärkte bei Großveranstaltungen zu installieren. Die Fußball-Weltmeisterschaft 2006 in Deutschland ist eine solche Gelegenheit, um mit weltweitem Werbeeffekt den Alltagsbetrieb von Brennstoffzellen-Bussen und Wasserstoff-Fahrzeugen zu demonstrieren. Gerade in München, wo das Pressezentrum der Veranstaltung seinen Sitz haben wird, und in Berlin, wo das Finale stattfinden wird, sind bereits heute Wasserstoff-Infrastrukturen vorhanden.

## Abstract

Als Energieträger steht der Wasserstoff kurz vor seinem Marktauftritt. Die Technik muss die Forschungslabore verlassen und ihre Alltagstauglichkeit unter Beweis stellen. Nur so kann sie auch weiter entwickelt und verbessert werden. Dabei tun sich für Unternehmen aussichtsreiche Geschäftsfelder auf, die ein großes Potenzial über alle Ländergrenzen hinweg beinhalten. Als ein Schrittmacher der neuen Technologie hat sich die Brennstoffzelle gezeigt, die auch in Zukunft die Schlüsseltechnologie der Wasserstoff-Welt sein wird. Bei der Umsetzung in Serienprodukte jedweder Art muss die Industrie die nötigen Investitionen schultern. Mit vorausschauender Energiepolitik und Außenwirtschaftspolitik sollte der Staat verlässliche Rahmenbedingungen für die Industrie-Investitionen schaffen.

## Der Autor



### Prof. Dr. Carl-Jochen Winter

Prof. Dr.-Ing. Carl-Jochen Winter ist seit 1999 Vizepräsident der International Association for Hydrogen Energy (IAHE). Zugleich erarbeitet er mit seiner Firma ENERGON Carl-Jochen Winter GmbH

Analysen und Studien zu energetischer Nachhaltigkeit, Energieeffizienz, erneuerbaren Energien und Wasserstoff als Energieträger. Er war von 1975 bis 1991 Vorstandsmitglied des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt und ist seit 1983 Professor an der Universität Stuttgart. Von 1989 bis 2003 war er stellvertretender Vorsitzender des Forums für Zukunftsenergien und von 1993 bis 1996 wissenschaftliches Mitglied der Enquete-Kommission des 12. Deutschen Bundestags „Schutz der Erdatmosphäre“. Er ist Autor und Herausgeber zahlreicher Bücher.

## Impressum



**Herausgeber:**  
Linde AG, Wiesbaden  
[www.linde.com](http://www.linde.com)

**Redaktion:**  
Verantwortlich: Stefan Metz, Linde AG;  
Science&Media, Büro für Wissenschafts-  
und Technikkommunikation, München

**Layout, Lithografie und Herstellung:**  
D+K Horst Repschläger GmbH,  
Wiesbaden

**Übersetzung:**  
eurocom Translation Services  
GmbH, Wien

**Druck:**  
HMS Druckhaus GmbH, Dreieich

**Anfragen und Bestellungen an:**  
Linde AG, Kommunikation  
Postfach 4020, 65030 Wiesbaden  
oder [stefan.metz@linde.de](mailto:stefan.metz@linde.de)

Nachdruck oder elektronische Verbreitung nur mit Zustimmung des Herausgebers. Mit Ausnahme der gesetzlich zugelassenen Fälle (und dabei nur mit vollständiger Quellenangabe) ist die Nutzung der Berichte aus „Linde Technology“ ohne Einwilligung des Herausgebers nicht gestattet.

ISSN 1612-2224  
Printed in Germany – November 2003

WWW

Diese Heftreihe sowie weitere Fachberichte stehen unter [www.linde.de/LindeTechnology](http://www.linde.de/LindeTechnology) als Download zur Verfügung.

**Linde AG**

Abraham-Lincoln-Straße 21

65189 Wiesbaden

Tel: ++49 (0) 611 770-0

Fax ++49 (0) 611 770-269

[www.linde.com](http://www.linde.com)

ISSN 1612-2224