



Deutscher Wasserstoff- und
Brennstoffzellen-Verband

Wasserstoff

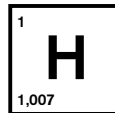
Der neue Energieträger

Eine fachliche Einführung vom Deutschen Wasserstoff- und
Brennstoffzellen-Verband e.V. – DWV

H₂

Vor Ihnen liegt eine Einführung in die Wasserstoff-Energietechnik. Sie soll eine Brücke zu den in der Referenzliste (S. 33/34) empfohlenen Büchern sein und jedem ermöglichen, sich zu den Umbrüchen in der Energiewirtschaft eine Meinung zu bilden. Wir alle werden davon betroffen sein.

Der DWV



Wasserstoff trägt im Periodensystem der chemischen Elemente die Nr. 1, seine Atome haben den kleinsten Durchmesser von allen, er besitzt die geringste Dichte und er ist das bei weitem häufigste Element: Im Universum sind 90% aller Atome und damit Dreiviertel der gesamten Masse Wasserstoff.

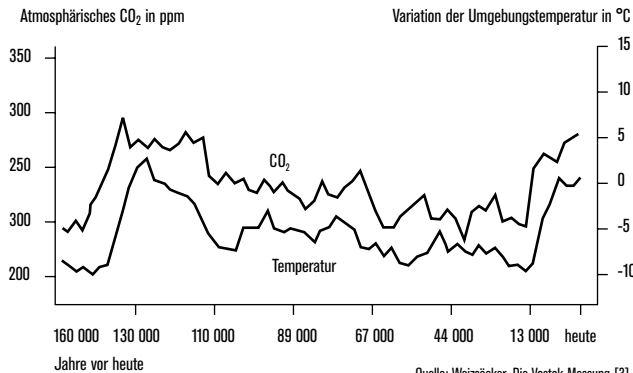
Wasserstoff kommt in der Natur ausschließlich in gebundenem Zustand vor. Durch den Einsatz von Energie lässt er sich elementar darstellen und wird dadurch zum Energieträger, dessen chemisch gespeicherte Energie nutzbar ist.

01 Wasserstoff als Energieträger – eine Notwendigkeit

01.1 Das Klimaproblem

Es darf mittlerweile als erwiesen betrachtet werden, dass neben Ozonloch, Smog und saurem Regen auch der Treibhauseffekt wesentlich auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen ist. Die Korrelation von atmosphärischem CO_2 -Gehalt und Jahresmitteltemperatur konnte an Hand der Auswertung von Bohrungen im antarktischen Eis, die auf der sowjetischen Station Vostok während der 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts niedergebracht worden waren, nachgewiesen werden. Seit dem Ende der letzten Eiszeit – vor 12.000 Jahren – stieg die mittlere Temperatur um etwa zehn Kelvin. Die Bestimmung des Gehalts an Kohlendioxid der im Eis eingeschlossenen Luftbläschen ergab für den gleichen Zeitraum einen Anstieg um etwa 40 %. Vor diesem Hintergrund ist die Erkenntnis erschreckend, dass der CO_2 -Gehalt allein während der letzten 250 Jahre mit der Entwicklung der Industrie um ein Viertel zugenommen hat. ^[1] Der antropogene Anteil an den Treibhausgasen im 20. Jahrhundert trug nach Modellrechnungen mit etwa 0,6 K zur Temperaturerhöhung bei. ^[2]

Abb. 1:
Kohlendioxid-
gehalt der
Atmosphäre



Quelle: Weizsäcker, Die Vostok-Messung [3]

Die vieldiskutierten Auswirkungen der Erwärmung werden zu schwerwiegenden Veränderungen in vielen Bereichen führen. Selbst wenn das Erreichen der Kyoto-Ziele Milderung brächte, lässt sich eine Gleichgewichtsstörung kurzfristig nicht beheben. Den

Ernst der Lage erkennt man daran, dass Versicherungsfachleute bereits begonnen haben, abzuschätzen, welche Schäden durch die Folgen der Klimaveränderungen entstehen.^[4a] Es kommt daher jetzt darauf an, das Menschenmögliche zu tun, um jedes Zehntel Kelvin Nichterhöhung oder Erniedrigung zu erreichen.

01.2 Gefahrgüter Erdöl und Erdgas

Abgesehen von der CO₂-Emission beim Verbrennen fossiler Kraftstoffe, beginnt die Schädigung der Umwelt bereits bei der Förderung von Kohle, Erdöl und Erdgas, bei Verschmutzungen und Umweltzerstörungen, vor denen die Öffentlichkeit nur zu gern die Augen verschließt.

Entweichendes Erdgas trägt direkt zum Treibhauseffekt bei. Zudem findet sich vielerorts zerstörte Natur in Folge des Abbaus: in Alaska und

Abb. 2:
Trans-Alaska
Ölpipeline



Quelle: © Roger Asbury - Fotolia

Mittelamerika, in Sibirien, am Kaspischen Meer und im Orient. Die Auswirkungen von Pipeline-Leckagen und Tankerunfälle sind längst kein Thema mehr allein für die Zeitungen, denn derartige Havarien finden auch bei uns statt. Wir sind immer häufiger selbst beteiligt; sei es im Spanienurlaub oder beim Ostseeausflug. Naturparadiese werden durch die zunehmende Zahl der Tankerpassagen immer häufiger in Mitleidenschaft gezogen.

01.3 Endlichkeit der Ressourcen

Die Menschheit wächst und damit ihr Energiebedarf. Aber wie kommen die Menschen eigentlich dazu, die fossilen Reichtümer der Erde, die sich in Jahrmillionen gebildet haben, innerhalb einiger hundert Jahre einfach zu verbrennen? Man sollte auch an die nachfolgenden Generationen denken. Man sollte sich bewusst machen, dass die fossilen Primärenergieträger auch Chemierohstoffe sind, die für andere Zwecke sinnvoller genutzt werden könnten.

Prof. Carl-Jochen Winter, Vize-Präsident der International Association for Hydrogen Energy (IAHE), meint dazu:

»Zwischen der ersten (vor-industriellen) und der zweiten (post-fossilen) Zivilisation ist die Ära der fossilen Energieträger ein Augenblick, nicht mehr.«^[4b]

Auch wenn in unseren Tagen die Abschätzungen über das nahende Ende von Erdgas, Erdöl und Kohle durch Entdeckung neuer Vorkommen immer wieder hinausgezögert werden, herrscht über den Rückgang dieser Energieträger und über die künftig wachsende Bedeutung der erneuerbaren Energien weitestgehend Einigkeit.

Für Erdgas sei das Beispiel einer parametrischen Überlegung aus dem Jahr 1992 angeführt. Meadows^[5] ging in seinem Gedankenexperiment von dem Vierfachen der damals bekannten Gasvorkommen aus und wählte als Parameter die jährliche Steigerungsrate des Verbrauchs. Wenn nun eine einprozentige Verbrauchssteigerung jährlich zugrunde gelegt wird, wären die Erdgasvorkommen in 120 Jahre erschöpft.

Abb. 3:
Prognose des
Bevölkerungs-
zuwachses und
des Energiever-
brauchs

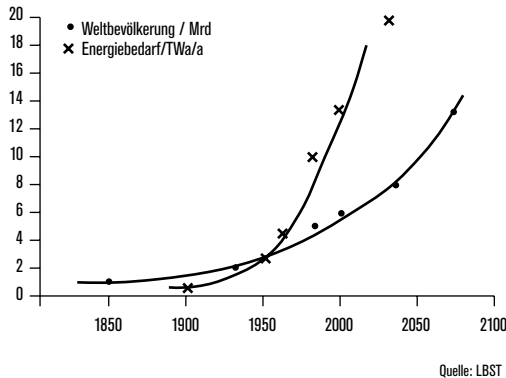
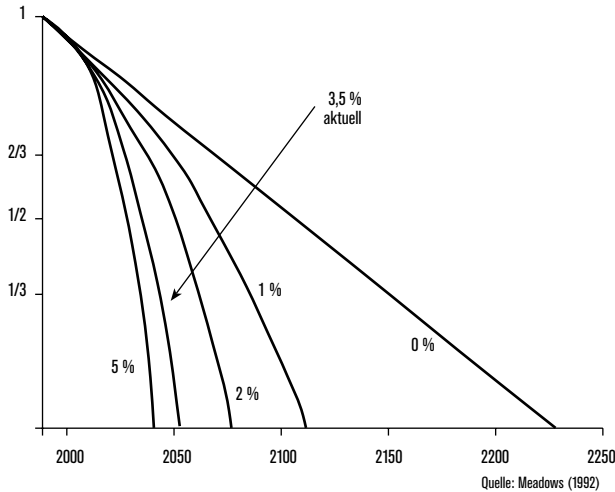


Abb. 4:
Endlichkeit der
Erdgasvorräte

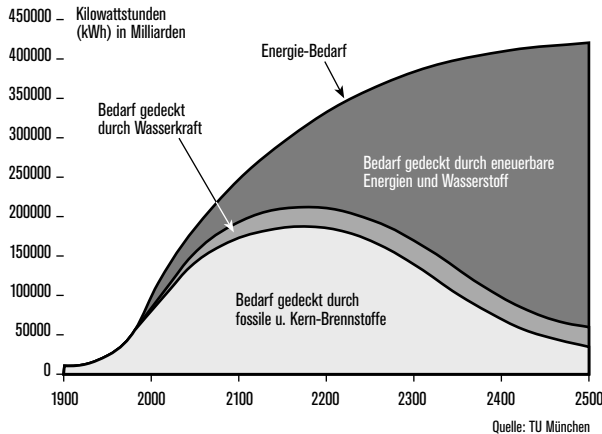


Zurzeit liegt das jährliche Bedarfswachstum aber bei 3,5 %, wodurch sich die Reichweite drastisch verringert.

Noch zwei Beispiele für Verbrauchsprognosen und Deckungsanteile:

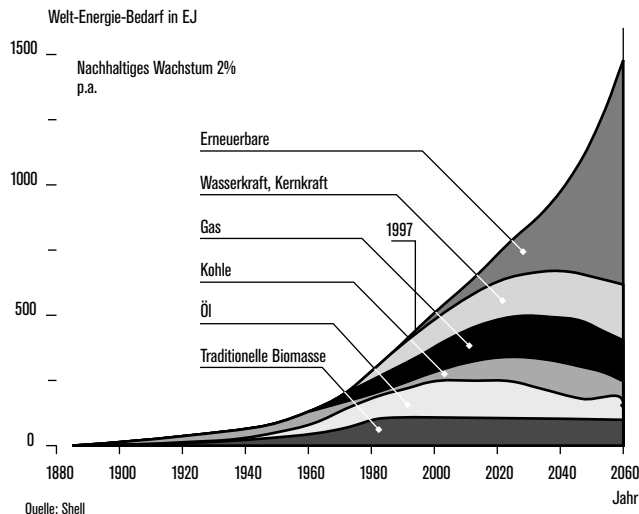
1. Eine Studie der TU München^[6] schätzte für die Mitte des 21. Jahrhunderts einen gegenüber dem Jahr 2000 knapp verdoppelten Energiebedarf sowie für diesen Zeitraum eine Erhöhung des Deckungsanteils der erneuerbaren Energien von 10 auf etwa 20 %.

Abb. 5:
Prognose des
Energiebedarfs
und seiner
Deckung



2. Die Shell-Studie^[7] geht für 2050 gegenüber dem Jahr 2000 von einem 2,5fach höheren Energiebedarf aus und rechnet mit einem fast 50-prozentigen Anteil von erneuerbarer Energie an der Deckung zu diesem Zeitpunkt.

Abb. 6:
Prognose des
Energiebedarfs
und seiner
Deckung



Da bereits lange vor der Erschöpfung von Gas und Öl deren Produktionsvolumen nicht mehr aufrechterhalten werden können, werden diese unweigerlich teurer. Erneuerbare Energien erhalten dadurch bessere Chancen am Markt.

01.4

Erneuerbare Energie und Wasserstoff

Bis auf die Gezeiten und die Geothermie gehen die erneuerbaren Energiequellen mehr oder weniger direkt auf die Sonnenstrahlung zurück. Durch diese Strahlung erhält die Erde etwa das 15.000fache des heutigen Energieverbrauchs. Berücksichtigt man die technischen Möglichkeiten zur Nutzung, so käme von der Sonne immerhin zumindest das Zehnfache des Bedarfs.^[8]

Allerdings verfügen die erneuerbaren Energien über zwei wichtige Merkmale, die den Gebrauch in der Energiewirtschaft erschweren:

1. Sonnenstrahlung, Wind und Wellen sind diskontinuierlich.
2. Die Leistungsdichte ist im Vergleich zu den fossilen Energieträgern relativ gering, außer bei Wasserkraft.

Dies bedeutet, dass nachhaltig gewonnene Energie speicherbar sein muss, zumindest dort, wo keine anderen Energiequellen zur Verfügung stehen.

Tab. 1:
Leistungs-
dichtenvergleich
verschiedener
Energiewand-
lungen

	kWm⁻²	Bemerkungen
Wasserkraft	108,0	6 ms ⁻¹ Strömungsgeschwindigkeit
Wellen	14,5	bei 1 m Wellenfront von 1,5 m Höhe
Windkraft	0,13	6 ms ⁻¹ Windgeschwindigkeit
Sonnenstrahlung	0,12	in Deutschland
Gezeiten	0,002	
Biomasse	0,0002 ¹⁾	
Geothermie	0,00006	
Wärme- kraftwerk	500,0	Rohre im Kessel
Kern- kraftwerk	650,0	Druckgefäß

1) Wird nicht von thermischer Nutzung sondern von Reformierung zu Wasserstoff ausgegangen, so ist 0,001 kWm⁻² erreichbar.

Quelle: Meliß, FH Jülich, 1996

Elektrische Energie lässt sich nur bedingt speichern. Pumpspeicherkraftwerke oder Druckluftspeicher sind an günstige geografische und geologische Verhältnisse gebunden. Gyrospeicher und Supercaps sind typische Kurzzeitspeicher. Batterien und Akkumulatoren sind in ihrer Größe stark eingeschränkt.

Dass Stromspeicherung zudem ihren Preis hat, soll folgendes Beispiel verdeutlichen:

Tab. 2:
Abschätzung
der Strom-
speicher-
kosten
einer Batterie

Speichertyp:	Alkali-Mangan-Batterie R6²⁾
Durchmesser:	14,5 mm
Höhe:	50,5 mm
Spannung:	1,5 V
Kapazität:	2,6 Ah
Energieinhalt:	3,9 x 10 ⁻³ kWh
Preis:	0,60 €
Energiekosten:	153,80 € / kWh

2) Primärzelle – Obwohl diese Batterie kein aufladbarer Akku ist, wird sie als Speicher-möglichkeit betrachtet.

Obwohl die Energiekosten in dem hier ausgewählten Beispiel indiskutabel hoch sind, gelten Batterien als sinnvolle Energiespeicher. Der Preis allein entscheidet also nicht über die Verwendbarkeit. Entscheidend ist vielmehr, welchen Nutzen der Verbraucher davon hat.

Erneuerbare Energien sind für den Verbraucher nur zeitweise nutzbar. Nachhaltig erzeugter Strom muss daher speicherbar gemacht werden, um ihn im Bedarfsfall zur Verfügung zu haben. Dieses Kriterium ist insbesondere dann wichtig, wenn die Umwandlung sowie die Nutzung an einem netzfernen Ort erfolgen sollen. Der Energieträger Wasserstoff verfügt über Eigenschaften, die ihn für diesen Einsatz hervorragend geeignet erscheinen lassen:

- Wasserstoff verbrennt emissionsfrei zu Wasser, wenn nur die Umwandlungsbedingungen darauf ausgerichtet werden.
- Wasserstoff lässt sich in jeder Größenordnung und überall dort elektrolytisch herstellen, wo Strom und Wasser zur Verfügung stehen.
- Wasserstoff ist auf vielerlei Weise speicherbar und übertrifft dabei in der Vielfalt der Möglichkeiten alle anderen Gase.
- Wasserstoff kann wie Erdgas oder Erdölprodukte als Kraftstoff verwendet werden und diese ersetzen.
- Wasserstoff wird dank der Brennstoffzellentechnik direkt verstrombar, ohne den Umweg über Wärme und mechanische Energie gehen zu müssen.

Die Wasserstofftechnik ist nicht nur in der Lage, umweltschädliche Emissionen gänzlich zu vermeiden. Sie realisiert auch innerhalb der Energiewirtschaft einen für mehr Nachhaltigkeit erforderlichen Stoffkreislauf „Wasser – Wasserstoff – Wasser“. Und: Mit Wasserstoff als Kraftstoff kommen erneuerbare Energien in den Bereich der mobilen Energieverbraucher, die ihrerseits etwa ein Drittel der gesamten Emissionen verursachen.

02

Wasserstoff kann kommen

02.1

Geschichte

Entdeckt wurde Wasserstoff als gasförmiges Element sowie als Bestandteil von Wasser durch den Engländer Cavendish um 1780. Zuvor hatte man nicht einmal den Begriff Gas gekannt. Dann aber war schnell klar, dass Wasserstoff das chemische Element mit der geringsten Dichte (weniger als ein Zehntel von Luft) ist. Kurze Zeit später (1783, im Jahr des Aufstiegs der Gebrüder Montgolfier mit einem Heißluftballon) fanden erste Experimente mit wasserstoffgefüllten Ballons statt. Um den Wasserstoff dafür herzustellen, wurde Schwefelsäure über Eisenspäne geleitet.

Der Startschuss für den ersten großtechnischen Einsatz des Energieträgers Wasserstoff wurde 1808 in London gegeben, Gaslaternen für die städtische Beleuchtung kamen auf. Das Stadtgas bestand zu etwa 50 % aus Wasserstoff. Erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde es für Koch- und Heizzwecke vom Erdgas abgelöst.

Tab. 3:
Zusammensetzung von
Stadtgas

Wasserstoff (H ₂)	50 %
Methan (CH ₄)	30 %
Kohlenmonoxid (CO)	9 %
Kohlendioxid (CO ₂)	2 %
Stickstoff (N ₂)	4 – 5 %
Kohlenwasserstoffe (z. B. Äthylen)	4 %

Quelle: Remy

Gegenwärtig erfolgt die Hauptanwendung von Wasserstoff in der chemischen Industrie. Der Aufbau dieser Großindustrie begann mit der Ammoniaksynthese von Fritz Haber (erfunden 1909). Und immer noch dient rund 75 % des produzierten Wasserstoffs der Herstellung von Ammoniak. Etwa acht Prozent benötigt man zur Methanolproduktion. Wasserstoff gilt als Grundstoff für Kunstdünger, Kunststoffe, Sprengstoffe.

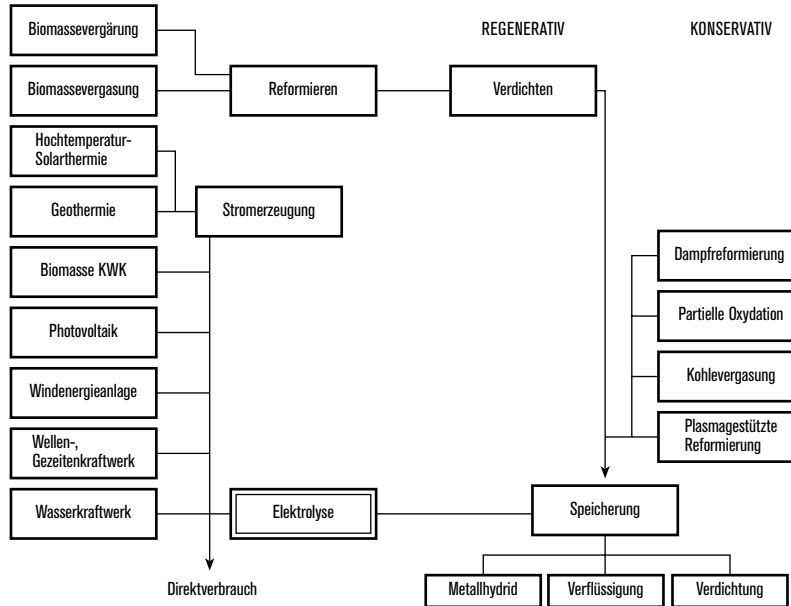
Er spielt weiterhin eine wesentliche Rolle in Raffinerien, bei der Fetthärtung, der Stahlproduktion sowie in der Glas- und Halbleiterindustrie.

02.2 Herstellung

Weltweit werden mehr als 600 Milliarden m³ Wasserstoff hergestellt und verbraucht, wobei nur etwa 1 % davon als Treibstoff für Raketen dient. Der Energieinhalt des insgesamt produzierten Wasserstoffs könnte etwa 1,5 % des Weltenergieverbrauchs decken. Soll zukünftig Wasserstoff für Energiezwecke eingesetzt werden, muss dieser zusätzlich hergestellt werden.

Nachfolgende Übersicht soll die Verfahrensmöglichkeiten verdeutlichen, über die Wasserstoff großtechnisch hergestellt werden kann:

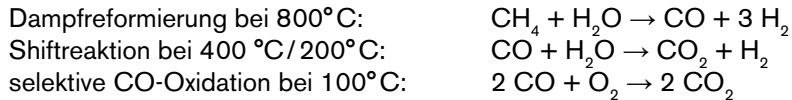
Abb. 7:
Möglichkeiten
der Wasserstoff-
herstellung



Quelle: FH HST 01

Gegenwärtig wird Wasserstoff größtenteils durch **Reformierung von Erdgas** erzeugt. Dieses Verfahren ist technisch ausgereift und ermöglicht somit einen relativ niedrigen Preis.

Die Vorgehensweise bei der Dampfreformierung von Erdgas sieht folgendermaßen aus:



Danach sind noch etwa 20 ppm CO im Wasserstoff enthalten.

Das entstehende Kohlendioxid (CO₂) sollte künftig klimaneutral sequestriert werden, also in künstliche oder natürliche Hohlräume der Erdkruste eingelagert werden.

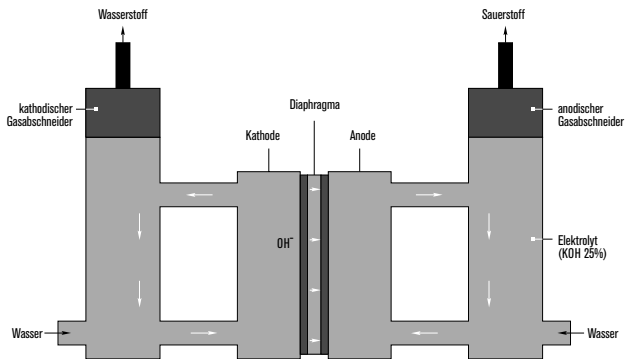
Der **Elektrolyseur** eignet sich als zentrales Bindeglied zwischen erneuerbar erzeugtem Strom und speicherbarem Wasserstoff. Technisch betrachtet steht die Wasserelektrolyse längst zur Verfügung. Sie wurde 1929 erstmals industriemäßig im norwegischen Rjukan durchgeführt, bezeichnenderweise auf der Basis von erneuerbarer Energie bei einem Wasserkraftwerk. Großtechnisch wird sie dort angewandt, wo regelmäßig zuviel Elektrizität anfällt, zum Beispiel am Assuan-Staudamm in Ägypten, aber auch in Kernkraftwerken.

Ebenfalls inzwischen kommerzialisiert sind Elektrolyseure, die mit einer Kunststoffolie als Elektrolyten arbeiten (s. Kap. 2.5 Brennstoffzellen). Diese so genannten PEM-Elektrolyseure haben den Vorteil eines trockenen Elektrolyten und arbeiten bei relativ hohen Drücken. Preislich liegen sie deutlich über den alkalischen Elektrolyseuren.

Abbildung 8 zeigt das Prinzipbild eines alkalischen Elektrolyseurs. An den beiden Elektroden wird Wasserstoff beziehungsweise Sauerstoff abgeschieden. Dazwischen befindet sich das Diaphragma, das den Reaktionsraum trennt. Das Diaphragma muss die Vermischung der Produktgase verhindern und gleichzeitig durch Ionendurchlässigkeit den Stromkreis schließen. Als günstigsten Elektrolyten benutzt man meist 25- bis 30-%ige Kalilauge.

Bei der Herstellung werden die Einzelzellen produktionsfreundlich rund mit sehr kleinen Elektrodenabständen konstruiert und zu Stacks elektrisch in Reihe liegend verbunden. Auf diese Weise lassen sich Elektrolyseure mit nahezu beliebiger Ausgangsleistung bauen. Sie arbeiten bei etwa 80°C mit Drücken unterhalb von 30 bar. Kommerzielle Elektrolyseure dieser Art erreichen derzeit Wirkungsgrade von 75 % (unterer Brennwert des erzeugten Wasserstoffs bezogen auf die zugeführte elektrische Energie). Um Wasserstoff mit dem Energieäquivalent von 1 kWh zu erzeugen, werden knapp 300 ml Wasser verbraucht.

Abb. 8:
Prinzip des
alkalischen
Elektrolyseurs



Quelle: DLR

Die Hochtemperaturelektrolyse muss ihre Praxistauglichkeit erst noch unter Beweis stellen. Ebenso die thermische Spaltung von Wasser (Temperatur > 800°C). Andere Wasserstoff-Herstellungsverfahren – etwa die photoelektrochemische Zerlegung von Wasser oder biologische Möglichkeiten – befinden sich noch im Laborstadium. Für die Zukunft aber gelten sie als außerordentlich interessant.

Preise für die elektrolytische Herstellung von Wasserstoff anzugeben, ist müßig, weil die Zahl an sich nichts aussagt, ohne mit Produktionsumständen, Transportwegen und Mengen kommentiert zu werden. Andererseits lässt sich eine Grundtendenz erkennen. Der Vergleich mit dem aktuellen Kraftstoffpreis (versteuert!) zeigt, dass sauberer Wasserstoff nicht chancenlos ist, zumindest solange er nicht mit einer Steuer belegt wird.

Tab. 4:
Herstellungs-
abhängige
Preise für
Wasserstoff

Verfahren	Kosten	Bemerkung
	Cent / kWh	
Erdgasreformierung	3	Hart, 1997
	4	Wagner, 2000
Wasserkraft / Elektrolyse	9	Hart, 1997, GH ₂
	15	Bünger, 1992, LH ₂
Windenergie / Elektrolyse	23	Hart, 1997
	8 ... 25	Heinicke, 2002
Photovoltaik / Elektrolyse	33 ... 73	Hart, 1997
	75	Wagner, 2000
Biomassevergasung	9	Hart, 1997
	4	Tetzlaff, 2001
Diesel	8,5	Sept. 2000, versteuert

[9], [10], [11], [12]

02.3

Speicherung

Wasserstoff ist das Element mit den kleinsten Atomen und demzufolge das Gas mit der geringsten Dichte. Für den Kraftstoff Wasserstoff ist damit auch eine geringe Energiedichte (Energieinhalt pro Volumeneinheit) verbunden. Bei der Wasserstoffspeicherung ist man deswegen bestrebt, die volumetrische Energiedichte zu erhöhen.

Wie jedes Gas kann Wasserstoff in Druckgefäßen (Stahlflaschen, Kompositbehältern) oder auch in natürlichen oder künstlichen Höhlen unter der Erdoberfläche aufbewahrt werden. Bisher üblich sind dabei Drücke bis zu 350 bar.

Verflüssigt man hingegen Gase, können diese drucklos gespeichert werden (Carl Linde, 1895, Luftverflüssigung bei -193 °C). Für Wasserstoff liegt die Verflüssigungstemperatur unter minus 253 °C. Der Energieaufwand zum Verflüssigen beträgt etwa ein Drittel der im Wasserstoff enthaltenen Energie. Außerdem bedürfen entsprechende Speicherbe-

hälter einer speziellen Wärmeisolierung, um Abdampfverluste möglichst gering zu halten. Abbildung 9 zeigt einen Flüssigwasserstofftank für einen Pkw.

Eine weitere Speichermethode, die bei Wasserstoff in Frage kommt, ist die Einlagerung in Metallen. Wenn metallische Oberflächen sauber (nicht oxidiert) sind, dissoziieren an ihnen Wasserstoffmoleküle. Die entstandenen Atome vermögen dank ihres geringen Durchmessers in das Metall einzudringen und können sich im metallischen Gitter einbinden. Die Bindungsenergie wird dabei freigesetzt, wodurch sich das Material erwärmt. Es entsteht ein Metallhydrid. Fügt man die Bindungsenergie dem Metallhydrid als Wärme zu, wird der Wasserstoff wieder freigesetzt.

Auch diese Speichermethode ist im Prinzip drucklos. Der Wasserstoff erreicht gebunden (bei den bis jetzt entwickelten Materialien) eine Dichte von mehr als dem Doppelten der Dichte flüssigen Wasserstoffs. Deutlicher Nachteil derartiger Speicher ist ihr großes Gewicht. Ihr besonderer Vorteil besteht in einer außerordentlichen Sicherheit. Auch beim

Erhitzen solcher Speicher tritt Wasserstoff nur langsam aus.

Im weiteren Sinne stellen alle wasserstoffhaltigen chemischen Verbindungen wasserstoffspeichernde Substanzen dar. Im Falle der Kohlenwasserstoffe muss allerdings vor der Nutzung des Wasserstoffs eine Reformierung stattfinden.

Alle beschriebenen Möglichkeiten der Speicherung sind technisch erprobt. Bei stationärer Lagerung von Wasserstoff sollte es kein Problem sein, die relativ günstigen Druckspei-

Abb. 9:
Kryotank für
Flüssig-
wasserstoff



Quelle: Linde

cher mit bis zu 300 bar einzusetzen. Im mobilen Bereich führt die geringe Energiedichte des Wasserstoffs jedoch zu großvolumigen Speichern, für die Kraftfahrzeuge üblicherweise nicht ausgelegt sind. Eine Ausnahme bilden Nahverkehrsbusse mit einer relativ geringen täglichen Kilometerleistung. Sie bieten für Druckspeicher auf dem Dach hinreichend Raum.

Tab. 5:
Speicherung
von Wasserstoff

H₂ – Gas		H₂ – flüssig	H₂ – „fest“	H₂ in Verbindungen
1 bar	$\rho = 0,09 \text{ kgm}^{-3}$	$T = -253^\circ\text{C}$	Metallhydride	Kohlenwasserstoffe
350 bar	$\rho = 24,0 \text{ kgm}^{-3}$	$\rho = 71,0 \text{ kgm}^{-3}$	$\rho_{\text{H}_2} > 160 \text{ kgm}^{-3}$	Reformierung
			$T_A \approx 0^\circ\text{C} \dots 400^\circ\text{C}$	erforderlich
700 bar	$\rho = 40,2 \text{ kgm}^{-3}$			
	$1,3 \text{ kWhl}^{-1}$	$2,4 \text{ kWhl}^{-1}$	Nanomaterialien	
			Mg, C, Alanate	salzartige Hydride
Busse		Raketen	Schiffe / Boote	Pkw
Pkw		Flugzeuge	Sonder-	Lkw
Transporter		Pkw	Fahrzeuge	Lokomotiven
Lokomotiven				
STATIONÄR		STATIONÄR	PORTABEL	PORTABEL

Zum Vergleich: Energieinhalt von Diesel ca. 11 kWhl^{-1}

Die Tabelle fasst einige Aspekte der Speichermöglichkeiten von Wasserstoff zusammen und stellt die jeweiligen Energiedichten der von Dieselkraftstoff gegenüber. Wird Druckspeicherung bei 700 bar eingeführt, so erreicht die Energiedichte etwa den halben Wert der von Flüssigwasserstoff. Gewänne man über den Ersatz von Verbrennungsmotoren durch Brennstoffzellen eine Wirkungsgradsteigerung von möglicherweise 50 %, dann wäre für Flüssigwasserstoff die Angleichung an Diesel bereits bis auf den Faktor 2 erreicht, für 700-bar-Druckwasserstoff allerdings nur etwa auf ein Viertel.

Für Raketen ist flüssiger Wasserstoff zum Antrieb die beste Lösung, denn der große

Abb. 10:
Brennstoffzellen-
U-Boot U31 der
Klasse 212A



Flugwiderstand, den großvolumige Speicher (Booster) bieten, wirkt sich nur während der ersten Minuten eines Starts in den dichten Atmosphärenschichten aus. Die wichtige Kenngröße Startmasse wird durch den leichten Treibstoff minimiert. Letzteres gilt auch für Flugzeuge.

Die Stabilität von Schiffen und Booten wird durch Ballastmassen in der Kielregion gesichert. Metallhydridspeicher können hier als Ballast fungieren. Auch bei Spezi-

alfahrzeugen wie Gabelstaplern bringen die kompakten schweren Speicher Vorteile. Das Bild zeigt das seit März 2003 in Seerprobung befindliche U-Boot U 31. Es ist das erste durch PEM-Brennstoffzellen angetriebene Unterseeboot und nutzt Metallhydridspeicher. An weiteren Wasserstoff-Speichersystemen wird intensiv gearbeitet. Erforscht werden unter anderem die Kryo-Adsorption in aktivem Kohlenstoff, Kohlenmaterialien und Alanate.

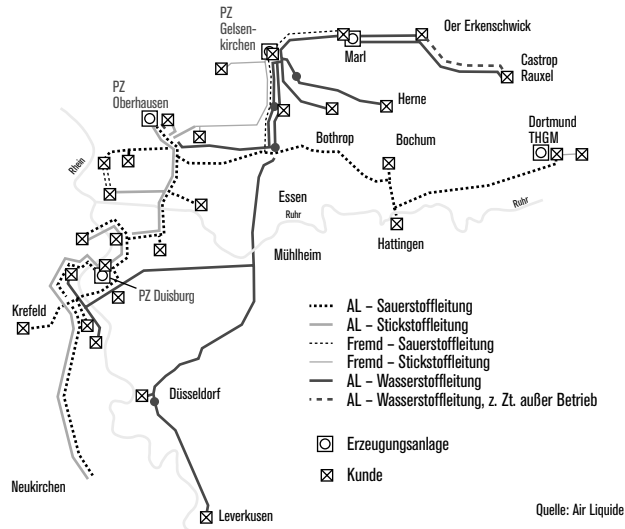
02.4

Verteilung

Mit den Möglichkeiten zur Speicherung von Wasserstoff sind gleichzeitig bereits die für seinen Transport angesprochen worden: Stahlflaschen, Druckflaschenbündel, Flüssiggastransporter, Kryo-Container, das alles wurde entwickelt, technisch erprobt und in den täglichen Gebrauch zu Wasser und zu Lande genommen. Kleinere Metallhydridspeicher für portable Geräte könnten künftig über Baumärkte im Austausch voll gegen leer gehandelt werden. Gleiches ginge auch mit Methanolpatronen.

Bei den bisherigen H_2 -Tankstellen gibt es Stationen, die beliefert werden, und welche, die vor Ort ihren Wasserstoff selber produzieren. Mit den letzteren, wie zum Beispiel in Barcelona und im vorpommerschen Barth, könnte sich ein neues Dienstleistungsgewerbe

Abb. 11:
Industrielles
Pipelinetz im
Ruhrgebiet



entwickeln, das den Markt für Kraftstoffe neuen Mitbewerbern öffnet.

Bisher weitgehend unbekannt ist, dass die Chemieindustrie bereits 1938 damit begann, ein etwa 230 Kilometer langes Rohrleitungssystem für Wasserstoff im Ruhrgebiet zu betreiben. Inzwischen werden auch zwischen Frankreich, Belgien und den Niederlanden (810 km, Air Liquide), im mitteleuropäischen Raum (Leuna, Bitterfeld, Rodleben; etwa 90 km; Linde) und mit mehr als 1000 km in Nord-Amerika (Air

Products) sowie in Thailand und Brasilien Verbundsysteme havariefrei betrieben.

Prinzipiell ist das Erdgasnetz auch für Wasserstoff einsetzbar. Die Verdichter müssten dafür jedoch dem neuen Medium angepasst und einige Materialien sowie Komponenten müssten ausgetauscht werden. Die Wasserstoffbeförderung durch Röhren würde dadurch 1,5- bis 1,8-fach teurer werden als die von Erdgas.^[13] Lange Beförderungswege sollten jedoch vermieden werden, da Wasserstoff überall herstellbar ist. Dezentrale Lösungen könnten typisch werden.

02.5

Energieumwandlung

Die derzeit gängigsten Energiewandler zur Erzeugung kinetischer Energie sind **Verbrennungsmotoren** und Turbinen. Diese Maschinen verfügen über einen hohen Entwick-

Abb. 12:
BMW-Limousine
mit Wasserstoff-
Verbrennungs-
motor



Quelle: BMW

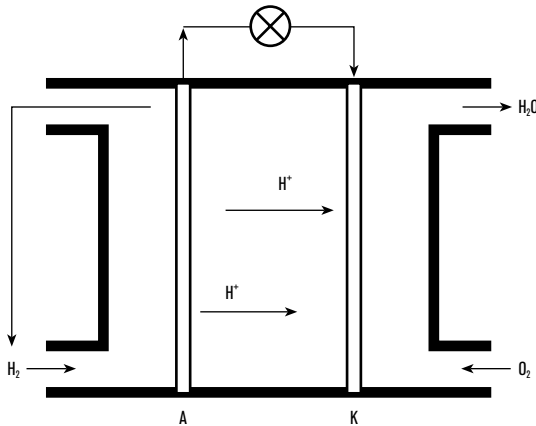
lungsstand und sind grundsätzlich auch für den Betrieb mit Wasserstoff geeignet. Man kann Wasserstoff in unterschiedlichen Anteilen Erdgas ^[14] zumischen und erreicht dadurch eine Verringerung der Emissionen von Kohlendioxid und Schwefelgasen. NO_x-Emissionen können durch Niedrighalten der Verbrennungstemperatur reduziert werden. Oberhalb eines bestimmten Beimischungs-

verhältnisses bzw. bei reinem Wasserstoff als Kraftstoff werden allerdings konstruktive Änderungen und modifizierte Betriebsweisen notwendig. Die bisherige Nennleistung wird nach einer Beimischung nicht mehr erreicht, weil der Brennwert von Wasserstoff nur etwa ein Drittel des Wertes von Erdgas aufweist.

Die größten Erfahrungen mit wasserstoffbetriebenen Ottomotoren hat BMW. Seit 1979 setzt diese Firma derartige mit Flüssigwasserstoff betankte Fahrzeuge ein. Für Dieselmotoren ist die Entwicklung einer Wasserstoffvariante allerdings noch nicht so weit.

Einen besonders großen Beitrag zum Fortschritt der Wasserstoffenergietechnik leisten zur Zeit Forschung und Entwicklung im Bereich der **Brennstoffzellen**. Dabei handelt es sich um elektrochemische Wandler, die die im Wasserstoff enthaltene chemische Energie direkt in elektrische umwandeln. Dadurch verfügen sie über einen höheren Wirkungsgrad als andere Strom erzeugende Prozesse. Zudem funktionieren sie ohne bewegliche Teile, ohne mechanische Reibung und sind geräuscharm. Aus diesen Gründen können die Brennstoffzellen mithelfen, den niedrigen Gesamtwirkungsgrad zu erhöhen. Derzeit beträgt das Verhältnis aus zur Verfügung gestellter und genutzter Energie in Deutschland 10 : 3. ^[15]

Abb. 13:
Prinzip der PEM-
Brennstoffzelle



Quelle: FH HST

Es gibt sechs Typen von Brennstoffzellen, die nach ihrer Arbeitstemperatur in Nieder-, Mittel- und Hochtemperaturzellen eingeteilt werden und in denen durchaus ähnliche Prozesse ablaufen. Benannt werden sie nach dem verwendeten Elektrolyten. Das Prinzip einer Brennstoffzelle sei an der inzwischen schon recht gebräuchlichen PEM-Zelle erklärt:

Als Elektrolyt wird eine Folie eingesetzt, die nur für positiv geladene Wasserstoffatome

me, die Protonen, durchlässig ist (PEM = Proton Exchange Membran). Diese Membran ist beidseitig beschichtet mit porösem, elektrisch leitendem Material, das mit einem Katalysator (am besten Platin) durchsetzt ist. Anodenseitig wird Wasserstoffgas zugeführt. Die Wasserstoffmoleküle dissoziieren unter dem Einfluss des Katalysators, die Atome werden ionisiert. Die entstandenen Protonen durchdringen den Elektrolyten und treffen in der Kathode auf ebenfalls ionisierten Sauerstoff. Dieser wurde dort auch mit Hilfe eines Katalysators erzeugt. Bei dieser so genannten kalte Verbrennung reagiert Wasserstoff mit Sauerstoff zum Endprodukt Wasser.

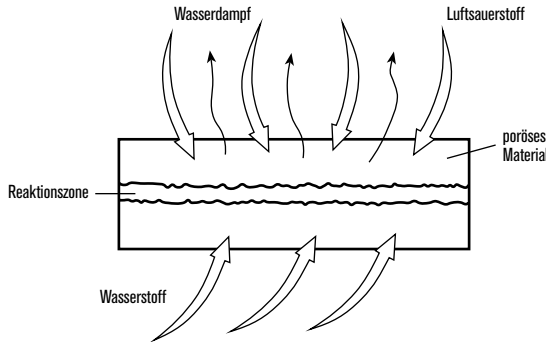
Die Ionisierung von Wasserstoff setzt Elektronen frei, während diese von Sauerstoff benötigt werden. Über eine leitende Verbindung außerhalb der Zelle fließen die Elektronen von der Anode zur Kathode, stellen also einen elektrischen Strom dar, der von Verbrauchern genutzt werden kann. Der Innenwiderstand einer Brennstoffzelle führt zu Wärmeentwicklung. Diese thermische Energie wird abgeführt und sollte ebenfalls genutzt werden, um einen guten Gesamtwirkungsgrad zu erhalten. Das entstehende Wasser ist sauber und trinkbar.

Tab. 6:
Übersicht über
Brennstoffzell-
entypen

Bezeichnung	Arbeits- temperatur	Elektrolyt	Anwendung	Kraft- stoff	Bemerkung
AFC alkalisch	60 - 90 °C	30 - 50 % Kalilauge	stationär, mobil	H ₂	CO ₂ -freie Reaktanden erforderlich
PEMFC Polymer-Elektrolyt	bis 80 °C	polymere Membran	mobil, portabel Hausheizungen Kraft-Wärme- Kopplung, APU	H ₂	sehr breites Anwendungs- gebiet
DMFC Direkt-Methanol	bis 80 °C	polymere Membran	portabel, mobil	Methanol	kleinere Leistungen
PAFC Phosphorsäure	160 - 220 °C	konzentrierte Phosphorsäure	Kraft-Wärme- Kopplung	Erdgas	externe Reformierung
MCFC Schmelzkarbonat	ca. 650 °C	Li ₂ CO ₃ / Na ₂ CO ₃	Kraft-Wärme- Kopplung	Erdgas Biogas	interne Reformierung
SOFC Festoxid	> 800 °C	ZrO ₂ / Y ₂ O ₃	Hausheizungen APU Kraft-Wärme- Kopplung	Erdgas	interne Reformierung

Wärme zum Kochen oder Heizen lässt sich mit **katalytischen Brennern** gewinnen. Wasserstoff und Sauerstoff verbinden sich auch unterhalb der Verbrennungstemperatur, wenn sich die Reaktion an katalytisch wirksamen Oberflächen vollzieht. Hierfür werden poröse Brennererelemente aus keramischen oder metallischen Materialien benutzt. Die katalytische Wirkung von Nickel reicht aus. Temperaturen bis zu einigen hundert Grad Celsius können je nach Art des Katalysators und der Diffusionsverhältnisse eingestellt werden. Ein Kochgerät dieses Prinzips würde sich insbesondere für Regionen eignen, in denen es nicht ausreichend Brennmateriale gibt, aber Wasserstoff mit Hilfe erneuerbarer Energien erzeugt werden kann. ^[16]

Abb. 14:
Prinzip des
katalytischen
Brenners



Quelle: Veziroglu, Barbir

Eine grundsätzliche Diskussion der Effizienz wird hier aus Platzgründen ausgespart, weil dazu umfangreiche Vergleiche unterschiedlicher Verfahrensketten notwendig wären. Hierzu wird auf die Well-to-Wheel Studie der LBST verwiesen. ^[17]

02.6 Sicherheit

Drei durch Kennwerte beschreibbare Eigenschaften sind für den sicheren Umgang mit Wasserstoff besonders wichtig:

Dichte: Als Gas mit der geringsten Dichte steigt freigesetzter Wasserstoff stets hoch. Bei Arbeiten ist daher für eine gute obere Be- und Endlüftung zu sorgen.

Diffusionskoeffizient: Als Element mit dem kleinsten Atomdurchmesser bewegen sich Wasserstoffmoleküle in Luft schneller als andere Teilchen. Wasserstoffatome diffundieren in Materialien ein und können sich in ihnen bewegen, wodurch in bestimmten Metallen Versprödung verursacht werden kann.

Explosionsgrenzen in Luft: Sobald sich mehr als 4 Vol.-% Wasserstoff in Luft befindet, kann sich das Gemisch entzünden. Erst bei mehr als 75 Vol.-% Wasserstoffanteil hört die Entzündbarkeit auf. Dieser Bereich ist größer als bei anderen gasförmigen Kraftstoffen.

Man kann vereinfachend formulieren, fast jedes Wasserstoff-Luft-Gemisch ist entzündlich. Demzufolge sind die Ansprechwerte für Sensoren entsprechend niedrig zu halten. Die Realisierung dieser Forderung ist technisch unproblematisch. Es gibt Wasserstoffsensoren mit unterschiedlichen Wirkprinzipien, die außerordentlich gute Empfindlichkeiten aufweisen.

Für die heutige Zeit und jeglichen Umgang mit Wasserstoff wäre undenkbar, auf den Einsatz von Sensoren zu verzichten, wie es hundert Jahre lang bei der Stadtgasnutzung üblich war und noch heute bei der von Erdgas im nicht kommerziellen Bereich praktiziert wird.

Zur Sicherheit bei zunehmender Herstellung und Nutzung von Wasserstoff gehört auch, dass die möglicherweise ansteigende Wasserstoff- bzw. OH-Konzentration in der Troposphäre auf eventuelle klimaschädigende Auswirkungen untersucht wird. Gemäß einer aktuellen Arbeit von Schultz u. a.^[18] sei jedoch mit keinen bedeutenden Einflüssen zu rechnen. Natürlich sollten nicht größere Mengen Wasserstoffs freigesetzt werden und möglichst kein zusätzliches Kohlendioxid durch seine Herstellungsverfahren in die Atmosphäre gelangen.

Tab. 7:
Sicherheits-
relevante
Kenngrößen

Kenngrößen		Wasserstoff	Methan	Benzin
Unterer Heizwert	kWs / g	120	50	44,5
Selbstentzündungstemperatur	°C	585	540	228-501
Flammentemperatur	°C	2045	1875	2200
Zündgrenzen in Luft	Vol. %	4-75	5,3-15	1,0-7,6
Minimale Zündenergie	mWs	0,02	0,29	0,24
Verbrennungsgeschwindigkeit in Luft (stöchiometrisches Gemisch)	m / s	2,37	0,42	0,42
Detonationsgrenzen	Vol. %	13-65	6,3-13,5	1,1-3,3
Detonationsgeschwindigkeit	km / s	1,48-2,15	1,39-1,64	1,4-1,7
Theoretische Explosionsenergie	kg TNT / m ³ Gas	2,02	7,03	44,22
Diffusionskoeffizient in Luft	cm ² /s	0,61	0,16	0,05

Quelle: DLR

Insgesamt sollen die Werte der Tabelle belegen, dass sich Kraftstoffe hinsichtlich ihrer Gefährlichkeit wenig unterscheiden. Der Wert für die minimale Zündenergie hat praktisch kaum Bedeutung, da ohnehin die kleinsten Schaltfunken mehr als die aufgeführten Energien freisetzen.

03

Einführung eines neuen Energieträgers

Wasserstoff ist ein auf vielerlei Weise herstellbarer Energieträger. Wasserstoff macht Strom speicherbar. Er ermöglicht stoffliche (Wasser-Wasserstoff-Wasser) und energetische (Strom-Wasserstoff-Strom) Kreisläufe, die die Umwelt deutlich weniger beeinträchtigen, als beim Einsatz fossiler Energieträger. Elektrizität und Wasserstoff stellen damit wichtige Säulen für die Nachhaltigkeit in einer modernen Energiewirtschaft dar.

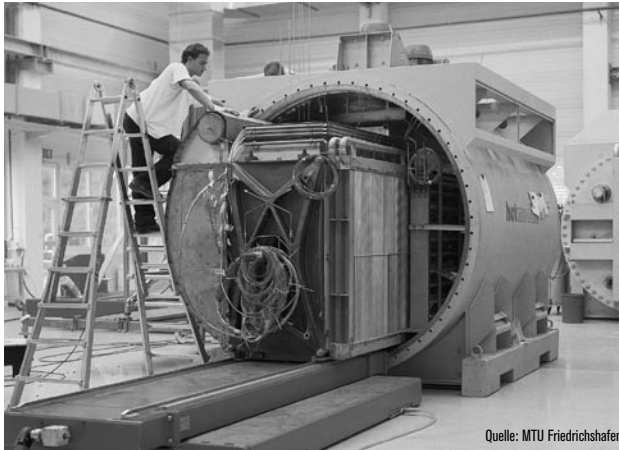
Mit erneuerbaren Energien und Wasserstoff kann man emissionsfreie autarke Energieversorgungssysteme für eine dezentrale Nutzung einrichten. Ohne zusätzliche Emissionen könnte somit eine Stromversorgung in entlegenen Regionen auch ohne die Verwendung fossiler Ressourcen sichergestellt werden. Das wäre ein wichtiger Schritt hin zu mehr Energiegerechtigkeit auf dieser Welt.

Auch in den Transportsektor können erneuerbare Energien mit Hilfe von Wasserstoff Einzug erhalten. Er würde mehr Unabhängigkeit von Ölimporten bringen, wodurch ein Stück weit globale Entspannung praktiziert werden könnte.

Erfahrungsgemäß vollziehen sich Änderungen in der Energiewirtschaft eher langsam. Zeiträume von einigen Jahrzehnten waren nötig, um aus reiner Kohlenutzung einen Energiemix zu machen. Die Anteile von Erdöl, Erdgas, Kernspaltung und Wasserkraft wuchsen nur langsam. Auch Windkraft, Sonnenstrahlung und Biomasse steigern ihren Beitrag jetzt nur schrittweise, denn der Energiemarkt ist groß. Aber ohne unser Zutun vollzieht sich gar keine Entwicklung.

Drei Wirtschaftssparten haben die Bedeutung des Energieträgers Wasserstoff für ihre Zu-

Abb. 15:
Schmelzkarbonat
Brennstoffzelle
(HotModule)



kunft begriffen und investieren zunehmend in diesen Bereich: Automobilindustrie, Stromversorgungsunternehmen, Heizungsfirmen. Hinzu kommen der 4C-Markt (Computer, Camcorder, Cordless Phones & Tools) sowie der Freizeitbereich (Camping und Boote) mit Klein- und Kleinst-Anwendungen.

In Hausheizungssysteme werden PEM- oder Festoxid-Brennstoffzellen bereits teilweise integriert. Diese decken die Grundlast ab, ein Brenn-

wertkessel springt bei Spitzenlast an. Der erzeugte Strom wird ins Netz eingespeist. Künftig wird eine Vielzahl solcher Anlagen virtuelle Kraftwerke darstellen. Pilotprojekte gibt es beispielsweise in Bielefeld, Brake, Düsseldorf, Gelsenkirchen, Groningen, Hamburg, Kasel, Machern bei Leipzig, Oldenburg, Remscheid und Ulm.

Versuchsanlagen mit 250-kW-Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen sind ebenfalls bereits außerhalb der Entwicklungsbetriebe im Probelauf (u. a. in Bad Berka, Bad Neuheim, Bielefeld, Dorsten, Magdeburg, Karlsruhe und München). Auch Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit PEMFC wurden bereits in Berlin und Mingolsheim erprobt.

Besonders stark engagierten sich die Automobilkonzerne und mit ihnen die Gaseindustrie sowie Mineralölunternehmen. Weltweit sind bereits mehr als 200 Tankstellen für Wasserstoff in Betrieb, vor allem innerhalb der kalifornischen Fuel Cell Partnership, im Großraum Tokyo-Yokohama beim Japan Hydrogen Fuel Cell Demonstration Project, im Rahmen des CUTE-Projekts in Europa und in Deutschland, in München, Hamburg und Berlin, wo 2004 mit dem Probееinsatz von Fahrzeugen verschiedener Hersteller die Clean Energy Partnership gestartet wurde.

Abb. 16:
PEMFC Citaro
Stadt-Bus am
Stuttgarter
Schlossplatz



Abb. 17:
H₂-Tankstelle
am Flughafen
München



Im Pkw-Bereich begann Daimler Mitte der 1970er Jahre Ottomotoren mit Wasserstoff zu betreiben. Diese Versuche wurden 1984 bis 1988 mit einem Flottenexperiment (10 Fahrzeuge, Metallhydridtanks, Aral-Tankstelle) in Berlin abgeschlossen. An der NECAR-Reihe von DaimlerChrysler konnte man verfolgen, wie die Brennstoffzellentechnik immer kleinere Antriebssysteme hervorbrachte, so dass schließlich Antrieb und Tank ohne räumliche Einschränkung der Nutzung in die A-Klasse (F-Cell) passten.

Opel ging mit dem Brennstoffzellen-Zafira auf Tour rund um den Erdball, betreibt in Washington seit 2004 mehrere HydroGen3-Modelle und hat außer der Versorgung mit flüssigem Wasserstoff und 35-MPa-Druckwasserstoff auch ein 70-MPa-Betankungssystem in Erprobung.

Unter Beteiligung aller namhaften Automobilhersteller fah-

Abb. 18:
Opel Zafira
HydroGen3



ren weltweit einige hundert Prototypen mit PEM-Brennstoffzellenantrieben. Ab 2010 soll es im regulären Vertrieb um Marktanteile für die entwickelten BZ-Autos gehen.

Bei verschiedenen Herstellern werden PEMFC- oder SOFC-Aggregate im 5-kW-Bereich für die Pkw-Bordstromversorgung getestet. Solche APU

(Auxiliary Power Units) sind zudem für Nutz-, Wasser- und Luftfahrzeuge in Entwicklung.

Eine besondere Erwähnung verdienen mit Brennstoffzellen ausgestattete Nahverkehrsbusse. Das kanadische Unternehmen Ballard Power Systems begann 1993 mit ersten Versuchen und hatte bereits in den Jahren 2000 bis 2001 sechs Busse in Vancouver und Chicago im Linieneinsatz. Deren maximale Laufleistung lag bei 25.000 Kilometern.

Ein MAN-Bus mit Siemens-PEMFC wurde 2000/2001 in Nürnberg und Erlangen über 8.000 km erfolgreich erprobt. Ein Nachfolgemodell mit Brennstoffzellen-Hybrid-Antrieb ist seit Anfang 2004 am Flughafen München im Einsatz. Innerhalb des Projektes CUTE (Clean Urban Transport), eines EU-geförderten Vorhabens, wurden insgesamt 27 Daimler Chrysler Citaro-Busse in neun europäischen Großstädten eingesetzt. Start war im Mai 2003 in Madrid. Ab Januar 2004 waren alle Busse in Betrieb. Zudem führen drei dieser Busse im ECTOS Projekt in Reykjavik. Weitere drei Modelle wurden 2004 nach Perth, Westaustralien, geliefert und drei weitere gingen nach Beijing, China. 2005 wurde CUTE erfolgreich abgeschlossen und durch das Nachfolgeprojekt HyFLEET:CUTE abgelöst.

Die UNO unterstützt zudem mit einer 50-%igen Beteiligung ein Vorhaben in fünf smoggequälten Metropolen, um auch in sich entwickelnden Ländern Wasserstoffbusse einzuführen. Den City-Bussen kommt somit eine wesentliche Bedeutung zu, um den Abgasausstoß in Ballungsgebieten verringern zu können.

Abb. 19:
Wasserstoff-
tankstelle im
Klärwerk Barth



Das Ziel der Europäischen Union lautet, bis zum Jahr 2020 rund 20 % des Energiebedarfs aus erneuerbaren Energiequellen zu decken.^[19]

Die Zielsetzung bedeutet, bis 2020 etwa 5 % des Kraftstoffs für Fahrzeuge durch Wasserstoff zu ersetzen. Solche Ziele sind nur durch gemeinsame Anstrengungen von Politik und Industrie erreichbar, wobei die Politik für die Rahmenbedingungen verantwortlich ist.

Die Frage dabei ist, wie eine flächendeckende Infra-

struktur für den in so vieler Hinsicht bedeutsamen Kraftstoff auch in Deutschland errichtet werden kann. Einzelne Unternehmen sind sicherlich damit überlastet, ein Tankstellen- und Handelssystem in Eigenarbeit zu entwickeln. Aber ohne diese Infrastruktur wird die Autoindustrie ihre Entwicklungen nicht in Serien auflegen. Politik und Wirtschaft sollten daher gemeinsam ein Planungsnetzwerk entwerfen, eine Roadmap für die Einführung des Energieträgers Wasserstoff. Der Deutsche Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband hat einen entsprechenden Entwurf vorgelegt, der mittlerweile schon umfassend diskutiert wird.

Japan ist so gut wie hundertprozentiger Energieimporteur. Folgerichtig hat das Land eine führende Position inne bei der Entwicklung hin zum Kraftstoff Wasserstoff. Bereits 1993 wurde von MITI mit zugesicherter Finanzierung über zehn Jahre die Forschungs-offensive WE-NET eröffnet. Inzwischen gibt es das nationale Millennium-Programm und bereits zehn H₂-Tankstellen im Großraum Tokio-Yokohama im Rahmen des JHFC-Projekts. Weitere Tankstellen in vergleichbaren Zahlen sind in den nächsten Jahren in den

Ballungsräumen von Osaka, Nagoya und Sapporo geplant. Japan ist auf dem Weg zu 50.000 BZ-Fahrzeugen im Jahr 2010 oder kurz danach und zu 5 Mio. BZ-Fahrzeugen und 4.000 Tankstellen im Jahre 2020.

Island – reich an erneuerbaren Energiequellen – will bis 2030 frei von Erdölimporten werden, indem es den Verkehr und die Fischereiflotte mit Wasserstoff versorgt. Die damalige Industrieministerin eröffnete im April 2003 in Reykjavik die erste Wasserstofftankstelle, an der auch Citaro-Busse tanken.

Die USA, der größte Energieverbraucher weltweit, ließ 2003 aufhorchen: In der Rede zur Lage der Nation wurde ein nationales Wasserstoffprogramm ausgerufen, finanziert über verschiedene Teilprojekte mit insgesamt 1,7 Milliarden US-\$ bis 2008/2009. Die Zielsetzung lautet auch dort, unabhängig von Ölimporten zu werden. Die Euphorie, mit der diese Wegweisung im Lande aufgenommen wurde, erinnerte Beobachter an die Zeiten des Apollo-Programms. Wie damals wird geklotzt. Wer nicht dabei ist, wird Lizenzen kaufen.

In Frankreich wird ebenfalls „klar und deutlich die Förderung des Energieträgers Wasserstoff“ befürwortet.^[20] Eine solche Positionierung stand in Deutschland lange Zeit aus. Im Frühjahr 2006 wurde jedoch ein Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzellen vorgestellt, zu dem sowohl Bundesministerien als auch Wirtschaft jeweils etwa 700 Mio. Euro beisteuern werden.

Zuvor erfolgte die Förderung von Wasserstoff/Brennstoffzellen über Forschungsprogramme der Europäischen Union, an denen sich auch deutsche Forschergruppen beteiligten. Im ausgelaufenen 6. Rahmenprogramm wurden 300 Mio. Euro zur Verfügung gestellt. Auch durch die Bundesministerien für Forschung sowie Bildung und Arbeit wurden und werden regelmäßig Fördergelder für Brennstoffzellen ausgegeben. Dadurch konnten in den 1980er und 1990er Jahren wegweisende Projekte realisiert werden. Beim BMWA erfolgte jedoch seit 1995 keine Unterstützung mehr für Wasserstofftechnologie und auch von anderer Seite hatte in den letzten vier bis fünf Jahren die Förderung deutlich nachgelassen. Die deutsche Industrie ist im Wasserstoff noch stark vertreten, orientiert sich jedoch an international vorteilhaften Rahmenbedingungen und fand diese bisher vornehmlich außerhalb Europas.

International scheint Wasserstoff endgültig im Blickpunkt der großen Politik zu stehen: Japans Ministerpräsident Koizumi lässt sich in Wasserstoffautos zu seinen Terminen chauffieren, US-Energieminister Abraham hat im November 2003 in Washington die Welt zu einer Wasserstoff-Partnerschaft versammelt (IPHE), und auch die Europäische Kommission hat sich von einem hochrangigem Beratergremium nachdrücklich energische Anstrengungen empfehlen lassen. Europa arbeitet am Aufbau der Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform sowie an der mittelfristigen Förderung von H₂ & BZ innerhalb des 7. Rahmenprogramms und an der längerfristigen Förderung im Rahmen der Growth Initiative und der geplanten Joint Technology Initiative (JTI).

In Deutschland bietet das 2006 aufgelegte Nationale Innovationsprogramm nunmehr die Chance, auf breiter Linie bei Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien aufzuschließen und die Voraussetzungen dafür zu erarbeiten, dass wir auch in dieser Sparte ein starkes Exportland werden.

04 Thesen

- Das Erreichen der Ziele zur Verringerung der CO₂-Emissionen, die Erkenntnis, dass die Verminderung der Abhängigkeit von Erdöl und Erdgas eine weltpolitische Entspannung fördert, und das absehbare Ende der fossilen Energierohstoffe erfordern den Einsatz von Wasserstoff als Energieträger.
- Dank der Möglichkeit der wechselseitigen Umwandlung von Elektrizität und Wasserstoff stellen diese beiden sauberen Energieträger Säulen in einer nachhaltigen Energiewirtschaft dar.
- Die seit mehr als 100 Jahren praktizierte Nutzung von Wasserstoff vor allem in der chemischen Industrie, aber auch als Kraftstoff, hat zu Erfahrungen geführt, die seine sichere Handhabung bei Erzeugung, Speicherung, Verteilung und Wandlung ermöglichen.
- Die Fortschritte in den Brennstoffzellentechnologien lassen erkennen, dass die Energiewirtschaft auch hinsichtlich der stationären, der mobilen und der portablen Verbraucher von tiefgreifenden Veränderungen ergriffen werden wird.
- Der allmähliche Übergang zum Energieträger Wasserstoff, der an vielen Stellen durch zunehmende Nutzung von Erdgas und Biogasen und möglicherweise auch verstärkt über Kohlevergasung beschritten wird, ist unumkehrbar.
- Um bei den anstehenden Veränderungen in der Energiewirtschaft Schritt zu halten und die Exportfähigkeit der Industrie zu stärken, sind in Deutschland ein politisches Bekenntnis zum Energieträger Wasserstoff erforderlich wie auch ein länderübergreifendes Konzept zur Schaffung der Infrastruktur für Energiewasserstoff.

05 Quellen

05.1 Referenzen

- [1] *Forschungszentrum Umwelt (FZU)* a. d. Universität Karlsruhe (Inst. IWC), 2001
- [2] *Rahmsdorf, S.*, Bild der Wissenschaft, Heft 1, 2003
- [3] *v. Weizsäcker, E. U.*, u. a., Faktor 4, Droemer/Knauer, München, 1996
- [4] *Winter, C.-J.*, Hrsg., On Energy-of-Change, The Hydrogen Solution, München, 2000, (a) S. 149 – 160, (b) S. 67 – 82, 3-932425-31-6
- [5] *Meadows, D.H.*, u. a. Beyond the Limits, London, 1992, 1-85383-130-1
- [6] *Institut für Energie- und Kraftwerkstechnik*, Technische Universität München, 1995
- [7] *Energy Needs, Choices and Possibilities*, 1994, www.shell.com
- [8] *Solarer Wasserstoff*, DLR, Stuttgart, 1990
- [9] *Tetzlaff, K.-H.*, Das Treibhausproblem lösen und die Energiekosten senken – das geht, Shaker Verlag, Aachen, 1999, 3-8265-6631-9
- [10] *Hart, D.*, Hydrogen Power, Financial Times Energy Publ. London, 1997, 1-85334-760-4
- [11] *Bünger, U.*, u. a., NHEG-Studie, LBST, 1990
- [12] *Heinicke, M.*, Diplomarbeit, FH Stralsund, 2002
- [13] *Wasserstoff – Energieträger der Zukunft*, Association Francaise de l'Hydrogene, 2002, S. 8
- [14] *Hoekstra, R.*, u. a., WHEC X, Cocoa Beach, 1994, Proc. 1781 – 1796
- [15] *Schnurnberger, W.*, REGWA 2002, Stralsund, Tagungsband 113 – 122
- [16] *Großmann, U.-P.*, u. a., Int. J. Hydr. Energy 25 (2000), 1, 87 – 90
- [17] *J. Schindler, W. Weindorf, R. Wurster*, Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel / Vehicle Systems, Ottobrunn, 27th September 2002
- [18] *Schultz, M. G., T. Diel, G. P. Brassner, W. Zittel*, Science 302(2003), 624-627
- [19] *Directive 2003/30/EC on the promotion of the use of biofuels or their renewable fuels for transport*, L123/42 Official Journal of the European Union, 08 May 2003
- [20] *Geitmann, S.*, Wasserstoff und Brennstoffzellen, Hydrogeit Verlag, Kremmen, 2004, 3-937863-04-4

05.2

Weiterführende Literatur

- *Commission to the European Parliament*, Proposal for a directive of the European parliament and of the council on the promotion of the use of biofuels for transport, 92/8/EEC, COM(2001) 547, Brussels, 7.11.2001
- *Geitmann, S.*, *Wasserstoff-Autos*, Hydrogeit Verlag, Kremmen, 2006, 3-937863-07-9
- *Kordesch, K., Simader, G.*, *Fuel Cells and Their Applications*, VCH Verlagsgesellschaft mbH Weinheim, 1996, 3-527-28579-2
- *Ledjeff-Hey, K., Mahlendorf, F., Roes, J.*, *Brennstoffzellen*, C. F. Müller Verlag Hüthig, Heidelberg, 2001, 3-7880-7629-1
- *Karamanolis, S.*, *Wasserstoff*, Elektra Verlags-GmbH, Neubiberg, 2001, 3-929226-16-2
- *Pehnt, M.*, *Energierévolution Brennstoffzelle*, Wiley-VCH, Weinheim, 2002, 3-527-30511-4
- *Weber, R.*, *Der saubere Brennstoff*, Verlag für verständliche Wissenschaft und Technik, Oberbözberg, 1991, 3-907175-13-1
- *Winter, C.-J., Nitsch, J.*, *Wasserstoff als Energieträger*, Springer Verlag, Berlin 1989, 3-540-50221-1

06

Geschichte

- Empedokles** 5. Jh. v. Chr., 4 Elemente Erde, Wasser, Luft, Feuer
- Helmond um 1600**..... Es existieren auch andere luftartige Stoffe: Gas
- Cavendish, 1766**..... Metall + Schwefelsäure → Salz + *brennbare Luft*

$$\text{Zn} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{ZnSO}_4 + \text{H}_2 \uparrow$$
- Scheele, 1772/73 &** entdecken den Sauerstoff: *Feuerluft*
- Priestley, 1774**
- Cavendish, 1781** verbrannte *brennbare Luft* mit *Feuerluft*

$$2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$$
- Lavoisier, 1787** schlägt die Namen „oxygène“ und „hydrogène“ vor
- A.C. Charles, 1783**..... Start eines 25 m³ Wasserstoffballons
- van Troostwyck, 1789**..... Elektrolyse – Wasserstoff
- London 1808** Gaslight
- um 1820** Doebereinersches Feuerzeug
- Grove, 1839**..... Gas Chain
- Haber, 1909** Ammoniaksynthese: Wasserstoff wird zum Grundstoff der chemischen Industrie
- Schmid, um 1925** Gasdiffusionselektrode mit Pt
- Rjukan, 1929** Industrielle Elektrolyse
- von Ohain, 1937** Strahltriebwerk mit Wasserstoff
- um 1950** Wasserstoff für Raketenantrieb
- seit 1960** Übergang von Stadtgas zu Erdgas
- NASA, 1963**..... Brennstoffzelle (PEMFC) im Gemini-Projekt
- NASA, 1968**..... Brennstoffzelle (AFC) auf den Mond
- seit etwa 1970**..... Internationale Gemeinschaftsforschung zur Fusion

$${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$$

07 Kontaktadressen

Baden-Württemberg

*Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)
Geschäftsbereich Elektrochemische Energiewandlung und -speicherung*

Prof. Dr. Werner Tillmetz

Helmholtzstr. 8, 89801 Ulm

Tel.: (0731) 9 530 - 607, Fax: -666

URL: www.zsw-bw.de, E-Mail: werner.tillmetz@zsw-bw.de

Bayern

*Koordinationsstelle der Wasserstoffinitiative Bayern
c/o Forschungsstelle für Energiewirtschaft*

Prof. Dr. Ulrich Wagner

Am Blütenanger 71, 80995 München

Tel.: (089) 158 121 - 0, Fax: -10

URL: www.wiba.de, E-Mail: wiba@ffe.de

Hamburg

*Wasserstoff-Gesellschaft Hamburg e.V.
c/o Handelskammer Hamburg, GB Innovation Umwelt*

Herr Hubert Grimm

Adolphsplatz 1, 20457 Hamburg

Tel.: (040) 36 138 381, Fax: -269

URL: www.h2hh.de, E-Mail: hubert.grimm@hk24.de

Hessen

Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Initiative Hessen e.V.
c/o InfraserV GmbH & Co. Höchst KG

Dr. Heinrich Lienkamp

Industriepark Höchst, Geb. E281, 65926 Frankfurt am Main

Tel.: (069) 305 - 7571, Fax: -20646

URL: www.wasserstoff-hessen.de, E-Mail: Heinrich.Lienkamp@InfraserV.com

Mecklenburg-Vorpommern

Wasserstofftechnologie-Initiative Mecklenburg-Vorpommern e.V.

Dr. Gerhard Buttkewitz

Schonenfahrerstraße 5, 18057 Rostock

Tel.: (0381) 12 887 - 35, Fax: -11

URL: www.wti-mv.de, E-Mail: info@wti-mv.de

Nordrhein-Westfalen

Landesinitiative Zukunftsenergien NRW

c/o ee energy engineers GmbH

Dr. Frank-Michael Baumann

Am Technologiepark 1, 45307 Essen

Tel.: (0201) 172 - 1349, Fax: -1848

URL: www.energieland.nrw.de, E-Mail: baumann@energieland.nrw.de

Rheinland-Pfalz

Kontakt über Herrn Jürgen Hansen

Am Ballplatz 2a, 55116 Mainz

Tel.: (06131) 9639 - 40, Fax: -41

E-Mail: jhansen@t-online.de

Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V.

Post: Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

Telefon: (0700) 49 376 - 835

Telefax: (0700) 49 376 - 329

Internet: www.dwv-info.de

E-Mail: h2@dwv-info.de

Der DWV dankt allen seinen Mitgliedern, die durch ihre Zuarbeit, Diskussionsbeiträge und kritischen Hinweise an der Fertigstellung dieser Broschüre maßgeblich beteiligt waren.

Redaktion: Jochen Lehmann

Zusammenstellung: Ortrud Luschtinetz

Druck: Quickprinter

Cover-Design: Volker Blandow

Satzgestaltung: Andreas Wolter

© DWV, Erstauflage 2002, überarbeitet 2006 & 2007

Erschienen 2007 im **Hydrogeit Verlag**, Kremmen

ISBN: 978-3-937863-08-5



Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V.
German Hydrogen and Fuel Cell Association

Unter den Eichen 87
12205 Berlin
Germany

Telefon (0700) 49376 835

Fax (0700) 49376 329

E-Mail h2@dwv-info.de

Internet www.dwv-info.de