

Wasserstoff

- Der neue Energieträger -

Eine Einführung

**Deutscher
Wasserstoff- und
Brennstoffzellen-
Verband e.V.**

Internet: <http://www.dwv-info.de>
Post: Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

E-Mail: h2@dwv-info.de
Telefon: (0700) 49376-835
Telefax: (0700) 49376-329

Frau Ortrud Lushtinetz, Rostock-Toitenwinkel, sei für das Zusammenstellen des Textes herzlich gedankt. Gleichfalls danken wir allen DWV-Mitgliedern, die durch Zuarbeit, Diskussionen und kritische Hinweise an der Fertigstellung beteiligt waren.

Redaktion: Jochen Lehmann

© DWV, 2005

Vor Ihnen liegt eine Einführung in die Wasserstoff-Energietechnik. Sie soll eine Brücke zu den in der Referenzliste (S. 21) empfohlenen Büchern sein und jedem ermöglichen, sich zu den Umbrüchen in und der Zukunft der Energiewirtschaft eine Meinung zu bilden. Wir alle werden davon betroffen sein.

Der DWV

WASSERSTOFF trägt im Periodensystem der 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. Unter Aufwand von Energie lässt er sich rein darstellen und wird dadurch zum Energieträger, denn die bei der Rückreaktion wieder frei werdende Energie ist nutzbar.

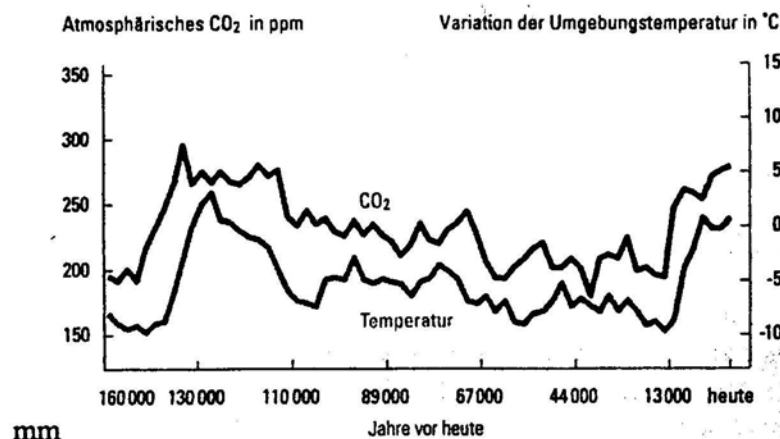
1 Wasserstoff als Energieträger - eine Notwendigkeit

1.1 Das Klimaproblem

Neben Ozonloch, Smog und saurem Regen hat sich erwiesen, dass auch der Treibhauseffekt wesentlich auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen ist. Die Korrelation von atmosphärischem CO₂-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, bewiesen werden. Seit dem Ende der letzten Eiszeit, vor 12.000 Jahren, stieg die mittlere Temperatur um etwa 10 K. Die Bestimmung des Gehalts an Kohlendioxid in im Eis eingeschlossenen Luftbläschen ergab für den gleichen Zeitraum einen Anstieg um etwa 40 %. Daran gemessen ist die Erkenntnis erschreckend, dass der CO₂-Gehalt allein während der letzten 250 Jahre mit der Entwicklung der Industrie um ein Viertel zugenommen hat /12/ und der antropogene Anteil an den Treibhausgasen im 20. Jahrhundert nach Modellrechnungen mit ca. 0,6 K zur Temperaturerhöhung beitrug /13/.

Abbildung 1:
CO₂-Gehalt der
Atmosphäre

Quelle:
Die „Vostock“-
Messung /11/



Die vieldiskutierten Auswirkungen der Erwärmung werden zu schwerwiegenden Eingriffen und Veränderungen in allen Bereichen führen. Selbst wenn das Erreichen der Kyoto-Verminderungsziele Milderung brächte, kurzzeitig lässt sich eine Gleichgewichtsstörung nicht beheben. Es kommt darauf an, das Menschenmögliche zu tun und um jedes Zehntel Kelvin Nichterhöhung oder Erniedrigung zu ringen. Den Ernst der Lage erkennt man daran, dass Versicherungsfachleute bereits begonnen haben abzuschätzen, welche Schäden durch die Folgen der Klimaveränderungen entstehen /14a/.

1.2 Gefahrgüter Erdöl und Erdgas

Ganz abgesehen von der CO₂-Emission beim Verbrennen fossiler Kraftstoffe, die Schädigung der Umwelt beginnt bereits bei der Förderung von Erdöl und –gas, bei Verschmutzungen, vor denen die Öffentlichkeit nur zu gern die Augen verschließt.

Abbildung 2:

Tankerhavarie



Auch ausströmendes Erdgas trägt zum Treibhauseffekt bei. Zerstörte Natur findet sich im Gefolge des Abbaus in Alaska und Mittelamerika, in Sibirien, am Kaspischen Meer und im Orient. Gewinn geht vor Sicherheit beim Transport über Land und Meer: Undichtigkeiten an Pipelines, Tankerunfälle ... Die Langzeitauswirkungen von Havarien sind kein Thema mehr für die Zeitungen. Nichts ist mehr irgendwo, weit weg. Wir sind beteiligt: Naturparadiese liegen zu beiden Seiten des Nadelöhrs der Ostsee, der Kadetrinne, das dänische Moen, der deutsche Darß. Jährlich steigt die Zahl der Tankerpassagen.

1.3 Endlichkeit der Ressourcen

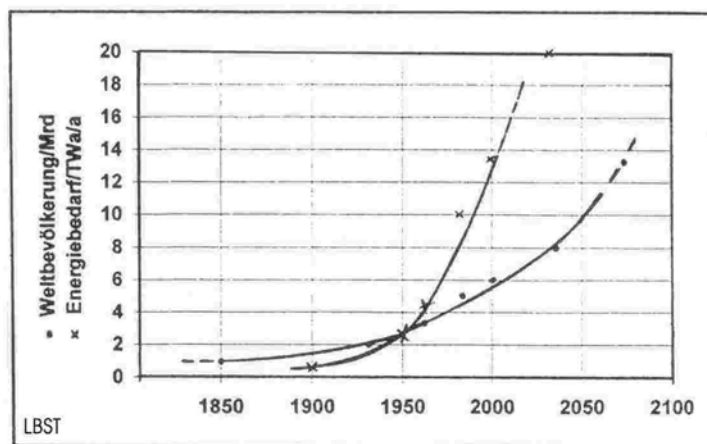
Die Menschheit wächst und damit ihr Energiebedarf.

Doch: Wie kommen die Menschen eigentlich dazu, die fossilen Reichtümer ihrer Erde, die sich in Jahrtausenden gebildet haben, innerhalb einiger hundert Jahre zu verbrennen? Man müsste an die nachfolgenden Generationen denken. Man sollte sich bewusst sein, dass die fossilen Brennstoffe auch Chemierohstoffe sind. C.-J. Winter stellt es in den Zusammenhang: Zwischen der ersten (vorindustriellen) und der zweiten (postfossilen) Zivilisation ist die Ära der fossilen Energieträger ein Augenblick, nicht mehr /14b/.

Abbildung 3:

Prognose des Bevölkerungszuwachses und des Energieverbrauchs

Quelle: LBST



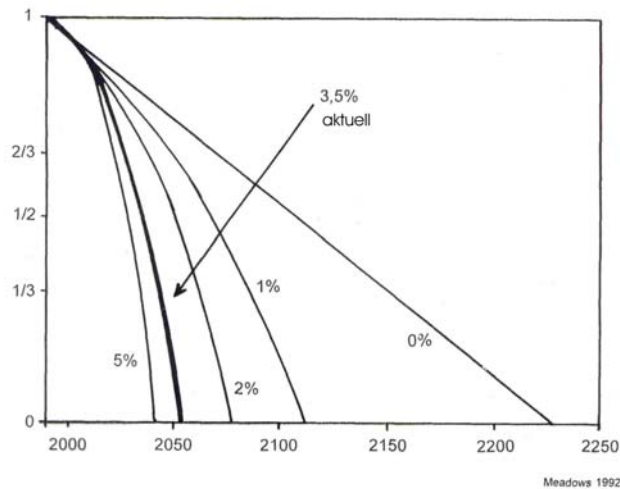
Auch wenn in unseren Tagen die Abschätzungen über das Ende von Erdgas, Erdöl und Kohle durch Entdeckung neuer Vorkommen immer wieder relativiert werden, über den Rückgang dieser Energieträger herrscht Einigkeit und über die künftige Bedeutung der erneuerbaren Energien auch.

Für Erdgas sei das Beispiel einer mehr als zehn Jahre alten parametrischen Über-

Abbildung 4:

Bewusstsein für die Endlichkeit der Erdgasvorräte – Eine Parameterstudie

Quelle:
Meadows – Die neuen Grenzen des Wachstums, 1992



legung angeführt. Meadows /15/ geht in seinem Gedankenexperiment von dem Vierfachen der damals bekannten Gasvorkommen aus und wählt als Parameter die jährliche Steigerungsrate des Verbrauchs. Wenn nur eine 1 %ige Verbrauchssteigerung jährlich zugrunde gelegt werden könnte, wären die Erdgasvorkommen erst in 120 Jahre erschöpft. Zur Zeit aber liegt das jährliche Wachstum bei 3,5 %.

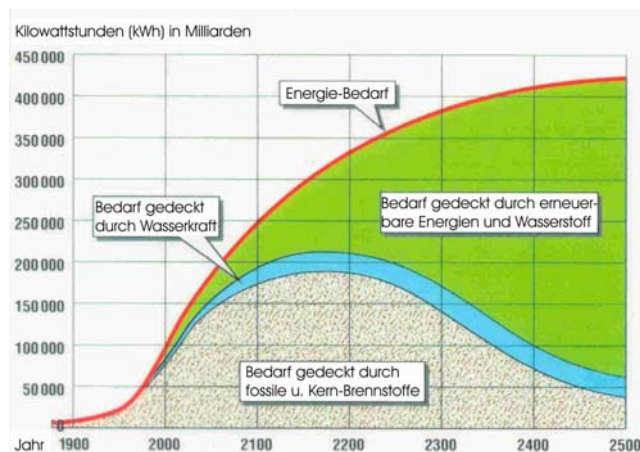
Noch zwei Beispiele für Verbrauchsprognosen und Deckungsanteile:

Eine Studie der TU München /16/ schätzt 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 %. Die Shell-Studie /17/ geht gegenüber dem Jahr 2000 von einem 2,5fach höheren Energiebedarf 2050 aus und rechnet mit einem fast 50 %igen Anteil von erneuerbarer Energie an der Deckung zu diesem Zeitpunkt.

Abbildung 5:

Prognose des Energiebedarfs und seiner Deckung

Quelle:
TU München

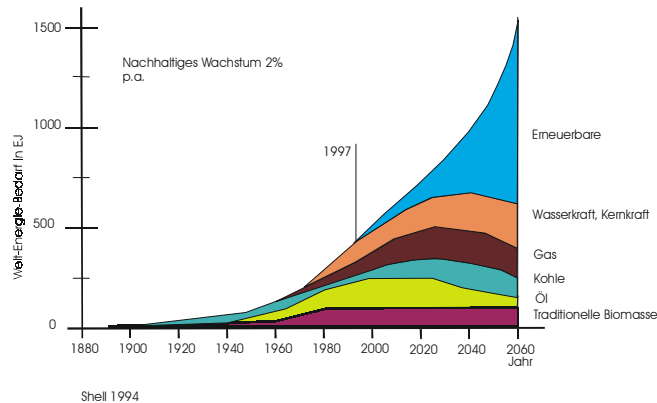


Da bereits lange vor der Erschöpfung von Gas und Öl deren Produktionsvolumen nicht mehr aufrecht erhalten werden kann, werden diese teurer und erhalten erneuerbaren Energien zusätzliche Chancen am Markt.

Abbildung 6:

Prognose des Energiebedarfs und seiner Deckung

Quelle:
TU München



1.4 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 derzeitigen Energieverbrauchs. Berücksichtigt man die technischen Möglichkeiten zur Nutzung, so käme von der Sonne immerhin zumindest das Zehnfache des Bedarfs /18/.

Allerdings haben die Erneuerbaren zwei hinsichtlich ihres Gebrauchs in der Energiewirtschaft wichtige Merkmale: Sonnenstrahlung, Wind und Wellen sind diskontinuierlich, und mit Ausnahme der Wasserkraft sind erneuerbare Energien bezüglich der Leistungsdichte bei den Wandlungsprozessen deutlich den durch die fossilen Energieträger geprägten Ansprüchen unterlegen. Beides bedeutet, dass erneuerbar gewonnene Energie speicherbar sein muss, zumindest dort, wo man ausschließlich mit ihnen auskommen will oder muss.

Tabelle 1:

Leistungsdichten bei Energieumwandlungen

Quelle:
Meliß, FH Jülich, 1996

	kWm ⁻²	Bemerkungen	
Wasserkraft	108	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		
Wärmeleistung	500	Rohre im Kessel	
Kernleistung	650	Druckgefäß	Meliß '96

¹⁾Wird nicht von thermischer Nutzung sondern von Reformierung zu Wasserstoff ausgegangen, so ist 0,001 kWm⁻² erreichbar /5/.

Bei Wärme ist Speicherung im Wesentlichen ein Problem der Isolierung. Elektrizität lässt sich nur bedingt speichern: Pumpspeicherkraftwerke oder Druckluftspeicher sind an günstige geografische und geologische Verhältnisse gebunden, Batterien und Akkumulatoren sind in ihrer Größe beschränkt. Dass Speicherung darüber hinaus ihren Preis hat, soll die kleine Rechnung zeigen.

Tabelle 2:

Abschätzung der
Stromspeicherkosten
einer Batterie

Alkali-Mangan-Batterie R6 ²⁾		
Typ VARTA Durchmesser	14,5 mm	Spannung 1,5 V
Höhe	50,5 mm	Kapazität 2,6 Ah
Energieinhalt = Spannung x Stromstärke x Zeit = $3,9 \cdot 10^{-3}$ kWh		
Angenommener Preis der Batterie: 0,6 €		
Eine kWh würde dann 153,8 € kosten.		

²⁾ Bemerkte sei, dass es sich bei dem gewählten Beispiel um eine Primärzelle handelt, also nicht um einen Energiespeicher im Sinne eines aufladbaren Akkus. Rein praktisch wird die Batterie aber als Speichermöglichkeit betrachtet.

Erneuerbar erzeugter Strom muss also speicherbar sein, insbesondere wenn die Umwandlung nicht an einem netzeingebundenen Ort erfolgt. Der Energieträger Wasserstoff hat Eigenschaften, die ihn für diesen Einsatz hervorragend geeignet erscheinen lassen:

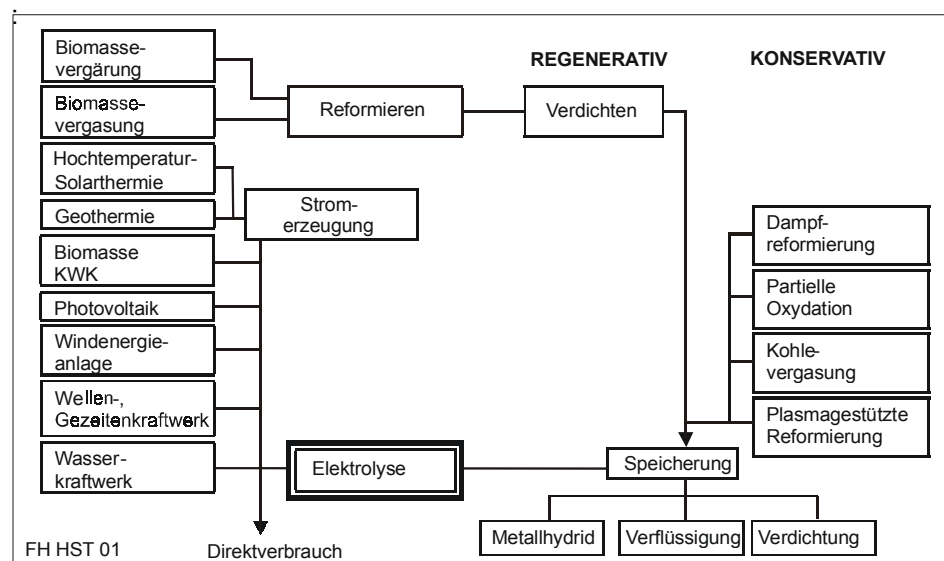
- Wasserstoff verbrennt emissionsfrei zu Wasser, wenn nur die Umwandlungsbedingungen darauf ausgerichtet werden.
- Wasserstoff lässt sich überall dort und in jeder Größenordnung elektrolytisch herstellen, wo Strom und Wasser zur Verfügung stehen.
- Wasserstoff ist auf vielerlei Weise speicherbar und 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 Brennstoffzellentechnologien direkt verstrombar, ohne den Umweg über Wärme und mechanische Energie gehen zu müssen.

Die Wasserstofftechnik ist nicht nur in der Lage, umweltschädliche Emissionen zu vermeiden, sondern sie realisiert auch innerhalb der Energiewirtschaft einen für die Nachhaltigkeit zu fordernden Stoffkreislauf „Wasser – Wasserstoff – Wasser“. Und: Mit Wasserstoff als Kraftstoff kommt eine erneuerbare Energie in den Bereich der mobilen Energieverbraucher, die etwa ein Drittel der Emissionen verursachen. Nachfolgende Übersicht soll die Wege verdeutlichen, über die Wasserstoff großtechnisch hergestellt werden kann :

Abbildung 7:

Möglichkeiten der
Wasserstoff-
herstellung

Quelle:
FH HST 01



Gegenwärtig wird etwa 95% des Wasserstoffs durch Reformierung von Erdgas erzeugt und damit ein sehr niedriger Preis für das Produkt vorgegeben.

Der Elektrolyseur erweist sich als zentrales Bindeglied zwischen erneuerbar erzeugtem Strom und speicherbarem Wasserstoff.

2 Wasserstoff als Energieträger kann kommen.

2.1 Geschichtliches

Entdeckt wurde Wasserstoff als gasförmiges Element und Bestandteil von Wasser durch den Engländer Cavendish um 1780. Lange Zeit hatte man nicht einmal den Begriff „Gas“ gekannt. Dann aber war schnell herausgefunden, dass Wasserstoff das chemische Element mit der geringsten Dichte – weniger als 10 % der von Luft – ist, und folgerichtig fanden bereits 1783, im Jahr des Aufstiegs der Gebrüder Montgolfier mit einem Heißluftballon, Experimente mit wasserstoffgefüllten Ballons statt. Um den Wasserstoff dafür herzustellen, wurde Schwefelsäure über Eisenspäne geleitet.

Der Startschuss für den ersten großtechnischen Einsatz von Wasserstoff als Energieträger wurde 1808 in London mit der Einführung der Gaslaternen zur städtischen Beleuchtung gegeben. 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.

Tabelle 3:

Zusammensetzung
des Stadtgases

Quelle:
Remy 1959

Stadtgas: 50 % H ₂
30 % CH ₄
9 % CO
2 % CO ₂
4 – 5 % N ₂
sowie ca. 4 % Kohlenwasserstoffe wie Äthylen
REMY 1959

Die Hauptanwendung von Wasserstoff erfolgt gegenwärtig in der chemischen Industrie. Mit der Ammoniaksynthese von Fritz Haber (1909) und dem entsprechenden technischen Verfahren begann der Aufbau dieser Großindustrie. 75 % des produzierten Wasserstoffs dient der Herstellung von Ammoniak, 8 % benötigt man zur Methanolproduktion. Damit wird Wasserstoff ein Grundstoff für Kunstdünger, Kunststoffe, Sprengstoffe, er spielt eine Rolle in den Raffinerien, bei der Fetthärtung, in der Glas- und Halbleiterindustrie. Weltweit werden mehr als 600 Milliarden m³ Wasserstoff hergestellt und verbraucht, etwa 1 % davon als Treibstoff für Raketen. Vom Energieinhalt her könnte diese Menge Wasserstoff etwa 1,5 % des Weltenergieverbrauchs decken. Künftig für Energiezwecke einzusetzender Wasserstoff muss zusätzlich hergestellt werden.

2.2 Herstellung von Wasserstoff

Wenn die Reformierung von Erdgas als Verfahren benutzt oder von anderen fossilen Energieträgern ausgegangen werden sollte, wäre die bisher noch nicht praktizierte Sequestrierung des Kohlendioxids vorzusehen, beispielsweise seine Einlagerung in künstliche oder natürliche Hohlräume der Erdkruste.

Tabelle 4:

Schritte der
Dampfreformierung
von Erdgas

<p>Dampfreformieren bei 800° C: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$ Shiftreaktion bei 400/200° C: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ Selektive CO-Oxidation bei 100° C: $2 \text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2$ Danach sind noch etwa 20 ppm CO im Wasserstoff enthalten.</p>
--

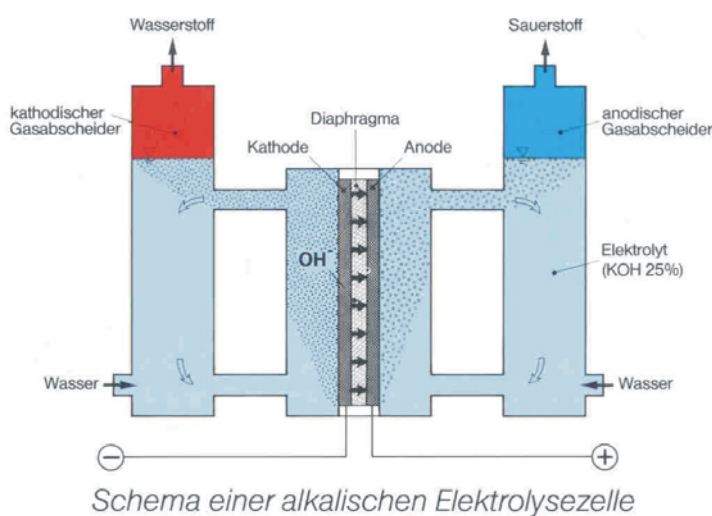
Vom Stand der Technik her steht die Wasserelektrolyse zur Verfügung. Sie wurde 1929 erstmals industriemäßig im norwegischen Rjukan durchgeführt, bezeichnenderweise auf der Basis von erneuerbarer Energie, an einem Wasserkraftwerk. Großtechnisch wird sie angewendet, wenn regelmäßig zuviel Elektrizität anfällt, z. B. am Assuan-Staudamm, üblicherweise aber auch in Kernkraftwerken.

Das Prinzipbild einer Einzelzelle eines alkalischen Elektrolyseurs zeigt außer den beiden Elektroden, an denen Wasserstoff bzw. Sauerstoff abgeschieden werden, das den Reaktionsraum trennende Diaphragma. Dieses hat einerseits die Vermischung der Produktgase zu verhindern, andererseits durch Ionendurchlässigkeit den Stromkreis zu schließen. Als günstigsten Elektrolyten benutzt man im Allgemeinen 25-30 %ige Kalilauge. Um Wasserstoff mit dem Energieäquivalent von 1 kWh zu erzeugen, werden knapp 300 ml Wasser verbraucht.

Abbildung 8:

Prinzip des Alkalischen Elektrolyseurs

Quelle:
DLR



Quelle: DLR

Einzelzellen werden produktionsfreundlich rund mit sehr kleinen Elektrodenabständen konstruiert und zu Stacks elektrisch in Reihe liegend verbunden. Auf diese Weise lassen sich Elektrolyseure nahezu beliebiger Ausgangsleistung bauen. Sie arbeiten bei etwa 80° C mit Drücken unterhalb von 3 MPa. Kommerzielle Elektrolyseure dieser Art erreichen derzeit Wirkungsgrade von 75 %, wobei die im erzeugten Wasserstoff enthaltene Energie, sein unterer Brennwert, zu der dem Elektrolyseur zugeführten elektrischen Energie ins Verhältnis gesetzt wird.

Ebenfalls inzwischen kommerzialisiert sind Elektrolyseure, die mit einer – später bei den Brennstoffzellen zu besprechenden – Kunststoffolie als Elektrolyten arbeiten. Diese sogenannten PEM-Elektrolyseure haben den Vorteil eines trockenen Elektrolyten und arbeiten bei noch höheren Drücken. Preislich liegen sie deutlich über den alkalischen Elektrolyseuren.

Ihre Praxistauglichkeit müssen noch die Hochtemperaturelektrolyse und auch die thermische Spaltung von Wasser (Temperatur > 800° C) erwerben. Andere Verfahren, Wasserstoff herzustellen, etwa die photoelektrochemische Zerlegung von Wasser oder biologische Möglichkeiten befinden sich im Laborstadium. Für die Zukunft aber gelten sie als außerordentlich interessant.

Tabelle 5:
Herstellungs-
abhängige
Preise für
Wasserstoff

Verfahren	Kosten Cent/kWh	Bemerkung
Erdgas- reformierung	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
Biomasse- vergasung	9	Hart, 1997
	4	Tetzlaff, 2001
Diesel /4, 5, 19, 20/	8,5	Sept. 2000, versteuert

Die Tabelle fasst Preise zusammen, welche für die elektrolytische Herstellung von Wasserstoff angegeben wurden. Eigentlich ist es müßig, Preise anzugeben, weil die Zahl an sich nichts aussagt, ohne mit Produktionsumständen, Transportwegen und Mengen kommentiert zu werden. Andererseits lässt sich wohl an der Anzahl der Zitate eine Grundtendenz erkennen. Verglichen werden sie mit dem Preis für großstechnisch aus Erdgasreformierung gewonnenen Wasserstoff ohne Sequestrierung des Kohlendioxids. Während der letztgenannte Preis durch erneuerbar erzeugten Wasserstoff wohl schwer zu erreichen sein wird, zeigt der Vergleich mit dem in der letzten Zeile der Tabelle genannten aktuellen Preis für Dieselmotorkraftstoff (versteuert!), dass sauberer Wasserstoff nicht chancenlos auf dem Markt sein sollte, zumindest solange er nicht mit einer Steuer belegt wird

2.3 Speicherung von Wasserstoff

Wasserstoff ist das Element mit den kleinsten Atomen und demzufolge das Gas mit der geringsten Dichte. Als Kraftstoff ist damit eine geringe Energiedichte (Energieinhalt pro Volumeneinheit) verbunden. Wasserstoff speichern bedeutet deshalb auch bestrebt zu sein, die Energiedichte zu erhöhen.

Wie jedes Gas kann Wasserstoff in Druckgefäßen (Stahlflaschen, Kompositbehälter) oder auch in natürlichen oder künstlichen Höhlen unter der Erdoberfläche aufbewahrt werden. Bisher üblich sind dabei Drücke bis zu 35 MPa. Proportional zum Druck steigen Dichte und Energiedichte.

Verflüssigt können Gase drucklos aufbewahrt werden (Carl Linde, 1895, flüssige Luft 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. Um Abdampfverluste möglichst gering zu halten, werden Flüssigwasserstofftanks hoch isoliert. Die Energiedichte verflüssigten Wasserstoffs beträgt das Doppelte der von Druckwasserstoff bei 35 MPa. - Das Bild zeigt einen Flüssigwasserstofftank für einen PKW.

Abbildung 9:

Kryotank für
FlüssigwasserstoffQuelle:
Magna 2003

Eine weitere Speichermethode gibt es nur bei Wasserstoff: Wenn metallische Oberflächen sauber (nicht oxidiert) sind, dissoziieren an ihnen Wasserstoffmoleküle. Die entstandenen Wasserstoffatome vermögen dank ihres geringen Atomdurchmessers, in das Metall einzudringen. Im metallischen Gitter können sie eingebunden werden. Dann entsteht Metallhydrid und die Bindungsenergie wird frei, d. h. das Material erwärmt sich. Fügt man die Bindungsenergie dem Metallhydrid als Wärme zu, so 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 lecker Speicher tritt Wasserstoff nur langsam aus.

Im weiteren Sinne stellen alle wasserstoffhaltigen chemischen Verbindungen wasserstoffspeichernde Substanzen dar. Im Falle der Kohlenwasserstoffe muss vor der Nutzbarkeit des Wasserstoffs eine Reformierung stattfinden. Erwähnt seien weiterhin die mit Wasser zu Wasserstoff reagierenden Hydride (NaH, LiBH₄, NaBH₄ u.a.), die Möglichkeiten zur on board - Erzeugung von Wasserstoff bieten.

Alle beschriebenen Möglichkeiten der Speicherung sind technisch erprobt. Bei stationärer Lagerung von Wasserstoff sollte es kein Problem sein, die relativ billigen Druckspeicher mit bis zu 30 MPa einzusetzen. Im mobilen Bereich führt die geringe Energiedichte des Wasserstoffs zu großvolumigen Speichern, auf die Kraftfahrzeuge üblicherweise nicht ausgelegt sind. Eine Ausnahme bilden die Nahverkehrsbusse mit einer relativ geringen täglichen Kilometerleistung. Sie bieten für Druckspeicher auf dem Dach hinreichend Raum.

Tabelle 6:

Angaben zur
Speicherung von
Wasserstoff

H ₂ – Gas	H ₂ – flüssig	H ₂ – „fest“	H ₂ in Verbindungen
0,1 MPa ρ = 0,09 kgm ⁻³ 35,0 MPa ρ = 24,0 kgm ⁻³	T = -253°C ρ = 71,0 kgm ⁻³	Metallhydride ρ _{H₂} > 160 kgm ⁻³ T _A ≈ 0°C...400°C	Kohlenwasserstoffe Reformieren erforderlich
70,0 MPa ρ = 40,2 kgm ⁻³ 1,3 kWhl ⁻¹	2,4 kWhl ⁻¹	Nanomaterialien Mg, C Alanate	Salzartige Hydride
Zum Vergleich: Energieinhalt von Diesel ca. 11 kWhl ⁻¹			
Busse PKW Transporter Lokomotiven	Raketen Flugzeuge PKW	Schiffe / Boote Sonder- fahrzeuge	PKW LKW Lokomotiven
STATIONÄR	STATIONÄR	PORTABEL	PORTABEL

Die Tabelle fasst einige Aspekte der Speichermöglichkeiten von Wasserstoff zusammen und stellt die jeweiligen Energiedichten der von Dieselmotoren gegenüber. Es werden Hinweise auf Verbesserungspotentiale gegeben, um den Aktionsradius für wasserstoffbetriebene Kraftfahrzeuge bei gleichem Speichervolumen dem von

konventionell betankten anzugleichen. Gleichzeitig werden Beispiele angeführt, wo die Wasserstoffspeicherung bereits ideale Lösungen bietet.

Wird Druckspeicherung bei 70 MPa 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 70-MPa-Druckwasserstoff allerdings nur etwa auf ein Viertel.

Für Raketen ist flüssiger Wasserstoff zum Antrieb die beste Lösung, denn der große 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 als Ballast fungieren. Auch bei Spezialfahrzeugen wie Gabelstaplern bringen die kompakten schweren Speicher Vorteile. Das Bild zeigt das seit März 2003 in Seeerprobung befindliche U 31. Es ist das erste durch PEM-Brennstoffzellen angetriebene U-Boot und nutzt Metallhydridspeicher. Betont sei, dass gegenwärtig an neuen Wasserstoff-Speichersystemen intensiv gearbeitet wird. Dazu gehören unter anderem die Kryo-Adsorption in aktivem Kohlenstoff, Karbonmaterialien und Alanate.

Abbildung 10:

Übergabe von U31

Quelle:
HDW 2003



2.4 Verteilung

Mit den Möglichkeiten zur Speicherung von Wasserstoff sind praktisch auch die für seinen Transport angesprochen worden: Stahlflaschen, Druckflaschenbündel, Flüssiggastransporter, Kryocontainer, 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.

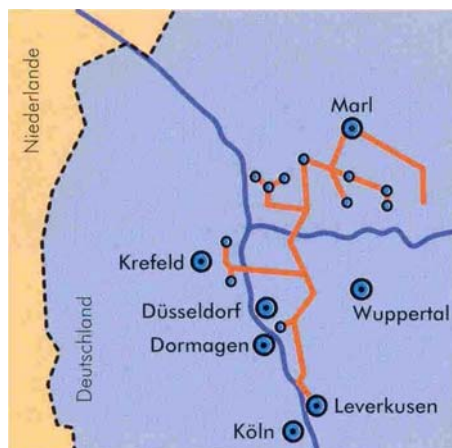
Bei den Tankstellen wird es belieferte geben, aber auch selbst produzierende. Mit den letzteren, wie denen in Barcelona oder im vorpommerschen Barth an Photovoltaikanlagen angeschlossenen, könnte sich ein neues Dienstleistungsgewerbe entwickeln, das den Markt für Kraftstoffe neuen Mitbewerbern öffnet.

Weitgehend unbekannt ist, dass die Chemieindustrie bereits 1938 damit begann, ein ca. 230 km langes Rohrleitungssystem für Wasserstoff im Ruhrgebiet zu betreiben. Inzwischen werden auch zwischen Frankreich, Belgien und den Niederlanden (810 km, Air Liquide), im mitteldeutschen Raum (Leuna, Bitterfeld, Rodleben; etwa 90 km; Linde) und mit mehr als 1000 km in Nordamerika (Air Products) sowie in Thailand und Brasilien Verbundsysteme havariefrei betrieben.

Abbildung 11:

Industrielles
Wasserstoffnetz im
Ruhrgebiet

Quelle:
Air Liquide



Prinzipiell ist das Erdgasnetz für Wasserstoff einsetzbar; die Verdichter müssten dem neuen Medium angepasst, bestimmte Materialien, bestimmte Teile ausgetauscht werden. Einfach umzustellen würde sicherlich nicht und schon gar nicht sicher funktionieren. Die Wasserstoffbeförderung durch Röhren wird 1,5 – 1,8 fach teurer sein als die von Erdgas /21/. Andererseits: Wasserstoff kann überall hergestellt werden. Dezentrale Lösungen sollten typisch für seinen Einsatz werden und Transporte vermindern.

2.5 Umwandlung von Wasserstoff

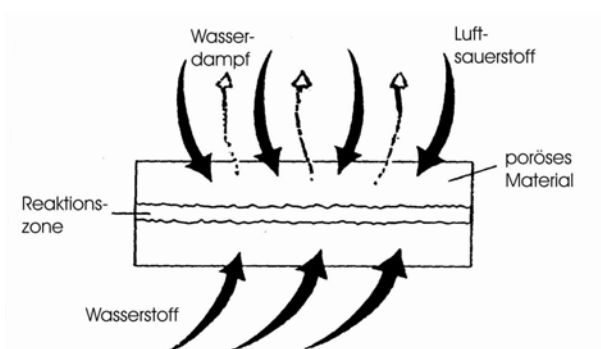
Wasserstoff kann auf konventionelle Weise oder auf der Basis erneuerbarer Energiequellen produziert werden. Je nach Aufwand lässt sich die Umweltverträglichkeit der Verfahren ausgestalten. Letzteres gilt auch für die Rückverwandlung der im Wasserstoff gespeicherten Energie in Wärme, mechanische Energie oder elektrischen Strom.

Eine Diskussion der Effizienz wird aus Platzgründen ausgespart, weil dazu grundsätzlich Vergleiche unterschiedlicher Verfahrensketten notwendig wären. Hierzu wird auf die Well-to-Wheel Studie der LBST verwiesen /28/.

Abbildung 12:

Prinzip des
katalytischen
Brenners

Quelle:
Veziroglu, Barbir



Wärme zum Kochen oder Heizen lässt sich mit katalytischen Brennern gewinnen. Wasserstoff und Sauerstoff verbinden sich bereits weit unter der Temperatur der offenen Flamme, wenn sich die Reaktion an katalytisch wirkenden Oberflächen vollzieht. Hierfür werden poröse Brennelemente aus keramischen oder metallischen Materialien benutzt. Die katalytische Wirkung von Nickel reicht bereits. Temperaturen bis zu einigen hundert Grad Celsius werden je nach Art des Katalysators und der Diffusionsverhältnisse einstellbar. Ein Kochgerät dieses Prinzips würde sich insbesondere für Regionen eignen, in denen es nicht ausreichend Brennmaterial gibt, erneuerbare Energie aber als Wasserstoff „gesammelt“ werden kann /22/.

Mechanische Energie wird meist mittels Verbrennungsmotoren und Turbinen erzeugt. Diese Maschinen repräsentieren einen hohen Entwicklungsstand und sind grundsätzlich für den Betrieb mit Wasserstoff geeignet. Man kann Wasserstoff in unterschiedlichen Anteilen Erdgas /23/ zumischen und erreicht eine Verringerung der Emissionen von Kohlendioxid und Schwefelgasen. Allerdings wird dann die Nominaleistung nicht erreicht, weil der Brennwert von Wasserstoff nur etwa ein Drittel des Wertes von Erdgas aufweist. NO_x -Emissionen können durch Niedrighalten der Verbrennungstemperatur vermieden werden. Oberhalb eines bestimmten Beimischungsverhältnisses bzw. bei reinem Wasserstoff als Kraftstoff werden konstruktive Änderungen und veränderte Betriebsweisen notwendig. Für Dieselmotoren ist die Entwicklung der Wasserstoffvariante noch nicht abgeschlossen.

Abbildung 13:

Limousine mit
Wasserstoff-
Verbrennungsmotor



Quelle:
BMW 2003

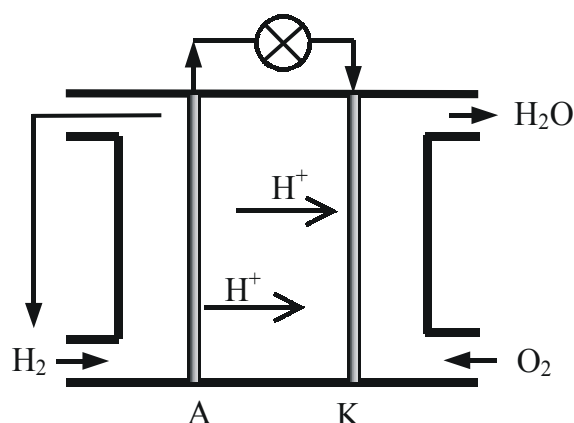
Die größten Erfahrungen mit wasserstoffbetriebenen Ottomotoren hat BMW. Seit 1979 setzt diese Firma derartige mit Flüssigwasserstoff betankte Fahrzeuge ein.

Einen besonders großen Beitrag zum Fortschritt der Wasserstoffenergietechnik leisten zur Zeit Forschung und Entwicklung der Brennstoffzellen, elektrochemischen Wandlern, welche die im Wasserstoff enthaltene chemische Energie direkt in elektrische umwandeln. Allein deshalb haben sie potentiell einen besseren Wirkungsgrad als andere Elektrizität erzeugende Prozesse. Zudem funktionieren sie ohne bewegliche Teile, ohne mechanische Reibung und sind geräuscharm. Aus diesen Gründen könnten die Brennstoffzellen berufen sein zu helfen, das Missverhältnis aus zur Verfügung gestellter und genutzter Energie (derzeit in Deutschland 10 : 3, /24/) zu vermindern.

Es gibt 6 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, Protonen, durchlässig ist (PEM = Proton Exchange Membrane). Diese ist beidseitig beschichtet mit porösem, elektrisch

Abbildung 14:
Prinzip der PEM-
Brennstoffzelle

Quelle:
FH HST



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 dank der Wirkung des Katalysators entstandenen ionisierten Sauerstoff, sodass die „kalte Verbrennung“ des Wasserstoffs zum Endprodukt Wasser ablaufen kann. Während die Ionisierung von Wasserstoff Elektronen freisetzt, werden für die von Sauerstoff welche benötigt. 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 zur Wärmeentwicklung. Die Wärme wird abgeführt und sollte ebenfalls genutzt werden, um einen guten Gesamtwirkungsgrad zu erhalten. Das entstehende Wasser ist sauber und trinkbar.

Tabelle 7:

Übersicht über Brennstoffzellen-typen

Name der Brennstoffzelle	Arbeits-temperatur	Elektrolyt	Anwendung	Kraft-stoff	Bemerkung
AFC Alkalische	60-90° C	30-50 % Kalilauge	stationär, mobil	H ₂	CO ₂ -freie Reaktanden erforderlich
PEMFC Polymer-Electrolyt	bis 80° C	polymere Membran	mobil, portabel Hausheizungen Kraft-Wärme- Kopplung, APU	H ₂	sehr breite Anwendung
DMFC Direkt-Methanol	bis 80° C	polymere Membran	portabel, mobil	Methanol	kleinere Leistungen
PAFC Phosphorsaure	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

2.6 Sicherheit

Drei durch Werte beschreibbare Eigenschaften sind für den sicheren Umgang mit Wasserstoff besonders wichtig: die Dichte, der Diffusionskoeffizient und die Explosionsgrenzen in Luft.

Als Gas mit der geringsten Dichte steigt freigesetzter Wasserstoff stets hoch. Bei Arbeiten mit ihm ist für eine dementsprechende obere Lüftung zu sorgen.

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.

Sobald sich 4 % Wasserstoff in Luft befindet, kann sich das Gemisch entzünden. Erst bei mehr als 75 % Wasserstoffanteil hört die Entzündbarkeit auf. Dieser Bereich ist größer als bei anderen gasförmigen Kraftstoffen. Man kann vereinfachend formulieren, 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 steigender Herstellung und Nutzung von Wasserstoff gehört auch, dass die dabei möglicherweise ansteigende Wasserstoff- bzw. OH-Konzentration in der Troposphäre auf eventuelle klimaschädigende Auswirkungen untersucht wird. Entsprechend einer aktuellen Arbeit von Schultz u.a. /25/ sei mit keinen bedeutenden Einflüssen zu rechnen. Natürlich sollten nicht größere Mengen Wasserstoffs freigesetzt und möglichst kein zusätzliches Kohlendioxid durch seine Herstellung in die Atmosphäre gelangen.

Tabelle 8:

Sicherheitsrelevante Kenngrößen ausgewählter Kraftstoffe im Vergleich zu Wasserstoff

Quelle:
DLR

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

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

3 Wie kommt der Energieträger Wasserstoff ?

Zusammengefasst:

- Wasserstoff ist ein auf vielerlei Weise herstellbarer Energieträger. Wasserstoff macht Elektrizität variabel speicherbar. Er stellt stoffliche (Wasser-Wasserstoff-Wasser) und energetische (Strom-Wasserstoff-Strom) Kreisläufe her, die Natur und Umwelt nicht beeinträchtigen. Die wertvollen Energieträger elektrischer Strom und Wasserstoff stellen Säulen für die Nachhaltigkeit in der Energiewirtschaft dar.
- Mit erneuerbarer Energie und Wasserstoff kann man emissionsfreie autarke Energieversorgungssysteme für örtlich begrenzte Nutzung einrichten. Ohne zusätzliche Emissionen könnten sich auch die, die über keine fossilen bzw. nachwachsende Ressourcen verfügen und keine Chance haben, in ein Energie verteilendes Netz einbezogen zu werden, mit Elektroenergie versorgen. Das wäre ein Schritt zur Energiegerechtigkeit auf dieser Welt.
- Durch Wasserstoff gelangt die erneuerbar erzeugte Elektroenergie als alternativer Kraftstoff in das Verkehrswesen. Er wird Unabhängigkeit von Importen bringen. Das wäre ein Stückchen globale Entspannung.

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

Drei Sparten der Wirtschaft vor allem haben die Rolle des Energiewasserstoffs für ihre Zukunft begriffen und investieren: Automobilindustrie, Stromversorgungsunternehmen, Heizungsfirmen. Dazu kommen der 4C-Markt (Computer, Camcorder, Cordless Phones & Tools) und der Freizeitbereich (Camping und Boote) mit Klein- und Kleinstanwendungen.

In Hausheizungssysteme werden PEM- oder Festoxidbrennstoffzellen integriert. Diese decken die Grundlast ab, ein Brennkessel springt bei Spitzenlast an. Der erzeugte Strom wird ins Netz eingespeist. Künftig wird die Vielzahl solcher Anlagen „virtuelle“ Kraftwerke darstellen. Pilotprojekte gibt es z.B. in Bielefeld, Brake, Düsseldorf, Gelsenkirchen, Groningen, Hamburg, Kassel, Machern bei Leipzig, Oldenburg, Remscheid und Ulm.

Mehr als 200 PAFC-Anlagen von ONSI (USA) mit jeweils 250 kW_{el} werden als Blockheizkraftwerke betrieben. Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen mit Ballard-PEMFC wurden in Berlin und Mingolsheim erprobt.

Abbildung 15:

Schmelzkarbonat
Brennstoffzelle
(HOT Module)

Quelle:
MTU Friedrichshafen



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).

Besonders stark engagierten sich die Automobilkonzerne und mit ihnen Gasindustrie und Tankstellenbetreiber. Weltweit sind bereits mehr als 70 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 Probeinsatz von Fahrzeugen verschiedener Hersteller die Clean Energy Partnership starten wird.

Abbildung 16:

PEMFC Citaro
Stadt-Buss auf der
Linie 44 der SSB
in Stuttgart –
Endhaltestelle
Schlossplatz

Quelle:

DaimlerChrysler
Evo-Bus
2003



Im PKW-Bereich begann Daimler Mitte der 70er Jahre Ottomotoren mit Wasserstoff zu betreiben. Diese Versuche wurden 1984/88 mit einem Flottenexperiment (10 Fahrzeuge, Metallhydridtanks, Aral-Tankstelle) in Berlin abgeschlossen. An der NECAR-PKW-Reihe von DaimlerChrysler und zuerst einem VAN mit PEM-Brennstoffzellen konnte man verfolgen, wie die Wasserstofftechnik immer kleinere Antriebssysteme gestaltete, so dass schließlich Antrieb und Tank ohne räumliche Einschränkung der Nutzung in die A-Klasse (F-Cell) passten.

Opel geht mit dem Brennstoffzellen-Zafira auf Tour um den Erdball, betreibt in Washington ab 2004 mindestens 6 BZ-Zafira und hat außer der Versorgung mit flüssigem Wasserstoff und 35 Pa Druckwasserstoff auch ein 70-MPa-Betankungssystem in Erprobung.

Unter Beteiligung aller namhaften Automobilhersteller fahren weltweit bald 100 Prototypen mit PEM-Brennstoffzellenantrieben. Ab 2010 soll es im regulären Vertrieb um Marktanteile für die entwickelten BZ-Autos gehen.

Abbildung 17:

Wasserstofftank-
stelle am Flughafen
München

Quelle:
Linde

Abbildung 18:

PEMFC Zafira-
HydroGen3,
Demonstration in
Monaco,
Dez. 2002

Quelle:
Opel



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. Nach Versuchen seit 1993 hat das Unternehmen Ballard Power Systems 2000 – 2001 sechs Busse in Vancouver und Chicago im Linienverkehr erprobt. Maximale Laufleistung je Bus in dieser zweijährigen Erprobung war 25.000 km. Der MAN-Bus mit Siemens-PEMFC wurde 2000/2001 in Nürnberg und Erlangen über 8000 km erfolgreich erprobt. Ein Nachfolgemodell mit Brennstoffzellen-Hybrid-Antrieb soll ab Anfang 2004 am Flughafen München zum Einsatz kommen. Innerhalb des Projektes CUTE (Clean Urban Transport) eines EU-geförderten Vorhabens in 9 Städten werden 27 Daimler Chrysler Citaro“-Busse eingesetzt. Start war im Mai 2003 in Madrid. Seit Januar 2004 sind alle Busse in Betrieb. Ebenfalls drei dieser Busse fahren im ECTOS Projekts in Reykjavik. Weitere drei Citaro Busse werden ab Sommer 2004 in Perth, Westaustralien, eingesetzt werden. Drei weitere Busse gehen nach China. Die UNO unterstützt zu 50 % ein Vorhaben, in fünf smoggequälten Citys von Metropolen in sich entwickelnden Ländern Wasserstoffbusse einzuführen. - Den Citybussen scheint dank ihrer für die Einführung der neuen Technologie günstigen Betriebsweise (begrenzter Aktionsradius, einen zentralen Tank- und Servicepunkt, qualifiziertes Personal) und des dringenden Bedarfs, Abgasausstoß in Ballungsgebieten zu verringern, eine – wenn auch subventionierte - Vorreiterrolle zuzukommen.

Genau hier aber zeigt sich auch die Nischenposition: Punktuell Abfüllstationen für Energiewasserstoff – vielleicht sogar erzeugt aus erneuerbaren Energien – einzurichten, das wird der geförderten privaten Initiative sicher gelingen. Aber eine



Abbildung 19:

Wasserstofftankstelle im Klärwerk Barth, MV

Quelle:
Boddenland 2003

flächendeckende Infrastruktur für den in so vieler Hinsicht Fortschritt bedeutenden Kraftstoff, ein Tankstellen- und Handelssystem zu entwickeln, das kann den Privaten nicht allein aufgelastet werden. Ohne diese Infrastruktur aber wird die Autoindustrie ihre Entwicklungen nicht in Serien auflegen. Politik und Wirtschaft sollten gemeinsam ein Planungsnetzwerk entwerfen, eine Roadmap für die Einführung des Energieträgers Wasserstoff. Der Deutsche Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband hat einen entsprechenden Entwurf vorgelegt und ist zur Kooperation bereit. Für Frankreich wird ein solcher Plan 2004 bereits vorliegen.

Ziel der Europäischen Union ist es, bis 2020 20 % ihres Energiebedarfs aus erneuerbaren Energiequellen zu decken/26/. Die Zielsetzung des Vorschlages der EU für eine Ratsdirektive /27/ heißt, 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.

Japan ist so gut wie hundertprozentiger Energieimporteur. Folgerichtig ist es das Land mit einer führenden Position bei der Entwicklung hin zum Kraftstoff Wasserstoff. 1993 wurde von MITI mit zugesicherter Finanzierung über 10 Jahre die Forschungsoffensive WE-NET eröffnet. Inzwischen gibt es das nationale „Millenium“-Programm und bereits 10 Wasserstoff-Tankstellen mit dem Schwerpunkt auf den Großraum Tokio-Yokohama im Rahmen des JHFC-Projekts, sowie weitere Tankstellen in vergleichbaren Zahlen in den nächsten Jahren in den Ballungsräumen von Osaka, Nagoya und Sapporo. Japan ist auf dem Weg zu 50.000 BZ-Fahrzeugen im Jahr 2010 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 versorgen wird. Die Industrieministerin eröffnete im April 2003 in Reykjavik die erste Wasserstofftankstelle, an der auch Citro-Busse tanken werden.

Die USA, der größte Energieverbraucher, deren Regierung nach wie vor eine Beteiligung am Kyoto-Prozess ablehnt, ließ aufhorchen: In der Rede zur Lage der Nation, Ende Januar 2003, wurde ein nationales Wasserstoffprogramm ausgerufen, finanziert über verschiedene Teilprojekte mit insgesamt 1,7 Milliarden USD in den nächsten 5 Jahren. Zielrichtung ist auch dort, unabhängig von Ölimporten zu werden. Die Euphorie, mit der diese Wegweisung im Lande aufgenommen wurde, erinnert Beobachter an die Zeiten des Apollo-Programms. Wie damals kann nun geklotzt werden. Wer nicht dabei ist, wird Lizenzen kaufen.

Von der Association Francaise de l'Hydrogene (AFH) wird eingeschätzt, dass für das Nachbarland der am stärksten betroffene Entscheidungsträger, das Ministerium für Forschung, Verkehr und Industrie, „klar und deutlich die Förderung des Energieträgers Wasserstoff“ befürwortet hat /9/. Eine solche Positionierung steht in Deutschland aus. Vielleicht, weil hier die ministerialen Kompetenzen anders als in Frankreich auf mehrere Häuser verteilt sind? Der Freistaat Bayern jedenfalls hat ein Wasserstoffprogramm, und das Energieland Nordrhein-Westfalen hat sich pro Wasserstoff positioniert. Ebenfalls auf dem Weg zur Brennstoffzelle und Wasserstoff hat sich Hessen gemacht.

Über Forschungsprogramme der Europäischen Union erfolgt die Förderung von Wasserstoff/Brennstoffzellen z.B. im auslaufenden 5. Rahmenprogramm mit etwas mehr als 30 Mill. Euro pro Jahr. Deutsche Forschergruppen sind beteiligt. Auch durch die Bundesministerien für Forschung sowie Bildung und Arbeit wurden und werden regelmäßig Fördergelder für Brennstoffzellen ausgegeben, beim BMWA seit 1995 jedoch nicht mehr für Wasserstofftechnologie. Dadurch konnten in den 1980er und 1990er Jahren wegweisende Projekte realisiert werden, die Deutschland und der deutschen Industrie einen inzwischen allerdings schwindenden Vorlauf eingebracht haben. Seit vier bis fünf Jahren betreibt Deutschland staatlich unterstützt nur noch Technologiepflege. Die deutsche Industrie ist im Wasserstoff noch stark vertreten, orientiert sich jedoch an international vorteilhaften Rahmenbedingungen und findet diese gegenwärtig vornehmlich außerhalb Europas.

International scheint Energie-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 jüngst von einem hochrangigem Beratergremium nachdrücklich energische Anstrengungen empfehlen lassen und arbeitet am Aufbau der Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform sowie an der mittelfristigen Förderung von H₂ & BZ im Rahmen des 6. Rahmenprogrammes und an der längerfristigen Förderung im Rahmen der Growth Initiative.

Nun aber ist ein nationales Konzept, ein zum Handeln führendes Bekenntnis der Politik zum Wasserstoff in Deutschland notwendig, um die Macher zu beflügeln und Investoren abzusichern. Ein starker Inlandsmarkt hat einem Exportland noch nie geschadet. Und Technologie exportieren, das wollen wir doch auch künftig.

3.1 Weiterführendes Schriftwerk und Referenzen

- /1/ Weber, R., Der saubere Brennstoff, Verlag für verständliche Wissenschaft und Technik, Oberbözberg, 1991, 3-907175-13-1
- /2/ Winter, C.-J., Nitsch, J., Wasserstoff als Energieträger, Springer Verlag, Berlin 1989, 3-540-50221-1
- /3/ Kordesch, K., Simader, G., Fuell Cells and Their Applications, VCH Verlagsgesellschaft mbH Weinheim, 1996, 3-527-28579-2
- /4/ Hart, D., Hydrogen Power, Financial Times Energy Publ. London, 1997, 1-85334-760-4
- /5/ Tetzlaff, K.-H., Das Treibhausproblem lösen und die Energiekosten senken – das geht, Shaker Verlag, Aachen, 1999, 3-8265-6631-9
- /6/ Ledjeff-Hey, K., Mahlendorf, F., Roes, J., Brennstoffzellen, C.F.Müller Verlag Hüthig, Heidelberg, 2001, 3-7880-7629-1
- /7/ Karamanolis, S., Wasserstoff, Elektra Verlags-GmbH, Neubiberg, 2001, 3-929226-16-2
- /8/ Pehnt, M., Energierevolution Brennstoffzelle, Wiley-VCH, Weinheim, 2002, 3-527-30511-4
- /9/ Geitmann, S., Wasserstoff und Brennstoffzellen, Hydrogeit-Verlag, Berlin, 2002, 3-8311-3273-9
- /10/ Geitmann, S., Wasserstoff und Brennstoffzellenprojekte, Hydrogeit-Verlag, Berlin, 2002, 3-8311-3280-1
- /11/ v. Weizsäcker, E. U., u. a., Faktor 4, Droemer/Knauer, München, 1996
- /12/ Forschungszentrum Umwelt (FZU) a. d. Universität Karlsruhe (Inst. IWC), 2001
- /13/ Rahmsdorf, S., Bild der Wissenschaft, Heft 1, 2003
- /14/ 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
- /15/ Meadows, D.H., u. a. Beyond the Limits, London, 1992, 1-85383-130-1
- /16/ Institut für Energie- und Kraftwerkstechnik, Technische Universität München, 1995
- /17/ Energy Needs, Choices and Possibilities, 1994, www.shell.com
- /18/ Solarer Wasserstoff, DLR, Stuttgart, 1990
- /19/ Bünger, U., u.a., NHEG-Studie, LBST, 1990
- /20/ Heinicke, M., Diplomarbeit, FH Stralsund, 2002
- /21/ Wasserstoff – Energieträger der Zukunft, Association Francaise de l'Hydrogene, 2002, S. 8
- /22/ Großmann, U.-P., u. a., Int. J. Hydr. Energy 25 (2000), 1, 87 – 90
- /23/ Hoekstra, R., u. a., WHEC X, Cocoa Beach, 1994, Proc. 1781 – 1796
- /24/ Schnurnberger, W., REGWA 2002, Stralsund, Tagungsband 113 – 122
- /25/ Schultz, M. G., T. Diel, G. P. Brassner, W. Zittel, Science 302(2003), 624-627
- /26/ Directive 2003/30/EC on the promotion of the use of biofuels or ther renewable fuels for transport, L123/42 Official Journal of the European Union, 08 May 2003
- /27/ COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS on alternative fuels for road transportation and on a set of measures to promote the use of biofuels, Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the promotion of the use of biofuels for transport, Proposal for a COUNCIL DIRECTIVE amending Directive 92/81/EEC with regard to the possibility of applying a reduced rate of excise duty on certain mineral oils containing biofuels and on biofuels, COM(2001)547, Brussels, 7.11.2001
- /28/ J. Schindler, W. Weindorf, R. Wurster, Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A European Study, a study for General Motors under participation of bp, ExxonMobil, Shell and TotalFinaElf, Ottobrunn, 27th September 2002 [download at: <http://www.lbst.de/gm-wtw>]

4 Energieträger Wasserstoff – Geschichtliches

<i>Empedokles</i>	5. Jh. v. Chr., Die vier Elemente Erde, Wasser, Luft, Feuer
<i>Helmond</i> um 1600:	Es existieren auch andere luftartige Stoffe, Begriff „Gas“
<i>Cavendish</i> , 1766	Metall + Schwefelsäure → Salz + „brennbare Luft“ $\text{Zn} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{ZnSO}_4 + \text{H}_2 \uparrow$
<i>Scheele</i> , 1772/73 <i>Priestley</i> , 1774	entdecken den Sauerstoff „Feuerluft“
<i>Cavendish</i> , 1781	verbrannte „brennbare Luft“ mit „Feuerluft“ $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$
<i>Lavoisier</i> , 1787	schlägt die Namen „oxygène“ und „hydrogène“ vor
<i>A.C. Charles</i> , 1783	Start eines 25 m ³ Wasserstoffballons
<i>van Troostwyck</i> , 1789	Elektrolyse – Wasserstoff
London 1808	GASLIGHT
um 1820	Doebereinersches Feuerzeug
<i>Grove</i> , 1839	Gas Chain
<i>Haber</i> , 1909	Ammoniaksynthese, Wasserstoff wird zum Grundstoff der chemischen Industrie
<i>Schmid</i> , um 1925	Gasdiffusionselektrode mit Pt
Rjukan, 1929	Industrielle Elektrolyse
<i>von Ohain</i> , 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 ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$

5 Meilensteine der Energiewirtschaft

Kontrolle des Feuers als Voraussetzung für die Menschwerdung

Sonne – Wasser – Wind – Erdwärme – Wellen – Gezeiten – genutzt mit lokaler/regionaler Bedeutung in allen Epochen

Muskelkraft		lokaler Einsatz
Dampfmaschine	(1782)	an Transportmöglichkeiten gebundene Kraft
Elektrizität	(1866)	Voraussetzung für die industrielle Revolution Wärme, Kraft, Licht, Information netzgebunden
Verbrennungsmotor	(1877)	Die Verschwendung der fossilen Energieträger sowie der Ausbau der Netze verdecken, dass Elektrizität nur im geringem Maße speicherbar ist.
Wasserstoff		Mobilität wird auf der Basis von Kraftstoffen fossilen Ursprungs möglich Elektroenergie wird auch in großem Maße speicherbar. Als Handelsgut ersetzt H_2 die fossilen Energieträger.

Kontrolle des Sonnenprozesses, 2_1H und 3_1H werden genutzt.

Seit Anfang des 21. Jahrhunderts erscheint Wasserstoff zunehmend als strategische Komponente der Politik beim Verfolgen der Ziele Nachhaltigkeit und Sicherheit im Energiebereich.

6 Kontaktadressen

Baden-Württemberg

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

Prof. Dr. Jürgen Garche
Helmholtzstr. 8, 89801 Ulm
Tel.: (0731) 9530-606, Fax –666
URL: www.zsw-bw.de, E-Mail: juergen.garche@zsw-bw.de

Bayern

Koordinationsstelle der Wasserstoffinitiative Bayern
c/o Forschungsstelle für Energiewirtschaft

Prof. Dr. Ulrich Wagner
Am Blütenanger 71, 80995 München
Tel.: (089) 15 81 21-0, 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) 361 38 381, Fax 361 38 269
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, 305-20646
 URL: www.wasserstoff-hessen.de, E-Mail: Heinrich.Lienkamp@InfraserV.com

Mecklenburg-Vorpommern

Wasserstofftechnologie-Initiative Mecklenburg-Vorpommern e.V.

Dr. Gerhard ButtkeWitz
 Joachim-Jungius-Str. 9, 18059 Rostock
 Tel.: (0381) 405 91 40, Fax: 405 93 10
 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: 172-1848
 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) 96 39 40, Fax: 96 39 41
 E-Mail: jhansen@t-online.de

7 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 der Nachhaltigkeit in der 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, möglicherweise auch verstärkt über Kohlevergasung, beschränkt werden 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.