

## Bedeutung von Wasserstoff für eine nachhaltige Energiewirtschaft

## Trübe Aussichten

Nach dem Versiegen der fossilen Quellen wird die Energieversorgung eine andere Basis erhalten. Neue Energiequellen müssen erschlossen werden. Neue Energieträger wie Wasserstoff könnten dienlich sein. Sie können das Energieproblem jedoch nicht lösen. Die Basis einer nachhaltigen Energiewirtschaft bilden erneuerbare Energien. Im Vergleich zur Förderung fossiler Energievorräte ist die Energieernte allerdings aufwändiger und teurer.

Das zweite wichtige Standbein einer nachhaltigen Energiewirtschaft ist deshalb der rationelle Umgang mit Energie. Dies gilt für alle Stufen der Energiewirtschaft: Gewinnung, Umwandlung, Verteilung, Speicherung und Nutzung. Das gesamte Energiesystem wird nicht nur mit Blick auf die Einsparung von Energie nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik (Energieerhaltung) optimiert, sondern auch hinsichtlich der gewünschten Energiedienstleistungen (2. Hauptsatz, Exergie). Daraus folgt zwingend, dass Energieumwandlungsschritte nach Möglichkeit zu vermeiden sind. Elektrolyse-Wasserstoff-Brennstoffzelle ist ein prominentes Beispiel für eine verlustreiche Umwandlungskette. Elektrizität wird in Wasserstoff, dieser später wieder in Elektrizität umgewandelt. Fast immer lässt sich die elektrische Energie effizienter direkt über Leitungen transportieren.

Ein weiteres Merkmal nachhaltiger Energiewirtschaft sind Form und Menge der geernteten Energie. Fotovoltaik liefert Elektrizität. Wind-, Wasser-, Wellen- und Gezeitenenergie, über Dampfturbinen auch Solarthermie, Geothermie und thermisch genutzte Biomasse werden mittels Turbomaschinen als Wechsel-

oder Drehstrom zur Verfügung gestellt. Chemisch gebundene Energie liegt nur bei Biomasse vor. Primärenergetisch wird sich also das Bild ändern: Während heute das Energieangebot zu etwa 80 % als chemisch gebundene Energie und zu 20 % in Form von Elektrizität vorliegt, könnte es in Zukunft im Wesentlichen elektrischer Natur sein. Denkbar wäre beispielsweise ein Mix von 80 % Strom, 5 % Wärme und 15 % Biomasse.

## Elektrizität im Trend

Doch schon vor der Verwirklichung einer nachhaltigen Energiewirtschaft wird es verbraucherseitig grundlegende Veränderungen geben. Mit zunehmender Verknappung fossiler Vorräte werden die Energiepreise stetig steigen. Die Folge: Energieeinsparmaßnahmen werden an Attraktivität und Bedeutung gewinnen. Mit vertretbarem Aufwand lässt sich zum Beispiel der jährliche Heizölverbrauch von Einfamilienhäusern von 2 500 l auf weniger als 500 l senken. Dies entspricht maximalen Heizleistungen von wenigen kW, für die sich ein Gasanschluss immer seltener lohnen wird, so dass der Trend in Richtung elektrischer Heizsysteme und Wärmepumpen gehen könnte. Ebenfalls denkbar ist der Einsatz von Brennstoffzellen-Heizgeräten, die Heizwärme für das eigene Haus und Elektrizität für ein anderes Haus liefern. Auch dieser Weg weist von fossilen Energieträgern in Richtung Elektrizität. Im mobilen Bereich ist der Trend von fossilen Energieträgern zur Elektrizität ebenso erkennbar. So werden abnehmende Ölvorräte sparsamere Fahrzeuge erzwingen. Mit Drei-Liter-Autos, Hybrid-

und batteriebetriebenen Elektro-Fahrzeugen sind die Wege vorgezeichnet. Diese Varianten werden sich noch vor der Einführung der Brennstoffzelle als Hauptantrieb eines Elektromobils im Markt etablieren.

In fast allen Bereichen der Energiewirtschaft, so scheint es, werden fossile Brenn- und Kraftstoffe durch Elektrizität ersetzt, nicht jedoch durch andere Brennstoffe substituiert. In den Industrieländern könnte daher bei sinkendem Energieverbrauch der Elektrizitätsanteil von heute 20 % auf mehr als 50 % ansteigen. Eine Wasserstoffwirtschaft würde mit diesen Startbedingungen konfrontiert. Da Erdgas und Heizöl bereits durch verbesserte Wärmedämmung in Kombination mit elektrischer Beheizung substituiert wurden, besteht kaum noch Bedarf für ein Wasserstoffverteilnetz. Ebenso ist die Fahrt zur Arbeit mit kleinen und effizienten Elektrofahrzeugen mit einem Gesamtwirkungsgrad von der Steckdose zum Rad von mehr als 70 % bereits sehr kostengünstig. Weshalb sollte jemand ein Brennstoffzellen-Fahrzeug kaufen, das teurer in der Anschaffung ist und mit einem niedrigeren Wirkungsgrad von der Tankstelle bis zum Rad von weniger als 40 % höhere Betriebskosten verursacht?

## Wasserstoff oder Elektrizität: Eine Frage der Effizienz

Für die nachhaltige Energiewirtschaft lassen sich bereits heute die relativen Energiekosten abschätzen. Wegen des Wirkungsgrades thermischer Kraftwerke sind die Energiepreise für Elektrizität heute etwa drei Mal höher als die der

## Autor

Dr. Ulf Bossel, European Fuel Cell Forum, Oberrohrdorf, Schweiz.

Verfahrensschritt	Technische Daten	Energieeinsatz		Verlust <sup>1)</sup> [%]
		gesamt [MJ/kg]	relativ <sup>1)</sup> [-]	
Elektrolyse	1,76 Volt, 1 bar	203	1,43	43
Kompression	1 bar bis 200 bar	10	0,07	7
	1 bar bis 400 bar	13	0,09	9
	1 bar bis 800 bar	17	0,17	12
Verflüssigung	100 kg/h	65	0,46	46
	1 000 kg/h	45	0,32	32
	10 000 kg/h	35	0,25	25
Straßentransport	200 bar, 200 km	18	0,13	13
	200 bar, 400 km	36	0,25	25
	Flüssig, 200 km	3	0,02	2
Pipeline	10 bar, 1 000 km	12	0,09	8
H <sub>2</sub> -Elektrolyse <sup>2)</sup>	60 000 l/d Benzin	222	1,56	56
Betanken	von 100 auf 400 bar	5	0,04	4
Brennstoffzelle		142	0,50	50

<sup>1)</sup> bezogen auf den Brennwert von Wasserstoff (142 MJ/kg);  
<sup>2)</sup> an Tankstellen, einschließlich Wasseraufbereitung, Kompression usw.

Tabelle

Typischer Energiebedarf für die Erzeugung, Vermarktung und den Verbrauch von Wasserstoff bezogen auf seinen Brennwert von 142 MJ/kg.

größen, Verteilung des komprimierten oder verflüssigten Gases per Tankwagen, Schiff oder Pipeline und Speicherung in Behältern oder in chemischer Form von Metallhydriden bis zur Nutzung. Diese Pfade bauen auf wenigen Grundbausteinen auf:

- Elektrolyse,
- Kompression,
- Verflüssigung,
- StraBen- oder Pipelinetransport,
- Lagerung,
- Umfüllung und
- Nutzung in Brennstoffzellen.

Diese Grundbausteine wurden in der genannten Studie energetisch bewertet. Bei fossilen Brennstoffen bauen Vergleiche traditionell auf dem Heizwert auf. Da Wasserstoff künstlich erzeugt wird, ist sein Energieinhalt auf die Energiemenge zu beziehen, die dem Elektroly-

verstromten fossilen Brennstoffe Erdgas und Erdöl. Im nachfossilen Zeitalter wird sich diese Relation jedoch ändern. Da erneuerbare Energie vorwiegend als elektrische Energie verfügbar ist, wird Elektrizität zur dominierenden Energiequelle werden. Der Preis für Wasserstoff muss zwangsläufig über dem Preis der Elektrizität liegen, denn als sekundärer oder synthetischer Energieträger wird Wasserstoff aus Elektrizität gewonnen. Die über Wasserstoff gelieferte Energie muss also wesentlich teurer sein, als die direkt per Stromnetz verteilte Energie. Daher wird Wasserstoff im Heizungsbereich allein aus Kostengründen nicht Erdgas oder Heizöl ersetzen können, denn Elektrizität aus dem Netz ist kostengünstiger. Das Gleiche gilt für Autos. Elektrizität aus der Garagensteckdose wird billiger sein als Wasserstoff an der Tankstelle. Mit Brennstoffzellen lassen sich nur 40 %, mit Elektrofahrzeugen jedoch 80 % der getankten Energie auf die Straße bringen.

Stufen einer Wasserstoffwirtschaft abgeschätzt. Basis für die Arbeiten bilden die Gesetze der Thermodynamik und praktische Erfahrungen der Wirtschaft. Wasserstoff kann auf unterschiedlichen Pfaden zum Verbraucher gelangen: über zentrale Elektrolysefabriken, dezentrale Elektrolysestationen in Windenergieparks oder Tankstellen mit Kompression auf 200, 400 oder 800 bar, Verflüssigung in Anlagen unterschiedlicher Leistungs-

### Beispiel zur Anwendung der Tabelle

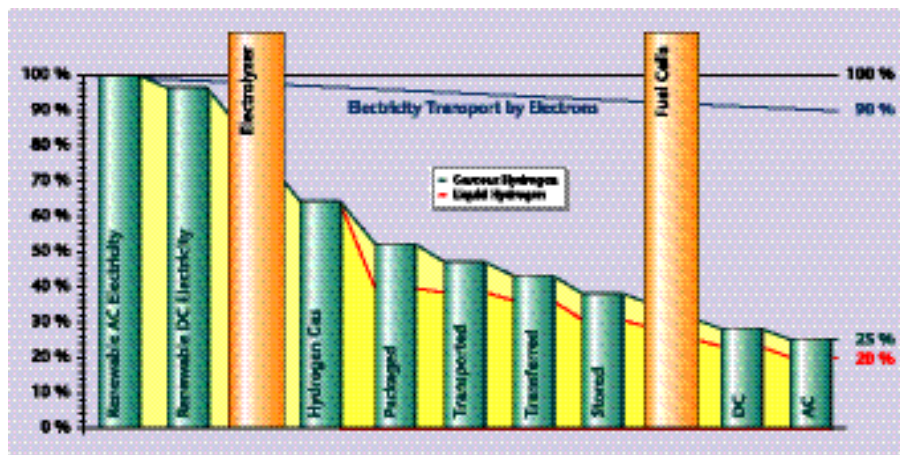
Der Energieeinsatz für elektrolytisch erzeugten Wasserstoff, der auf 200 bar komprimiert, 200 km per LKW transportiert, bei 100 bar im Vorratstank gelagert und zur Befüllung eines 350-bar-Tanks auf 400 bar komprimiert wird, beträgt gemäß der Tabelle mindestens:

$$(203 + 10 + 18 + 5) \text{ MJ/kg} = 236 \text{ MJ/kg.}$$

142 MJ/kg erhält der Kunde in Form von Wasserstoff. 94 MJ/kg oder rund 66 % des Brennwertes mussten zuvor zusätzlich aufgewendet werden. Bezogen auf den Gesamtenergieeinsatz ergibt sich ein Wirkungsgrad von 60 %. Beim Einsatz in Brennstoffzellen stehen davon 71 MJ/kg oder nur noch 30 % in Form von Elektrizität zur Verfügung. Es gibt keine erkennbare Möglichkeit, dem Endverbraucher über die Wasserstoffschiene mehr als 40 % der eingesetzten Elektrizität wieder als elektrische Energie bereitzustellen. Beim direkten Stromtransport vom Kraftwerk zum Verbraucher werden dagegen Werte von mehr als 90 % erreicht.

### H<sub>2</sub>-Zukunft: Strahlend oder trüb?

In der kürzlich vorgelegten Studie „The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak?“ (Infokasten) wurde der Energiebedarf für die grundlegenden



Elektrizitätstransport über Elektronen und Wasserstoff im Vergleich.

„Auf politischer Ebene genießt Wasserstoff einen zu hohen Stellenwert. Die politisch motivierten US-amerikanischen Regierungsprogramme (FreedomCar, Clean Coal, Hydrogen Initiative) drohen den Rest der Welt zu blenden und zur Nachahmung zu animieren. Es ist zu hoffen, dass Europa den eingeschlagenen Weg der Vernunft unbeirrt fortsetzt und die nachhaltige Energiewirtschaft mit einem eigenen Energieprogramm zielstrebig verwirklicht. Hierzu gehört auch die Entwicklung der Brennstoffzelle. Wir brauchen sie jetzt für die Umwandlung fossiler Brennstoffe in Strom, nicht jedoch als Feigenblatt für die übereilte Einführung einer Wasserstoffwirtschaft. Wir brauchen vor allem die Festoxid- und Schmelzkarbonat-Zellen, die wegen der hohen Betriebstemperaturen und wegen des Sauerstofftransports von der Luft zum Brennstoff eine breite Brennstoffpalette mit hoher Effizienz in Strom umwandeln können.“

SPECIAL

seur als Minimum zugeführt werden muss: die Bildungsenthalpie oder der Brennwert. Im besten Fall kann diese Energie durch Wasserstoffverbrennung mit reinem Sauerstoff zurückgewonnen werden. Der Unterschied zwischen Brenn- und Heizwert beträgt bei Heizöl etwa 6,4 %, bei Erdgas 10,7 % und bei Wasserstoff 18,3 %. Offenbar basieren viele Studien auf der Verwendung des (niedrigeren) Heizwertes. Die Ergebnisse werden dadurch zugunsten des Wasserstoffes um mindestens 10 % geschönt.

Die wichtigsten Ergebnisse der Studie sind in der **Tabelle** zusammengefasst. Die Zahlen können nur als Anhaltspunkt dienen, denn sie enthalten weder betriebsbedingte Anlagenverluste wie elektrische Wirkungsgrade von Motoren oder mechanische Kompressorverluste noch Verluste der Stromübertragung vom Kraftwerk zum Prozess, Verluste durch Wasserstoffleckagen oder bei der Stromerzeugung. Die Realität sieht also schlechter aus. Für den physikalischen Prozess jedoch sind die Tabellenwerte repräsentativ.

Für die Abschätzung der relativen Energiekosten kann von einem Faktor zwei für den thermischen Einsatz von Wasserstoff und von einem Faktor vier für die Rückverstromung ausgegangen werden. In einer nachhaltigen Energiewirtschaft muss daher Elektrizität aus der Steckdose deutlich kostengünstiger sein als Wasserstoff aus der Gasleitung. Diese physikalischen Zusammenhänge können nicht durch neue Bemühungen in der Forschung geändert werden, um Wasserstoff dadurch zum universellen Energieträger zu qualifizieren.

Die Forderungen zur Einführung einer Wasserstoffwirtschaft basieren häufig auf der stark vereinfachten Annahme, dass alle heute eingesetzten fossilen Energieträger durch andere chemische Energieträger ersetzt werden müssen. Wenn dies so wäre, könnte Wasserstoff tatsächlich die sinnvollste Lösung sein. Wenn jedoch Antworten aus der erkennbaren Entwicklung abgeleitet werden, ergeben sich andere Ergebnisse. Denn wegen des wahrscheinlichen Energieangebotes einer künftigen nachhaltigen Energiewirtschaft wird für Wasserstoff keine dominierende Rolle erkennbar. Vermutlich wird die Dominanz der Elektrizität durch Kernenergie noch weiter erhöht. Andererseits wird Kohle auch nach Versiegen der Öl- und Gasquellen für viele Jahre Energierohstoff bleiben. Synthetische Flüssigkraftstoffe könnten durch Kohlehydrierung gewonnen werden. Allerdings wird für diese bekannte und bewährte Synthese Wasser, nicht aber reiner Wasserstoff verwendet. Eine Energieverknappung wird mit der Substitution fossiler Energieträger durch

Elektrizität verbunden sein und nicht zum Einsatz von Wasserstoff führen. Die Zeichen stehen daher nicht günstig für eine Wasserstoffwirtschaft. Bevor Weichen gestellt und Beschlüsse gefasst werden, sollten die hier vorgetragenen Gedanken genauer quantifiziert werden. Forschungsgelder können nur einmal ausgegeben werden. Es wäre sinnvoll, die begrenzten Mittel für den besten Weg in die Zukunft zu verwenden.

**H<sub>2</sub>-Visionen ...**

In der Studie „The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak?“ von Ulf Bossel, Baldur Eliasson und Gordon Taylor ist der Energiebedarf für die grundlegenden Stufen einer Wasserstoffwirtschaft erfasst und in Kurvenform dargestellt. Die Studie ist als pdf-Dokument abrufbar unter: [www.ecf.com/reporte/hydrogen\\_economy.pdf](http://www.ecf.com/reporte/hydrogen_economy.pdf)



IMPRESSUM

ISSN 1616-193X  
55. Jahrgang (2003)

**Herausgeber**

Verein Deutscher Ingenieure

**Redaktion**

Dipl.-Ing. Peter von Hilde (Chefredakteur),  
Tel. 02 11 461 03-5 26, Fax 02 11 461 03-1 40  
Dipl.-Ing. Thomas Linnemann, Tel. 03 32  
Redaktions-Ansprechz. Eva Andrejewski, Tel. +1 24  
E-Mail: [info@vdi-zeitschriften.de](mailto:info@vdi-zeitschriften.de)

**Redaktionsrat**

Dr.-Ing. E.-C. Henke, VDI-ZET, Düsseldorf  
Dr.-Ing. R. Maas, FDER, Düsseldorf  
Dr.-Ing. L. Manold, Wlbera, Düsseldorf  
Dr.-Ing. H. Oeynhaus, Siemens (PC),  
München a. d. Ruhr  
Prof. Dr.-Ing. H.-J. Wagner, IZL, Ruhr-Universität  
Bochum  
Prof. Dr.-Ing. U. Wagner, FZL, München

**Organ**

Mitgliedsausgabe der VDI-Gesellschaft Energie-  
technik (VDI-ZET). Für Mitglieder der VDI-ZET  
ist der Bezug im Mitgliedsbeitrag enthalten.  
Weitere Organisationsdaten: Forschungsausschuss  
für Energieleittechnik (FAE) e. V., München, Fach-  
verband für Dampfverlei, Fachverband und Rehe-  
lektionbau e. V. (FDER), Düsseldorf, und Deut-  
sche Dampfmaschinenvereine (DDA). In Fort-  
führung der Zeitschriften „Archiv für Wärme-

wirtschaft“, „Feuerungstechnik“, „Wärme- und  
Kältetechnik“, „Praktische Energiekunde“ und  
vereinigtmittler Zeitschrift „Energie und Tech-  
nik“.

**Verlag**

Springer-Verlag GmbH & Co. KG  
Verlag für technische Zeitschriften  
Heinrichstr. 24, 40225 Düsseldorf  
Postfach 1 01 0 22, 40001 Düsseldorf  
Postbank Bonn, Kto.-Nr. 13 244 432,  
BLI 360 1 00 40  
Deutsche Bank AG, Düsseldorf  
Kto.-Nr. 5 46 1 75, BIC 250 700 10  
Swift Code: DEUT 3300

**Geschäftsbereich**

Christian W. Schwilo

**Leiter Redaktion**

Dr. Thomas Funke-Eber

**Lageort**

Ulrich-Honnen

**Vertriebsleiter**

Thomas Linnemann

**Satz**

Bismann & Münnig 40239 Düsseldorf

**Druck**

KLEINdruck, Hiltl 55, 4700 Eupen, Belgien

**Copyright**

Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen Beiträge  
und Abbildungen sind urheberrechtlich ge-  
schützt. Jede Weiterverbreitung ohne die  
Genehmigung der Verlagsanstalt ist ohne  
Zulassung der Urheberrechtsverwalter  
Das gilt insbesondere für Reproduktionen,  
Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die  
Elektronische Speicherung und Verarbeitung in elek-  
tronischen Systemen. Für unvertagte eingewandte  
Manuskripte kann keine Gewähr übernommen  
werden.

**Vertriebsred. Levertours**

Tel. 02 11 461 03-1 40  
Fax 02 11 461 03-4 14  
E-Mail: [levertours@vdi-zeitschriften.de](mailto:levertours@vdi-zeitschriften.de)  
Vertriebsleitung: Silke Benschel  
Die erweiterte Ausgabe erhält ein VDI-ZET-  
Mitglied zum Vorzugspreis von € 32,-,  
Studentische VDI-ZET-Mitglieder € 29,-

**Anzeigen**

ES MediaConsult GmbH  
Eben Eulenbruch  
Thomas Schropp  
Mühlstr. 6  
60519 Starnberg  
Tel. 0 89 517 44 63 16  
Fax: 0 89 517 44 63 1 9  
E-Mail: [info@es-mediaconsult.de](mailto:info@es-mediaconsult.de)  
Erhält der Anzeigen tarif Nr. 44  
vom 1. Januar 2003.

**Ankunftsverteilung**

Cömerich  
Fernstra. GmbH  
Peter-Wolke  
Lehbank 1 6, 4020 Linz, Österreich  
Tel. +43 7 32 66 6 6 7 6  
Fax: +43 7 32 61 27 6 3  
E-Mail: [peter@vdi-zeitschriften.de](mailto:peter@vdi-zeitschriften.de)



Weitere Informationen finden Sie unter  
[www.vdi-zeitschriften.de/jahrb](http://www.vdi-zeitschriften.de/jahrb)

Die Hinweise für Autoren und die Vertriebs-  
bedingungen finden Sie im Internet  
unter [www.vdi-zeitschriften.de/jahrb](http://www.vdi-zeitschriften.de/jahrb)