

Sonderdruck aus
CCI.Print-Schweiz 2/2003

InfoSystem
GebäudeTechnik

cci

Print

Große
FachZeitung

Promotor Verlag Borsigstraße 3 D-76185 Karlsruhe Fon 07 21/5 65 14-0
Fax 07 21/5 65 14-50 www.cci-promotor.de Verlag@cci-promotor.de

Wasserstoff in einer nachhaltigen Energiewirtschaft

Die Zeichen stehen ungünstig



Von Ulf Bossel

Oberrohrdorf. Mit teilweise laienhaften Vorstellungen und physikalisch nicht nachvollziehbaren Argumenten, aber mit fast schon religiösem Eifer wird die Einführung einer Wasserstoffwirtschaft gefordert. Wichtige Merkmale der Energiewirtschaft bleiben dabei unberücksichtigt. Mit dem folgenden Beitrag soll verdeutlicht werden, dass die physikalischen und kommerziellen Rahmenbedingungen einer zukünftigen Energiewirtschaft nicht für den Wasserstoff sprechen, sondern vielmehr für eine stärkere Rolle der Elektrizität. Bevor man sich dem Wasserstoff verschreibt, sollte man die folgenden Argumente prüfen und diskutieren.

Standbeine einer nachhaltigen Energiewirtschaft

Das wichtigste Standbein einer nachhaltigen Energiewirtschaft sind die Energiequellen Wind- und Wasserkraft, solarthermisch und photovoltaisch gewonnene Sonnenenergie, Wellen- und Gezeitenenergie, Geothermie und Biomasse in den unterschiedlichsten Erscheinungsformen sowie die Kernenergie. Im Vergleich zur Förderung fossiler Energievorräte ist die Energieernte jedoch aufwändiger und teurer. Das zweite wichtige Standbein einer nachhaltigen Energiewirtschaft ist deshalb der rationelle Umgang

Nach Versiegen der fossilen Quellen wird Energieversorgung auf eine andere Basis gestellt werden müssen. Die Formel könnte lauten: möglichst viel erneuerbare Energie, möglichst wenig Kernkraft. Wasserstoff ist keine neue Energiequelle. Er könnte aber als Energieträger oder Energiespeichermedium eine gewisse Bedeutung gewinnen. Über die Rolle des Wasserstoffs wird zurzeit heftig gestritten.

mit Energie. Dies gilt für alle Stufen der Energiewirtschaft: Gewinnung, Wandlung, Verteilung, Speicherung und Nutzung. Das gesamte Energiesystem wird im Hinblick auf die Einsparung von Energie (1. Hauptsatz, Energiemenge) und auf die Optimierung der Energieverwendung (2. Hauptsatz, Energiedienstleistung, Exergie) optimiert. Energiewandlungsschritte, besonders die Umwandlung von physikalischer in chemische Energie sind nach Möglichkeit zu vermeiden. Strom-Elektrolyse-Wasserstoff-Brennstoffzelle-Strom ist wohl das prominenteste Beispiel für eine verlustreiche Umwandlungskette. Die nachhaltige Energiewirtschaft

wird geprägt durch Art und Menge der geernteten regenerativen Energie. Photovoltaik liefert Gleichstrom. Energie von Wind, Wasser, Wellen, Gezeiten, über Dampfturbinen auch Solarthermie, Geothermie und thermisch genutzte Biomasse wird mit rotierenden Maschinen nutzbar gemacht und ist als Wechsel- oder Drehstrom verfügbar. Chemische Energie kommt lediglich von Biomasse. Das Energieangebot wird sich also drastisch ändern. Während heute etwa 80 Prozent in chemischer Form und lediglich 20 Prozent als Strom bereitgestellt werden, wird es in Zukunft im Wesentlichen elektrische Energie sein. Denkbar wären ein Mix von 80 Prozent Strom, fünf Prozent Solarwärme und 15 Prozent Biomasse.

Übergang zur nachhaltigen Energiewirtschaft

Der Übergang zu einer nachhaltigen Energiewirtschaft wird graduell erfolgen und begleitet sein von Veränderungen im Bereich der Energienutzung. Mit zunehmender Verknappung der fossilen Vorräte und stetig steigenden Energiepreisen machen sich Energiesparmaßnahmen bezahlt. Der Heizwärmebedarf im Gebäudebereich wird so stark sinken, dass sich der Einbau konventioneller Heizungsanlagen mit Kessel und Warmwasserverteilung nicht mehr lohnt. Elektrische Raumheizgeräte können auch am kältesten Tag die wenigen kW an Heizleistung erbringen, die nach Durchführung der Energiesparmaßnahmen verblieben sind. Im stationären Bereich wird der Übergang von fossilen Energieträgern zu Elektrizität schon bald beginnen. Denkbar ist auch der Einsatz von Brennstoffzellen-Heizgeräten, die Heizwärme für das eigene Haus und Strom ins Netz für ein anderes liefern. Auch dieser Weg führt von fossilen Energieträgern zu Strom. Erdgas und Heizöl werden nicht durch Wasserstoff, sondern durch Wärmedämmung und elektrischen Strom ersetzt. Die Notwendigkeit zum Aufbau eines flächendeckenden Wasserstoffnetzes ist nicht erkennbar.



Dr. Ulf Bossel

Ein ähnlicher Prozess ist im mobilen Bereich im Gange. Verknappungsbedingte Kostensteigerungen für Kraftstoffe machen sparsamere Fahrzeuge attraktiv. Mit den „Dreiliter-Autos“ und Hybrid- oder Batterieelektrischen Wagen sind die Wege bereits vorgezeichnet. Diese Fahrzeuge werden sich im Markt etablieren noch vor der Einführung der Brennstoffzelle als Hauptantrieb eines Elektromobils. Auch werden die mit diesen Fahrzeugen gesammelten Erfahrungen die zukünftige Entwicklung gleich mehrfach beeinflussen.

Die neuartige Technik wird auch bei größeren Fahrzeugen zur Anwendung kommen. In Zukunft werden zum Beispiel auch Wagen der gehobenen Mittelklasse statt zehn nur noch sechs Liter pro 100 km benötigen. Die wesentlichen elektrischen Komponenten der Batteriefahrzeuge werden verbessert und verbilligt. Die materiellen Vorzüge der elektrischen Lösung werden mit zunehmenden Benzinpreisen deutlicher. Schon heute fährt man mit effizienten und kleinen Elektromobilen wesentlich günstiger zur Arbeit als mit einem konventionellen Wagen der Mittelklasse. Das Mobilitätskonzept wird sich ändern. Statt zwei Familienfahrzeuge pro Haushalt wird man für die Fahrten zur Arbeit ein kleines und für Familienfahrten ein größeres Auto in die Garage stellen. Das kleine könnte ein Elektrofahrzeug mit Batterie und das größere ein Hybridfahrzeug sein, das für kurze Strecken

ebenfalls mit Batteriestrom gefahren werden kann.

Durch die bereits wirksamen Entwicklungen wird sich die Energieszene noch vor Einführung einer nachhaltigen Energiewirtschaft grundlegend ändern. Auch bei Fahrzeugen ist der Trend weg von fossilen Energieträgern hin zu Strom erkennbar. In fast allen Bereichen der Energiewirtschaft, so scheint es, werden im Zuge der rationellen Energienutzung fossile Brenn- und Kraftstoffe durch Strom ersetzt. Chemische Energieträger werden nicht durch synthetische Brennstoffe wie Wasserstoff ersetzt, sondern durch Sparmaßnahmen und elektrischen Strom verdrängt. Als Folge davon könnte der Energieverbrauch in den Industrieländern sinken und gleichzeitig der Stromanteil von heute 20 auf über 50 Prozent ansteigen.

Eine Wasserstoff-Wirtschaft wäre mit diesen Startbedingungen konfrontiert. Da Erdgas und Heizöl bereits durch Wärmedämmung und Elektroheizungen substituiert sind, besteht kaum noch Bedarf für ein zentrales Wasserstoffnetz. Ebenso fährt man mit kleinen und effizienten Elektrofahrzeugen (über 70 Prozent Wirkungsgrad von Steckdose zum Rad) bereits kostengünstig zur Arbeit. Weshalb sollte man ein Brennstoffzellen-Fahrzeug kaufen, das teurer in der Anschaffung ist und wegen des niedrigeren Wirkungsgrades (unter 40 Prozent von Tankstelle zum Rad, bezogen auf den oberen Heizwert) höhere Betriebskosten verursacht?

Energiekosten in einer nachhaltigen Energiewirtschaft

Für die nachhaltige Energiewirtschaft lassen sich auch die relativen Energiekosten grob abschätzen. Heute ist Elektrizität wegen des Wirkungsgrades thermischer Kraftwerke etwa dreimal so teuer wie die Energiekosten der verstromten fossilen Brennstoffe Kohle, Erdgas und Erdöl. Im nachfossilen Zeitalter wird sich diese Relation jedoch grundlegend ändern. Da erneuerbare Energie vorwiegend als

elektrischer Strom ankommt, wird der Strompreis zur Referenz der Energiekosten werden. Die Kilowattstunde Wasserstoff muss zwangsläufig teurer sein als die Kilowattstunde Strom, denn Wasserstoff wird unter erheblichen Verlusten über die Elektrolyse aus Strom gewonnen und unter Einsatz von Strom verpackt (komprimiert oder verflüssigt) und verteilt. Die über Wasserstoff beim Verbraucher ankommende Energie muss also wesentlich teurer sein, als die über das Stromnetz verteilte. Allein aus Kostengründen wird der künstlich erzeugte Wasserstoff im Heizungsbereich nicht Erdgas oder Heizöl ersetzen, denn Netzstrom ist billiger. Bei der Rückverstromung des Wasserstoffs mit Brennstoffzellen entstehen weitere Verluste. Ein stationärer Verbraucher mit Netzanschluss wird seine elektrische Energie auch in Zukunft vom Netz beziehen.

Ähnliches gilt auch für Autos. Der Strom aus der Steckdose in der Garage wird billiger sein als Wasserstoff an der Tankstelle. Dieser Kostenvorteil lässt sich mit Brennstoffzellen nicht kompensieren, denn mit diesen lassen sich nur 40 Prozent, mit Elektrofahrzeugen jedoch 80 Prozent der „getankten“ Energie auf die Straße bringen. Die Rückwandlung von Wasserstoff in Strom mit Hilfe von Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotoren verschlechtert die Ökonomie der auf Wasserstoff basierenden Lösungen weiter.

Die Kostenrelation ergibt sich aus dem Energieaufwand für Herstellung, Verpackung durch Verdichtung oder Verflüssigung, Verteilung mittels Tankwagen oder Pipeline, Lagerung und Transfer von Wasserstoff, kurz für alle notwendigen Schritte einer Wasserstoffwirtschaft. Jeder dieser Schritte kostet Energie, vorwiegend elektrische, oder ist mit Verlusten behaftet. In der kürzlich vorgelegten Studie „The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak?“ (die endgültige Fassung vom 15. April 2003 findet man unter www.efcf.com/reporte/hydrogen_economy.pdf) haben die Autoren Ulf Bossel, Baldur Eliasson und Gordon Taylor den Energiebedarf für die wesentlichen Stufen



Nicht mehr weit entfernt von der Markteinführung: Brennstoffzellen-Heizgeräte.

einer Wasserstoffwirtschaft erfasst und verständlich dargestellt. Basis für die Arbeiten bilden physikalische und thermodynamische Grundlagen, sowie praktische Erfahrungen der Wirtschaft. Die Analysen sind inzwischen auch von Befürwortern einer Wasserstoffwirtschaft bestätigt worden. Bezüglich der Schlussfolgerungen gibt es naturgemäß unterschiedliche Meinungen. Die Arbeit gestattet jedoch

allen Interessenten, eigene Überlegungen mit sachlichen Argumenten zu hinterlegen.

Energieverluste bei der Bereitstellung von Wasserstoff

Wasserstoff kann auf unterschiedlichen Pfaden von der Stromquelle zum Verbraucher gelangen: zentrale Elektrolysefabrik, Elektrolysestationen in Windenergieparks oder an Tankstellen, Kompression des Gases auf 200, 400 oder 800 bar, Verflüssigung in Anlagen unterschiedlicher Leistungsgröße, Verteilung des komprimierten oder verflüssigten Gases per Tankwagen, Schiff oder Pipeline, Speicherung in Behältern oder in chemischer Form in Metallhydriden usw. Der Phantasie sind fast keine Grenzen gesetzt. Jedoch sind alle denkbaren Pfade auf wenigen Grund-

Verfahrensschritt	Technische Angaben	Gesamte Energieeinsatz MJ/kg	Relativ zu 142 MJ/kg -	Verluste in Bezug auf Ho %
Elektrolyse:	1.76 Volt, 1 atm	203	1.43	43
Kompression:	1 bar - 200 bar	10	0.07	7
	1 bar - 400 bar	13	0.09	9
	1 bar - 800 bar	17	0.17	12
Verflüssigung:	100 kg/h	65	0.46	46
	1000 kg/h	45	0.32	32
	10000 kg/h	35	0.25	25
Strassen-transport:	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, 1000 km	12	0.09	8
H ₂ -Elektrolyse an Tankstellen:	entspr. 60000 Liter Benzin pro Tag	222*)	1.56	56
Betanken:	100 bar auf 400 bar	5	0.04	4
Brennstoffzelle:		142	0.50	50

*) einschliesslich Wasseraufbereitung, Kompression usw.

Typischer Energiebedarf für Erzeugung, Vermarktung und Verbrauch von Wasserstoff bezogen auf den oberen Heizwert (Ho) von 142 MJ/kg.

bausteinen aufgebaut: Elektrolyse, Kompression, Verflüssigung, Straßentransport, Pipelinetransport, Lagerung, Umfüllen und Brennstoffzelle. Diese sind in der zitierten Studie erfasst.

In der Studie werden alle Energiebetrachtungen auf den oberen Heizwert bezogen, also auf eine Bezugsgröße, die durch den Energieerhaltungssatz physikalisch exakt definiert ist. Bei fossilen Brennstoffen, die vor Millionen von Jahren natürlich entstanden sind, kann man Vergleiche auch auf dem unteren Heizwert H_u aufbauen. Da Wasserstoff künstlich erzeugt werden muss, sollte man den Energieinhalt des synthetischen Energieträgers auf die Energiemenge beziehen, die als Minimum dem Elektrolyseur zugeführt werden muss, um Wasser zu spalten, also auf die Bildungsenthalpie oder den oberen Heizwert H_o . Im besten Fall kann man diese Energie durch Verbrennung des Wasserstoffs mit reinem Sauerstoff wieder zurückgewinnen. Der Unterschied zwischen oberem und unterem Heizwert beträgt bei Heizöl etwa 6,4 Prozent, bei Benzin etwa 7,8 Prozent, bei Erdgas etwa 10,7 Prozent und bei Wasserstoff 18,6 Prozent. Offenbar basieren viele vergleichende Studien auf der Verwendung des unteren Heizwertes H_u . Die Ergebnisse solcher Betrachtungen werden dadurch zu Gunsten des Wasserstoffs um mindestens zehn Prozent geschönt.

Die wesentlichen Ergebnisse der zitierten Studie sind in der Tabelle zusammengefasst. Die Zahlen können nur als Anhaltspunkt dienen, denn sie enthalten keine betriebsbedingten Anlagenverluste (elektrische, mechanische, oder thermische), keine Verluste der Stromübertragung vom Kraftwerk zum untersuchten Prozess, keine Wasserstoff-Verluste im Prozess infolge Leckage, keine Verluste bei der Stromerzeugung usw. Die Realität sieht also schlechter aus. Für den physikalischen Prozess jedoch sind die folgenden Werte repräsentativ. Daraus folgt beispielsweise ein Energieeinsatz für elektrolytisch erzeugten, auf 200 bar komprimierten, per LKW 200 km transportier-

ten, in Vorrattanks bei 100 bar gelagerten, zur Befüllung eines 350 bar Tanks auf 400 bar komprimierten Wasserstoff von insgesamt mindestens $203+10+18+5 = 236$ MJ/kg. 142 MJ/kg erhält der Kunde in Form von Wasserstoff. 94 MJ/kg oder 66 Prozent des oberen Heizwerts mussten für die Bereitstellung zusätzlich aufgewendet werden. Bezogen auf den Gesamt-Energieeinsatz ergibt sich ein Wirkungsgrad von 60 Prozent. Bei der Rückverstromung mit stationären oder mobilen Brennstoffzellen stehen lediglich 50 Prozent von 142 MJ/kg oder nur noch 30 Prozent des Stromeinsatzes zur Verfügung. Es gibt keine erkennbare Möglichkeit, dem Endverbraucher über die Wasserstoffschiene mehr als 40 Prozent des eingesetzten Stroms wieder als elektrische Energie zur Verfügung zu stellen. Beim direkten Stromtransport vom Kraftwerk zum Verbraucher mittels Elektronen sind es über 90 Prozent.

Für die Abschätzung der relativen Energiekosten kann man von einem Faktor zwei für den thermischen Einsatz von Wasserstoff und vier für die Rückverstromung mit Brennstoffzellen ausgehen. Eine Energieverteilung mittels Wasserstoff bringt dem Energieverbraucher also keine erkennbaren Vorteile. In einer nachhaltigen Energiewirtschaft wird Strom aus der Steckdose deutlich kostengünstiger sein als Wasserstoff aus der Gasleitung.

Diese physikalisch begründeten Zusammenhänge können nicht durch intensive Forschungsbemühungen wesentlich verbessert werden. Wasserstoff ist nun einmal das leichteste Gas mit dem kleinsten Molekül. Fast alle daraus abgeleiteten physikalischen Daten und technischen Zusammenhänge stellen Wasserstoff als Energieträger in Frage. Merkmale wie seine saubere Verbrennung, seine hohe Verfügbarkeit (allerdings in chemisch gebundener Form), oder dass man alle Energieformen in Wasserstoff umwandeln kann, qualifizieren diesen Stoff nicht als universellen Energieträger.

Auf der politischen Ebene genießt Wasserstoff einen nach Meinung

vieler Experten viel zu hohen Stellenwert. Die politisch motivierten Regierungsprogramme der Vereinigten Staaten (FreedomCar, Hydrogen Initiative, Clean Coal) drohen den Rest der Welt zu blenden und Politiker zur Nachahmung zu animieren. Europa hat die Chance, ein auf den Gesetzmäßigkeiten der Physik aufgebautes Programm zur Einführung einer nachhaltigen Energiewirtschaft zu formulieren und zielstrebig zu verwirklichen. Wasserstoff wird darin sicherlich eine gewisse Rolle spielen. Aber eine nur auf Wasserstoff aufbauende Energiewirtschaft kann die Probleme der Zukunft nicht lösen.

Rolle der Brennstoffzelle

Zu den Bausteinen einer gesicherten Energiezukunft gehört sicherlich auch die Brennstoffzelle. Wir brauchen sie vor allem jetzt für die Umwandlung fossiler Brennstoffe in Strom, denn sie kann diese effizienter und sauberer umwandeln als Verbrennungsmaschinen. Aber sie sollte nicht als Feigenblatt für die übereilte Einführung einer Wasserstoff-Wirtschaft missbraucht werden. Wir benötigen heute vor allem die Festoxid- und Schmelzkarbonat-Zellen, die wegen ihrer hohen Betriebstemperaturen und des Sauerstofftransports von Luft zum Brennstoff eine breite Brennstoffpalette mit hoher Effizienz in Strom umwandeln können und deshalb nicht auf Wasserstoff angewiesen sind.

Was ist zu tun?

Die meisten Forderungen zur Einführung einer Wasserstoff-Wirtschaft basieren auf der stark vereinfachten Annahme, dass alle heute eingesetzten chemischen Energieträger fossilen Ursprungs durch andere chemische Energieträger ersetzt werden müssen. Wenn dies so wäre, dann könnte Wasserstoff tatsächlich die sinnvollste Lösung sein.

Man kommt jedoch zu ganz anderen Ergebnissen, wenn man, wie in dieser Arbeit, die Antworten aus

bereits laufenden oder sich abzeichnenden Entwicklungen ableitet. Aufgrund des wahrscheinlichen Energieangebots (Strom, Biomasse, Wärme) einer nachhaltigen Energiewirtschaft wird Wasserstoff keine dominierende Rolle spielen können. Vermutlich wird die Stromdominanz durch Kernenergie noch weiter erhöht. Andererseits wird Kohle auch nach Versiegen der Öl- und Gasquellen für viele Jahre Energierohstoff bleiben. Durch Kohlehydrierung könnten synthetische flüssige Kraftstoffe gewonnen wer-

den. Für diese bekannte und bewährte Synthese wird jedoch Wasser, nicht Wasserstoff verwendet. Auch für diesen wichtigen chemischen Prozess wird also kein reiner Wasserstoff benötigt.

Die sich abzeichnende Energieverknappung wird mit der Substitution fossiler Energieträger durch Elektrizität verbunden sein, nicht aber zum universellen Einsatz von Wasserstoff führen. Die Zeichen stehen nicht günstig für eine Wasserstoff-Wirtschaft. Bevor Weichen gestellt und Beschlüsse gefasst wer-

den, sollte man die vorgetragenen Gedanken genauer studieren und quantifizieren. Forschungsgelder können nur einmal ausgegeben werden. Es wäre sinnvoll und verantwortlich, die begrenzten Mittel für die beste Zukunftssicherung zu verwenden.

Der Autor Dr. Ulf Bossel (Ph.D. UC Berkeley, Dipl. Ing. ETH) ist Initiator des European Fuel Cell Forums, Oberrohrdorf/Schweiz.