

Wasserstoff – Zündschlüssel für den nachhaltigen Verkehr?

Wasserstoff als Treibstoff im Verkehrssektor spielt auf dem Gemeinschaftsstand »Hydrogen and Fuel Cells« in Halle 13 der Hannover Messe vom 15. bis 20. April eine große Rolle. Im Vorfeld lohnt sich ein Blick auf die Ökobilanz von Wasserstoff gegenüber Diesel. Vier Szenarien weisen den Weg zum »optimalen« Kraftstoff.



Wasserstoff wird als der Kraftstoff der Zukunft angesehen. Grundlage für diese Einschätzung ist, dass bei seinem Einsatz in Brennstoffzellen als Abgas lediglich Wasserdampf entsteht, der deutlich weniger klimawirksam ist als z.B. Kohlendioxid. Außerdem weisen Brennstoffzellen im Teillastbereich einen höheren Wirkungsgrad als Verbrennungsmotoren auf. Diese Argumente implizieren ökologische Vorteile bei der Substitution von Benzin und Diesel, deren Verbrennung zu etwa 19% der bundesweiten Kohlendioxidemissionen [1] beitragen (Bezugsjahr 1998). Wie die Primärenergie- und Emissionsbilanz wirklich aussieht, zeigt eine Studie, die das Oldenburger Ingenieurbüro Planet in Kooperation mit der Universität Oldenburg durchführte [3]. Darin werden vier Kraftstoffversorgungsketten für Wasserstofffahrzeuge am Beispiel von Linienbussen verglichen.

Eine aussagekräftige Argumentation muss auf einer Lebenszyklusanalyse basieren, die alle Schritte – von der Primärenergiequelle bis zum drehenden Rad – beinhaltet (Normenreihe DIN EN ISO 14040 ff. [2]). Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung wurden die Umwelteffekte von der Rohstoff- oder Primärenergiegewinnung (z.B. Erdgas, Windenergie, Erdöl, Eisenerz) über die verschiedenen Transport- und Umwandlungsschritte bis zur Nutzung im Fahrzeug ermittelt. Auch der »ökologische Rucksack« des Produktes Wasserstoff bzw. Diesel musste berücksichtigt werden, also Energiebedarf und Umweltwirkungen beim Aufbau der Produktions-, Transport- und Betankungsinfrastruktur (z.B. die Erzeugung von Stahl für Raffinerien und Windkraftanlagen). Die Herstellung der Fahrzeuge war nicht Teil der Untersuchung. Als Instrument und teil-

weise als Datenbasis diente die Software GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme) des Öko-Institutes in Darmstadt [4]. Betrachtungshorizont und Datengrundlage war das Jahr 2000.

Diesel als der heutige Standardkraftstoff für Busse dient als Referenz für die Bewertung der unterschiedlichen Wege zur Wasserstoffbereitstellung. Seine Herstellung erfolgt durch zentrale Raffinerieprozesse aus dem Erdölmix der BRD [4]. Der Kraftstoff wird in den Modellrechnungen per Binnenschiff-, Schienen- und Straßentransport verfrachtet, an Tankstellen bereitgestellt und an einen Linienbus mit Verbrennungsmotor nach der Euro3-Abgasnorm (gültig für Neufahrzeuge seit Januar 2000) abgegeben. Der mittlere Kraftstoffbedarf wurde nach GEMIS-Angaben auf 4,15 kWh/km, also ca. 42 Liter Diesel pro 100 km festgelegt.

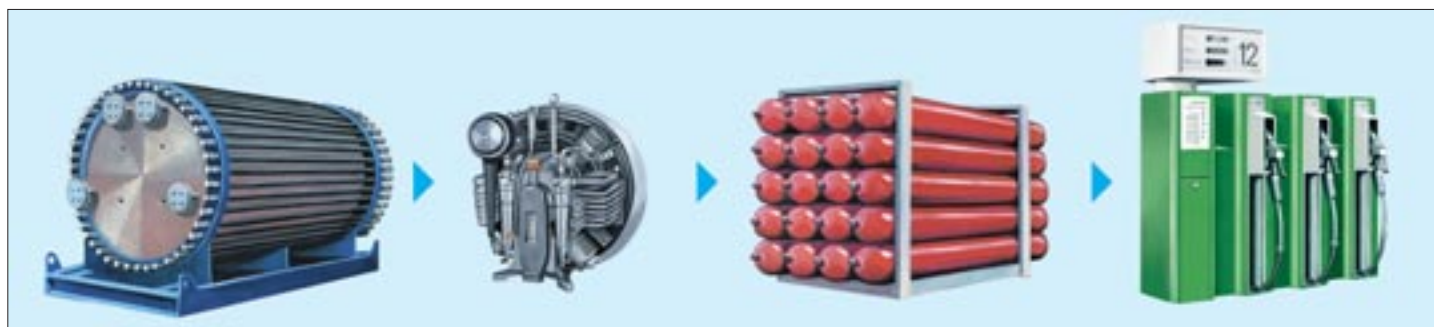
Die vier Szenarien

Aus heutiger Sicht sind die Spaltung von Wasser mittels elektrischer Energie (Elektrolyse) und die Reformierung von Erdgas oder Methanol (katalytische Umsetzung mit Wasserdampf zu H_2 und CO_2) die vielversprechendsten Verfahren zur Wasserstoffproduktion. Für den Einsatz von Methanol als flüssigem (Zwischen-) Energieträger spricht vor allem ein mit Diesel vergleichbarer Energiegehalt pro Liter und eine ähnliche Handhabung, die den Aufbau einer neuartigen Tankstellenstruktur weitgehend erspart. Der Energieinhalt von komprimiertem Wasserstoffgas (Druckwasserstoff) ist bei 250 bar um einen Faktor von etwa 13,3 geringer als der von Diesel, was den Platzbedarf im Fahrzeug erhöht bzw. die Reichweite einschränkt.

Abb. 1: Im Rahmen des Projektes »Cute – Clean Urban Transport for Europe« werden ab 2003 in neun europäischen Großstädten je drei Brennstoffzellenbusse erstmals im Alltagsbetrieb erprobt (www.fuel-cell-bus-club.com).

Foto: DaimlerChrysler

Abb. 2: Die Tankstelle Euhyfis (European Hydrogen Filling Station) erzeugt vor Ort Wasserstoff durch Elektrolyse mittels Strom aus (überwiegend) erneuerbaren Energiequellen; von links nach rechts: Elektrolyseur, Kolbenkompressor, Speichersäule, Zapfsäule. Nähere Infos zu Euhyfis auf der Hannover Messe auf dem Stand G 58/6 in Halle 13 im Rahmen des Gemeinschaftsstandes »Hydrogen and Fuel Cells« (www.fair-pr.de).



Im folgenden werden exemplarisch vier der insgesamt sieben in [3] untersuchten Szenarien zur Wasserstoffherzeugung und Nutzung in Bussen mit Brennstoffzellenantrieb skizziert. Der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch von Brennstoffzellenbussen liegt derzeit noch bei etwa 4,1 kWh/km, was dem Bedarf eines Dieselfahrzeuges entspricht. Zukünftige Brennstoffzellensysteme sollen durch Optimierung einen deutlich geringeren Energiebedarf aufweisen. Als Zielwert wird für Linienbusse bis zum Jahr 2010 ein Wert von 2,9 kWh/km angestrebt [5].

1. Wind, Elektrolyse: Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse mit 100% Strom aus Windkraft als erneuerbarer Energiequelle. Der Wasserstoff wird direkt an der Tankstelle erzeugt, anschließend durch einen Kompressor auf 350 bar verdichtet und einem Druckspeicher zugeführt. Die Betankung erfolgt durch Überströmen des Gases in den Fahrzeugtank (250 bar).

Abb. 3: Kumulierter Energieaufwand im Vergleich für die vier Szenarien differenziert nach nicht-regenerativen und regenerativen Anteilen

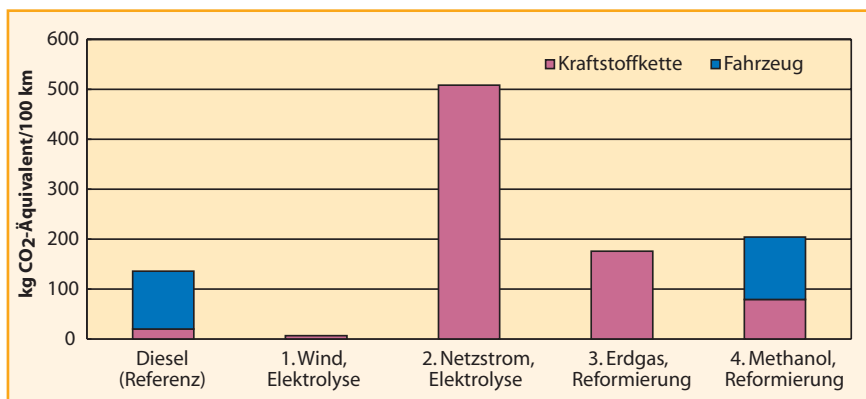
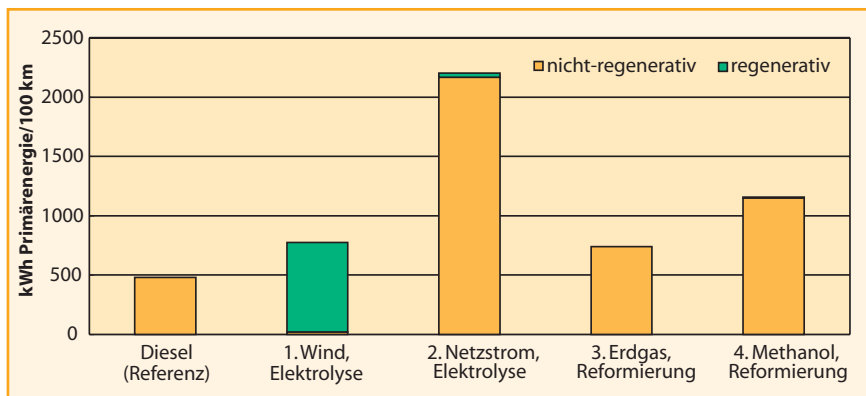


Abb. 4: Emission von CO₂-Äquivalenten aus dem gesamten Treibstoff-Lebenszyklus im Vergleich für die vier Szenarien, aufgeteilt in die Kraftstoffkette (von der Energiequelle bis zum Tank) und die Nutzung des Kraftstoffes als Antriebsenergie. Grafiken (3): Planet

2. Netzstrom, Elektrolyse: Erzeugung und Nutzung wie im Szenario »Wind, Elektrolyse«, jedoch mit Netzstrom entsprechend dem deutschen Strommix (53,5% Kohle, 28,1% Kernkraft, 9,5% Erdgas, 3,5% Wasserkraft, 2,8% Müll, 1,1% Wind, 1% Öl, 0,5% Biomasse).

3. Erdgas, Reformierung: Erzeugung von Wasserstoff durch Reformierung von Erdgas. Das Erdgas wird zuerst über das bestehende Gasnetz bis zur Tankstelle transportiert und dort zu Wasserstoff reformiert. Ansonsten wie Szenario 1.

4. Methanol, Reformierung: Erzeugung von Wasserstoff durch Reformierung von Methanol im Fahrzeug (on-board). Das Methanol wird in mehreren Schritten aus Erdgas in zentralen Anlagen großtechnisch synthetisiert und anschließend wie Diesel zu

den Tankstellen befördert, gespeichert und getankt. Der Bus besitzt zusätzlich zur Brennstoffzelle ein Reformersystem, um Wasserstoff zu gewinnen. Die Verdichtung mittels Kompressor entfällt. Allerdings ergibt sich aus dem Mehrgewicht für die Reformertechnik und dem Energieaufwand des erneuten Umwandlungsprozesses ein erhöhter Kraftstoffbedarf im Vergleich zu einem mit Druckwasserstoff versorgten Fahrzeug. Er wurde auf Grundlage von [6] mit 4,9 kWh/km angenommen.

Kumulierter Energieaufwand

Für die energetische und ökologische Bewertung sind nach heutiger Ansicht vor allem der Verbrauch von fossilen Ressourcen sowie die Produktion von klimawirksamen Treibhausgasen entscheidende Kriterien in der umweltpolitischen Bewertung. In Abb. 3 ist der kumulierte Energieaufwand für die untersuchten Pfade als Summe aus fossilen und regenerativen Energieanteilen dargestellt. Es zeigt sich, dass im Vergleich zu Diesel alle Wasserstoffsznarien einen erhöhten kumulierten Energieaufwand erfordern. Dabei liegen die Szenarien 1 »Wind, Elektrolyse« und 3 »Erdgas, Reformierung« etwa gleichauf und dem Diesel am nächsten.

Anders als bei Dieselmotoren, der mit einem relativ geringen Energieaufwand gewonnen wird, kann Wasserstoff nur über mehrere Umwandlungsschritte unter vergleichsweise hohem energetischem Einsatz erzeugt werden. Entscheidend für die ökologische Bewertung ist jedoch der Anteil nicht-regenerativer, in der Regel fossiler Energie.

Bezüglich des fossilen Energieaufwandes ist das Szenario 1 »Wind, Elektrolyse« dem Referenzsystem und allen anderen Wasserstoff-Pfaden klar überlegen. Der nicht-regenerative Anteil, der allein aus der Berücksichtigung von Baumaterialien und Energie zur Errichtung von Windkraftanlagen, Elektrolyseur, Kompressor, Druckgasspeicher usw. herrührt, ist fast vernachlässigbar. Mit 20,5 kWh pro 100 km beträgt er weniger als 5% des Wertes für Diesel.

Die Reformierung von Erdgas bzw. Methanol sowie das Szenario »Netzstrom, Elektrolyse« zeigen dagegen einen bis zu viermal höheren kumulierten Energiebedarf im Vergleich zu Diesel und stellen daher mit Blick auf die Schonung fossiler Ressourcen keine Alternative dar. Auch die erwarteten Effizienzsteigerungen der Wasserstofffahrzeuge würden nicht zu einem solchen Vorteil gegenüber Diesel führen, dass ein Systemwechsel attraktiv würde.

Treibhausgaspotenzial

Für die kumulierten Emissionen von Treibhausgasen entlang der Kette von Bereitstellung und Nutzung, in Abb. 4 als CO₂-Äquivalente angegeben, gelten im wesentlichen die gleichen Relationen wie in Abb. 3. Wieder schneidet das Szenario »Wind, Elektrolyse« mit 6,4 kg/100 km am besten ab mit einem Bruchteil des Diesel-Wertes (136 kg/100 km). Es wird ferner deutlich, daß die Szenarien 2 und 3



Fahrfähiger Brennstoffzellenbus in der Ausstellung »It's Hy(drogen)Time« in Düsseldorf

Foto: Landesinitiative Zukunftsenergien NRW

zwar lokal Emissionen aus der Kraftstoffnutzung vermeiden und damit zur Verbesserung der Situation z.B. in Innenstädten beitragen. Sie bewirken jedoch nur eine Verlagerung der Klimagaserzeugung in Kraftwerke (Szenario 2) bzw. an Tankstellen (Szenario 3) und verschlechtern die Situation im Vergleich zur Dieselnutzung. Der Einsatz von Methanol im Szenario 4 führt wegen der Reformierung an Bord zur lokalen Emission von Klimagasen. Das relativ günstige Ergebnis muss mit Vorsicht bewertet werden, weil die Datenbasis dieses Prozessschrittes noch mit großen Unsicherheiten behaftet ist.

Der Weg zum »optimalen« Kraftstoff

Wasserstoff kann also nicht vorbehaltlos als ein umweltfreundlicher und – in Bezug auf den Verbrauch von fossilen Ressourcen – als effizienter Energieträger bezeichnet werden. Nur unter Einsatz erneuerbarer Primärenergie (bzw. im Rahmen eines Ener-

giemixes hoher Anteile aus erneuerbaren Quellen) ergibt sich ein ökologischer Nutzen, der eine Substitution von Diesel oder Benzin unter Berücksichtigung der nötigen Investitionen sinnvoll erscheinen lässt.

Grundsätzlich ist die Umwandlung fossiler Primärenergie in Wasserstoff selbst unter Berücksichtigung höherer Energiewandlungsgrade der Brennstoffzellen ineffizient.

Die hier vorgestellten Pfade, die auf Erdgas oder Methanol zur Herstellung von Wasserstoff basieren, können somit nicht überzeugen. Immerhin zeigen diese Prozessketten bei einigen Umwelteffekten deutliche Vorteile gegenüber Diesel, die in dieser knappen Darstellung jedoch nicht vorgestellt werden können (z.B. beim Potenzial zur Bildung von Sommersmog).

Im Rahmen der Gesamtuntersuchung [3] konnte die dezentrale Bereitstellung von Druckwasserstoff durch Elektrolyse auf der Basis von Windkraft auch im Vergleich zu anderen regenerativen Energieszenarien als umweltpolitisch optimal herausgestellt werden. Allerdings wurden Bereitstellungswege bisher nicht untersucht, die z.B. biogene Quellen für Methan zur Wasserstoffproduktion berücksichtigen.

Thomas Feck

Robert Steinberger-Wilckens

Klaus Stolzenburg

Dipl.-Umweltwis. Thomas Feck, Dipl.-Phys. Dr. Robert Steinberger-Wilckens und Dipl.-Phys. Klaus Stolzenburg arbeiten im Ingenieurbüro Planet, das sich bereits seit 1986 mit Energieversorgung und Technikplanung beschäftigt. Planet hat 1997 die Entwicklung der Wasserstoff-Tankstelle Euhyfis (European Hydrogen Filling Station; www.euhyfis.com) initiiert und ist an mehreren EU-weiten Projekten der mobilen und stationären Nutzung von Wasserstoff beteiligt, darunter am Projekt »Cute« (Abb. 1).

Adresse:

Planet – Planungsgruppe Energie und Technik GbR,
Donnerschweer Straße 89 bis 91,
26123 Oldenburg,
Tel. 04 41/8 50 51, Fax 04 41/8 80 57,
E-mail:
t.feck@planungsgemeinschaft.de,
www.planungsgemeinschaft.de,

Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Zahlen und Fakten – Energie Daten 2000, Juli 2000
- [2] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): DIN EN ISO 14040/41/42/43: Umweltmanagement – Produkt-Ökobilanz, August 1997 – Juli 2000
- [3] T. Feck: Ökobilanzierung unterschiedlicher Kraftstofflebenszyklen für Wasserstofffahrzeuge, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Oldenburg 2001
- [4] U. Fritsche et al.: Globales Emissions Model Integrierter Systeme, Version 4.07, Öko-Institut, Darmstadt 2001
- [5] CRAFT-Project: European Hydrogen Filling Station EUHYFIS; Infrastructure for Fuel Cell Vehicles Based on Renewable Energies, Publishable Report to the European Commission, Contract No. JOE-CT98-7043, Juli 2000
- [6] Deutscher Bundestag, Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung gemäß § 56a der Geschäftsordnung, Technikfolgenabschätzung: Brennstoffzellen-Technologie, Berlin 2001

WIR SORGEN FÜR CIBERBLICK !!!!

Ja, ich bestelle die *Sonne Wind & Wärme* im Abonnement zum Preis von 60 € pro Jahr (im Ausland zzgl. Porto).

Jetzt 12mal im Jahr

Abo-Coupon

Name _____

Straße _____

PLZ _____ Ort _____

Datum _____ Unterschrift _____

Vertrauensgarantie! Mir ist bekannt, daß ich diesen Auftrag innerhalb von 10 Tagen schriftlich bei der Bielefelder Verlagsanstalt GmbH & Co. KG, Postfach 10 06 53, 33506 Bielefeld, widerrufen kann. Die Widerrufsfrist beginnt mit Absendung dieses Abonnement-Coupons (Poststempel). Zur Wahrung der Widerrufsfrist genügt die Absendung innerhalb von 10 Tagen nach Beginn der Widerrufsfrist (Poststempel). Die Kenntnisnahme dieses Hinweises bestätige ich mit meiner 2. Unterschrift.

Datum _____ Unterschrift _____

Bitte per Post oder Fax an:
Bielefelder Verlagsanstalt, Postfach 10 06 53, 33506 Bielefeld,
Fax: 05 21 / 59 55 07.