

Mit Wasserstoff in eine saubere Energiezukunft?

Welt-Wasserstoffkonferenz reflektiert Stand der Technik und fordert politische Entscheidungen

Wasserstoff wäre der ideale und könnte ein universeller Sekundärenergie-träger sein, denn durch ihn ließen sich für den Endverbraucher Wärme, Licht und Kraft bereitstellen. Seine Energiedichte ist hoch. Bei der Verbrennung von 1 kg Wasserstoff werden etwa 33 kWh frei. Wissenschaftler wie Prof. Justi und Industrielle wie Dr.-Ing. Bölkow denken seit vielen Jahren über eine Wasserstoffwirtschaft nach, die gleichzeitig die Solarenergie in großem Umfang nutzbar machen könnte. Als energiewirtschaftlicher Hoffnungsträger ist Wasserstoff heute mehr denn je im Gespräch. Die fossilen Energieträger werden irgendwann einmal nicht mehr wie derzeit zur Verfügung stehen, ihre Verbrennung belastet die Atmosphäre in einer Weise, daß katastrophale Folgen absehbar sind, und nicht zuletzt dürfte nach Tschernobyl die Atomenergie keine allzu große Zukunft mehr haben.

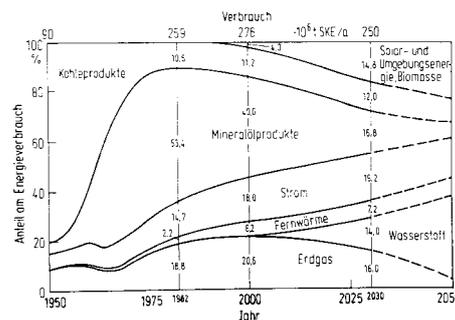
Von einer auf Wasserstoff basierenden Energiewirtschaft sind wir trotzdem noch Jahrzehnte entfernt, auf jeden Fall dann, wenn man sie sich nur mit großtechnischen Erzeugungsanlagen und landesweiten Verteilnetzen für den Wasserstoff vorstellen kann. Die am 24. Juli 1986 in Wien zuende gegangene „6th World Hydrogen Energy Conference“, über die nachfolgend berichtet wird, vermittelte wahrscheinlich ein recht zutreffendes Bild von dem, was vom Wasserstoff für die künftige Energieversorgung zu erwarten ist. Zwei der wesentlichsten Unbekannten sind konkrete politische Entscheidungen und die Ergebnisse menschlicher Kreativität. Beide könnten im Sinne eines „sauberen Brennstoffes für die Zukunft“ sehr wohl für positive Überraschungen sorgen.

Eingeladen hatte zu der Wiener Konferenz, an der weit über 300 Fachleute aus rund 40 Ländern teilnahmen, die „Internationale Gesellschaft für Wasserstoff-Energie“. Organisatoren waren die Österreichische Akademie der Wissenschaften und die Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR). Eine insbesondere für die Öffentlichkeit bestimmte Bilddokumentation über Wesen, Gewinnung und Anwendung von Wasserstoff ist von Univ.-Prof. Dr. Gerhard Faninger, dem Präsidenten der Österreichischen Gesellschaft für Sonnenenergie und Weltraumfragen (ASSA), zusammengestellt worden.

Univ.-Prof. Dr. Nikola Getoff, der die Konferenz als Präsident leitete, formulierte: „Wasserstoff gibt uns die Chance, mit Hilfe der Sonnenenergie eine energetische und ökologische Kreislaufwirt-

schaft in der Energiewirtschaft zu realisieren. Ein Wunschziel, aber auch eine große Herausforderung an Wissenschaft und Technik.“

Getoff erinnerte daran, daß Wasserstoff aus Wasser hergestellt werden kann und bei der Verbrennung wiederum Wasser liefert. Das Schlüsselproblem für die Einführung von Wasserstoff als Energieträger liege heute noch bei seiner wirtschaftlichen und umweltschonenden Herstellung sowie der Schaffung der nötigen Infrastruktur. Seine wirtschaftliche großtechnische Erzeugung könne z.B. durch moderne Elektrolyseverfahren und – vielleicht in einer Dekade – auch mit Hilfe der Sonnenenergie erreicht werden. Diese sei dann in großem Stil nutzbar, weil sie in eine speicherbare und transportierbare Form umgewandelt werde.



Vergangene und künftig mögliche Entwicklung des bundesdeutschen Energiemarktes (Endenergie und nicht-energetischer Verbrauch) unter der Annahme einer Wasserstoffproduktion aus nicht-fossiler Primärenergie ab etwa dem Jahre 2000.

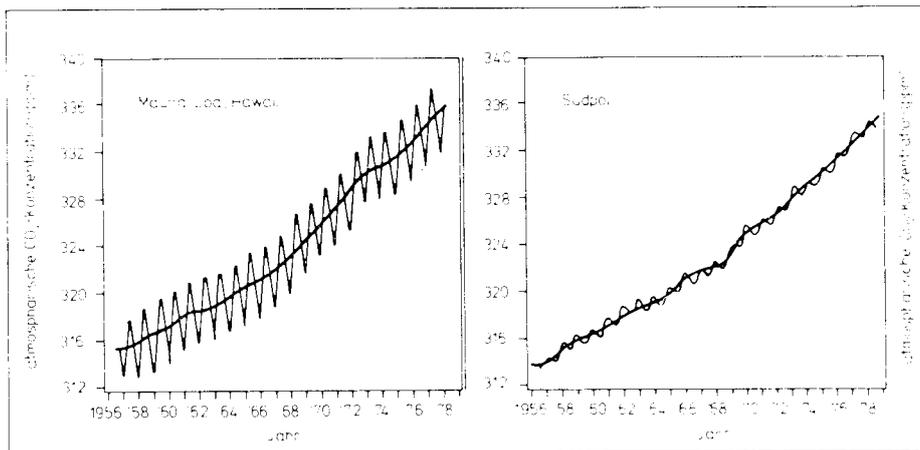
Quelle: DFVLR

Wasserstoff noch kaum aus Wasser

In der Industrie spielt Wasserstoff von jeher eine wesentliche Rolle. In der Bundesrepublik Deutschland dürften von ihr jährlich rund 20 Milliarden Nm³ verbraucht werden. Obwohl Wasser der ideale Rohstoff zur Gewinnung von Wasserstoff ist, wird dieser heute weltweit zu etwa 77 % aus Erdöl/Erdgas hergestellt, zu 18 % aus Kohle und zu nur etwa 4 % durch Elektrolyse. Wasserstoff aber, der nahezu ausschließlich aus fossilen Rohstoffen gewonnen wird, schließt seine breite energetische Verwendung grundsätzlich aus.

Für die Realisierung einer Wasserstoff-Energiewirtschaft in der Welt samt dazugehöriger Infrastruktur sei eine internationale politische Entscheidung notwendig, ließ die Konferenzzeitung verlauten. Die Politiker müßten von der dringenden Notwendigkeit zur Einführung dieser neuen Technologie überzeugt werden. Dabei sollten nicht nur die „sichtbaren“ Nachteile der fossilen Brennstoffe hervorgehoben werden, sondern auch die „versteckten“ Folgen des gegenwärtigen Energiehaushaltes. Zu ihnen gehörten die sich ständig verschlechternde Atmosphäre mit den daraus resultierenden Folgen, die bisher bei den wirtschaftlichen Betrachtungen nicht berücksichtigt worden seien.

Gewiß würden die zahlreich verfaßten Energieprognosen anders lauten, wäre das Erdöl heute nicht so billig. An eine weitverbreitete Nutzung von Wasserstoff als Sekundärenergie-träger ist überhaupt nur dann zu denken, wenn dieser Preis drastisch ansteigt und wenn durch eine Massenproduktion der zur Wasserstoffgewinnung notwendigen Komponenten – vor allem auch solartechnischer Art – bei den Anlagen eine radikale Preisreduktion möglich würde. Solange sich diese Parameter nicht entscheidend verändern, wird die



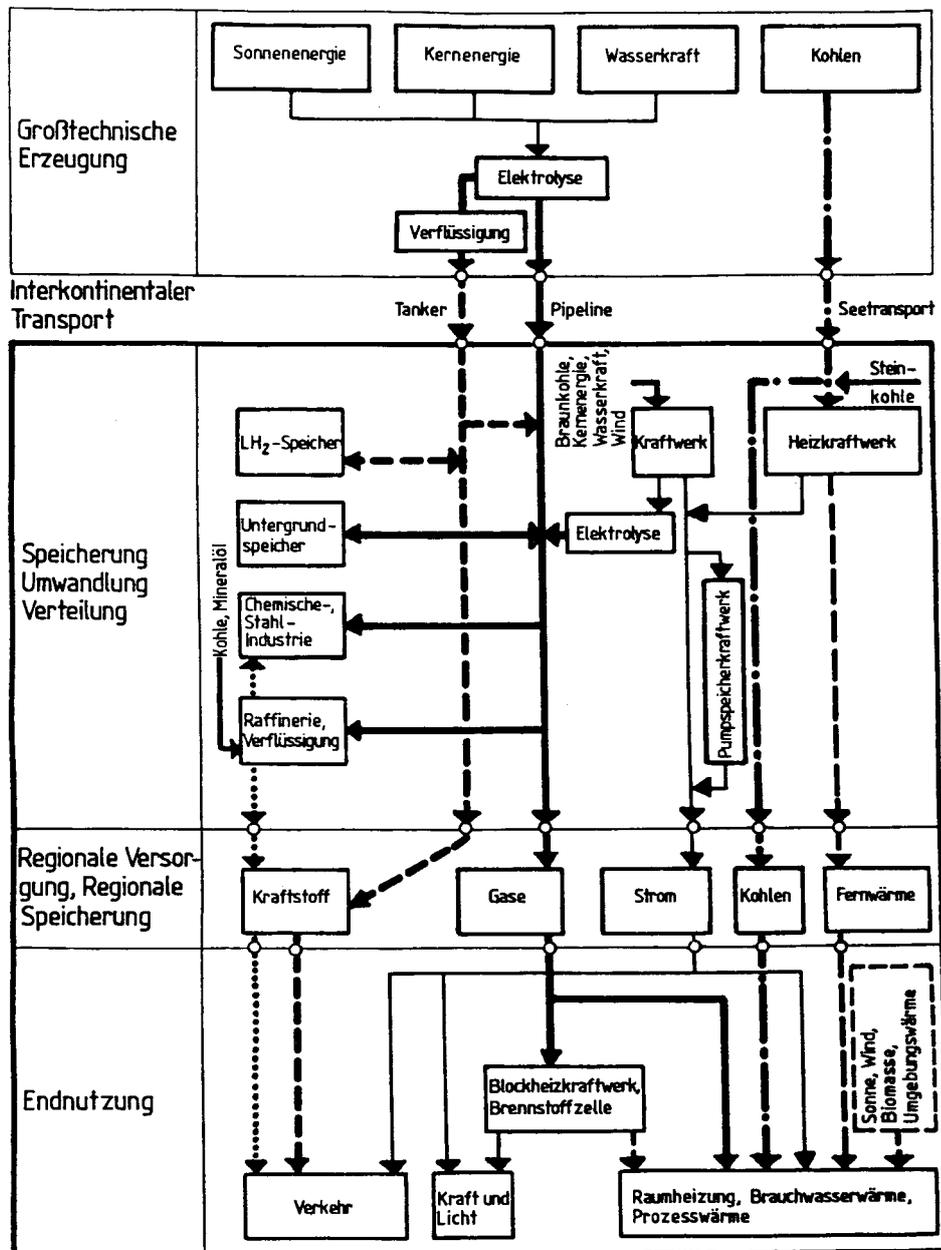
Warnkurven. Sie zeigen den Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre über Hawaii (links) und dem Südpol (rechts). Da die Fortsetzung dieser Trends in einigen Jahrzehnten zu klimatischen Katastrophen führen dürfte, muß die Verbrennung fossiler Energieträger radikal eingeschränkt werden. Eine Wasserstoffwirtschaft böte sich als Alternative an.

elektrolytische Wasserstoffgewinnung auf die seltenen Fälle beschränkt bleiben, wo Elektrizität buchstäblich spottbillig verfügbar ist oder auf den nach diesem Verfahren erzeugbaren besonders reinen Wasserstoff nicht verzichtet werden kann. Freilich haben sich auch in Sachen Wasserstoffwirtschaft die Atomkraftwerksbetreiber längst zu Wort gemeldet und als Problemlöser angeboten, denn zumindest ihr Überschussstrom biete ein Potential an billiger Primärenergie zur Wasserzerlegung.

Elektrolyse nur bei ganz billigem Strom wirtschaftlich

Dr. J. Nitsch vom DFVLR-Institut für Technische Physik hielt im März 1986 vor einem Dechema-Symposium einen Vortrag über „Wasserstoff als Energieträger“, auf den auch in Wien verwiesen wurde und in dem es u.a. heißt:

„Am kostengünstigsten wird Wasserstoff zur Zeit durch die Wasserdampfpreformierung von Erdgas hergestellt. Bei einem Erdgaspreis von 12 DM/GJ (1983) kostet Wasserstoff rund 22 DM/GJ (bezogen auf den unteren Heizwert $H_u = 10\,760\text{ kJ/Nm}^3$) bzw. 234 DM/1000 Nm^3 . Die Obergrenzen der Verfahren mit fossilen Rohstoffen legt die Wasserdampfpreformierung von Naphta mit 30 DM/GJ bzw. 323 DM/1000 Nm^3 fest. Dazwischen liegen die Herstellungsverfahren aus Heizöl, Steinkohle und Braunkohle. Um mit gegenwärtigen Rohstoffpreisen konkurrieren zu können, sind für die Elektrolyse Strompreise von 2 bis 4 Pf/kWh erforderlich. Bei kurzzeitiger Auslastung der Elektrolyse, z.B. durch Nutzung von Strom aus Schwachlastzeiten, wird selbst bei verschwindenden Stromkosten heute keine Wirtschaftlichkeit erreicht. Elektrolysewasserstoff ist daher auf wenige Großverbraucher mit speziellen Standortvorteilen (sehr preiswerte Wasserkraft) beschränkt. Nimmt man eine reale Preissteigerung der fossilen Rohstoffe um etwa 3 %/a an, kann elektrolytischer Wasserstoff im Jahr 2000 konkurrenzfähig werden, falls dann Strom zu etwa 8 bis 10 Pf/kWh (in Preisen von 1984) zur Verfügung steht. Voraussetzung dafür sind fortschrittliche und gleichzeitig billigere Elektrolyseure (durch größere Stückzahlen) und eine Auslastung der Anlagen von etwa 8000 h/a. Die Nutzung von Schwach-



Struktur einer weltumspannenden Energieversorgung, in der Erdöl und Erdgas weitgehend durch solar erzeugten Wasserstoff ersetzt sind. Elektrizität, Fernwärme, Kohle und lokal genutzte Sonnenenergie ergänzen dieses von der DFVLR entworfene Energieträgerszenario.

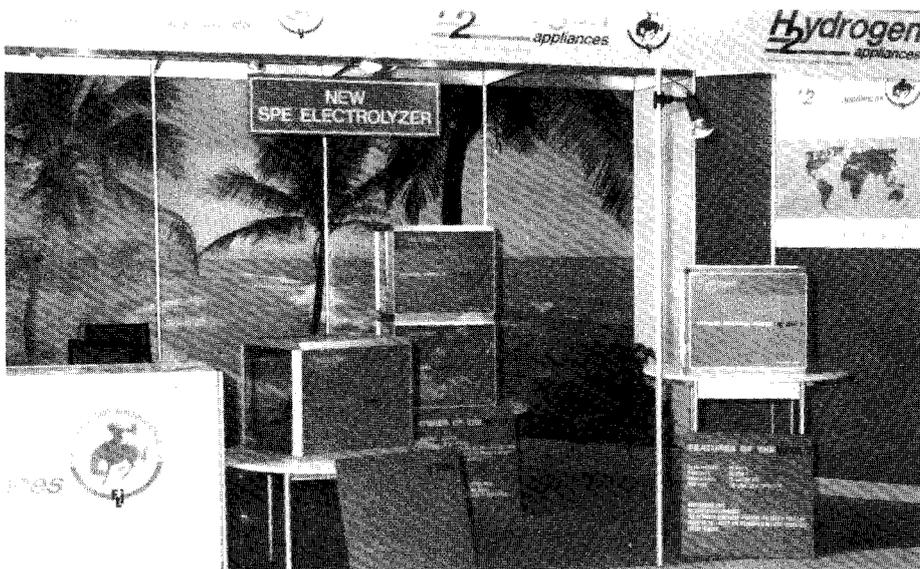
laststrom aus Kernenergie (2000 h/a) wäre nur bei entsprechend abgesenktem Preisniveau der Elektrizität wirtschaftlich.“

„Sonnenenergie“ sprach mit Roger E. Billings, dessen Kompetenz auf dem Wasserstoffsektor weltweit unumstritten ist. Vor 20 Jahren ließ er das erste Wasserstoffauto der Welt fahren. Vor 15 Jahren gelang es ihm, die NO_x -Emission seiner Wasserstoffmotoren auf 1 ppm zu reduzieren; 3000 damit ausgerüsteter Autos würden nicht mehr NO_x produzieren als ein einziges Auto mit Benzinmotor. Weitere Marksteine, die Billings im Gespräch mit „Sonnenenergie“ rekapitulierte: Vor 12 Jahren baute er den ersten Metallhydrid-Speicher in ein Auto ein, dessen Wasserstoffvorrat ihn 20 km weit fahren ließ; zwei Jahre später reichte die Speicherkapazität bereits für 200 Fahrkilometer aus. 1986 habe er den ersten hochwirksamen, wartungsfreien und billigen Wasserstoffgenerator fertiggestellt. Für 1990 prophezeit Billings den Verkauf von Wasserstoffautos in Schweden.

Kleine Elektrolysegeräte für jedermann

Auf der den Kongreß begleitenden Ausstellung war die belgische N.V. Hydrogen Appliances vertreten, eine Privatfirma, die zur Unternehmensgruppe Lerno gehört, einem der führenden europäischen Unternehmen für Tanktransporte. „Wenn wir etwas träumen können, dann können wir es auch verwirklichen“, schmunzelte Frank Lerno und verwies dabei auf die ausgestellten Elektrolysegeräte (Elektrolyseure). Den Traum, der ihn in diesem Fall so ermutigt, hätte er ohne Dr. Roger E. Billings, einem der großen Pioniere der Wasser-

stofftechnik, wohl nicht geträumt. Jetzt produziert und vermarktet Lerno die von Billings entwickelten Geräte und dürfte damit einen großen Beitrag zur dezentralen Wasserstoffherzeugung und -nutzung leisten. Auf diese Weise könnte sehr wohl auch eine Wasserstoffwirtschaft in Szene gesetzt werden, nur eben ohne Großtechnik. In den zahlreichen Studien über eine Energieversorgung mit Wasserstoff als Sekundärenergieträger kommt ein derartiges Kleingerät noch nicht vor, obwohl es eine käufliche Realität darstellt.



Ausstellungsstand der belgischen Firma Hydrogen Appliances. Sie produziert und vermarktet die von Billings, USA, entwickelten Wasserstoffgeneratoren. Die auf dem Bild zu sehenden „Elektrolyseure“ zeichnen sich durch kompakte Bauweise und hohe Leistungsfähigkeit aus.

Wasserstoffgenerator und Brennstoffzelle kombinieren

Roger E. Billings hat im Oktober 1984 seine zu beachtlicher Größe angewachsene Firma verkauft, Kapitalanteile behalten und eine neues, wesentlich kleineres Entwicklungsunternehmen gegründet. Er hätte endlich wieder forschen und entwickeln und nicht managen wollen und habe sich damals zum Ziel gesetzt, eine neue Elektrolysezelle zu entwickeln, die 50 Prozent billiger, ein Drittel leichter sei und eine zehnmal längere Lebensdauer habe als ihre Vorgänger. In weniger als einem Jahr war es soweit.

Ein bißchen Stolz über das Erreichte konnte man in seinen Augen noch ablesen, aber zum Glänzen kamen sie erst so richtig, als er einige Andeutungen

über seine gegenwärtigen Entwicklungsanstrengungen machte. Diese gelten offenbar einer kleinen Verbundanlage von Wasserstoffgenerator und Brennstoffzelle. Der Generator wird den Wasserstoff für die Brennstoffzelle liefern, diese wiederum den elektrischen Strom für die Wasserzerlegung, und was übrig bleibt, geht als Nutzenergie in einen Elektromotor.

In der Brennstoffzelle erblickt Billings einen sehr effizienten Energiespeicher. Verglichen mit einem Metallhydridspeicher werde ein Auto bei gleicher Speicherkapazität in einer Brennstoffzelle doppelt so weit fahren können, und das wartungsfrei.

1 Nm³ Wasserstoff stündlich

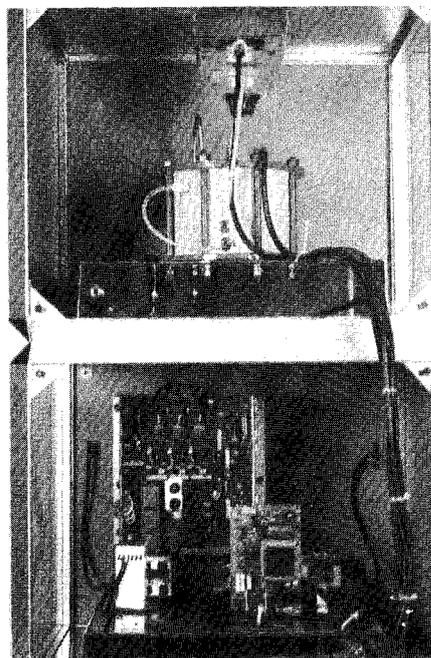
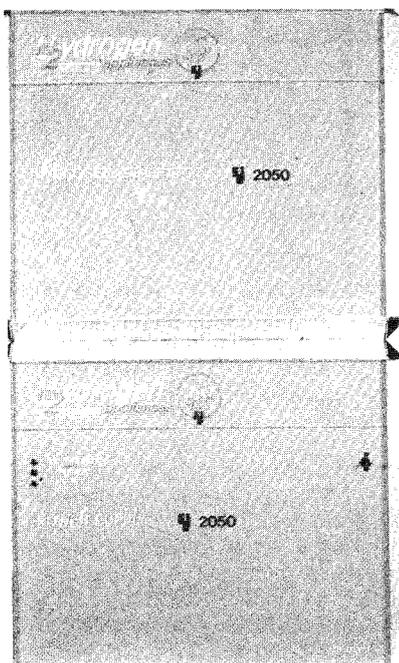
Hydrogen Appliances produziert seit Dezember 1985. Der ausgestellte Wasserstoff/Sauerstoff-Generator FLI 2050 erzeugt stündlich 1 Nm³ Wasserstoffgas bei einem Druck von 25 bar, wodurch sich beispielsweise ohne Pumpen Flaschen füllen ließen. (In „Sonnenenergie“ 3/1986 ist dieses Gerät im Rahmen des Artikels über die autarke Energieversorgung des Haushaltes von Olaf Tegström vorgestellt worden, der eine Vertretung für Hydrogen Appliances übernommen hat). Der mit dem FLI 2050 erzeugte Wasserstoff kostet nach Frank Lerno etwa 30 Prozent weniger als der im Handel erhältliche und weist eine Reinheit von 99,6 % auf. Das Gerät kostet rund 6500 DM, seine Nutzungsdauer wird mit acht Jahren angegeben. An Wasser müssen ihm stündlich rund 8 l von 25 °C und einer Reinheit von 1 M Ω cm zugeführt werden. Fällt der Wasserdruck unter 1 bar, leuchtet eine Warnlampe auf und das Gerät schaltet ab. Bei einer entsprechend großen Nachfrage, so Frank Lerno zum Abschluß des „Sonnenenergie“-Interviews, könnte der Preis für derartige Wasserstoffgeneratoren halbiert werden.

Große Elektrolyseanlagen

Dr. Hugo Vandendorre, Managing Director der belgischen Hydrogen systems N. V., beschäftigte sich in seinem Vortrag über die elektrolytische Wasserstoffproduktion vornehmlich mit größeren Anlagen. Länder wie Norwegen, Ägypten und Indien produzieren heute in großen Mengen Wasserstoff mit Hilfe von Wasserkraft zum Einsatz in der Ammoniaksynthese. Elektrolyseure mit einer Wasserstoffproduktion von weit über 30000 Nm³/h (entsprechend etwa 150 MW_{el}) seien seit Jahren Stand der Technik. Drei Viertel aller weltweit eingesetzten Elektrolyseanlagen produzieren stündlich zwischen 10 und 200 Nm³, nur etwa 2 Prozent aller Anlagen lieferten mehr als 1000 Nm³.

Im Prinzip seien zwei Bautypen im Einsatz, der unipolare oder Tanktyp sowie der bipolare oder Filterpressentyp. Bei der unipolaren Bauweise werden die einzelnen Zellen parallel geschaltet, während sie bei der moderneren bipolaren in Serie miteinander verbunden sind.

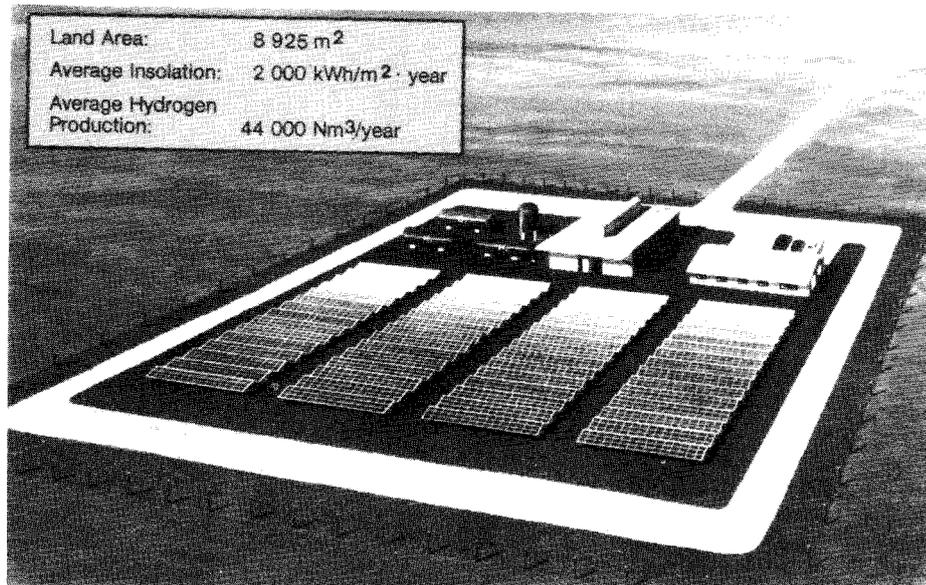
Im zweiten Teil seiner Rede ging Vandendorre auf die Forschungs- und Entwicklungsprogramme der Europäischen Gemeinschaft ein, für die in den letzten Jahren 21,2 Millionen ECU (etwa 46 Mill. DM) ausgeben wurden. Da die jeweiligen Projektträger 50 Prozent der Gesamtkosten getragen hätten, seien für die Wasserstoffforschung 43 Mill ECU (etwa 92 Mill. DM) aufgewendet worden. Ungefähr zwei Drittel davon seien der Wasserstoffelektrolyse zugute gekommen. Abgesehen von Bemühungen, die Baukosten durch höhere Spannungsdichten zu senken, sei man vor allem um die Einsparung von elektrischer Energie bemüht gewesen. Stichworte dazu: Verminderung der ka-



Ansichten vom Wasserstoffgenerator FLI 2050 von Hydrogen Appliances. In der oberen Box ist der eigentliche H₂-Generator untergebracht, in der unteren die Energieversorgung und Regelungseinrichtungen; rechts die geöffneten Boxen. Beide aufeinandergestellte ergeben einen Block von 1 m Höhe, 60 cm Breite und 50 cm Tiefe. Aus 8 l Wasser produziert das Gerät stündlich 1 Nm³ Wasserstoff.

thodischen und anodischen Überspannungen, Reduzierung des ohmschen Spannungsabfalls im Elektrolyten, Reduzierung der Potentialdifferenz über der Fläche des Diaphragmas.

Das Schwergewicht der EG-Forschung lag bei der Niedertemperatur-Elektrolyse, mit der belgischen S.C.K.-C.E.N. und den französischen Laboratoires des Marcoussis als Hauptvertragspartnern. Mit der Elektrolyse im mittleren Temperaturbereich beschäftigen sich die französische Sodetec-R.T.I. zusammen mit dem Institut Français du Pétrol sowie die technische Hochschule Darmstadt und die Kernforschungsanlage Jülich. Zum Schluß seiner Ausführungen beschrieb Vandenborre drei projektierte, außergewöhnliche Großanlagen zur elektrolytischen Wasserstoffgewinnung: eine 5-MW-Anlage in der kanadischen Provinz Quebec, eine 2-MW-Anlage bei Grenoble, Frankreich, und das deutsch-saudi-arabische Projekt „Hysolar“.



So wird sich die im Rahmen des deutsch-saudi-arabischen Programms „Hysolar“ in Riyadh, Saudi-Arabien, entstehende solare 100-kW-Wasserstoffanlage in einigen Jahren darbieten.

Hysolar – ein Schritt in die solare Wasserstofftechnik

Das „Hysolar“-Programm, das auf dem Wiener Wasserstoffkongreß ausführlich behandelt wurde, wird im Rahmen des „Abkommens zwischen der Regierung der Bundesrepublik Deutschland und der Regierung des Königreichs Saudi-Arabien über Zusammenarbeit auf dem Gebiet wissenschaftlicher Forschung und technologischer Entwicklung“ verwirklicht, das im Januar 1980 unterzeichnet worden ist. Es soll die wissenschaftlich-technologischen Voraussetzungen für eine künftige solare Erzeugung von Wasserstoff sowie die Wasserstoffnutzung schaffen

und eine langfristig angelegte Zusammenarbeit in bezug auf den Wissens- und Technologietransfer auf diesem Gebiet schaffen. Die Arbeiten begannen 1985 und werden vorerst bis voraussichtlich 1989 fortgeführt; die Gesamtkosten für das Projekt werden mit rund 40 Mill. DM angegeben.

Das Projekt „Hysolar“ umfaßt sechs Aufgabenstellungen:

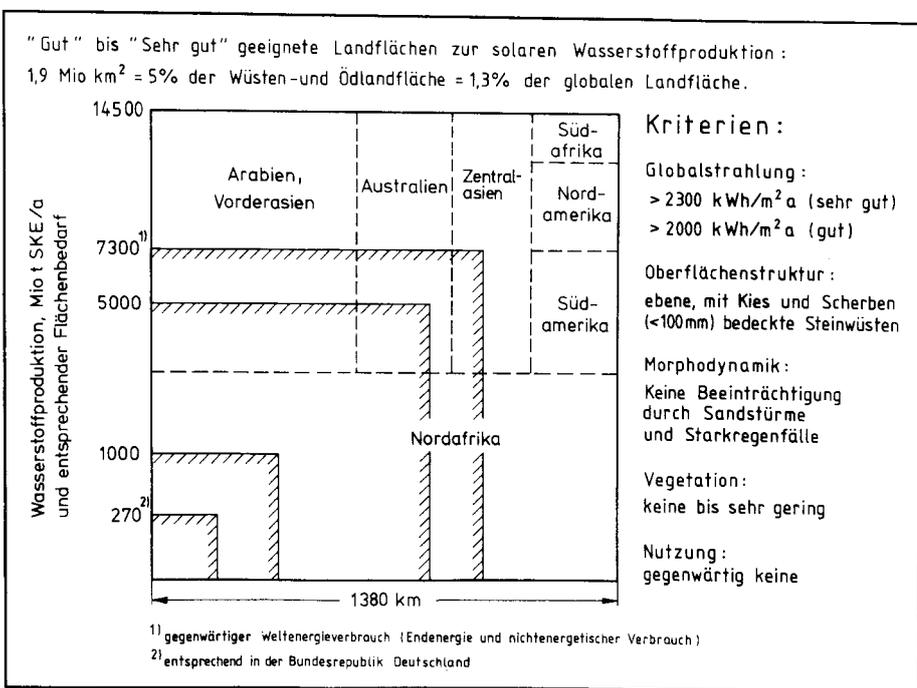
1. Bau einer photovoltaisch-elektrolytischen Demonstrationsanlage zur solaren Wasserstoffherzeugung mit 100 kW Leistung in der saudi-arabischen Hauptstadt Riyadh.

2. Bau einer 10-kW-Test- und Forschungsanlage in Stuttgart.
3. Bau einer Test- und Forschungsanlage mit 2 kW Leistung in Jeddah, Saudi-Arabien.
4. Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Photoelektrochemie der fortgeschrittenen Alkali-Elektrolyse und der Brennstoffelemente.
5. Systemstudien und Demonstration der Wasserstoffnutzung.
6. Ausbildung, Schulung und Austausch von Personal.

Grundlagenforschung und Versuchsbetrieb

Die Anlage in Riyadh wird weltweit die erste zur solaren Erzeugung von Wasserstoff in der Größenordnung von 100 kW sein. Die beiden anderen Anlagen in Stuttgart und Jeddah sind als Vorläufer gedacht, insbesondere im Hinblick auf die Energiekonditionierungs- und Elektroliseteknologie, die bei der Großanlage zum Einsatz kommen soll. Verwirklicht werden drei Prinzipien der Energiekonditionierung: 1. direkte galvanische Kopplung mit einer steuerbaren Schnittstelle (<100mm) bedeckte Steinwüsten

Die „Hysolar-Grundlagenforschung“ umfaßt drei Teilbereiche:

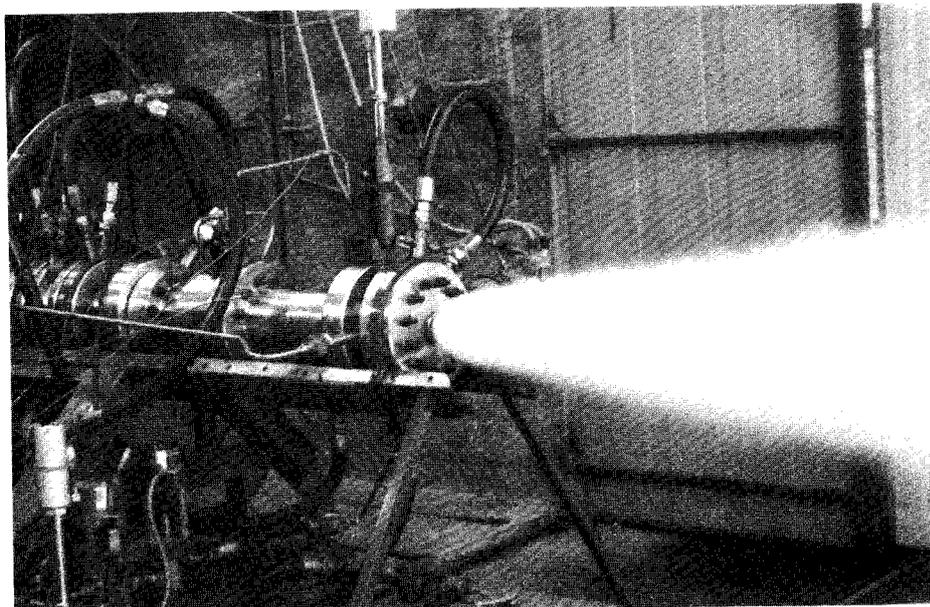


Geeignete Landflächen zur solaren Wasserstoffproduktion und Flächenbedarf für verschiedene Produktionsmengen; die Produktion einer jährlichen Wasserstoffmenge entsprechend 270 Mill. t SKE würde etwa 0,3 % der Fläche der Sahara in Anspruch nehmen. Quelle: DFVLR

1. Spaltung von Wasser mit Hilfe photoelektrochemischer und photokatalytischer Verfahren unter Einsatz beleuchteter Halbleiter/Elektrolyt-Schnittstellen im Hinblick auf eine langfristige Anwendung.
2. Entwicklung und Anwendung von Elektrokatalysatoren für fortgeschrittene Alkali-Elektrolysegeräte.
3. Katalyse und grundlegende Mechanismen bei Brennstoffelementreaktionen und Gasdiffusionselektroden.

Wasserstoff/Sauerstoff-Dampfgenerator

Ein besonderer Anziehungspunkt auf dem Ausstellungsstand der DFVLR war ein kleiner Dampfgenerator, der als Nebenprodukt der Raumfahrttechnik anzusehen ist. Er wurde von der Firma Kammerer in Pforzheim zusammen mit dem DFVLR-Institut für Chemische Antriebe und Verfahrenstechnik entwickelt und liefert Dampf mit Drücken zwischen 1 und 5 bar sowie Temperaturen zwischen 120 und 300 °C bei einer thermischen Leistung zwischen 2 und 15 kW. Zugeführt werden Wasserstoff, Sauerstoff und das zu verdampfende Wasser. Innerhalb einer Sekunde ist Dampf verfügbar, dessen Temperatur und Druck unabhängig voneinander in weiten Bereichen verändert werden können.



Wasserstoff/Sauerstoff-Dampferzeuger der DFVLR. Diese Versuchsanlage leistet 40 MW_{therm.}

Propagiert wird diese Art von Geräten u. a. zur Dampfsterilisation in der Biotechnologie sowie zur Spitzenlastabdeckung und als Momentanreserve in der Kraftwirtschaft. Daß nach diesem Prinzip gebaute Dampferzeuger sehr wohl auch in Verbindung mit großen

Kraftwerken eingesetzt werden können, kann die DFVLR auf ihrem Versuchsgelände in Lampoldshausen bei Heilbronn demonstrieren: Dort läuft ein Wasserstoff/Sauerstoff-Dampfgenerator mit einer thermischen Leistung von 40 MW.

Wasserstoff als Alternative zum Benzin

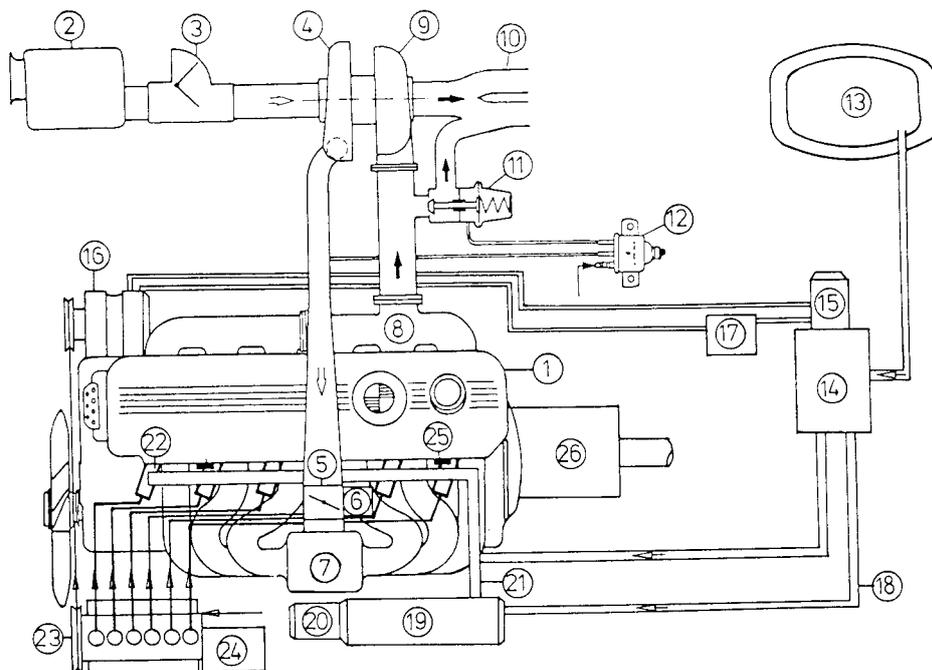
Wasserstoff als Alternative zu den herkömmlichen Kraftstoffen für Straßenfahrzeuge war selbstverständlich auch auf dem Wiener Kongreß ein bedeutendes Thema. Stand in früheren Berichten zu dieser Angelegenheit das Testprogramm mit Fahrzeugen von Daimler-Benz im Mittelpunkt, so brillierte diesmal BMW mit zwei Fahrzeugen, die unter Mitwirkung der DFVLR für den wahlweisen Betrieb mit Wasserstoff oder Benzin umgerüstet worden sind. DFVLR und BMW arbeiten seit 1985 bei der Entwicklung von Fahrzeugen mit innerer Gemischbildung einschließlich des dazu erforderlichen Kraftstoffspeicherungs- und Aufbereitungssystems zusammen.

Das Motorkonzept mit äußerer Gemischbildung mit Wasserstoffgas von Umgebungstemperatur, das mit einem der beiden Fahrzeuge demonstriert wurde, gilt laut BMW heute bei einer effektiven spezifischen Motorleistung von etwa 35 kW/dm³ als „ausgereizt“. Als vorteilhaftestes Brennverfahren bietet dagegen die kryogene innere Gemischbildung noch ein hohes Entwicklungspotential in bezug auf die Erhöhung der spezifischen Motorleistung, die Senkung der Stickoxidemissionen, die Verbesserung des Ansprechverhaltens des Motors sowie die Vermeidung von Früh- und Rückzündungen und die Steuerung des Verbrennungsablaufes. Das zweite Versuchsfahrzeug soll den Einstieg in diese Technologie markieren.

Es ist gekennzeichnet durch eine kryogene, in Tanknähe angebrachte Flüssigwasserstoff-Kolbenpumpe (15

bar), hydraulisch betätigte, kryogene Kraftstoffinjektoren und eine kennfeldabhängige, elektronische Steuerung

der Kraftstoffzumessung. Die kryogene innere Gemischbildung wird als eine wesentliche Voraussetzung für ein



Komponenten des Wasserstoff-Antriebskonzepts mit „früher“ innerer LH₂-Gemischbildung. (1) BMW Ottomotor 3,5 l, (2) Luftfilter, (3) Luftmengenmesser, (4) Verdichter, (5) Drosselklappe, (6) elektronischer Stellmotor, (7) Luftverteiler, (8) Auspuffkrümmer, (9) Abgasturbine, (10) vordere Auspuffrohre, (11) Bypassventil, (12) Magnetventil, (13) Flüssigwasserstofftank, (14) Flüssigwasserstoffpumpe, (15) Hydraulikmotor, (16) Hydraulikpumpe, (17) elektrohydraulisches Drosselventil, (18) kryogene Kraftstoffleitung, (19) Kraftstoffdruckbehälter, (20) Druckminderventil, (21) Wasserstoffverteilerleiste, (22) Wasserstoffinjektor, (23) hydraulische Dosierpumpenpumpe, (24) elektronischer Stellmotor, (25) Klopfsensor, (26) elektronisch-hydraulisches Automatikgetriebe.

Wasserstoff-Antriebskonzept angesehen, mit dem sich mit den heutigen Pkw's vergleichbare Fahrleistungen erreichen lassen dürften. Die derzeit maximal nutzbare Wasserstoff-Speicherdichte fahrzeugauglicher Hydridspeicher liege bei nur 1,2 Gewichtsprozenten. Die damit verbundenen Reichweiten und schlechten Fahrleistungen bei hohem Kraftstoffverbrauch sowie die enorm hohen Kosten, vor allem für den Speicher, ließen den Einsatz von Metallhydridspeichern in Fahrzeugen großer Serien nicht zu.

Die Versuchsfahrzeuge von Typ BMW 745i verfügen über doppelwandige, vakuumisolierte Kryro-Behälter mit einer vom Abgas gekühlten Superisolation. Vollautomatische Betankungsanlagen, die eine Befüllung der kalten Tanks in etwa 3 Minuten zuließen, seien bereits entwickelt. Die Sicherheit im Umgang mit LH_2 , so daß Kürzel für flüssigen Wasserstoff, sind nach Ansicht von BMW etwa mit denen von Benzin-Versorgungssystemen vergleichbar. Mit künftigen Speicherentwicklungen für Personenkraftwagen strebe man den Einbau von trapezförmigen Tanks

Fortsetzung nächste Seite



Versuchsfahrzeug mit Wasserstoffantrieb, das im Rahmen der Zusammenarbeit von BMW und DFVLR entsprechend modifiziert wurde.

Sowjetunion: Wasserstoff für Nischen im Energiesystem

Der sowjetische Beitrag der Ingenieure M. A. Styrikovich und S. P. Malyschenko unter der Rubrik „Transport, Verteilung und Speicherung“ ist aus mehreren Gründen von besonderem Interesse. Einerseits zeichnete sich ihr Vortrag durch eine tiefgehende Analyse der zu behandelnden Problematik aus, zum anderen beleuchtete er Aspekte der Energiewirtschaft eines großen Landes, die für den Westen gleichermaßen von Bedeutung sind.

Ihr Hauptaugenmerk legt die Sowjetunion auf die weitere und verfeinerte Nutzung ihrer immensen Energierohstoffe, die in erster Linie fossile Energieträger sind. Die Rolle, die die Kernenergie spielen soll, ist aus offiziellen Äußerungen hinreichend bekannt. Dem Wasserstoff ist in diesem Szenario nur eine kleine Rolle zugewiesen. Er soll gewisse Nischen besetzen, wo sein wirtschaftlicher Einsatz lohnend ist.

Eine dieser Nischen entsteht in dem großen Land Sowjetunion aus der problematischen Nutzung des Nacht- und Wochenendstroms. Auf Grund der geomorphologischen Struktur des Landes lassen sich kaum Wasserspeicher-Kraftwerke bauen, deren Pumpen mit überschüssigem Strom zu Schwachlastzeiten betrieben werden und die in Zeiten hoher Last Spitzenstrom abgeben. Eine wirtschaftliche Alternative besteht in der Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse zu Schwachlastzeiten und der kurzzeitigen Zwischenspeicherung dieses Gases. Dank seiner hohen Energiedichte kann mit relativ kleinen Gasspeichern eine Gasmenge gespeichert werden, die für den kurzzeitigen Einsatz in der Spitzenlastzeit ausreicht.

Die Speicherung des Wasserstoffs wäre am billigsten in unterirdischen Salzkavernen, die heute schon Erdgas aufnehmen. Eine solche Speichereinrichtung befindet sich bei Hunstorf in der Nähe von Bremen. Anderen Formen der Speicherung – insbesondere die der chemischen Bindung zum Beispiel in Form von Methanol – werden diskutiert.

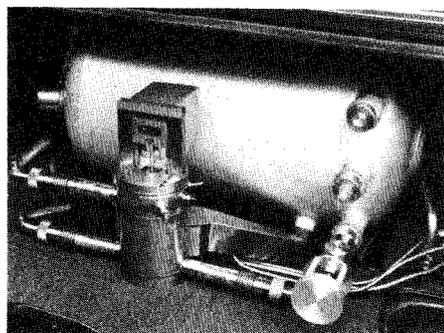
Bei nicht langfristiger Speicherung hat Flüssigwasserstoff Vorteile, die insbesondere dann zu Buche schlagen, wenn die Wasserstoffreinheit sehr hoch sein soll.

Eine ingenieurtechnisch gut abgestimmte Lösung unter den Aspekten Erzeugung, Speicherung, Transport und Verbrauch und ihrer zeitlichen Variationen liefern je nach vorliegender Situation unterschiedliche wirtschaftliche Ergebnisse für die wasserstofftechnologischen Systeme. Die sowjetischen Ingenieure betonen, daß es keine einheitliche technische Lösung für den Wasserstoffeinsatz in der Energiewirtschaft geben kann, daß spezielle Probleme vielmehr jeweils besondere technische Antworten verlangen. Die Technologie sei heute auf dem Stand, diese Probleme zu lösen. Allerdings – und dies geht auch aus dem sowjetischen Beitrag hervor – ist auch die Sowjetunion heute noch nicht in der Lage, Wasserstofftechnologien im großen Rahmen einzusetzen.

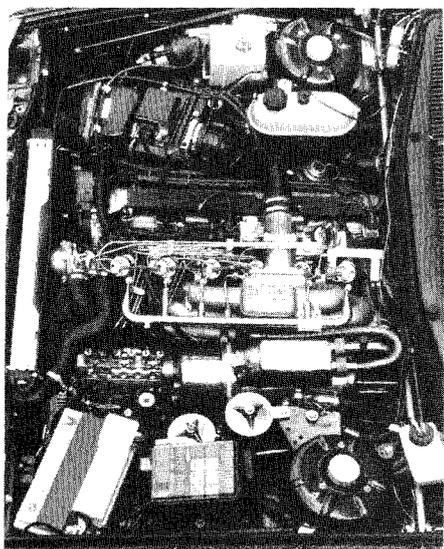
Es war daher wichtig, von den Vortragenden zu erfahren, daß die Sowjetunion zur Zeit ihr Erdgas-Verteilungsnetz noch stärker ausbaut. Ein neuer Aspekt ist, daß in größeren Städten Erdgas-Verteilstationen (Tankstellen) geplant sind, die die stärkere Nutzung dieses Energieträgers fördern sollen. Sicherlich trägt auch eine energetisch bessere Ausnutzung des sauberen Erdgases zur Verbesserung der Umweltbedingungen bei, die auch in der Sowjetunion inzwischen Bestandteil energiepolitischer Überlegungen sind.

Der Vortrag schloß mit einer Einladung an die Kongreßteilnehmer zum Besuch der nächsten Wasserstoffweltkonferenz 1988 in Moskau, wobei das Photo eines Busses mit Wasserstoffantrieb auf dem Roten Platz gezeigt wurde. Ein Beweis dafür, daß die Wasserstofftechnologie im Verkehr in der Sowjetunion ein Forschungsgegenstand ist.

hhh



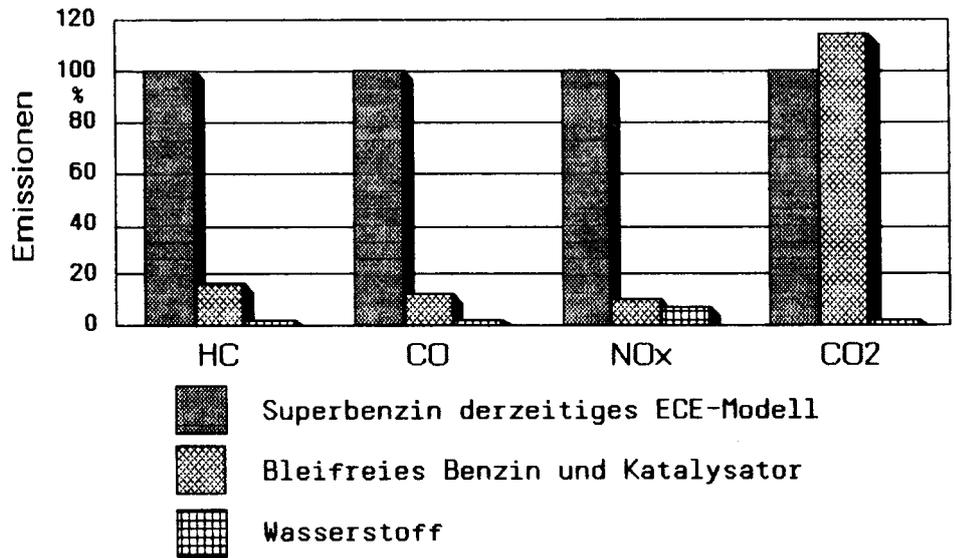
Blick unter die Motorhaube eines Versuchsfahrzeuges vom Typ BMW 745i mit Wasserstoff-Direkteinspritzung



Doppelwandiger, vakuumisolierter Tank für flüssigen Wasserstoff im Kofferraum eines Versuchsfahrzeuges; die Speichertemperatur beträgt $-250^{\circ}C$.

in geschützter Lage hinter den Rücksitzen an. Für Fahrzeuge mit LH_2 -Tanks seien vier Motorkonzepte möglich, die sich in wesentlichen durch die Art der Gemischbildung unterscheiden:

1. Das als „ausgereizt“ bezeichnete Motorkonzept mit äußerer Gemischbildung bei Umgebungstemperatur.
2. Äußere Gemischbildung mit tiefkaltem Wasserstoff, der in die Saugrohre eingeblasen wird. Der Füllungsverlust betrage dabei bei stöchiometrischem Gemisch etwa 10 % im Vergleich zu Benzinbetrieb. Ein Versuchsfahrzeug des japanischen Musashi Institute of Technology vom Typ Datsun B-210 erreicht mit seinem 1,4-l-Ottomotor nach diesem Verfahren etwa die gleiche Leistung wie bei Benzinbetrieb.
3. Innere kryogene Gemischbildung während des Verdichtungsaktes. Diese wird mit dem in Wien gezeigten Versuchsfahrzeug demonstriert, das von einem modifizierten 3,5-l-Turbomotor angetrieben wird. Eine Hydraulikpumpe in unmittelbarer Tanknähe saugt den flüssigen Wasserstoff an und verdichtet ihn über den kritischen Druck von 12,5 bar hinaus. Eine kryogene Rohrleitung führt den tiefkalten Kraftstoff einem Druckausgleichsbehälter am Motor zu, in dem er zur Vermeidung des Zwei-Phasengebietes bei einer Temperatur oberhalb von 33 K gasförmig gehalten wird. Über ein Druckminderventil werden daraus die Injektoren über die Direkteinblasung des Wasserstoffs in allen Motorbetriebspunkten mit konstantem Kraftstoffdruck versorgt.
4. Innere kryogene Gemischbildung während der Verbrennung. Aufbauend auf dem Brennverfahren mit Gemischbildung während des Verdichtungsaktes hat BMW damit begonnen, das, wie



Reduktion der Emissionen eines BMW 745i durch Einsatz von Wasserstoff statt Benzin

es heißt, gesamte Entwicklungspotential der Wasserstoffverbrennung mit zumindest teilweise während der Verbrennung stattfindender innerer Gemischbildung zu nutzen. Damit würden nicht nur Flammenrückschläge in die Sauganlage, sondern auch unkontrollierte Frühzündungen im Brennraum selbst bei der Verbrennung von Zylinderfüllungen mit hohem Gemischheizwert vollständig vermieden. Neben der ohnehin eintretenden Absenkung der NO_x -Emissionen als Folge der Ladungskühlung über den tiefkalten Wasserstoff und durch die Verbrennung magerer Kraftstoff-Luftgemische sei hiermit eine weitere NO_x -Absenkung durch Steuerung des Verbrennungsablaufes möglich. Darüber hinaus verbessere

sich auf Grund geringerer Wandwärmeverluste der indizierte Motorwirkungsgrad. Fortschrittliche Antriebskonzepte mit Wasserstoff werden nach Ansicht von BMW im wesentlichen auf der Speicherung des Kraftstoffes in flüssiger Form sowie auf Verbrennungsmotoren mit innerer Gemischbildung basieren müssen. Die weiteren Entwicklungsaktivitäten konzentrieren sich auf eine verbesserte Einbeziehung des LH_2 -Speicher- und Kraftstoffversorgungssystems in das Fahrzeug, auf die Beherrschbarkeit des Brennverfahrens mit Gemischbildung während der Verbrennung sowie auf die wirtschaftliche Herstellung der Komponenten des Kraftstoffaufbereitungssystems.

Brennstoffzellen – effiziente Energiewandler

Einen temperamentvoll vorgetragenen Überblick über den Stand der Brennstoffzellentechnik unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklung von bipolaren alkalischen Brennstoffzellen bot Univ.-Prof. Dr. K.H. Kordes, Leiter des Instituts für Chemische Technologie Anorganischer Stoffe der Technischen Universität Graz.

Brennstoffzellen sind elektrochemische Generatoren, die im Vergleich zur Stromerzeugung mit Wärmekraftmaschinen mit einem höheren Wirkungs-

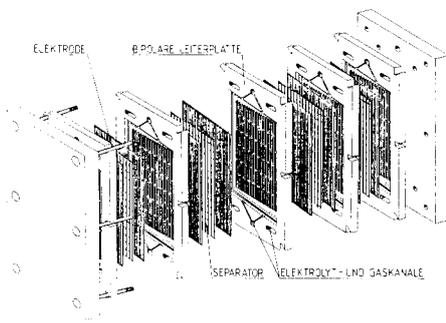
grad arbeiten. Eine Brennstoffzelle ist eine galvanische Zelle im höheren Leistungsbereich, in der die chemische Energie in einer „kalten katalytischen Verbrennung“ direkt in elektrische Energie umgewandelt wird. Dabei müssen ständig Brennstoff und Oxidationsmittel den Elektroden getrennt zugeführt werden. Diese Form der Energieumwandlung, und das schien Kordes zu betonen, werde im Gegensatz zu der bei Wärmekraftmaschinen nicht durch das Carnot'sche Gesetz begrenzt. Theoretisch könnten 90 % der chemischen Energie in elektrische umgewandelt werden; in der Praxis ergäben sich Werte um 50 %.

Viele Zellentypen

In der Wasserstoff/Sauerstoff-Brennstoffzelle (es gibt noch knapp ein Dutzend anderer Typen) läuft ein der Wasserelektrolyse entgegengesetzter Vorgang ab. Wasserstoff und Sauerstoff werden während einer elektrochemischen Zellenreaktion zu Wasser umgesetzt. Jeder elektrochemische Generator besteht aus der Brennstoffzellenbat-

terie sowie aus Hilfs- und Steuereinrichtungen. In einer derartigen Batterie können mehrere Elektroden entweder monopolar oder bipolar angeordnet werden. Im ersteren Fall werden Anoden und Kathoden abwechselnd placiert und über Bügel miteinander in Serie oder parallel verbunden. Die bipolare Anordnung erlaubt eine äußerst kompakte Bauweise. Stromableitungen zwischen den einzelnen Elektroden entfallen. Die Kontakte werden durch extrudierte, beidseitig gerillte und mit Nickel plattierte Kunststoffplatten hergestellt. Auf einer Plattenseite wird jeweils in den Rillen Brennstoff zugeführt, auf der anderen Seite Oxidationsmittel.

Sollen Brennstoffzellen zu einer breiteren Anwendung kommen, so müßten laut Kordes eine wesentliche Erhöhung der Lebensdauer und eine deutliche Senkung der Herstellungskosten erreicht sowie bessere Hilfsgeräte entwickelt werden. Bei den in der Raumfahrt betriebenen Brennstoffzellensystemen habe man auf die Kosten nicht zu achten brauchen. Trotzdem werde das aus den Apollo- und Space-Shuttle-Projekten gewonnene Know-



Aufbau einer bipolaren alkalischen Brennstoffzelle

how nun kommerzialisiert. So ist in New York ein 4,8-MW-Versuchskraftwerk gebaut worden, das erste Probeläufe erfolgreich hinter sich gebracht hat. In Tokio wird ein Brennstoffzellenkraftwerk mit etwa 5 MW Leistung fertiggestellt. Europäische Projekte nähmen sich dagegen bescheiden aus. Kordeusch verwies auf von Siemens entwickelte ortsfeste Notstromaggregate mit alkalischen Wasserstoff/Sauerstoff-Brennstoffzellen in der Größenordnung von 25 kW, deren Wirkungsgrad bei rund 25 % liege.

Wasserstoff durch Sonnenlicht

Von den Vortragenden, die über Verfahren zur Wasserstoffgewinnung referierten, dürfte Dr. J.O.M. Bockris, Direktor des Wasserstoff-Forschungszentrums an der Texas A & M University in College Station, die Fachleute am meisten in Erstaunen versetzt haben. Bockris beschäftigt sich seit einigen Jahren mit der Umwandlung von Licht und Wasser in Wasserstoff und Elektrizität. Diese Energiewandlung spielt sich in sog. photoelektrochemischen Zellen

ab, in denen es mit Hilfe elektrochemischer Katalysatoren zwischen einer photoaktiven und einer schwarzen Gegenelektrode zur Wasserelektrolyse kommt. Lichteinfall allein genügt, um den Prozeß in Gang zu halten. Bisher war bekannt, daß der maximale Wirkungsgrad, berechnet aus dem Verhältnis von Wasserstoffkonversion zu aufgenommener Solarenergie, nur rund 0,25 % betrug. Die am Institut von Bockris inzwischen erzielten Entwicklungsfortschritte veranlaßten ihn zu der Feststellung, daß nunmehr Wirkungsgrade von rund 10 % möglich seien.

Wie Wasser in die Wüste?

Bei Überlegungen zu einer auf der elektrolytischen Wasserspaltung basierenden Wasserstoffwirtschaft, und nur diese scheint realistisch, werden bekanntlich sowohl photovoltaische als auch solarthermische Großanlagen in sonnenreichen ariden Gebieten studiert. Eine Solarzellenanlage, die jährlich 15 Milliarden Nm³ (entsprechend 5,5 Mill. t SKE) Wasserstoff produziert, würde nach Berechnungen der DFVLR 576 km² Landfläche in Anspruch nehmen. Diese sollten an vielen

Stellen der Erde verfügbar sein. Wo aber soll das benötigte Wasser herkommen?

Fast wäre diese wichtige Frage bei aller Technik auf dem Wiener Wasserstoffkongreß zu kurz gekommen. Der Ägypter Prof. Dr. Hussein K. Abdel-Aal vom Nationalen Forschungszentrum in Kairo ging in seinem Vortrag auf die weltweit für die Wasserelektrolyse verfügbaren Vorräte ein. Dabei wurde erneut deutlich, daß für Großanlagen eigentlich nur entsalztes Meerwasser in Frage kommt. Für ihn ist es naheliegend, mit Hilfe eines sog. heliohydroelektrischen Systems zunächst Frischwasser und anschließend Wasserstoff zu gewinnen. Abdel-Aal möchte dort, wo es die Topographie erlaubt, Meerwasser durch einen Damm hindurch in ein tiefergelegenes Reservoir leiten und dabei in einem üblichen Wasserkraftwerk Elektrizität erzeugen. Diese will er dann zur Meerwasserentsalzung und zur Wasserstoffproduktion heranziehen. Alles in allem ein weiteres Konzept zur großtechnischen solaren Wasserstofferzeugung, das den Vorzug hat, daß der unentbehrliche Rohstoff Wasser nicht übersehen werden kann.

Gottfried Hilscher

Fünf Jahre Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme

Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg feierte am 3. Juni 1986 sein fünfjähriges Bestehen. In einem Kolloquium wurden der Öffentlichkeit die Arbeiten des Instituts vorgestellt. Neben ganz neuen Systemen zur Sonnenenergienutzung arbeitet das Institut intensiv an der Verbesserung und Verbilligung bestehender Systeme.

Die Bedeutung der konsequenten Erforschung und Markteinführung solarer Energiesysteme erläuterte Institutsleiter Prof. Adolf Goetzberger mit Ausführungen zu folgenden Feststellungen:

1. Sonnenenergie ist eine unerschöpfliche Energiequelle, deren Nutzung praktisch keine Umweltprobleme mit sich bringt.
2. Es gibt ausreichend Sonnenenergie: Die Sonnenstrahlung auf der Erdoberfläche entspricht dem 10.000fachen des Weltenergieverbrauchs – allerdings ist nur ein geringer Teil dieses Potentials technisch nutzbar.
3. Alle anderen Primärenergiequellen sind entweder erschöpfbar oder bringen erhebliche Umwelt- und soziale Probleme mit sich.
4. Eine Energieversorgung, die auf Energieeinsparung und Sonnenenergie beruht, ist langfristig nicht teurer als Kernenergie und von größerer Sozialverträglichkeit (s. Mayer-Abich und Schefold in dem Buch „Die Grenzen der Atomwirtschaft“).
5. Die Entwicklung und Markteinführung neuer Primärenergiequellen erfordert sehr lange Zeiträume. Wenn Solarenergie im nächsten Jahrhundert einen nennenswerten Beitrag leisten soll, müssen heute dafür die Weichen gestellt werden.

Potential der Sonnenenergie

Bundesrepublik im Jahr 2000:

2 bis 4 %

(regenerative Energien insgesamt)

+ 3 bis 6 % Einsparung (z.B. passiv)

Bundesrepublik im Jahr 2030:

10 bis 20 %

Potential in Entwicklungsländern deutlich höher.

Technische Entwicklungslinien

thermische Umwandlung

a) passive Solarenergienutzung:

Energiebedarf eines Altbaus kann um 50 bis 80 % reduziert werden.

Ziel: Verbilligung der Systeme

b) Warmwasserkollektoren: 50 % des Energiebedarfs (Ein- und Zweifamilienhaus) für Warmwassererwärmung können solar gedeckt werden.

Ziele: Vereinfachung und Verbilligung der Systeme

photovoltaische Stromerzeugung heute: Modulwirkungsgrad 10 %, Kosten 1,50 bis 2,50 DM/kWh

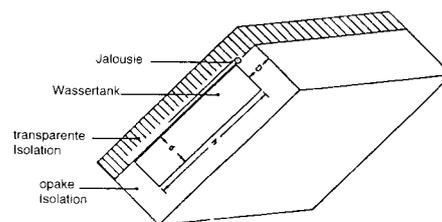
Entwicklungsziele: Wirkungsgrad größer 15 %, Kosten 0,50 bis 1,00 DM/kWh.

Ein Beitrag zur Stromversorgung in der Bundesrepublik ist erst nach 2000 zu erwarten. Märkte existieren heute in Entwicklungsländern, z.B. Anlagen ohne Netzverbindung, sowie bei tragbaren Geräten. Eine stetige Weiterentwicklung ist zu erwarten. Ein großtechnischer Beitrag erfordert die Entwicklung der solaren Wasserstofftechnologie und Großanlagen, z.B. in Nordafrika.

Energiespeicherung

Energiespeicherung ist für die weitere Verbreitung der Sonnenenergie von großer Bedeutung. Ideal wäre eine sai-

sonale Speicherung. Erfolge sind nur durch langfristige Entwicklungen zu erwarten. Speicher für thermische und elektrische Energie sind heute schon technisch machbar, aber noch viel zu teuer.



Aufbau des integrierten Speicherkollektors

Integrierter Speicherkollektor

Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme arbeitet an einem neuartigen solaren System, dem „integrierten Speicherkollektor“. Während in herkömmlichen Solaranlagen Kollektor und Speicher getrennt sind, besteht der integrierte Speicherkollektor aus einem direkt von der Sonne bestrahlten flachen Tank mit einem Volumen von z.B. 100 l/m². Auf Grund neuartiger, lichtdurchlässiger Wärmedämmmaterialien, an deren Entwicklung das Institut ebenfalls arbeitet, lassen sich derartige Speicherkollektoren auch in unserer Klimazone einsetzen. Im Winter können die Speicherkollektoren nicht einfrieren. Selbst an extrem kalten Tagen im Januar 1986 hatte das Wasser in den zwei Speicherkollektoren auf dem Institutsdach eine Temperatur von über 15 °C. Der Jahreswirkungsgrad der Speicherkollektoren ist höher als der herkömmlicher Solaranlagen mit Flachkollektoren.