Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 80 (1989)

Heft: 24

Artikel: SHEE-TREE : Konzept eines Solar-Wasserstoff-Versorgungssystems Afrika - Europa

Autor: Sobek, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903748

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

SHEE-TREE: Konzept eines Solar-Wasserstoff-Versorgungssystems Afrika – Europa

J. Sobek

Die Verwendung von Wasserstoff ist eine der möglichen Massnahmen zur Eindämmung der exponentiellen Zunahme der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre. Als partnerschaftliches Projekt aller Energieträger wird das Konzept einer Wasserstoffversorgung vorgeschlagen, bei der aus Sonnenenergie in Nordafrika erzeugte Elektrizität zur Produktion von Wasserstoff dient, der dann mittels einer Pipeline durch Italien bis in die Schweiz transportiert wird.

Une des mesures possibles pour enrayer l'aggravation exponentielle de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère est l'utilisation de l'hydrogène. La conception d'un approvisionnement en hydrogène est proposée à titre de projet basé sur tous les agents énergétiques. Dans ce cas, l'électricité d'origine solaire produite en Afrique du Nord servirait à produire l'hydrogène, qui serait transporté par pipeline jusqu'en Suisse en passant par l'Italie.

Referat anlässlich des Internationalen Symposiums Solar-Wasserstoff-Versorgung am 1. November 1989 in Zürich

Adresse des Autors

Dipl.-Wirtsch.-Ing. *Joachim Sobek*, Projektleiter SHEE-TREE, World Circle of the Consensus (WCTC), Zentralsekretariat, Kellerweg 38, 8055 Zürich

Energiesituation der Schweiz und Handlungsalternativen

Zur Deckung des Endenergiebedarfs der Schweiz tragen heute zu 75% fossile Energieträger bei. Darunter nehmen Erdölbrennstoffe mit 36%, Erdöltreibstoffe mit 30% und Erdgas mit 8% vom Total den grössten Teil ein. Der Elektrizitätsbedarf liegt bei 21% und wird im wesentlichen durch Wasserkraft und Kernenergie gedeckt. Die Hauptverbraucher fossiler Energieträger sind die privaten Haushalte mit einem Anteil von etwa 24% und der Verkehr mit 29% vom Gesamttotal.

Zur Verminderung der CO_2-Emissionen stehen prinzipiell mehrere Wege zur Verfügung, die alle im Zusammenspiel betrachtet werden müssen:

- Ersatz von fossilen Energieträgern durch Energiequellen, die kein CO_2 erzeugen
- Verminderung insbesondere des fossilen Energieverbrauchs insgesamt
- Aufforstung
- Erdgas
- Rückhaltetechniken für Kohlendioxid

Letztere Alternative wird gegenwärtig nicht ernsthaft diskutiert. Die Verminderung des Gesamtenergieverbrauchs ist sicherlich kurz- bis mittelfristig die effektvollste Alternative, betrachtet man nur den nationalen Rahmen industrialisierter Länder. Schwellen- und Entwicklungsländer bauen in zunehmendem Mass ihren Energieverbrauch auf. So hat beispielsweise China seinen Verbrauch an fossilen Energien von 1987 auf 1988 um mehr als 5% erhöht, das entspricht dem 2,5fachen des jährlichen Verbrauchs fossiler Energien in der Schweiz. Damit wird deutlich, dass bei Anhalten dieser Entwicklung, global – ergänzend zur Energieeinsparung – besonders die Einführung von kohlendioxidfreien Energien einen deutlichen Beitrag zur Reduzierung der Kohlendioxidbelastung leisten kann.

Die direkte Nutzung der Sonnenenergie mit den energetisch nutzbaren indirekten Varianten Wind, Wasserkraft und Biomasse steht im Mittelpunkt der Diskussionen. Die Sonnenenergie wird, solange es sich nur um eine abstrakte Zielsetzung handelt, allgemein akzeptiert und findet in allen Kreisen hohe Zustimmung. Sie scheitert jedoch immer noch an den zu hohen Kosten.

Konkrete Konzepte oder sogar Projekte wurden und werden teilweise stark von konträren Interessensgruppen torpediert. Beispielsweise wurde das vielversprechende Wasserstoff-Kanada-Projekt von der deutschen Bundesregierung wegen mangelnden Interesses nicht gefördert. Erst die EG-Kommission förderte die Feasibility-Studie mit 85 000 D-Mark, die Kosten von insgesamt 500 000 D-Mark mussten in der Folge im wesentlichen von den beteiligten Industriefirmen getragen werden.

Hinzu kommt die Problematik, dass Grossprojekte politisch schwer durchsetzbar sind.

Neben den unbedingt zu forcierenden Massnahmen im kleintechnischen Massstab, also z.B. bei den einzelnen Haushalten, können gerade auch grossmassstäbliche Projekte einen deutlichen Beitrag zur Kohlendioxidentlastung leisten, zumal dadurch erhebliche Kostenreduzierungen erzielt werden könnten.

SHEE-TREE ist ein solches Projekt, das im folgenden in seiner technischen und ökonomischen Dimension dargelegt wird.

Das Projekt SHEE-TREE

Der Wasserstoffzyklus (Wasserstoffspaltung mit Solarenergie, Transport, Speicherung und Verteilung, Wasserstoffnutzung durch Umwandlung in thermische Energie und den Ausgangsstoff Wasser) stellt unter ökologischen Gesichtspunkten im Gegensatz zu den fossilen Energieträgern ein geschlossenes System dar. Bei der Umwandlung des Sekundärenergieträgers Wasserstoff wird genau der Stoff, nämlich Wasser, an die Umwelt abgegeben, aus dem er unter Einwirkung der Primärenergie Sonnenenergie hergestellt wurde. Als Schadstoffe fallen allenfalls Stickoxide an, deren Erzeugung bei der Anwendung wasserstoffspezifischer Techniken (katalytische Verbrennung, Brennstoffzellen) durch niedrigere Prozesstemperaturen minimiert werden kann.

Internationales Symposium

Solar-Wasserstoff-Versorgung

Am 1. November 1989 organisierte der World Circle of the Consensus (WCTC-CMDC) ein internationales Symposium, zu dem sich über 300 Teilnehmer in Zürich einfanden. Unter der Gesprächsleitung von Dr. Rolf Homann äusserten sich Wissenschafter, Techniker und Politiker aus dem In- und Ausland zu Fragen der Erzeugung, Nutzung und Beurteilung von Wasserstoff ebenso wie zu den ökologischen Problemen der heutigen Nutzung fossiler Brennstoffe. Ein Tagungsband mit den nachfolgend aufgeführten Referaten – sowie demnächst eine Niederschrift der Diskussionsbeiträge – ist erhältlich beim WCTC-CMDC-Zentralsekretariat, Kellerweg 38, 8055 Zürich, 01/463 02 26.

Hydrogen Energy Symposium
S. Kiciman, Representative UNO-ECE, Geneva

Solar-Wasserstoff-Versorgung zur Abwendung der fossilen Umweltkatastrophe
G.R. Grob, Präsident WCTC-CMDC

Der energetisch-ökologische Handlungsspielraum
Prof. em. Dr. H.U. Dütsch, ETHZ

Fossil Fuel Health Hazards and Damages to the Environment
Dr. med. R.M. Zweig, Clean Fuel Institute, Riverside Ca., USA

Health Benefits derived from a planned Hydrogen Community
Dr. med. R.M. Zweig, Clean Fuel Institute, Riverside Ca., USA

Economic Comparison of Solar Hydrogen Energy System with Fossil Fuel System
Prof. Dr. T.N. Veziroglu, University of Miami, Fla., USA

Das Solar-Wasserstoff-Versorgungssystem Afrika–Europa
Dipl.-Wirtsch.-Ing. J. Sobek, Projektleiter SHEE-TREE

Gesetzliche und steuertechnische Massnahmen zur Einführung der Wasserstoffwirtschaft
G.R. Grob, Präsident WCTC-CMDC

ISO-Standards for Hydrogen/Oxygen Energy
G.R. Grob, Präsident WCTC-CMDC

Technical Possibilities for the Solar Hydrogen Production
Prof. Dr. J. O'M. Bockris, Texas A&M University

Wasserstoff-Anwendungen für die Energie-Konsumenten
Dr. Ing. R. Weber, Oberbözberg

Solarer Wasserstoff als Triebfeder eines World Recovery Programm
Dr. rer. pol. H. Scheer, Präsident Eurosolar, MdB, Bonn

Konzept

Zur Herstellung von Wasserstoff stehen prinzipiell mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Ökologisch sinnvoll sind nur diejenigen Methoden, die auf regenerativen bzw. CO_2-freien Primärenergien basieren. Beim Projekt SHEE-TREE (Solar Hydrogen & Electric Energy – Trans European Enterprise) werden direkt solare Technologien zur Stromerzeugung und die Kopplung mit Elektrolyseuren vorgeschlagen. Die Stromerzeugung mittels Solarzellen und solarthermischen Kraftwerken sind grundsätzlich beherrschte Technologien. Als Standort solcher Wasserstoffwerke für die Versorgung der Schweiz kommen Südeuropa und besonders nordafrikanische Wüstengebiete in Betracht. Dies deshalb, weil die Sonneneinstrahlung im Jahresmittel hier etwa das Zweifache der mitteleuropäischen Werte erreicht. Die Elektrizitätserzeugung und die Wasserstoffproduktion müssen nicht notwendigerweise am selben Ort sein. Auch könnte ein Teil der produzierten Elektrizität direkt in die Verbrauchsländer, z.B. mittels Hochspannungsgleichstromübertragung, gelangen. Eine neuere Studie [1] kommt zum Ergebnis, dass der kostenoptimale Energietransport von Nordafrika in die Bundesrepublik durch eine Kombination beider Übertragungssysteme erreicht werden kann.

Flächenbedarf

Um den grossen Flächenbedarf zu decken, bieten sich besonders Kies- und Steinwüstengebiete Nordafrikas an. Für die solare Energieerzeugung spielen die sog. Serir-, Reg- und Hammadalandschaften der Sahara wegen ihrer grossen Ausdehnung und geringen Gefahr von Sandstürmen eine wichtige Rolle.

Serir- und Reglandschaften erstrekken sich über mehrere hundert Kilometer und zeichnen sich durch ihre annähernde Gleichförmigkeit aus. Diese extremen, vegetationslosen Trockengebiete sind als Lebensraum für den Menschen ungeeignet und bieten sich auch daher für die Installation grosstechnischer Wasserstofferzeugungsanlagen an. In Nordafrika gibt es etwa 400 000 km² sehr gut für die Wasserstofferzeugung geeignete Flächen, deren Sonneneinstrahlung mehr als 2300 kWh/m²a beträgt.

Die flächenspezifische Wasserstoffproduktion beträgt 56 Mio kWh/km²a für solarthermische Anlagen, und 76 Mio kWh/km²a für Solarzellenanlagen; daraus ergibt sich beispielsweise zur Deckung von 50% des schweizerischen Energiebedarfs eine notwendige Fläche von 1400 bis 1900 km². Diese Fläche entspricht etwa 0,5% der in Nordafrika sehr gut geeigneten Gebiete.

Wasserbedarf

Der Wasserbedarf könnte einerseits durch Grundwasser gedeckt werden, wenn gewährleistet ist, dass der Grundwasserspiegel dadurch nicht wesentlich sinkt. Alternativ könnte durch Umkehrosmose entsalztes Meerwasser in der benötigten Reinheit bereitgestellt und über Rohrleitungen zu den Elektrolyseuren transportiert werden. Der benötigte Wasserbedarf (ohne evtl. Kühlwasser) liegt für das beschriebene Projekt bei 4000 m³/h. Eine entsprechend ausgelegte Desalinationsanlage würde etwa 180 Mio

Figur 1
Konzept des SHEE-TREE-Projektes: Der in mehreren Ländern Nordafrikas produzierte Wasserstoff gelangt durch eine grosse Pipeline durch Italien zu den Verbrauchern in der Schweiz und Mitteleuropa.

Franken kosten, d.h. weniger als ein Promille der Gesamtanlagenkosten ausmachen.

Transport des Wasserstoffs

Die Erzeugung des Wasserstoffs muss nicht zwangsläufig an einem einzigen Ort geschehen. Es ist aus Gesichtspunkten der Risikoverteilung wünschenswert, mehrere Solarfarmen in verschiedenen Ländern zu installieren. Denkbar ist die Einspeisung von mehreren Produktionsstätten in eine zentrale Pipeline, die parallel zu der bestehenden Transmed-Erdgas-Pipeline gebaut würde (Fig.1), um Erfahrungen über den Trassenverlauf zu nutzen. Die Transmed-Pipeline verläuft von Algerien über Tunesien und Sizilien bis nach Norditalien (Minerbio).

Um das Risiko der Abhängigkeit von den Erzeugerländern zu begrenzen kommen vorerst Algerien, Libyen, Tunesien und Marokko in Betracht. In den genannten Ländern besteht bereits heute grosses Interesse, Solarfarmen zu installieren und zu betreiben.

In der Anfangsphase besteht auch die Möglichkeit, Wasserstoff bis zu einem Mischungsverhältnis von max. 20% dem Erdgas beizumischen, ohne signifikante Änderungen an der Rohrleitung durchzuführen.

Die Bauzeit der ersten SHEE-TREE-Pipeline, die ausschliesslich dem Transport von Wasserstoff dienen würde, liegt bei 2 bis 3 Jahren. Eine solche Pipeline mit einer Gesamtlänge von etwa 3300 km, davon 175 km unter Wasser, einem Nenndurchmesser von 1400 mm und einem Betriebsdruck von 80 bar hätte eine jährliche Transportkapazität von etwa 50 Mia m^3H_2 (=175 Mia kWh/a). Im Vergleich dazu: der Energiegehalt der in der Schweiz verbrauchten fossilen Energie liegt bei etwa 160 Mia kWh/a.

Die Pipeline übernimmt ausser der Transportfunktion auch eine gewisse Speicherfunktion, wodurch der tägliche Druckausgleich erreicht wird. Zur Anpassung von Energieproduktion und -verbrauch im Jahresverlauf sind im Verbrauchsland Speicher nötig. Die Investitionskosten der beschriebenen Pipeline werden auf 11,6 Mia Franken geschätzt.

Mögliche Einführungsvarianten

Für die Realisierung des SHEE-TREE können zwei zeitliche Konzepte betrachtet werden, zum einen ein staatlich lanciertes Sofortprogramm mit heute verfügbaren Technologien und zum anderen ein über Steuern staatlich gefördertes Mittelfristprojekt, bei dem Technologieentwicklungen berücksichtigt werden.

Variante 1, Sofortprogramm

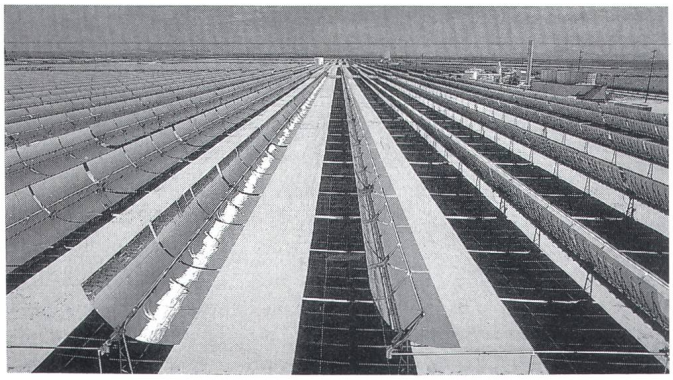
Zunächst wurde davon ausgegangen, dass innert kürzester Zeit die Versorgungsseite aufgebaut werden sollte. Die Kosten der Subsysteme würden in diesem Projekt heutigen Preisen mit Kostendegression durch «economies of scale» entsprechen.

Auf der Stromerzeugungsseite kämen kristalline Solarzellen mit einem Zellenwirkungsgrad von 14% in Frage, der sich unter Einsatzbedingungen aufgrund von Verschmutzung und Verlusten durch Temperaturerhöhung auf rund 10% reduziert.

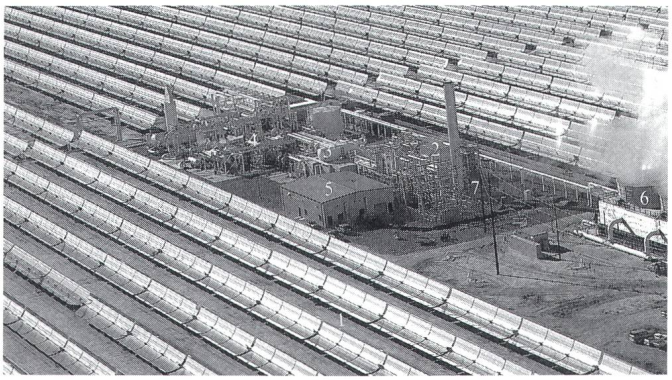
Alternativ dazu wurde eine praxiserprobte und sofort verfügbare solarthermische Stromerzeugungsvariante betrachtet. Rinnenkollektoren mit nachgeschalteter Dampfturbine können angesichts ihres besonderen Markterfolgs in den USA und günstiger Stromgestehungspreise von gegenwärtig 0,13 $/kWh$_e$ mit abnehmender Tendenz als besonders attraktive Lösung bezeichnet werden.

Allein die heutigen Investitionskosten zeigen, dass Solarzellen noch weit von der Wirtschaftlichkeit solarthermischer Kraftwerke entfernt sind. Für ein solarthermisches Kraftwerk auf der Basis von Rinnenkollektoren (LUZ-System, s. Fig. 2) werden heute 3000–4000 Fr./kWh$_e$ veranschlagt, für Solarzellen liegen die Preise bei etwa 10 000 Fr./kWh$_e$. Damit ist im Rahmen eines kurzfristigen Programms nur die solarthermische Variante attraktiv.

Inklusive Investitionskosten für die Wasserstofferzeugung mit 920–1080 Fr./kWh$_e$ (für die konventionelle Wasserelektrolyse) ergeben sich zusammen mit den Kosten der Pipeline von 11,6



Figur 2 a Rinnenkollektoren eines solarthermischen Kraftwerkes. Von diesem Typ sind in Kalifornien bereits mehrere Anlagen mit einer elektrischen Gesamtleistung von 200 MW in Betrieb.



Figur 2 b Zentrale eines solarthermischen Kraftwerkes
1 Solarkollektoren, 2 Erdgas-Zusatzkessel, 3 Turbine/Generator, 4 Dampferzeuger und Überhitzer (solar), 5 Kraftwerkswarte, 6 Kühltürme, 7 Anschluss an das Netz der Southern California Edison

Mia Franken Gesamtkosten in der Höhe von mindestens 220 Mia Franken (Fig. 3).

Mit einem solchen Projekt könnten 50% des schweizerischen Endenergiebedarfs gedeckt werden. Die resultierenden Wasserstoffkosten am Terminal Schweiz, ohne Berücksichtigung der Kosten für die Feinverteilung, lägen dann bei min. 20 Rp./kWhH_2. Um diesen Deckungsbeitrag zu erreichen, ist eine installierte Leistung von 53 GW für die Speisung der Elektrolyseure erforderlich. Hier könnte ein Engpass in den Fertigungskapazitäten entstehen, da z.B. die Fertigungskapazität für Elektrolyseure um das 100fache erhöht werden müsste. Bei entsprechendem Planungsvorlauf und Klarheit über die zukünftigen Absatzmärkte sollte dieses hohe Ziel für die Industrieländer Europas erreichbar sein, zumal die Fertigungstechnologien beherrscht werden.

Wo liegen die Probleme für die Durchführung des Sofortprogramms?

- Die politische Bereitschaft zu schnellem Handeln ist noch nicht erkennbar. Rein betriebswirtschaftliche Argumente wie solarer Wasserstoff sei heute noch zu teuer werden vorgeschoben, um einer ernsthaften und zügigen Evaluation zu entgehen.
- Produktionskapazitäten müssten drastisch aufgebaut werden. Die Industrie investiert nur, wenn sich interessante Märkte abzeichnen. Dazu müssten politische Instanzen ihren eindeutigen Willen erklären. Sie tun dies nicht aus oben erwähnten Gründen. Man will noch warten, bis die Wettbewerbsfähigkeit von Wasserstoff sozusagen von selbst eintritt. Damit werden die möglichen Kostendegressionen durch grössere Stückzahlen jedoch gerade verzögert.
- Die Verbraucherseite übt gegenwärtig trotz zunehmendem Interesse an einer ökologisch vertretbaren Energieversorgung noch zu wenig Druck auf die politischen Entscheidungsträger aus.

Unter dem Zwang der ernsten CO_2-Bedrohung bleibt uns allerdings vielleicht nicht viel anderes übrig, als durch den Staat ein Notstandsprogramm durchziehen zu lassen. So wie im Krieg die Rüstungsmaschinerie in Rekordzeit aufgebaut wurde, müssten wir vielleicht auch die Wasserstoffproduktion als Überlebensmassnahme mit allen Mitteln vorantreiben.

Welche Massnahmen führen zum beschleunigten Aufbau der Solar-Wasserstoffwirtschaft? Die Einführung eines neuen Energieträgers hängt massgeblich davon ab, ob der Konsument seinen Nutzen steigern kann. Ohne das Interesse des Energiekonsumenten für saubere Energieträger zu bewerten, muss daher davon ausgegangen werden, dass die Energiekosten von Wasserstoff nicht über denen fossiler Energieträger liegen dürfen.

Die sukzessive Internalisierung der von der Gemeinschaft getragenen ex-

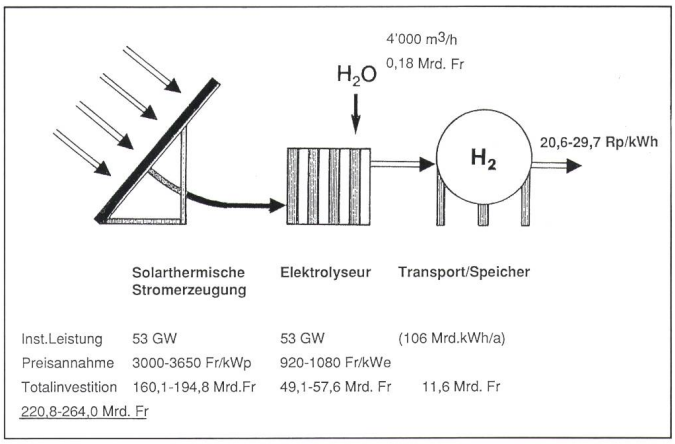
Stellungnahme des BEW

Crash-Programm unrealistisch

Unter dem Titel «SHEE-TREE-Versorgung der Schweiz mit solarem Wasserstoff» erarbeitete der World Circle of The Consensus (WCTC-CMDC) im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft (BEW) eine Vorstudie, die im August 1989 abgeschlossen und inzwischen veröffentlicht wurde. In einer dem Bericht beigefügten Stellungnahme begrüsst das BEW das Engagement der Autoren – im Sinne einer Verminderung der Umweltbelastung – für eine Wasserstoff-Wirtschaft und unterstreicht die Bedeutung dieser Untersuchung. Die Ergebnisse zeigten, dass die Wasserstoff-Technologie im nächsten Jahrhundert eine grosse Rolle spielen könne, wie auch anderen, ausländischen Berichten entnommen werden könne.
Aufgrund der bestehenden Daten erachtet das BEW jedoch die Empfehlung für ein Crash-Programm, mit dem innerhalb weniger Jahre die Hälfte des schweizerischen Energieverbrauchs auf einen neuen Energieträger umgestellt werden solle, als nicht realistisch. Fragwürdig oder noch zu wenig abgeklärt seien unter anderem

- die Verletzlichkeit einer Energieversorgung, die zur Hälfte von einer einzigen Pipeline abhängt
- die Vor- und Nachteile im Vergleich mit anderen Alternativen (z.B. Hochspannungsgleichstromübertragung des solar erzeugten Stromes)
- die Kosten, die bisher – sehr optimistisch – nur für Erzeugung und Transport des Wasserstoffs, jedoch nicht für die Feinverteilung und die Anpassung der Infrastruktur und Geräte berechnet worden seien.

Insgesamt bestehe beim BEW der Eindruck, dass die Autoren der Studie die Realisierungsschwierigkeiten ihres Projektes unterschätzten. Eine schnelle Umstellung (5 Jahre) des Abnehmermarktes auf ein derart teures, neues Energieversorgungssystem sei für die Schweiz mit ihrer freien Marktwirtschaft unmöglich. Das BEW unterstreicht jedoch, dass alle in der Studie vorgeschlagenen Forschungsschwerpunkte im Energieforschungsprogramm des Bundes bereits mit höchster Priorität eingestuft seien. *Red.*



Figur 3
Beim Sofortprogramm kommen solarthermische Kraftwerke zur Anwendung. Das Projekt ist für einen 50%igen Deckungsbeitrag zur schweizerischen Energieversorgung konzipiert.

ternen Kosten fossiler Energie führt allerdings bei einem (nach USA-Berechnungen [2]) angenommenen Wert von etwa 5 Rp./kWh zu einer Mehrbelastung des Konsumenten von etwa 8 Mrd. Franken p.a., das entspricht fast den heutigen Totalausgaben für fossile Energie in der Schweiz. Sowohl private Haushalte als auch die Industrie müssten zur Deckung ihres Energiebedarfs das geplante Budget etwa verdoppeln. In obigen Annahmen ist die monetäre Bewertung des CO_2-Treibhauseffekts noch nicht erfasst. Er ist schwer quantifizierbar und erhöht die externen Kosten auf weit über 8 Mia Franken. Wenn die allgemein diskutierte Umlegung externer Kosten auf den Verursacher durchgesetzt werden kann, besteht die Möglichkeit, mit diesen Zusatzeinnahmen umweltverträgliche Energieträger derart zu subventionieren, dass ihr Marktpreis gegenüber fossilen Energieträgern wettbewerbsfähig wird. Klar ist dabei, dass auch die Umstellungskosten des Verbrauchers auf wasserstofftaugliche Verbrauchstechnologien zu berücksichtigen sind.

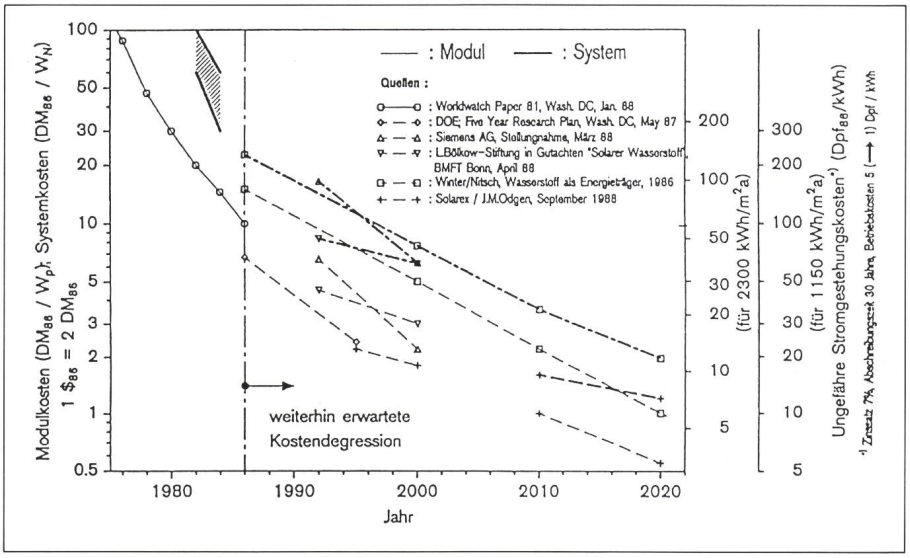
Anhand dieser ersten groben Überlegung ergibt sich für die Schweiz eine spezifische Substitution fossiler Energieträger durch Wasserstoff. Dabei dienen die anfänglich hohen Zusatzeinnahmen durch Besteuerung fossiler Energien dazu, den Preisunterschied des Wasserstoffs voll zu kompensieren. Im zeitlichen Verlauf der Markteinführung sinkt der Wasserstoffpreis durch technologischen Fortschritt und damit auch sein Subventionsbedürfnis. Auf dieser Basis wären bei einer zugrundegelegten Energiepreissteigerungsrate von 3% p.a. bereits im Jahr 2000 etwa 13%, 2005 etwa 25% und 2010 bereits mehr als 40% der fossilen Energie der Schweiz durch Wasserstoff ersetzt.

Variante 2, Mittelfristprogramm

Alternativ zu dem Sofortprogramm ist der sukzessive Aufbau eines Wasserstoff-Versorgungssystems denkbar, wobei unter rein betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten der Beginn der Einführung von Wasserstoff erst weit nach der Jahrtausendwende liegen würde. Der Hauptgrund liegt darin, dass fossile Energie zu billig, d.h. der Energiemarkt verzerrt ist, weil Kostenbestandteile für die nachteiligen Folgen der Nutzung fossiler Brenn- und Treibstoffe, die in die Kalkulation der Energielieferanten einbezogen werden müssten, heute von den Beschädigten getragen werden.

Bei der Konzeption eines schrittweise aufgebauten Wasserstoff-Versorgungssystems läge der Baubeginn gegen das Jahr 2000. Zu diesem Zeitpunkt werden bereits deutliche Kostendegressionen bei Solarzellen prognostiziert [3] und der Einstieg in eine solare Wasserstoffwirtschaft durch den Bau von Grossanlagen ohne Notstandsmassnahmen für möglich gehalten [4].

Verschiedene Untersuchungen (vgl. Fig. 4) gehen für 2000 von spezifischen Kosten von etwa 3.00 Fr./W_p für polykristalline Zellen aus und prognostizieren möglicherweise für dann verfügbare Dünnschichtzellen Kosten von 2.00 Fr./W_p (Watt peak) [5]. Damit wird deutlich, mit welchen Kostenreduktionen zukünftig auf der Stromerzeugungsseite, die mit Abstand den grössten Anteil an den Gesamtinvestitionen hat, zu rechnen ist.

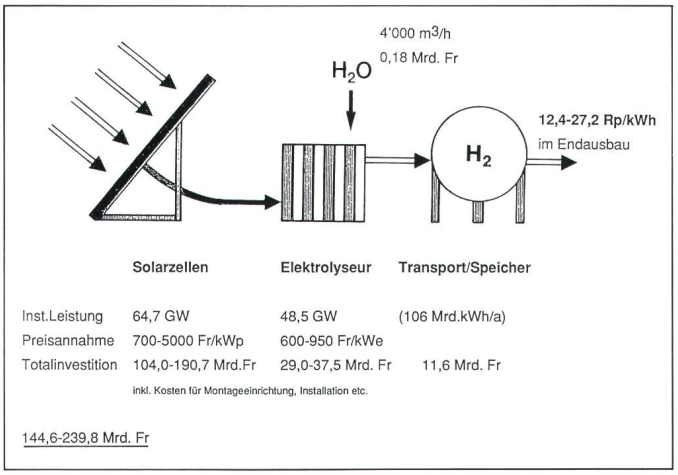


Figur 4 Mögliche Kostenentwicklungen von Photovoltaik-Modulen und -Systemen
(Quelle: VDI-Bericht 725, Wasserstofftechnik 2, Düsseldorf 1989)

Gründung in Gang:

Internationales Wasserstoff-Energie-Konsortium IHEC

Durch den World Circle of the Consensus (WCTC-CMDC) wurde u.a. die Gründung eines internationalen Wasserstoff-Energie-Konsortiums (IHEC) initiiert, das eine wesentliche Rolle bei der Realisierung der Wasserstoffversorgung spielen soll. Ziel des IHEC ist die Verwirklichung der weltweiten Produktion und Verteilung von Wasserstoff in Zusammenarbeit mit Regierungen, interessierten Industriefirmen, Forschungsinstituten, Abnehmern sowie relevanten nationalen und internationalen Organisationen. Eines der vom IHEC betriebenen regionalen Projekte soll das SHEE-TREE-Projekt zwischen Nordafrika und Europa werden. Die im Anschluss an das internationale Solar-Wasserstoff-Symposium beschlossenen Statuten des IHEC werden derzeit bereinigt und sollen Anfang nächsten Jahres in Kraft treten.



Figur 5 Langfristiges Programm mit Solarzellen, bei 50%igem Deckungsbeitrag zum schweizerischen Energieverbrauch

Die Kombination von Solarzellen und Elektrolyseuren ist wegen ihrer elektrischen Eigenschaften und des einfachen Aufbaus nahezu ideal. So entfällt beispielsweise die bei der solarthermischen Stromerzeugung mittels Generatoren notwendige Gleichrichtung. Bereits eine direkte Verschaltung von Solarzellen und Elektrolyseuren ergibt einen Übertragungswirkungsgrad von 90%. Eine Anpasselektronik verbessert diese Werte deutlich.

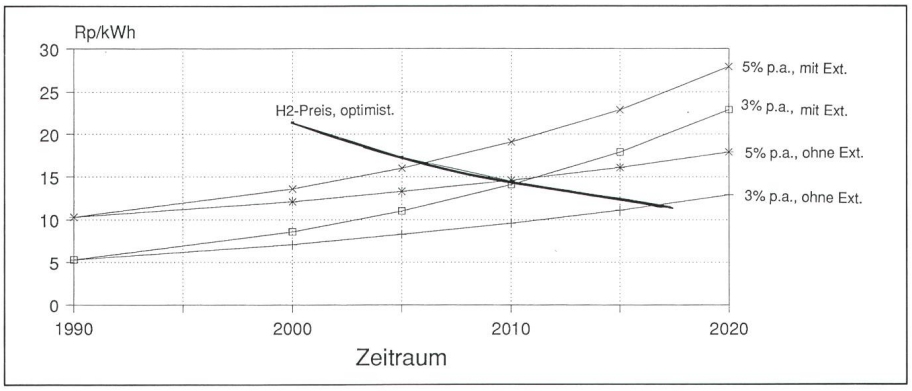
Um den Verdichtungsaufwand am Kopf der Pipeline klein zu halten, eignen sich Elektrolyseure, die mit einem Druck von 30 bar (zukünftig 80 bar) betrieben werden. Die heute noch in Einzelfertigung hergestellten Elektrolyseure könnten in der Serienproduktion deutlich kostengünstiger hergestellt werden, wobei künftig von Investitionskosten von etwa 650 Fr./kW_e ausgegangen wird. [6, S. 327].

Zu welchen Kosten führt ein staatlich geförderter schrittweiser Aufbau der Wasserstoffversorgung? Beginnend gegen das Jahr 2000 wären jährliche Investitionen in Höhe von 6–10 Mrd. Franken erforderlich (optimistische Annahme über die Preisentwicklung der Subsysteme), um gegen 2015/20 bei Totalinvestitionen von min. 145 Mia Franken (Fig. 5) einen Deckungsbeitrag von 50% des schweizerischen Energieverbrauchs (bzw. ⅔ des fossilen Verbrauchs) zu erzielen.

Die resultierenden Wasserstoffkosten lägen vor der Feinverteilung im skizzierten Fall bei 21 Rp./kWh_{H_2} im Einführungsjahr und bei 12 Rp./kWh_{H_2} 15 Jahre später. Dem gegenüber stehen Kosten für fossile Energie in Höhe von 8 Rp/kWh_{th} bei Beginn und 12 Rp./kWh_{th} 15 Jahre später, wenn eine 3prozentige Preissteigerung pro Jahr unterstellt wird. Ab dem Jahr 2015/20 würde der Wasserstoff als Energieträger sogar nach rein betriebswirtschaftlichen Kriterien wettbewerbsfähig sein können (Fig. 6).

Die Frage bleibt, ob wir uns dieses «langsame» Szenario verbunden mit einem weiteren exponentiellen Anstieg der CO_2-Konzentration zeitlich überhaupt leisten können. Diese Frage müssen uns die Klimaprognostiker beantworten. Wird ihre Antwort uns vielleicht zu einem krisenstabsmässigen Handeln zwingen?

Die Vergangenheit hat gezeigt, dass die Einführung neuer Energien bis zu ihrer Marktreife Jahrzehnte in Anspruch nimmt. Auch wenn es gelingt, den Wasserstoff-Energiemarkt wegen des ökologischen Handlungszwangs rascher zu etablieren, müssen heute bereits die Grundsteine gelegt werden, indem im Konsens zwischen Politik und Energiewirtschaft grosstechnische Projekte wie das SHEE-TREE vorangetrieben werden.



Figur 6 Energiepreis von Wasserstoff im Vergleich zu fossilen Brennstoffen, mit und ohne externe Kosten

ISO-Normen für Wasserstoff als Energieträger

Zur Förderung der Wasserstoff-Wirtschaft gehört auch die Aufstellung geeigneter Normen für Wasserstoff. Unter der Federführung des Schweizerischen Normenvereins SNV und unter dem Vorsitz des WCTC-CMDC-Präsidenten G.R. Grob wurde ein neues Technisches Komitee der ISO gegründet, das u.a. folgende Fragen bearbeiten soll:

- Terminologie
- Klassifizierung und Spezifizierung des Brennstoffs Wasserstoff und des Nebenproduktes Sauerstoff
- Infrastruktureinrichtungen für die Brennstoffversorgung im Bereich Verkehr und Wärmeversorgung
- Stationäre und mobile Anlagen für Handling, Speicherung und Verflüssigung von Wasserstoff und Sauerstoff
- Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff über solarthermische, photovoltische oder photochemische Verfahren
- statische und dynamische Messverfahren, Eichung von Messeinrichtungen
- Transport durch Pipelines, Schiffe und Fahrzeuge
- Sicherheitsvorschriften und -massnahmen.

Literatur

[1] *Kaske, G., Schmidt, P., Kanngiesser, K.W.:* Vergleich zwischen Hochspannungsgleichstromübertragung und Wasserstofftransport, in VDI-Berichte 725: Wasserstoffenergietechnik 2, VDI Verlag, Düsseldorf 1989.

[2] *Veziroglu T.N.:* Economic Comparison of Solar Hydrogen Energy System with Fossil Fuel System. Internationales Symposium Solar-Wasserstoff-Versorgung, Zürich, November 1989

[3] *Ogden, J.M., Williams, R.H.:* Electrolytic Hydrogen from amorphous silicon solar cells, Proceedings of the 7th World Hydrogen Energy Conference, Moscow 1988.

[4] *Nitsch, J.:* Solarer Wasserstoff in einer zukünftigen Energiewirtschaft, in: elektrowärme international, 46. Jg., Heft A5/1988, S. A138-148.

[5] *Winter, C.J., Nitsch, J., Klaiss, H.:* Energieträger Wasserstoff: Was wissen wir? Was bleibt zu lernen? - Eine Parameterabschätzung, in: VDI-Berichte 725: Wasserstoffenergietechnik 2, VDI Verlag, Düsseldorf 1989, S. 263-278.

[6] *Winter, C.J., Nitsch, J.*(Hg.): Wasserstoff als Energieträger: Technik, Systeme, Wirtschaft, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York 1989.