

Forschung Wissenschaft

Die Wasserstoffwirtschaft – eine langfristige Antwort auf das Energieproblem?

Von W. Seifritz

Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung, CH-5303 Würenlingen

Summary

“The theme was THEME”. This was the headline of *The Hydrogen Economy Miami Energy Conference* which was the first international conference of this type and which took place in Miami, March 18–20, 1974. For the first time, about 700 participants from all over the western world discussed all the ramifications and aspects of a hydrogen based economy. Non-fossil hydrogen, produced from water by either electrolysis or by direct use of process heat from a nuclear source is a clean, all-synthetic, automatically recyclable, and inexhaustible fuel. It may support the World's future energy requirements beyond our present selflimited fossil-fuel era. A large number of papers and news were presented on this conference reflecting this effort.

The following article is intended to report on the highlights of the conference and to give a survey on the present state of the art in the hydrogen field. Furthermore, the author includes own ideas and conclusions predominantly by taking into account the trends in the development of future nuclear reactor systems and symbiotic high-temperature-reactor/breeder strategies being the primary energy input of a hydrogen economy and providing a most promising avenue for solving both the World's energy and environmental (entropy) problems.

1. Einleitung

“The theme was THEME”. Unter diesem Motto fand vom 18. bis 20. März 1974 in Miami/Florida die erste internationale Wasserstoffökonomie-Konferenz, kurz *The Hydrogen Economy Miami Energy Conference*, statt. 700 Teilnehmer aus der westlichen Welt sind zu dieser Großtagung gekommen, auf der zum ersten Male in geschlossener Form die verschiedenartigsten Aspekte einer möglichen Substitution der versiegenden fossilen Energieträger behandelt wurde. Wasserstoff, erzeugt durch Aufspaltung von Wasser, als sauberer, voll-synthetischer und über die Biosphäre rezyklierbarer, nicht fossiler Brennstoff, könnte dabei der Energieträger einer sogenannten *Wasserstoff-Energiewirtschaft* werden, die unsere jetzige fossile Ära ablösen könnte. Als Teilnehmer der Schweiz an dieser Tagung möchte ich im folgenden eine Analyse dieses aktuellen Themas geben und auch durch eigene Schlußfolgerungen und unter Zurückgriff auf die gegenwärtigen Tendenzen in der Kernreaktorentwicklung versuchen, die Trends, soweit sie sich jetzt schon abzeichnen, aufzuzeigen.

2. Die Ausgangslage

Anlaß und Ausgangspunkt für die Veranstaltung der genannten Wasserstoffökonomie-Konferenz auf inter-

nationaler Basis war die gegenwärtige weltweite Energiesituation, die sich durch folgende drei Punkte charakterisieren läßt:

- Der wohl irreversible und stetig weiterwachsende Preisanstieg fossiler Brennstoffe sowie deren absehbares materielles Versiegen.
- Der weltweit und stetig weiterwachsende Energieverbrauch.
- Die Umweltbelastung des Lebensraums, die sich gewissermaßen als Rückkoppelung durch den erhöhten Energieverbrauch, insbesondere in hochtechnisierten Ländern, einstellte.

Zusammengefaßt kann diese sozio-technologische Situation als ein Energie- und Umweltproblem, oder – wie der US-Forschungs- und Entwicklungschef A. Weinberg kürzlich meinte – als eine *Energie- und Entropiekrise* gleichzeitig aufgefaßt werden.

Vom technologischen Standpunkt aus betrachtet, stellt das Problem der längerfristigen Überwindung dieser Situation eine gewaltige Herausforderung an den Ingenieur- und Forschergeist unserer Zeit dar. In den letzten Jahren hat deshalb auch vor diesem Hintergrund eine weltweite «Ideenproduktion» insbesondere auch in der interdisziplinären Forschung zur Überwindung dieser Probleme stattgefunden, und wir dürfen heute hoffen, daß es sehr wohl aufgrund der erarbeiteten Ansätze möglich scheint, einer längerfristigen Lösung des Energieproblems entgegenzusehen.

3. Das Für und Wider einer Wasserstoffwirtschaft

Wasserstoff könnte im Prinzip neben und analog der Elektrizität der generelle Energieträger einer nach-fossilen Energiewirtschaftsära werden, die unsere jetzige Energiewirtschaft, basierend hauptsächlich auf fossilen Energieträgern (Kohle, Erdöl und deren Derivate), ablösen würde. Der Grund, weshalb sich gerade Wasserstoff als geeigneter Energieträger erweist, geht aus folgender Zusammenstellung von physikalisch-chemischen Tatsachen hervor:

- Wasserstoff ist ein *vollsynthetisches* Produkt, das sich aus einer nie versiegenden und praktisch überall vorhandenen Grundsubstanz unseres Planeten, nämlich Wasser, gewinnen läßt.

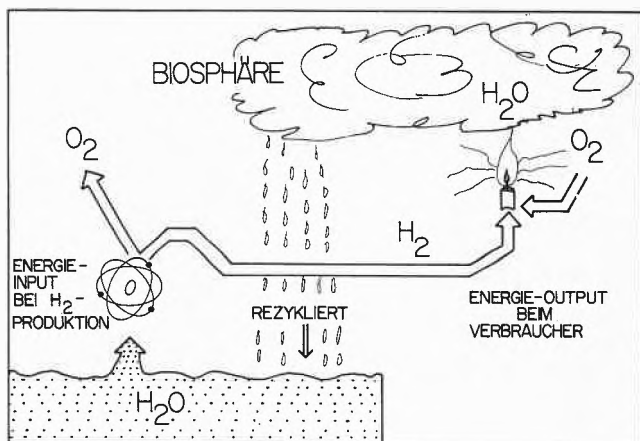


Abb. 1. Schematische Darstellung der Rezyklierbarkeit des Wasserstoffs über die Biosphäre

- Wasserstoff ist der *sauberste* Brennstoff überhaupt, da als Verbrennungsprodukt oder Asche aus einer Verbrennung mit Luftsauerstoff wiederum nur harmloses Wasser entsteht; d.h. die Erzeugung von «Umweltfeinden» wie CO_2 , CO , SO_2 und Rußpartikel, wie sie bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen, entfällt. Die Erzeugung von Stickoxiden ist beträchtlich kleiner als bei Verbrennungsvorgängen mit fossilen Brennstoffen und kann vernachlässigt werden.
- Wasserstoff bzw. dessen Asche, Wasser, ist eine völlig *ungiftige* Substanz und ist daher über die Biosphäre im Verbund mit dem normalen Wasserkreislauf in der Natur *rezyklierbar* (Abb. 1).
- Wasserstoff kann in gasförmiger, flüssiger und fester Form (gebunden als Metallhydride) *gespeichert* werden.
- Wasserstoff ist *transportierbar* und durch ein Pipeline-System *verteilbar*.
- Wasserstoff ist *universell nutzbar* und eine Grundsubstanz großtechnisch-chemischer Verfahren.
- Wasserstoff läßt sich leicht aus Elektrizität *gewinnen* (Elektrolyse) und auch wieder in Elektrizität *zurückverwandeln* (Gasturbinen und Brennstoffzellen). – Von einem übergeordneten Standpunkt aus betrachtet, hat eine stetige Rezirkulation von Wasserstoff über das Wasser eine frappante Ähnlichkeit mit der Elektrizität. In einer Wasserstoffwirtschaft spielt – zumindest phänomenologisch gesehen – das Proton jene Rolle, die das Elektron in der Elektrizitätswirtschaft inne hat. Deshalb kann auch die Wasserstoffwirtschaft als eine Art Elektrizitätswirtschaft mit positiven Transportelementen aufgefaßt werden.

Gemäß dieser Positivliste würde mithin der Wasserstoff den Bedingungen in hervorragender Weise genügen, die man heute an einen zukünftigen Energieträger stellen muß. Man könnte weiterhin noch hinzufügen, daß eine

Wasserstoffwirtschaft der logische Schlußpunkt der historischen Entwicklung unserer Kohlenwasserstoffära darstellen würde. Stellt man die wichtigsten Kohlenwasserstoffe (C_nH_m) nach einem Schema dar, in dem die Zahl der Kohlenstoffatome n gegen das Verhältnis von Wasserstoff- zu Kohlenstoffatome m/n aufgetragen ist, so ergibt sich ein Bild gemäß Abb. 2. Die Geschichte unserer Ära der fossilen Energieträger begann mit der Ausbeutung der Kohle ($n = 1, m = 0, m/n = 0$), die das industrielle Zeitalter in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts einleitete, und setzte sich über die Erdölphase (Schweröle und Benzine $m/n \approx 1,5$ bis $2,5$) und die Erdgasphase (Methan: $m/n = 4$) bis in die Gegenwart fort. Der Siedepunkt der verwendeten Kohlenwasserstoffe sank dabei in charakteristischer Weise und kontinuierlich zu niedrigeren Temperaturen. Eine Wasserstoffphase (H_2 : $n = 0, m = 2, m/n = \infty$) wäre somit die logische Endstation dieser Entwicklungsgeschichte. Im Gegensatz zu der in diesem Lande manchmal zu hörenden Meinung, man müsse nur den spezifischen Energieverbrauch einfrieren oder ihn gar längerfristig mittels sogenannten Kleintechnologien erniedrigen, um das Umweltproblem anpacken zu können, ist das Was-

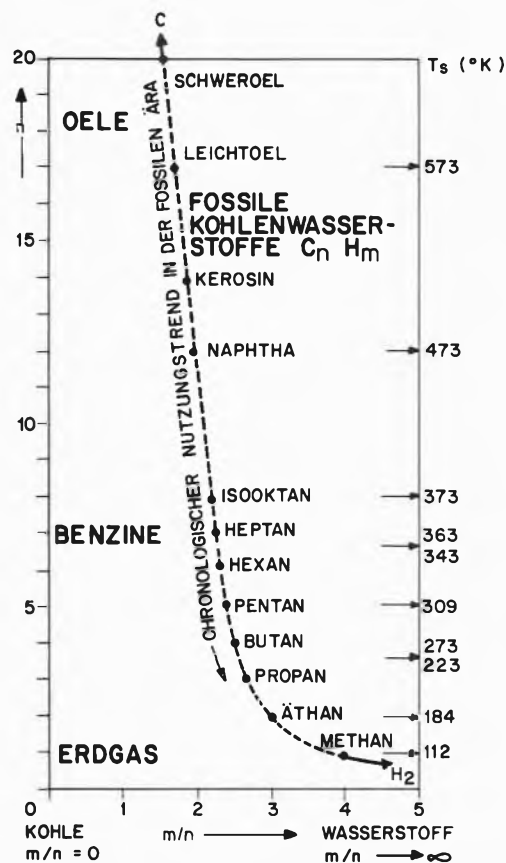


Abb. 2. Der geschichtliche Trend in der Nutzung der Kohlenwasserstoffe in der fossilen Energieära, beginnend mit Kohle und hinzielend auf Wasserstoff. Dieser muß jedoch synthetisch aus Wasser hergestellt werden, da er in der Natur nicht frei vorkommt.

serstoffkonzept eine in die Zukunft schauende aggressive Energiephilosophie. Sie will *bei* einem hohen spezifischen Energieverbrauch pro Einwohner, der letztlich eine doch nicht wegzudiskutierende Voraussetzung für einen hohen Lebensstandard ist, auch gleichzeitig durch die Umweltfreundlichkeit des Energieträgers das Entropieproblem lösen.

Es ist deshalb nicht ganz abwegig, in einem Übergang der jetzigen fossilen Energieära in eine vollsynthetische Wasserstoffära das alte Hegelsche Prinzip des Umschlages von Quantität in Qualität auf energiepolitischem Gebiet verifiziert zu sehen. Im Sinne des Autors könnte sogar die ganze zeitliche Entwicklung in der Energiegeschichte des Menschen als echter dialektischer Prozeß im Sinne Hegels mit folgenden Zuordnungen aufgefaßt werden:

- These $\triangleq$ Entwicklung hin zu einem hohen spezifischen Energieverbrauch in den hochentwickelten Industrienationen
- Antithese $\triangleq$ negative Umweltsbeeinflussung, bedingt durch diesen hohen Energieverbrauch (Entropieproblem)
- Synthese $\triangleq$ radikale Lösung des Energie- und Entropieproblems durch eine Wasserstoffwirtschaft

Die anstehenden Probleme, die sich im Augenblick jedoch einer sofortigen Einführung einer Wasserstoffwirtschaft im großen Maßstab entgegenstellen, lassen sich wie folgt anführen:

- die großtechnische Realisierung eines billigen Herstellungsverfahrens für Wasserstoff, mit einem *Energiepreis**, der heute vergleichbar oder niedriger als jener eines entsprechenden fossilen Brennstoffs ist;
- die noch zum Teil ungelösten rein *technischen Probleme* bei der Wasserstoffherstellung selbst, insbesondere bei dem vielversprechenden, aber sich noch im Labormaßstab befindenden thermochemischen Wassersplittingverfahren;
- die *Kompatibilität* der Wasserstoffwirtschaft mit dem jeweiligen bestehenden Energieverteilungssystem für die Übergangsphase. Dies ist ein typisch nationales und regionales Problem und bedarf im Einzelfall einer spezifischen Analyse im Hinblick auf eine optimale angepaßte Schwerpunktsfixierung in der Anwendung des Wasserstoffes bei dessen Einführung;
- die Beherrschung *sicherheitstechnischer* Aspekte beim Umgang mit Wasserstoff. Da jedermann in diesem Zusammenhang an Knallgasexplosionen und Brände denkt, hat sich für diesen Komplex der Begriff des «Hindenburg-Syndroms» – in Erinnerung an den

* Auf dem internationalen Energiemarkt ist es üblich, die Kosten der aus einem bestimmten Brennstoff gewonnenen thermischen Energie in der Einheit $\$/10^6 \text{ BTU} = \$/\text{MBTU}$ auszudrücken. Es ist $1 \text{ } \$/\text{MBTU} \sim 0,341 \text{ } \text{¢}/\text{KWh}(\text{th}) \sim 3,97 \text{ } \$/\text{Gcal}$.

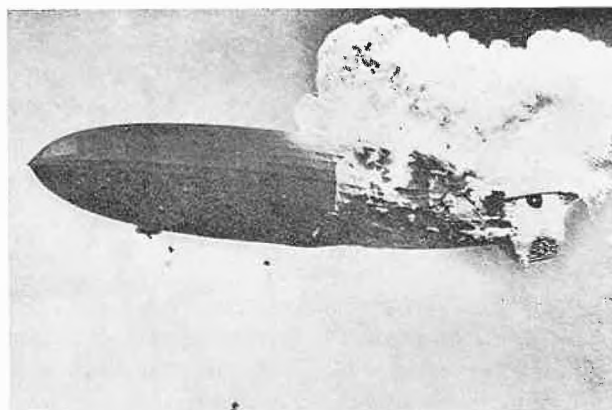


Abb. 3. Absturz des Luftschiffes «Hindenburg» kurz vor dem Zweiten Weltkrieg bei New York. Es benutzte Wasserstoff als Trägergas, der sich beim Absturz entzündete. Dieses Ereignis gab dem Sicherheitsproblem in einer Wasserstoffwirtschaft den Namen «Hindenburg-Syndrom»

Absturz des Luftschiffes «Hindenburg» vor dem Zweiten Weltkrieg – eingebürgert (Abb. 3). Der sichere Umgang mit Wasserstoff dürfte aber kein prinzipiell unbeherrschbares Hindernis darstellen;

- letztlich darf auch die *öffentliche Reaktion* bei der Einführung von Wasserstoff nicht vergessen werden. Es ist anzunehmen, daß mit Widerständen zu rechnen ist, da die Öffentlichkeit ähnlich wie im Falle der Nuklearenergie sich etwas Nichtvertrautem und Nichtalltäglichem gegenüber sieht: Verflüssigter Wasserstoff in großen Dewar-Behältern, d. h. letztlich eine kryogenische Substanz, wird wie die Radioaktivität als etwas Fremdartiges angesehen und mit einer wohl mehr emotional-motivierten Antihaltung aufgenommen werden.

4. Die Produktionsmethoden von Wasserstoff

Großtechnisch wird heute Wasserstoff durch die bekannte Wassergasreaktion aus Kohle und Wasserdampf oder bevorzugt aus Methan, dem Hauptbestandteil des Erdgases, gewonnen. Deshalb bezeichnet man ihn auch noch als «fossilen Wasserstoff». Wenn jedoch die fossilen Reserven knapp werden oder – was sinnvoll wäre – wenn man sie nicht einfach verbrennen würde, sondern sie als Ausgangsstoffe ausschließlich für petrochemische Erzeugnisse bereitstellen würde, so müßte Wasserstoff aus Wasser gewonnen werden. Es gibt hierzu zwei Methoden, die Aussicht auf großtechnischen Erfolg haben, nämlich die

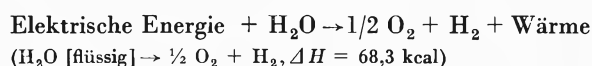
- direkte Elektrolyse von demineralisiertem Wasser sowie
- die Wasserzersetzung mittels sogenannter thermochemischer Splittingverfahren.

«Exotische» Methoden der Wasserstoffgewinnung etwa durch Trockendestillation von häuslichem Müll, durch

Algen mittels Photosynthese, durch direkte Lichtzer-
setzung von Wasser (Photolyse) sowie durch die Aus-
nutzung der kinetischen Energie der Spaltprodukte bei
der Kernspaltung in einem homogenen Reaktor, in dem
der Brennstoff in wäßriger Lösung vorliegt, leiden
allesamt an zu kleiner Ausbeute und sollen deshalb in
diesem Rahmen nicht weiter betrachtet werden.

4.1 Der Elektrolysewasserstoff

Die Methode des Wasser-Elektrolyseverfahrens ist dem
Prinzip nach schon seit dem 19. Jahrhundert bekannt;
als Primärenergie wird hier Elektrizität benötigt, und
die Reaktionsgleichung lautet bekanntlich



Da hierbei die Umsetzung von Elektrizität in die che-
misch-latente Energie des Wasserstoffs an den Elektro-
den nicht hundertprozentig erfolgt, definiert man den
Elektrolysewirkungsgrad gemäß

$$\eta_{\text{el}} = \frac{\text{Verbrennungswärme des erzeugten H}_2}{\text{hineingesteckte elektrische Energie}}$$

Angestrebt wird selbstverständlich ein Wirkungsgrad
nahe 1, um möglichst keine parasitäre Wärme zu er-
zeugen, die über einen Wärmeaustauscher abgeführt
werden muß.

Heutige kompakte Elektrolyseeinheiten können bis zu
4 t H₂ pro Tag erzeugen. Sie arbeiten bei etwa 7 atm
Druck (um das Volumen der sich bildenden Gasblasen
klein zu halten) mit Stromdichten von etwa 1,6 A/cm²
bei einigen Volt Spannung und KOH als Elektrolyt.
Der Wirkungsgrad liegt knapp über 61 %. Abb. 4 zeigt
ein Flußschema eines solchen Elektrolysemoduls.

Große Anstrengungen werden gegenwärtig unternom-
men, um den Wirkungsgrad weiter zu erhöhen. Dies
geht insbesondere in Richtung eines höheren Arbeits-
druckes bis über 200 atm und eines optimierten
Verhältnisses von Temperatur, Zerlegungsspannung
und Wasserstoffdruck gemäß der Nernstschen Gle-
ichung. Darüber hinaus werden Versuche unternommen,
um die Lebensdauer der Elektroden mit Edelmetall-
plattierung zu erhöhen.

General Electric hat einen neuen Polymerelektrolyten
vorgestellt, der mit einem wassergesättigten Plastik-
material, ähnlich Teflon, arbeitet und den Vorteil auf-
weist, daß keine korrosiven Säuren oder Basen im System
zirkulieren müssen.

Die Firma gibt für das Jahr 1985 folgende Gleichung
für die Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyse an

$$C_{\text{H}_2} = 0,312 C_0 + 0,227, \text{ in } \$/\text{MBTU},$$

wobei C₀ die Kosten der Elektrizität in mills/kWh-
Gleichstrom* angibt und der feste Summand die Ka-

* 1 mill = 1/1000 \$ = 0,1 ¢ ≈ 0,3 Rappen.

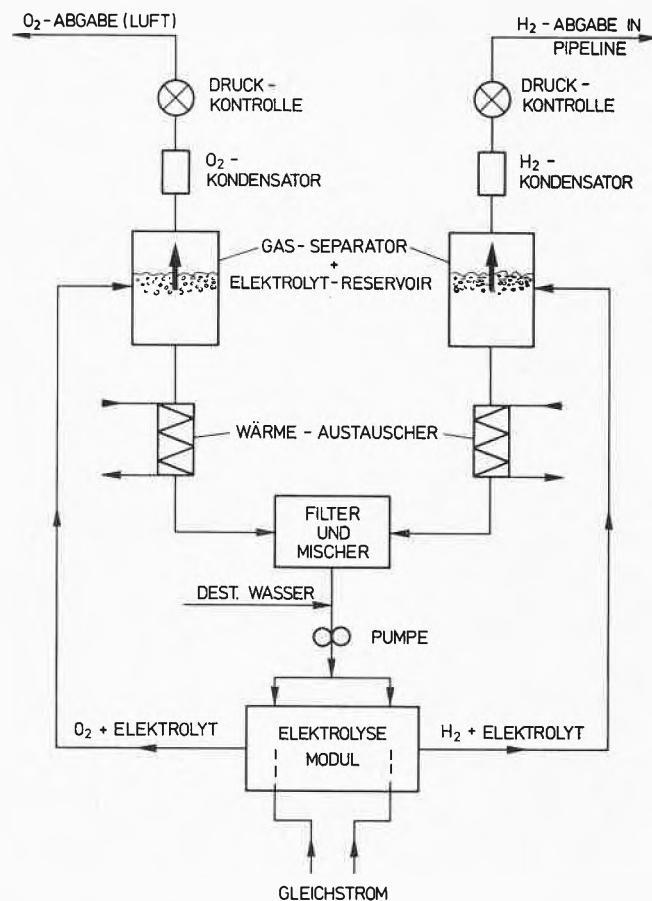


Abb. 4. Flußschema eines Elektrolysemoduls für 4 t H₂/Tag (5,6 MW_{th} [H₂]) der Firma Teledyne Isotopes Electra, USA

pitalkosten des Elektrolysators mit 15 % Abschreibung
pro Jahr enthält. So würde bei einem Strompreis von
10 mills/kWh der Wasserstoffpreis etwa 3,35 \$/MBTU
betragen.

Die Daten für die Verbrennungswärme pro Gewichts-
bzw. Volumeneinheit von Wasserstoff stellt sich mit
anderen vergleichbaren (flüssigen) Energieträger wie
folgt dar:

	kcal/g	kcal/cm ³
Wasserstoff	28,9	2,02
Methan	11,97	4,97
Benzin (Iso-Oktan)	10,98	7,59
Methanol	4,86	3,84
Ammoniak	4,44	3,63
Hydrazin	3,98	4,02

Damit kann der flüssige Wasserstoff als ein Energie-
träger mit einem relativ *hohen* gewichtsspezifischen und
einem relativ *niedrigen* volumenspezifischen Energie-
inhalt klassifiziert werden.

Für eine gute Nutzlastausnutzung bei großen Trans-
portflugzeugen kommt es in erster Linie auf einen hohen
gewichtsspezifischen Energieinhalt des Brennstoffs an.

Aus diesem Grunde ist es besonders interessant, den jetzigen Flugzeugsprit durch Flüssigwasserstoff zu ersetzen. Die Verflüssigungskosten werden mit (1.3 bis 1.8) \$/MBTU angesetzt, so daß flüssiger Wasserstoff nach dem General-Electric-Elektrolyseverfahren in der Preislage von (4.65 bis 5.15) \$/MBTU Mitte der 80er Jahre herstellbar sein dürfte. Dieser Preis muß mit dem Flugzeugsprit (JP-5) verglichen werden, der nach einer Angabe im *Time*-Magazin 1974 die Höhe von 5.1 \$/MBTU erreichen wird. Auf dieser Preisbasis existiert in den 80er Jahren eine realistische Marktchance des verflüssigten Elektrolysewasserstoffs im internationalen Flugzeugverkehr.

Folgende Tabelle stellt einen Vergleich der Auslegungsdaten zweier bekannter Flugzeugtypen zusammen, wenn sie vom heutigen Jet-Treibstoff auf Flüssigwasserstoff-Brennstoff umgestellt werden.

	Boeing 747 «Jumbo»	Lockheed L 1011
Nutzlast, lb	123 000	56 000
Reichweite in Meilen	5000	3400
Mach-Zahl	0.86	0.82
Take Off Gross Weight (TOGW), lb		
a) Jet-Treibstoff (JP)	775 000	430 000
b) LH ₂ *	574 000	318 000
Treibstoff-Gewicht, lb		
a) Jet-Treibstoff (JP)	268 000	137 000
b) LH ₂ *	90 500	46 650

* LH₂ = liquid hydrogen = verflüssigter Wasserstoff.

Man sieht, daß in beiden Fällen das Treibstoffgewicht im Falle einer Umstellung auf LH₂ fast um den Faktor 3 und der TOGW-Wert auf rund 3/4 reduziert werden könnte. Diese Einsparung käme dann einer entsprechend höheren Nutzlast zugute.

Rein vom Technischen gesehen, dürfte eine Umstellung auf LH₂-Treibstoff keine allzu großen Hindernisse aufwerfen, da Pratt and Whitney wie General Electric seit längerer Zeit erfolgreich Versuche mit LH₂-getriebenen Flugzeugturbinen durchführten. Die Form der LH₂-getriebenen Flugzeuge wird allerdings von den heutigen Formen abweichen, da mehr Volumen für den Treibstoff vorgesehen werden muß. Eine Version, in dem das LH₂ zusätzlich in speziellen Brennstofftanks am Ende der Flügel untergebracht ist, zeigt Abb. 5.

Es ist zu erwarten, daß der flüssige Wasserstoff auf dem zivilen Sektor den Treibstoffmarkt des internationalen Flugverkehrs als erstes erobern dürfte, zumal auch hier die sicherheitstechnischen Systeme am besten ausgebildet sind. Ob es sich um Elektrolysewasserstoff oder um thermo-chemischen Wasserstoff handeln wird, wird von den Herstellungskosten und den Fortschritten in der großtechnischen Herstellung des letzteren abhängig sein.

1972 wurden in der Schweiz 669 702 t Flugpetrol benötigt. Das Energieäquivalent wäre etwa 226 000 t LH₂.



Abb. 5. Modifizierte Version eines Verkehrsflugzeugs mit Wasserstoffantrieb. Das höhere Treibstoffvolumen wird hier in Zusatztanks am Ende der Tragflächen untergebracht. Andere Modifikationen (z. B. Boeing 747 = «Jumbo») sehen die Unterbringung des Flüssigwasserstoffs in einem vergrößerten Rumpf vor. Wegen des hohen gewichtsspezifischen Energiewerts des H₂-Treibstoffs scheint eine Nutzlasterhöhung bis zu einem Drittel des jetzigen Wertes möglich zu sein

Zwei Kernreaktoren mit einer elektrischen Leistung von je knapp 950 MW_{el} könnten diese Menge durch Elektrolyse ($\eta_{el} = 0,8$) bei einem Lastfaktor von 0,8 einschließlich Verflüssigung ($\eta = 0,72$) bereitstellen.

Eine andere interessante Markteinführung von Elektrolysewasserstoff kann bei den Kernkraftwerken zur Deckung des Spitzenstrombedarfes liegen. Da die Kosten für den Spitzenstrombedarf etwa 2- bis 4 mal höher liegen als für den sogenannten Grundlaststrom, liegt es nahe, in Zeiten relativ kleinen Strombedarfs (nachts) einen Teil der Elektrizität zur Wasserstoffelektrolyse zu verwenden und diesen dann in Zeiten hohen Strombedarfs (Mittagszeit) mit Hilfe von offenen Gasturbinen oder Brennstoffzellen in Elektrizität zurückzuverwandeln. Wasserstoff dient so analog den Speicherkraftwerken als Energiespeicher.

Das Schema einer neuartigen zukünftigen Gasturbine, die mit dem Gemisch von Wasserstoff und Luft (oder des mit dem Wasserstoff gleichzeitig erzeugten Elektrolysesauerstoffs) betrieben wird, zeigt Abb. 6. Dabei werden hohe Temperaturen über 3000°K erreicht, so daß die Turbine mit gekühlten Schaufeln laufen muß. Die Temperatur kann dabei sehr genau mit Einspeisen von Wasser, wie man es bei den Treibwerken von Düsenflugzeugen macht, gesteuert werden. Eine solche Gasturbine sollte einmal einen Wirkungsgrad von 60 % und mehr haben.

Bei einem Elektrolysewirkungsgrad um die 80 % und einem Gasturbinenwirkungsgrad bei knapp über 60 % ergäbe sich ein totaler Wiedergewinnungsgrad der Elektrizität von etwa 50 %, sofern man den Wasserstoff in gasförmiger Form, z. B. in einem Gasometer oder in unterirdischen Kavernen, speichert. Im Vergleich dazu liegt bei Pumpspeicherbecken der entsprechende Wirkungsgrad bei knapp über 70 %. Man muß aber bedenken, daß die spezifischen Anlagekosten von Gasturbinen kleiner sind als jene von Speicherbecken, so daß diese

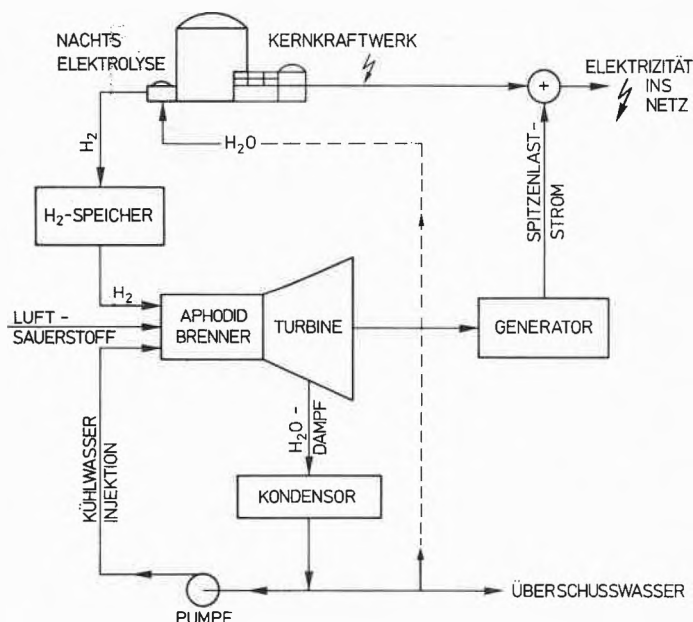


Abb.6. Schema einer zukünftigen offenen H_2 /Luft-Gasturbine im Verbund mit einem Kernkraftwerk zum Zwecke der Spitzenlastdeckung. Wasserstoff dient hier als Zwischenspeicher der Energie. – Andere fortgeschrittene Systeme sind noch mit einem Top-Cycle (MHD-Wandler) und einem Bottom-Cycle (Dampfkreislauf) in der Reihenfolge fallender Temperaturen konzipiert: MHD – Gasturbine – Dampfkreislauf; veranschlagter Gesamtwirkungsgrad: 60 bis 70 %

Differenz, in Stromkosten ausgedrückt, zusammenschumpft. Aus diesem Grunde könnte ein solches Gasturbinenkonzept insbesondere in Ländern interessant werden, wo man aus geographischen Gründen nur sehr schwer oder überhaupt keine Speicherbecken anlegen kann.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten für Elektrolysewasserstoff als Energiezwischenträger zeichnen sich überall da ab, wo eine billige Elektrizitätsquelle weit weg vom Verbraucher vorhanden ist oder erstellt werden kann. Der Elektrizitätstransport mittels Kabeln wäre dann zu teuer oder – z.B. im Falle, wenn größere Entfernungen über das Meer überbrückt werden müssen – ganz unmöglich. Als potentielle futuristische Möglichkeiten seien folgende Beispiele genannt:

- die sogenannten Off-Shore-Power-Systems: das sind auf einem riesigen Floß schwimmende große Kernkraftwerke mit mehreren tausend Megawatt elektrischer Leistung, die man aus Umweltsünden vom bewohnten Lande ins Meer verbannt hat, wo hinreichend Kühlwasser zur Abfuhr der Abwärme vorhanden ist.
- die sogenannten «Ocean-Thermal-Gradient (OTG)» – oder «Delta-T»-Kraftwerke. Dies ist ein neu konzipierter, im Prinzip möglicher Kraftwerkstyp, der mit dem Temperaturunterschied des Meerwassers in tropischen Meeren arbeitet und letztlich die Sonnenenergie ausnützt, wobei eine große Meeresoberfläche als natürlicher Kollektor der einfallenden Sonnen-

energie anzusehen ist. So zeigt z.B. die Karibische See vor Florida an der Oberfläche eine Wassertemperatur von etwa 25°C , hingegen in mehreren hundert Metern Tiefe eine solche von nur etwa 6°C . Durch Heraufpumpen von kaltem Tiefseewasser kann der Kondensator einer Carnot-Maschine gekühlt werden, die mit einem niedrig siedenden Kohlenwasserstoff, z.B. Propan, als Arbeitsmedium arbeitet. Der effektive Wirkungsgrad einer solchen Anlage ist natürlich sehr niedrig und dürfte effektiv bei etwa 1 bis 3 % liegen. Hingegen stehen praktisch unbegrenzte und sich stets erneuernde Energiemengen sowie gleichzeitig eine ebenfalls unbegrenzte Wärmesenke zur Verfügung.

Solche Anlagen sollen auf einem Floß von 300 m Durchmesser und 1000 Meilen vor der Küste verankert werden. Die erzeugte Elektrizität würde in Elektrolysewasserstoff umgewandelt werden und per Schiffstransport an Land gebracht. Die spezifischen Installationskosten werden auf 200 $\$/\text{kW}_{\text{el}}$ inkl. Elektrolyseausrüstung, die Stromerzeugungskosten auf 4 mills/kWh und die Wasserstoffherstellungskosten auf 1.8 $\$/\text{MBTU}$ geschätzt und wären mit den heutigen Kosten für flüssiges Erdgas vergleichbar. Es ist jedoch klar, daß auf diesem Gebiete aber wegen der noch ungelösten Probleme viel Entwicklungsarbeit geleistet werden muß. In den USA wird aber schon mit kleinen Pilotanlagen dieser Art experimentiert.

- Andere futuristische Möglichkeiten wären die direkte Nutzung der Sonnenenergie in Wüstengegenden, wo keine Abnehmer sind, die direkte Ausnutzung der kinetischen Energie durch Meeresströmungen, die Ausnutzung geothermischer Wärme in abgelegenen Gebieten sowie vielleicht das Konzept des Zürcher Hydrologen Stauber. Letzterer propagiert die Ausnutzung der immensen Wasserkräfte im Süden Grönlands durch sogenannte «Gletscherkraftwerke». Nach seinen Schätzungen könnten in der Fjordlandschaft Grönlands durch Aufstauen von Schmelzwasser leicht 200 GW_{el} – das wäre die 3- bis 4fache Menge des gesamtschweizerischen Primärenergieverbrauches im Jahre 2000 – gewonnen werden. Da dort keine Abnehmer vorhanden sind, Alu-Werke nur bedingt anzusiedeln wären, der Elektrizitätstransport mittels Seekabel zur 2500 km entfernten englischen Küste aus Kostengründen praktisch unmöglich ist, käme nur Wasserstoff als Energieträger in Frage. Dieser könnte z.B. in verflüssigter Form mittels umgebauten Erdöltankern nach Mitteleuropa transportiert werden. Es sind auch Überlegungen im Gange, Wasserstoff in Form von Metallhydriden in Schiffen zu transportieren, da beim Schiffstransport – im Gegensatz zu Automobilen – das Gewicht keine so große Rolle spielt. Folgende Institutionen beschäftigen sich heute recht intensiv mit der Herstellung von Elektrolysewasserstoff:

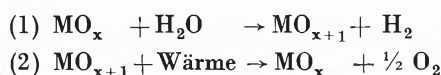
- General Electric Company, Lynn, Mass., USA
- The Flinders University of South Australia, Adelaide, Australia
- Teledyne Isotopes, Timonium, Maryland, USA
- Life Systems Inc., Cleveland, Ohio, USA
- University of Miami, Coral Gables, Florida, USA
- Firma Lonza, Basel, Schweiz

4.2 Der thermo-chemische Wasserstoff

Im Gegensatz zur Elektrolyse wird hier *direkt* die Wärme einer Energiequelle benutzt, um Wasser in seine beiden Gaskomponenten «aufzucracken» oder zu spalten. Die thermo-chemische Wasserstofferzeugung wird somit zu einer Aufgabe der Hochtemperaturchemie.

Es ist bekannt, daß durch reine Dampferhitzung Temperaturen von über 3000 °C nötig sind, um mit merklicher Ausbeute Wassermoleküle zu spalten. Da diese Temperaturen für eine großtechnische Anlage viel zu hoch sind, muß man nach Prozessen Ausschau halten, die bei niederen Temperaturen ablaufen. Dies sind dann die sogenannten thermo-chemischen Zyklen.

Das einfachste Beispiel für einen solchen chemischen Kreisprozeß in zwei Stufen ist wie folgt:



Brutto-Reaktionen:



wobei M normalerweise ein metallisches Anion ist. Der ideale maximale Wirkungsgrad eines solchen Kreisprozesses ist gegeben durch

$$\eta_{tc} = \frac{\text{Entalpie des gewonnenen Wasserstoffs}}{\text{hineingesteckte thermische Energie}} = \frac{\Delta H}{q_{th}} = \frac{\Delta H}{\Delta G} \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1} \right),$$

wobei

ΔH = Enthalpiezuwachs, kcal/Mol

ΔG = $\Delta H - T\Delta S$ = Gibbsche freie Energie, kcal/Mol

ΔS = Entropieänderung, kcal/°K/Mol

T_1, T_2 = obere bzw. untere Prozeßtemperatur, °K

Bei einer Atmosphäre und Zimmertemperatur ist $\Delta H = 68,3$ kcal/Mol, $\Delta G = 56,6$ kcal/Mol und $\Delta S = 39$ cal/°K/Mol. Da der Klammerterm als der ideale Wirkungsgrad einer Carnot-Maschine, η_c , bekannt ist, gilt mit diesen Zahlen auch

$$\eta_{tc} = 1,2 \eta_c.$$

Diese Abweichung vom Wirkungsgrad einer Carnot-Maschine resultiert aus der Tatsache, daß in diesen chemischen Prozessen eine Entropieänderung mit der Wasserzersetzung verknüpft ist. Idealerweise muß der Prozeß so laufen, daß er bei der hohen Temperatur eine positive Entropieänderung (exotherm) und bei niedriger Temperatur eine negative Entropieänderung (endotherm) zeigt. Wäre $T_1 \gg T_2$ ($T_1 \gtrsim 4000^\circ\text{C}$, $T_2 \approx 25^\circ\text{C}$),

so errechnet sich im Grenzfall ein theoretisch maximaler thermischer Wirkungsgrad von 120 %. Dabei müßte aber wegen des 1. Hauptsatzes der Umwelt bei der niederen Temperatur eine Wärmemenge von 11,6 kcal/Mol entzogen werden.

Der um 20 % höhere Wirkungsgrad gegenüber einer Carnot-Maschine ist ein inhärenter Vorteil dieser chemischen Zyklen. Da trotz der prinzipiellen thermodynamischen Grenze des Wirkungsgrades die Carnot-Maschinenweltweite Anwendung zur Erzeugung von Elektrizität fanden, erhofft man sich in ähnlicher Weise einen Durchbruch der thermo-chemischen Zyklen zur Erzeugung von Wasserstoff.

Es ist klar, daß der effektive Wirkungsgrad, η_{eff} , in der Praxis kleiner ausfallen wird, da neben der Wasserzerersetzung die Umwelt verändert wird, d.h. es müssen Massenströme von Chemikalien umgewälzt werden. Der effektive Wirkungsgrad läßt sich berechnen, indem man die totale thermische Energiemenge q_{th} in der vorhergehenden Gleichung durch

$$q_{th} = \frac{W}{\zeta} + q$$

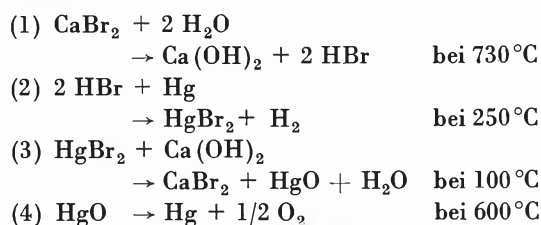
ersetzt, wobei neu definiert wird:

W = im Zyklus benötigte nutzbare (mechanische) Arbeit

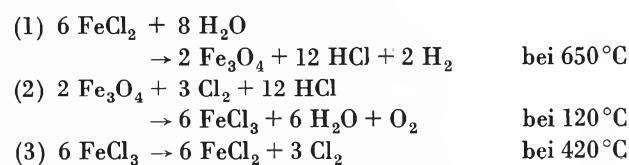
ζ = Wirkungsgrad, um Wärme in nutzbare Arbeit zu verwandeln

q = eigentliche thermische Wärme für den chemischen Prozeß

Leider gibt es keinen Zyklus, der in der geschilderten einfachen zweistufigen Form zu betreiben wäre. Die heute bekannten Kreisprozesse bestehen meist aus drei oder vier Stufen. Es sind heute bereits etwa 30 mehr oder weniger komplizierte Kreisprozesse im Prinzip bekannt, die nach der Zahl ihrer chemischen Reaktionsschritte katalogisiert werden. Der bekannteste Zyklus ist der sogenannte MARK-I-Zyklus von Euratom/Ispira, der in vier Schritten folgendermaßen abläuft:



Ein zweites Beispiel für einen Zyklus mit drei Schritten ist der Euratom-Zyklus MARK-9, der sogar 2 Mol Wasserstoff freisetzt und ebenfalls über wechselnde Valenzstufen eines Metalls abläuft. Hier wird die Tatsache ausgenutzt, daß Eisen zu einer höheren Valenz neigt, wenn es Eisenoxid ist, und zu einer niedrigeren, wenn es als Chlorid vorliegt:



Auch hier lautet die Bilanzgleichung $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2$. Die effektive Energiebilanz für den MARK-9-Eisenchlorid/Eisenoxid-Zyklus sieht folgendermaßen aus:

	Heutige Technologie	Zukünftige Technologie
Mechanische Arbeit für die Reaktionen 1 bis 3, $W = (21,03 + 2,29 + 1,77)$ [kcal]	= 25,09	25,09
Erforderliche Wärme, um diese Arbeit zu erzeugen, W/ζ [kcal]	= 75,27	55,19
Wirkungsgrad, ζ [%]	= 33,3	45,5
Benötigte thermische Energie für das Ablaufen des chemischen Zyklus, q [kcal]	246,9	246,9
Totale Wärme, $q_{\text{th}} = W/\zeta + q$ [kcal]	322,17	302,09
Effektiver Wirkungsgrad der Erzeugung von thermo-chemischem Wasserstoff		
$\eta_{\text{eff}} = 2 \times 68,3/q_{\text{th}}$, %	42,4	45,2

Zum Vergleich ergäbe ein entsprechender Vergleich zur Herstellung von Elektrolysewasserstoff:

	Heutige Technologie	Zukünftige Technologie
Effektiver Wirkungsgrad zur Erzeugung von Elektrizität aus Wärme (He-gekühlter Hochtemperaturreaktor mit Dampfturbine im Sekundärkreislauf, Flußwasserkühlung), η [%]	40	45–49 *
Effektiver Wirkungsgrad der Elektrolyse, η_{el} [%]	65	75–82
Totaler Wirkungsgrad zur Erzeugung von Elektrolysewasserstoff, $\eta_{\text{tot}} = \eta \cdot \eta_{\text{el}}$ [%]	26	34–40

* Mit He-Turbine im Direktkreislauf und sekundärem Dampf- oder Kohlenwasserstoff- (z.B. Propan) Kreislauf (Bottom-Cycle).

Man sieht, daß die direkte Ausnutzung von Wärme im Falle des MARK-9-Zyklus vom energetischen Standpunkt gesehen beträchtlich besser als der Umweg über die Elektrolyse ist.

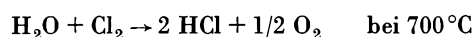
Aufgrund des heutigen Standes kann man für die thermo-chemischen Zyklen folgende effektiven Wirkungsgrade erwarten:

Obere Prozeßtemperatur	$(\eta_{\text{eff}})_{\text{max}}$
925 °C	$\lesssim 61\%$
700 °C	$\lesssim 45\%$

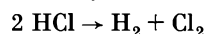
Damit wären sie in der überwiegenden Zahl der Fälle dem Elektrolyseverfahren überlegen.

Neben den reinen Elektrolyseverfahren und der thermo-chemischen Herstellung werden auch Hybridverfahren diskutiert, wie z.B.

(1) *Thermo-chemisch:*



(2) *Elektrolyse:*



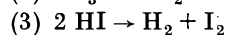
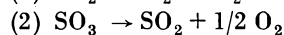
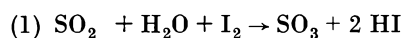
wiederum mit der Bilanz $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2$.

Die thermo-chemischen Verfahren werden zur Zeit vor allem in folgenden Institutionen studiert:

- Gemeinsames Forschungszentrum Euratom-Ispira, Italien
- Kernforschungsanlage Jülich in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Aachen, BRD
- Lawrence Livermore Laboratory and University of California, USA
- Institute of Gas Technology (IIT Center), Chicago, Illinois, USA
- General Atomic, San Diego, California, USA
- University of Kentucky, Lexington, Kentucky, USA
- Kernforschungszentrum Karlsruhe, BRD
- Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico, USA

Während das Elektrolyseverfahren heute schon als Standardverfahren anzusehen ist, an dem zukünftig nur noch gewisse Wirkungsgradverbesserungen vorzunehmen sein dürften, steht das thermo-chemische Verfahren am Anfang seiner Entwicklung. Es sind folgende technischen Probleme, die zunächst noch gelöst werden müssen, bevor man an einen Bau einer größeren Pilotanlage gehen kann:

- Das Korrosionsproblem, d.h. es müssen vor allem Wärmeaustauscher für Hochtemperaturreaktoren gebaut werden können, die die Wärme des heißen Heliumgases von 900 bis 1000 °C an den bei der hohen Temperatur ablaufenden Teil des thermo-chemischen Zyklus abgeben. Gegenwärtige Materialien, wie z.B. Cr–Ni-Legierungen, begrenzen die Temperaturen bis etwa 700 °C. Sogenannte Superlegierungen wie Udiment 700, Rene 41 und TD-Nickel könnten Temperaturen bis $\sim 1120^\circ\text{C}$ erlauben. Bei noch höheren Temperaturen stehen nur noch Molybdän-(TZM)- oder Nickel–Wolfram-Legierungen zur Diskussion. Das Hauptproblem wird hier die Handhabung (Formen, Schweißen usw.) sein. Da oft aggressive Medien im Prozeß auftreten, muß auch den Materialproblemen im gesamten Kreislauf Aufmerksamkeit geschenkt werden. Daher interessiert man sich mehr und mehr für organische Zyklen (z.B. Methan–Methanol) und Zyklen, die nur gasförmige Reaktanden enthalten, z.B.



von dem man aber die chemo-physikalischen Daten bei der Verwendung geeigneter Katalysatoren noch nicht kennt.

- Ein weiteres Problem ist die langsame Reaktionskinetik in manchen Zyklen, d.h. die zu langsame Erzeugung der gewünschten Reaktionsprodukte. Die niedrige Prozeßtemperatur muß daher bei Werten von 100 bis 300 °C liegen. Ein Trockenkühlturm kann daher leicht zur Abfuhr der Restwärme eingesetzt werden, oder es kann ein Fernheizwerk angekoppelt werden. Neuartige Katalysatoren als Reaktionsbeschleuniger sowie die Verfahrenstechnik derselben müssen noch studiert werden.
- Da eine große Menge teurer Chemikalien (z.B. Hg, Ag, Cs, V, Br) benötigt wird, muß von der Kostenseite her gesehen noch der optimale Zyklus gefunden werden. Auch die Umweltbeeinflussung, die sich z.B. im Falle eines Umgangs mit großen Quecksilbermengen (MARK-I-Prozeß) bei Leakagen einstellen können, müssen noch genauer untersucht werden.

4.2.1 Primäre Energiequellen für die Herstellung von thermo-chemischem Wasserstoff

Da der Zeitpunkt für eine Markteinführung des Energieträgers Wasserstoff entscheidend von seinen Herstellungskosten abhängt, kommt es vor allem darauf an, billige primäre Energiequellen zu seiner Herstellung ausfindig zu machen und zur Verfügung zu stellen. Neben mehr zukünftigen potentiellen Energiequellen wie Sonnenenergie, Fusionsreaktoren, geothermische Energie, ist heute der Helium-gekühlte Hochtemperaturreaktor das technisch reifste Konzept und daher die am meisten diskutierten Wärmequelle zur thermo-chemischen Wasserstoffherstellung.

Um sich ein Bild der Energiekosten zu machen, lohnt es sich, einen Blick auf die gegenwärtige Marktlage in Europa zu werfen. Als typisches Beispiel dazu sei der Primärenergemarkt der Bundesrepublik Deutschland ausgewählt, wo sich folgende Kostenanalyse ergibt:

	Energiepreis: \$/MBTU
Naturgas	0.8*
Flüssiges Erdgas	1.5 bis 2
Schweröl (frei Industrie)	1
Braunkohle	0.6
Steinkohle (Grubenpreis Ende 1973)	1.4**
(geschätzter Preis 1980)	1.8

* Dieser Preis zeigt steigende Tendenz. Es wird angenommen, daß z.B. das Erdgas aus Holland wegen seiner Erschöpfung sich zum Preis von flüssigem Erdgas hin entwickeln wird.

** Reicht im Prinzip für etwa zweihundert Jahre; der Preis ist um den Faktor 4 bis 5 höher als für US-Kohle (30 ¢/MBTU; 60 % des Preises sind Lohnkosten).

Die gegenwärtig einzig billige Energiequelle ist die nukleare Spaltenergie mit Brennstoffzykluskosten von 20 ¢/MBTU, wovon ungefähr 25 % dieser Kosten auf das Urankonzentrat fallen, wenn man dem gegenwärtigen Preis von ≈ 8 \$/lb U_3O_8 zugrunde legt. Um jedoch

einen sinnvollen Vergleich mit den fossilen Brennstoffen anzustellen, muß der Preis der nuklearen Wärme betrachtet werden, die im Helium-Kühlgas eines Hochtemperaturreaktors (HTR) zur Verfügung steht. Er betrug 1973 ≈ 60 ¢/MBTU und wird für 1980 auf ≈ 80 ¢/MBTU geschätzt, wenn die Wärme von einem 3000-MW-Prozeßwärme-HTR geliefert wird.

Mit folgenden Daten läßt sich nun die Wirtschaftlichkeit einer zukünftigen Wasserstoffherzeugung mittels eines thermo-chemischen Zyklus, der an einen Kugelhaufen-HTR gekoppelt ist, untersuchen (Geldwert 1973):

Thermo-chemischer Wirkungsgrad des HTR zur Wasserstoffherstellung (Nukleare Wärme $\rightarrow H_2$)	(50-55)%
Spezifische Investitionskosten eines HTR mit thermo-chemischem Wasserstoffzyklus (3000 MW _{th} 965 °C Gasaustrittstemperatur)	70-150 \$/kW (H_2)
Nukleare Wärmekosten	60 ¢/MBTU
Abschreibung der Kapitalkosten	15 %/Jahr
Lastfaktor der Anlage	80 %
Wasserstoffherzeugungspreis (H_2 -Gas)	1.6-2.2 \$/MBTU

Daraus ersieht man, daß es nicht unvernünftig ist, mit einem Wasserstoffpreis um 2 \$/MBTU zu spekulieren, der sehr gut mit dem zukünftigen Gasmarkt konkurrieren kann. Insbesondere in Ländern mit gut ausgebauten Gasnetzen ist daher auch Wasserstoff für industrielle und private Heizzwecke interessant, und das in vielen Fällen vorhandene und unterirdisch verlegte Gasnetz könnte stärker ausgelastet werden. Die Privathaushalte mit ihrem hohen Wärmeanteil am nationalen Energieverbrauch (≈ 50 % des Energieverbrauches fallen auf private Raumheizung und Warmwasseraufbereitung) könnten so, auf eine H_2 -Versorgung umgestellt, enorme Heizölmengen einsparen, und die Auslandsabhängigkeit auf dem Ölmarkt bei Einbeziehung der industriellen Prozeßwärme könnte um etwa 70 % reduziert werden. Gleichzeitig würde dabei die größte Quelle der Luftverschmutzung – nämlich die Privathaushalte mit den meist nicht richtig einjustierten Ölbrennern – eliminiert.

Allerdings scheint die Schweiz nicht besonders für diese Art von H_2 -Gaswirtschaft geeignet, da sie kein gut ausgebautes Gasnetz aufweist. Obwohl der Prozentsatz im Wachsen begriffen ist, beträgt der heutige Anteil von Gas am Energieverbrauch nur wenige Prozente.

Es ist hier außerordentlich interessant, hinzuzufügen, wie sich in einer thermo-chemischen HTR-Anlage das Endprodukt Wasserstoff im Preise erhöht, wenn z.B. die Primärenergie, in unserem Falle der Uranpreis, steigen sollte. Setzt man eine Uranpreiserhöhung um den unrealistisch hohen Faktor 5 an, d.h. einen Preis von 40 \$/lb U_3O_8 , so erhöht sich die nukleare He-Wärme in einem HTR von 60 auf ≈ 75 ¢/MBTU, also um zunächst 25 % im Brennstoffzyklus.

Veranschlagt man den Verkaufspreis von Wasserstoff an Privathaushalte mit 6 \$/MBTU (entspricht etwa dem heutigen Gaspreis für Privatkunden), so schlägt eine

fünffache Uranpreiserhöhung nur um etwa 3 % beim Endkunden durch. Dies ist die allgemein bekannte Tatsache, daß bei Kernreaktoren die Kosten des Endproduktes (in diesem Falle H_2 , gilt aber in gleicher Weise für die Stromerzeugungskosten) wegen des niedrigen Anteils ihrer Brennstoffzykluskosten nur schwach vom Uranpreis abhängen.

5. Der Einsatz von Wasserstoff im Transportsektor

Neben der Substitution des Flugpetrols und des Heizöls für die Raumheizung wäre der nächste wichtigste Schritt, die flüssigen Treibstoffe auf dem Transportsektor durch H_2 zu ersetzen. Da es sich hierbei um einen nichtstationären Einsatz handelt, ist momentan die Einführung von Wasserstoff z.B. für den Automobilantrieb noch recht problematisch.

Die Kriterien für den Treibstoff und seinen Behälter in einem Automobil sind bekanntlich:

- Vernünftiges Gewicht und Volumen im Verhältnis zu den Automobildimensionen
- Zeit zum Tanken nicht mehr als 10 Minuten
- Hinreichende Sicherheit auch bei Unfällen

Es wurden folgende Speichermöglichkeiten des Wasserstoffs genauer untersucht, die seine Verwendung als Automobiltreibstoff möglich machen sollten:

- Hochdruckgas in einem Druckbehälter
- Als kryogenische Flüssigkeit
- Synthetisierung von chemischen Treibstoffen mittels H_2 (z.B. Methanol, Ammoniak usw.)
- Speicherung in Metallhydriden

Um einen Eindruck der Verhältnisse an einem praktischen Beispiel zu gewinnen, sollen folgende Grundannahmen gemacht werden: Tankfüllung eines größeren PKW 80 l (55,3 kg) Benzin, ausreichend für 500 km Reichweite (16 l/100 km). Diese Treibstoffkapazität entspricht einem Energieinhalt von 607,2 Mcal oder umgerechnet 21 kg Wasserstoff (Verbrennungswärme H_2 : 28,9 kcal/g). Wollte man diese 21 kg H_2 in gasförmiger Form speichern, so ist ein Volumen von 320 l bei einem Druck von 800 atm (!) nötig. Um diesen Druck in einem Stahlgefäß zu halten ($\sigma = 10^8$ kg/m²), wäre eine Wandstärke von 7 cm nötig, und es würde 1,55 t wiegen. Bessere Materialien, insbesondere neuartige Faserstoffe mit Bor- und Kohlenstoff-Filamenten, würden eine Gewichtsreduktion um den Faktor 5 bringen. Trotzdem wäre der hohe Druck ein enormes Sicherheitsrisiko bei einem Unfall; darum scheidet diese Speichermöglichkeit in einem Automobil von vornherein aus.

Die Speicherung von verflüssigtem Wasserstoff erfordert ein Dewar-Gefäß mit einem Entlüftungssystem, während synthetische Brennstoffe (z.B. Methanol) wegen des höheren Siedepunktes dieses nicht benötigen. Folgende Zusammenstellung von L.O. Williams zeigt die Gewichts- und Volumenverhältnisse für potentielle

	Erforderliches Gewicht Volumen (kg) (l)		Bemerkung
Benzin (Iso-Oktan)	55,3	80	Referenzwert, druckloser Tank, kaum giftig 500 ppm
H_2 , flüssig	21	300	– 252°C, sehr kleines Treibstoffgewicht, wenig NO_x
<i>Aus H_2 synthetisierte Treibstoffe</i>			
Methanol	124,9	158	flüssig, Tank drucklos, wenig NO_x
Ammoniak	136,7	167	– 30°C, giftig 100 ppm, NO_x -Bildung
Hydrazin	152,5	151	giftig, 10 ppm
Methan, flüssig	50,7	122	– 175°C, ungiftig
<i>Hydridspeicherung von H_2</i>			
Pd_2H	≈ 4458	$\approx 413^*$	zu teuer und zu schwer teuer, arbeitet bei Zimmertemperatur mit 1 bis 10 atm Druck billig, höherer Druck 2 bis 20 atm bei Zimmer- temperatur
Lanthan–Nickel			
$LaNi_5H_6$	≈ 1522	$\approx 201^*$	
Eisen-Titan	≈ 1110	$\approx 190^*$	> hohe Drücke 5 bis 50 atm > leicht, arbeitet bei höheren Temperaturen 200 bis 400°C und Drück- ken von 0,1 bis 10 atm
$FeTiH_2$			
Vanadium, VH_2	≈ 556	$\approx 100^*$	
Magnesium, MgH_2	≈ 275	$\approx 190^*$	

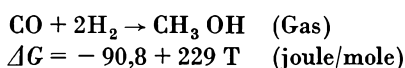
* Die Volumina dürften noch 30 bis 50 % höher liegen, da das Hydridbett zur Aufnahme des Wasserstoffs von Kanälen durchzogen sein muß. Void-Anteil demnach ≈ 30 bis 50 %.

Brennstoffe in einem Automobil mit einer Speicherkapazität äquivalent zu 21 kg H_2 .

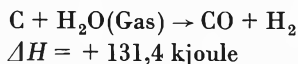
Man erkennt aus diesem Vergleich, daß unser Benzin geradezu ein idealer Treibstoff für Automobile ist, und es dürfte nicht leicht sein, ihn zu verdrängen. Obwohl man heute auf die Hydridspeicherung große Hoffnungen setzt, dürfte in einer Zwischenphase mit großer Wahrscheinlichkeit synthetisches Methanol oder synthetisches Benzin, gewonnen durch Kohleverflüssigung, eine Rolle spielen. Insbesondere Methanol ist interessant, da es relativ sauber verbrennt, wie folgende Zusammenstellung von T.B. Reed zeigt:

	Emissionen (g/Meile)		
	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe	CO	NO_x
Benzin	2,2	32,5	3,2
Methanol	0,32	3,9	0,35
Richtwerts-Standard in den USA (1975–1976)	0,41	3,4	0,4

Methanol wird bekanntlich aus Synthesegas gemäß



synthetisiert, wobei das Synthesegas durch Reaktion von Kohle und Wasserdampf erhalten wird:



In England ist der Vorschlag gemacht worden, CO_2 aus der Luft oder dem Kalkstein zu gewinnen, sofern ein Land keine Kohlereserven besitzt.

Die Reaktion verläuft wie folgt

- (1) $\text{Ca CO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ($-42,7 \text{ kcal}$, Kalkbrennen)
- (2) $3 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{ H}_2 + 3/2 \text{ O}_2$ (Wasserstoffherzeugung)
- (3) $\text{CO}_2 + 3 \text{ H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ (Methanolsynthese)

Ein Hochtemperaturreaktor könnte auch hier als Wärmequelle zum Kalkbrennen benutzt werden. Jedoch sind die Herstellungskosten von Methanol durch diese Methode noch zu hoch, da kein freier Kohlenstoff im Prozeß zur Verfügung steht. G.V.Day, Didcot, Berkshire, gibt einen Preis für eine 6000-t/Jahr-(125-barrels/Tag)-Methanol-Anlage auf CaCO_3 -Basis mit 18 bis 22 pence/imperial gallon an. Dieser Preis ist etwa viermal höher als für Methanol aus billiger US-Kohle.

Im Dezemberheft 1973 von *Science* werden Produktionskosten für Methanol aus Kohle genannt. Für eine große Anlage liegt bei einem Kohlepreis 7 \$/Tonne (oder 25 ¢/G joule) der Methanolpreis bei 1.4 \$/G joule (10.3 ¢/Gallone). Im Vergleich dazu betragen die Benzinherstellungskosten aus Erdöl 1 \$/G joule (bei 11.8 ¢/Gallone). Man rechnet damit, daß dieser 40prozentige Preisunterschied bald durch die Preiserhöhungen beim Rohöl ausgeglichen wird.

Weiterhin ist die Brennstoffzellentechnologie auf der Basis Methanol-Luft recht fortgeschritten. Der Wirkungsgrad bei einem Antrieb: Methanol-Brennstoffzelle-Elektromotor-Radantrieb könnte bei 50 % im Gegen-

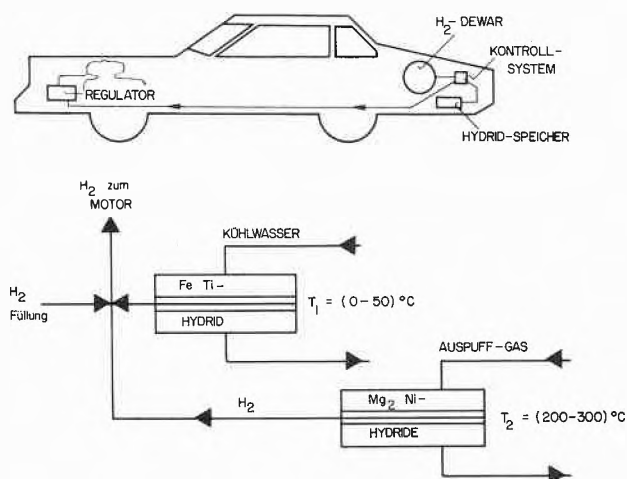


Abb.7. Oben: Für Wasserstoff-Treibstoff umgebauter PKW mit Otto-Motor. Ein Dewar-Gefäß enthält Flüssigwasserstoff; der verdampfende und nicht benötigte Wasserstoff wird bei Nichtbenutzung in einem Hydridspeicher aufgefangen. Lediglich der Vergaser wurde durch ein einfaches H_2 /Luft-Mischventil ersetzt. – Unten: Fortgeschrittenes Hydridspeichersystem für einen PKW. Die «Abwärme» des Wagens wird zur Freisetzung des Wasserstoffs in den Metallhydriden verwendet

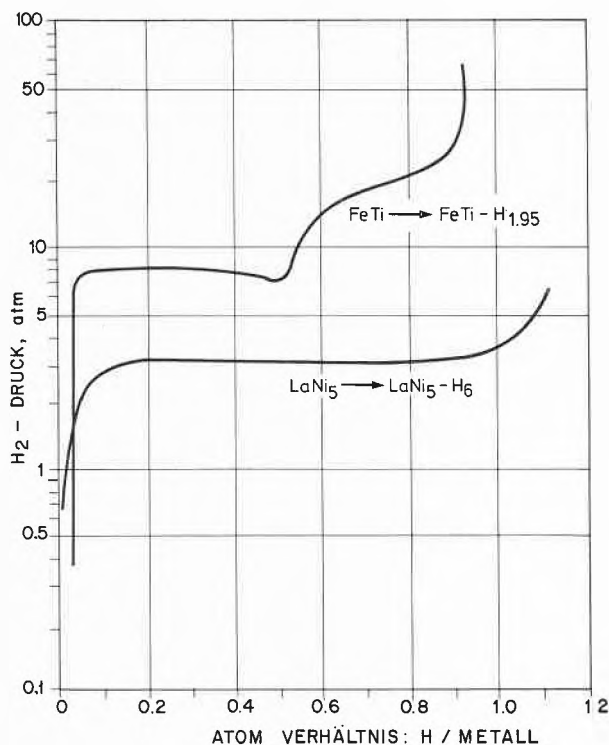


Abb.8. Kennlinie zweier potentieller Hydride für eine Wasserstoffspeicherung bei nichtstationärer Anwendung (Automobile)

satz zum Otto-Motor liegen, wo nur 10 bis 20 % des Brennstoffes effektiv ausgenutzt werden. Schon 1972 wurde auf der 7th Inter-Society Energy Conference über eine Brennstoffzelle berichtet, die 30000 h kontinuierlich mit Methanol und Luft arbeitete.

Abb.7 zeigt einen auf Wasserstoffantrieb umgebauten Monte-Carlo-PKW. Ein Dewar nimmt den Flüssigwasserstoff auf. Der verdampfende Wasserstoff wird in einem Hydridspeicher aufgefangen, so daß er nicht verlorengeht. Der Vergaser am Motor ist durch ein einfaches Luft/ H_2 -Mischventil ersetzt. Das Auto fährt angeblich problemlos.

In der unteren Abbildung ist das Schema eines fortgeschrittenen Speichersystems gezeigt. Mit Hilfe der heißen Abgase wird ein Mg-Ni-Hydridspeicher entladen, und mit nur mäßig warmem Motorkühlwasser wird ein FeTi-Speicher auf niedrigerem Temperaturniveau entladen. Dies erlaubt eine optimale Anpassung der Abwärmequellen an die Kennlinien der Hydridspeicher und erlaubt die Verwendung des gewichtsspezifisch interessanten Mg-Hydridspeichers. Das H_2 -Speichervermögen als Funktion des Druckes ist für zwei Hydride in Abb.8 gezeigt. Wie man sieht, kann man maximal 1 Atom Wasserstoff pro Metallatom speichern.

Die Schweiz wird im Jahre 2000 etwa 80000 GWh_{th} an flüssigen Treibstoffen pro Jahr benötigen. Dies entspricht etwa 2,38 Millionen t H_2 /Jahr. Würde eine vollständige Umstellung auf H_2 -Antrieb im Transportsektor durchgeführt, so wären zwischen 7 und 8 Hochtempera-

turreaktoren von $3000 \text{ MW}_{\text{th}}$ nötig (thermo-chemischer Wirkungsgrad 50%, Lastfaktor 0,8), um diesen Wasserstoff zu produzieren. Es sollte jedoch beachtet werden, daß ein einzelnes Land keinen Alleingang machen kann; hier wird es vor allem auf die Strategien der großen Automobilhersteller ankommen, welche Brennstofflinie beschritten wird.

6. Transport von Wasserstoff

Wasserstoff kann als Gas in Pipelines transportiert werden. Abb.9 zeigt einen Transportkostenvergleich mit anderen Energieträgern, insbesondere mit Erdgas.

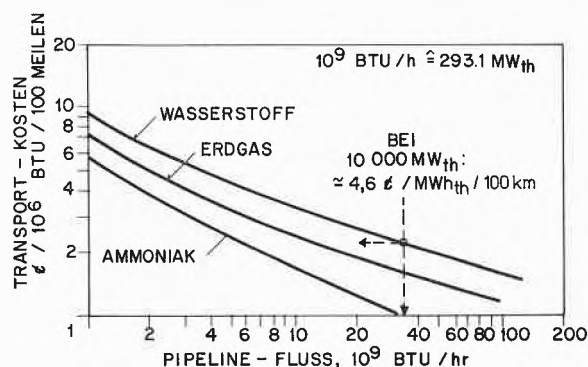


Abb.9. Transportkostenvergleich von Wasserstoff und Erdgas bei Pipelines. Die spezifischen Transportkosten nehmen mit zunehmender Transportleistung (größerer Pipelinedurchmesser) stark ab

Die spezifischen Transportkosten liegen aufgrund der verschiedenen thermodynamischen Daten für H_2 etwas höher als für Erdgas. Ein charakteristisches Beispiel für einen großen Abnehmer ist numerisch in derselben Abbildung angegeben. Die Wasserproduktion durch H_2/O_2 -Verbrennung ist mäßig und beträgt nur rund $74,4 \text{ l H}_2\text{O/sec}$ pro 1000 MW produzierter thermischer Leistung.

Die Verflüssigung von H_2 erfordert wegen des niedrigen Siedepunktes von flüssigem H_2 einen Energieaufwand von $\approx 28\%$ des Energieinhalts von H_2 . Der Umgang und der Transport in großen Dewars ist dank der umfangreichen Erfahrung, die auf dem Raketensektor gewonnen wurde, heute kein Problem mehr (Abb.10). Der Eisenbahntransport von flüssigem H_2 wird in den USA routinemäßig durchgeführt.

Es ist auch der interessante Vorschlag gemacht worden, in einem Spezialkabel flüssigen Wasserstoff zusammen mit Elektrizität zu transportieren. Als supraleitendes und von flüssigem Wasserstoff umspültes Kabelmaterial käme die Niob-Zinn-Legierung $\text{Nb}_{0,8}\text{Sn}_{0,2}$ in Frage, die bei $18,5^\circ\text{K}$ (Siedepunkt H_2 : $20,3^\circ\text{K}$) schon einen spezifischen Widerstand von $< 10^{-12} \Omega/\text{cm}$ besitzt.

Auch die stationäre Lagerung von kryogenischem Wasserstoff ist kein Problem; der unterirdischen Speicherung unter Druck in Kavernen wird jetzt ebenfalls Beachtung geschenkt, da man hierbei die Verflüssigungskosten



Abb.10. Speicherung von Flüssigwasserstoff in großen stationären Dewar-Behältern

sparen könnte. Für die Spitzenlastdeckung der Elektrizität mittels offener H_2 -Gasturbinen wäre dies besonders interessant.

In manchen Fällen lohnt es sich auch, das bei der H_2 -Herstellung anfallende Beiprodukt Sauerstoff in Pipelines zum Verwendungsort zu transportieren. Neben industrieller Anwendung ist hier besonders darauf hinzuweisen, daß man diesen Sauerstoff systematisch zur Umweltverbesserung (Belüftung von Seen, Flüssen und Kläranlagen) verwenden könnte. Eine solche Extra-Sauerstoffzugabe hat dabei eine erfreuliche Beschleunigung von biologischen Abbauprozessen zur Folge.

7. Sicherheitsaspekte beim Umgang mit Wasserstoff

Es wird immer wieder behauptet, der Umgang mit Wasserstoff sei sehr viel gefährlicher als z.B. jener mit Erdgas. Folgender Vergleich der pyrotechnischen Daten veranschaulicht diese Situation:

	Wasserstoff H_2	Erdgas CH_4
Siedepunkt, $^\circ\text{K}$	20,3	112
Verdampfungswärme, MJ/kg	0,45	0,51
Sättigungsdampfdichte beim Siedepunkt relativ zur Luftdichte	1,05	1,38
Gasdichte relativ zur Luft (Normalbedingungen)	0,07	0,55
Diffusionskoeffizient, cm^2/sec	0,63	0,2
Entflammargrenze in Luft (Vol.-%)	4,1 bis 75	5,3 bis 15
Detonationsgrenze in Luft (Vol.-%)	18 bis 59	6,3 bis 14
Zündtemperatur, $^\circ\text{K}$	850	807
Zündenergie, μJ	20	300
Flammentemperatur, $^\circ\text{K}$	2400	2190
Flammgeschwindigkeit, m/sec	2,75	0,37
Flammenemissionsgrad	0,1	1,0

Wie man sieht, gibt es Argumente, die sehr wohl dafür sprechen, daß H_2 gefährlicher ist als Erdgas, z.B. der größere Entflammareibereich, der höhere obere Grenzwert der Detonationsgrenze, die niedrigere Zünd-

energie und die höhere Flammgeschwindigkeit. Dem entgegen steht aber eine niedrigere Gasdichte und ein sehr viel höherer Diffusionskoeffizient von H_2 , was bei Gasansammlungen bewirkt, daß sich das H_2 sehr schnell verflüchtigt. Hinzu kommt der niedere volumenspezifische Energieinhalt und die höhere untere Detonationsgrenze des H_2 , seine höhere Zündtemperatur und die Möglichkeit des katalytischen Verbrennens von H_2 . Man kann also nicht *a priori* und generell sagen, Wasserstoff sei gefährlicher als Erdgas. Jeder Anwendungsfall bedarf einer speziellen Betrachtung. Es steht jedoch außer Zweifel, daß bei einem weitverbreiteten Umgang mit H_2 eine ausgeklügelte Sicherheitsphilosophie geschaffen werden muß. Experten sind deshalb der Ansicht, daß der Durchbruch des Wasserstoffs zunächst auf jenen Gebieten erfolgt, wo schon ein Sicherheitssystem auf hohem technischem Niveau existiert. Hier ist wiederum in erster Linie das Flugtransportwesen zu nennen.

8. Der CO_2 -Metabolismus

Setzen wir uns einmal über alle Wirtschaftlichkeitsfragen hinweg und stellen uns die Frage, wie die Atmosphäre unserer Erde belastet wird, wenn man sämtliche fossilen Energievorräte verbrennen würde.

Als Beispiel sei das Kohlendioxid herausgegriffen. Es ist bekannt, daß seit 1850 der CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre ständig gewachsen ist. Durch genaues Verfolgen der Meßdaten hat man herausgefunden, daß etwa 50% des durch Verbrennungsprozesse in die Luft emittierte CO_2 dort verbleibt und der Rest hauptsächlich durch Regen aus der Atmosphäre in die Ozeane als Kohlensäure ausgewaschen wird.

Nun gibt es sich widersprechende Theorien im Hinblick auf den Langzeiteffekt dieser CO_2 -Anreicherung:

Die Vertreter der einen Seite verweisen auf den bekannten Treibhauseffekt, so daß langfristig gesehen mit einem unangenehmen Temperaturanstieg auf der Erde zu rechnen wäre. Die Vertreter der anderen Seite meinen, daß man neben dem CO_2 auch andere künstlichen atmosphärischen Verunreinigungen, z. B. Staubpartikel, aber hauptsächlich Wasserdampf, mit in die Rechnung einbeziehen muß, und kommen zu dem Schluß, daß sich als integraler Effekt im Gegenteil die Erde längerfristig abkühlen müßte.

Es ist nun so, daß nach der *Encyclopaedia Britannica* (1972) die abbauwürdigen weltweiten Vorräte aller Arten von Kohle (Stein- und Braunkohle) etwa 4×10^{12} metrische Tonnen betragen. Würde alle diese Kohle verbrannt werden, so würden stöchiometrisch rund $14,7 \times 10^{12}$ t CO_2 bei einem Sauerstoffverbrauch von $10,7 \times 10^{12}$ t produziert. Man schätzt, daß diese Kohlereserven noch 100 bis 200 Jahre (nach der Meadows-Studie sogar nur 111 Jahre) ausreichen werden. Nimmt man weiterhin einen 50prozentigen Verbleib des CO_2 in der Luft an, so ergäbe sich eine CO_2 -Anreicherung der

Atmosphäre auf 1 m² Erdoberfläche ($= 5,1 \times 10^{14}$ m²) bezogen von 14,4 kg/m². Die Erdatmosphäre enthält heute $\approx 0,04$ Gewichtsprozent CO_2 oder 4,1 kg CO_2 /m². Mit anderen Worten, der CO_2 -Gehalt der Luft würde auf rund das *Dreieinhalbfache** ansteigen, ohne daß dabei die CO_2 -Produktion durch Verbrennen von Erdölprodukten berücksichtigt worden wäre. An ein merkliches Auffangen dieser massiven CO_2 -Konzentrationserhöhung, etwa durch vermehrte Photosyntheseprozesse (erhöhtes Pflanzenwachstum), ist nicht zu denken.

Niemand kann heute präzise sagen, auf welche Temperaturverhältnisse sich die Erdoberfläche bei dieser hohen CO_2 -Konzentration einstellen wird. Es ist aber mit großer Wahrscheinlichkeit doch anzunehmen, daß der Treibhauseffekt eine nicht zu unterschätzende Rolle spielen wird. Daher kann man nur ein großes «Vorsicht» aussprechen, wenn manchmal von Energieexperten beruhigend auf die großen Kohlevorräte verwiesen wird. Da mit der CO_2 -Emission wegen der sehr starken Verdünnung mit der Luft eine enorme Entropieproduktion verbunden ist, wäre es wohl ein hoffnungsloses Unterfangen, wollte man das CO_2 im großen Stil später wieder einmal aus der Atmosphäre herausholen. Es würde mit großer Wahrscheinlichkeit ein nie wieder gutzumachender Schaden und eine Situation entstehen, die ernsthaft die weitere Existenz von Leben auf der Erde in Frage stellen könnte.

In welchem Maße ein Industrieland CO_2 produziert bzw. atmosphärischer Sauerstoff verbraucht, zeigt die Sauerstoffbilanz der Schweiz. Nach Th. Keller ergibt sich für das Jahr 1969 folgendes Bild:

	O_2 -Produktion Millionen t/Jahr		O_2 -Verbrauch Millionen t/Jahr
Wälder	2,5	Menschen	1,5
Ackerland	0,9	Tiere	4,0
Grünland	6,1	Verbrennung von fossilen Brennstoffen	39,0
	9,5		44,5

Das Defizit beträgt demnach 35 Millionen t oder 0,85 kg/m². Bei rund 2300 kg atmosphärischem Sauerstoff/m² verbraucht die Schweiz jährlich knapp 0,4‰ des über ihr vorhandenen Sauerstoffs. Andererseits entspricht diesem Verbrauch eine jährliche CO_2 -Produktion von rund 1,2 kg CO_2 /m². Da die Atmosphäre – wie bereits erwähnt – 4,1 kg CO_2 /m² enthält, würde in rund dreieinhalb Jahren die Schweiz den CO_2 -Gehalt über ihrem Landesgebiet verdoppeln und in 35 Jahren verzehnfachen (!), gäbe es keine Großwetterlage, d. h. würde nicht durch Winde das CO_2 über die ganze Atmosphäre verteilt.

* Es gibt Schätzungen, die eine 6fache CO_2 -Konzentrationserhöhung in Betracht ziehen.

Aufgrund solcher globalen Betrachtungen zwingt sich mithin eine gemischte Wasserstoff-Elektrizitätswirtschaft als idealer, aber auch als zwingender Ausweg noch vor dem materiellen Ende der fossilen Ära auf. Ihre Primärenergieversorgung kann für absehbare Zeit nur die Kernenergie (zunächst Kernspaltenergie durch eine geeignete Brüterstrategie und vielleicht im nächsten Jahrhundert Fusionsenergie und eventuell Sonnenenergie) sein. Welcher Art diese Brüterstrategie sein sollte, um optimal die Uran- und Thoriumvorräte ausnutzen zu können, ist Inhalt des nächsten Kapitels.

9. Eine symbiotische Brüterstrategie als optimale Primärenergiequelle in einer gemischten zukünftigen Wasserstoff- und Elektrizitätswirtschaft

Wir haben in den letzten Kapiteln gesehen, daß in einer Wasserstoffwirtschaft der Wasserstoff nicht als neuartige *Energiequelle*, sondern lediglich als neuer und über die Biosphäre rezyklierbarer *Energieträger* der kalorischen Wärme fungiert. H_2 wird dabei voraussichtlich am effektivsten mit Hilfe von thermo-chemischen Wassersplittingsverfahren in Hochtemperaturreaktoren produziert werden. Da andererseits neben kalorischer Wärme auch in Zukunft die Elektrizität eine wesentliche Rolle spielen wird, ist es vielleicht zutreffender, nicht nur von einer reinen Wasserstoffwirtschaft, sondern von einer gemischten Wasserstoff-Elektrizitätswirtschaft als einer wünschbaren Zielvorstellung zu sprechen. Will man nicht in futuristische Zukunftsspekulationen verfallen, so kann nach heutiger Sachlage auf dem Energiemarkt nur die Kernspaltenergie ihre gemeinsame zukünftige Primärenergiequelle sein.

Es ist bekannt, daß Leichtwasserreaktoren (LWR) wie auch Hochtemperaturreaktoren (HTR) heutiger Bauart wegen ihrer niederen Konversionsrate die Uranreserven nur sehr schlecht ausnützen. Die Konversionsrate eines typischen Druckwasserreaktors liegt bei 0,58 und jene eines Hochtemperaturreaktors aus ökonomischen Gründen bei 0,66, wenn der $Th-^{233}U$ -Brennstoffzyklus Anwendung findet. Dies bedeutet, daß durch Neutroneneinfangprozesse im Brutmaterial dieser Reaktoren pro kg verbrauchtem Spaltmaterial nur 0,58 kg bzw. 0,66 kg an neuem spaltbarem Material entstehen. Es ist vorgesehen, das so erzeugte Spaltmaterial (Plutonium, im Falle der LWR und U-233 im Falle der HTR) in denselben Reaktoren wieder zu rezyklieren. Neuerdings scheint es, daß es u. U. ökonomischer ist, das konvertierte LWR-Plutonium in HTR überzuführen und dort zu verbrennen. Damit würden die HTR vorteilhafterweise zu einer Art «Allesfresser».

Auf der anderen Seite ist auch bekannt, daß schnelle Brutreaktoren (FBR) in der Lage sind, neben der Energieproduktion mehr spaltbares Material zu erzeugen, als sie verbrauchen. Damit ist prinzipiell die Möglichkeit einer 100prozentigen Uranausnützung gegeben. Analog zur Konversionsrate (CR) definiert man hier die

sogenannte Brutrate (BR), die angibt, wieviel man mehr Spaltmaterial in einem Brüter erbrütet, als verbraucht wird. Für fortgeschrittene natriumgekühlte Brutreaktoren (LMFBR) wird eine BR von 1,15 bis 1,35 je nach Art des Brennstoffs (Oxid- oder Carbidgeform) und für Helium-gekühlte Brüter (GBR, Oxidbrennstoff) eine BR von 1,3 bis 1,5 je nach Auslegung angegeben. Unter dem hier ebenfalls auftretenden Begriff der Verdopplungszeit versteht man in der einfachsten Form jene Zeit, die nötig ist, um den ursprünglichen Einsatz an Spaltmaterial in einem Brüter zu verdoppeln; bei GBR kann sie unter zehn Jahren liegen.

Neuerdings ist eine interessante Reaktorstrategie, nämlich eine Symbiose zwischen FBR und HTR, bekanntgeworden, die auf Fortescue/General Atomic zurückgeht. Der Grundgedanke dieser Philosophie ist, daß das in einer Anzahl FBR überschüssig erzeugte Spaltmaterial gerade zur Deckung des Spaltstoffdefizits in eine gewisse Anzahl HTR übergeführt werden soll, die sich wegen $CR < 1$ brennstoffmäßig nicht selbst erhalten können. Letztere werden wegen ihres hohen thermodynamischen Potentials in Zukunft hervorragende Bedeutung in der kerntechnischen Industrie erlangen. Die Konversionsrate der HTR läßt sich zudem unter Inkaufnahme einer relativ kleinen finanziellen Buße bis 0,8 oder gar 0,9 hochtreiben.

Die interessante Frage ist nun, in welchem Verhältnis (ausgedrückt in thermischer Leistung) FBR zu HTR installiert werden müssen, daß sich ein solcher symbiotischer Verbund selbst erhält.

Nach einer Analyse von Schikorr/KFZ Karlsruhe und nach eigenen Überlegungen gilt für ein autarkes HTR/FBR-System im eingependelten Gleichgewichtszustand:

$$P_{HTR} = C \cdot P_{FBR}$$

mit

$$P_{HTR}, P_{FBR} = \text{zu installierende thermische Leistung für HTR bzw. FBR, MW}_{th}$$

Die Proportionalkonstante C ergibt sich zu

$$C = \frac{1}{a} \frac{BR - 1}{1 - CR}$$

mit

$$a \simeq \frac{1 + \frac{\bar{\alpha}_{HTR}^{Fiss}}{\bar{\alpha}_{FBR}^{Fiss}}}{1 + \frac{\bar{\alpha}_{FBR}^{Fiss}}{\bar{\alpha}_{FBR}^{Fert}}} \times \left(1 + \frac{\sum_{sp}^{Fert}}{\sum_{sp}^{Fiss}} \right)_{FBR}$$

und

$$\frac{\bar{\alpha}_{FBR}^{Fiss}}{\bar{\alpha}_{FBR}^{Fert}}, \frac{\bar{\alpha}_{HTR}^{Fiss}}{\bar{\alpha}_{HTR}^{Fert}} = \text{mittleres Verhältnis von Einfang- zu Spaltquerschnitt des Spaltmaterials in einem FBR bzw. HTR,}$$

$$\sum_{sp}^{Fert}, \sum_{sp}^{Fiss} = \text{mittlerer makroskopischer Spaltquerschnitt von Brut- bzw. Spaltmaterial in dem entsprechenden Reaktor.}$$

Wünschenswert wäre ein großes Verhältnis von $P_{\text{HTR}}/P_{\text{GBR}}$, um möglichst wenig Brutreaktoren als Spaltstoff-fabriken der HTR installieren zu müssen. Nun sieht man aus der vorhergehenden Formel, daß dies um so besser geht, je größer die Brennstoffmultiplikation $1/(1 - CR)$, d. h. je größer die Konversionsrate der HTR und je höher die Brutrate der Brüter ist. Der Reaktorphysiker erkennt auch, daß es aus neutronenphysikalischen Gründen am optimalsten ist, im Core der Brüter mit dem ^{238}U -Pu-Zyklus und in den HTR, wegen des weicheren Neutronenspektrums, mit dem Th- ^{233}U -Zyklus zu arbeiten. Es scheint heute, daß sich folgendes Konzept als das Vielversprechendste unter mehreren möglichen Varianten herauskristallisiert hat, um $P_{\text{HTR}}/P_{\text{GBR}}$ zu maximieren:

Als Brutreakortyp wird der gasgekühlte Brüter (GBR) wegen seiner hohen Brutrate ausgewählt. Er ist so gebaut, daß er im Core und den axialen Blankets mit dem ^{238}U -Pu-Zyklus mit einer Konversion von genau 1 arbeitet, d. h. das erzeugte Plutonium wird in diesen Teil des Reaktors zurückgeführt und ersetzt gerade wieder die Spaltstoffverluste. Dieser Zyklus arbeitet wegen des harten Neutronenspektrums im Core am besten ($\alpha_{\text{GBR}}^{\text{Fiss}} \approx 0,20$ bis $0,23$). Der erbrütete überschüssige Spaltstoff wird im radialen Blanket, das aus ThO_2 -Brutstoff besteht, als ^{233}U durch Einfangprozesse der Core-Leakage-Neutronen im Th erzeugt.

Dieses überschüssige ^{233}U geht dann in die HTR. Es ist günstiger, ^{233}U erbrüten zu lassen als etwa Plutonium, da wegen des weicheren Neutronenspektrums in den HTR der Th- ^{233}U -Zyklus effektiver arbeitet ($\alpha_{\text{HTR}}^{\text{Fiss}}(^{233}\text{U}) \approx 0,1$ bis $0,15$). Zusammengefaßt ergeben sich für den beschriebenen gemischten ^{238}U -Pu/Th- ^{233}U -Zyklus mit dem numerischen Wert des Klammerausdrucks ($\quad$) $_{\text{GBR}} \approx 1,25$ für a den Wert $a \approx 1,1$, wäh-

rend bei einem reinen ^{238}U -Pu-Zyklus (Pu als Spaltstoff für die HTR) $a \approx 1,65$ wird. Der gemischte Zyklus ist also um etwa 50 % wirksamer als der reine Pu-Zyklus. Zudem hat der Gemischte den Vorteil, daß sehr viel weniger mit Pu umgegangen werden muß.

Nimmt man nun für die Brutrate eines GBR einen realistischen Wert von 1,33 und für einen HTR eine Konversionsrate von 0,85 an, so ergibt sich gerade ein Leistungsverhältnis von $P_{\text{HTR}}/P_{\text{GBR}} = 2$. Steigert man die Konversionsrate auf 0,9, so könnten drei HTR von einem GBR (bei gleicher thermischer Leistung und gleichem Lastfaktor) mit Brennstoff versorgt werden.

Für ein solches autarkes Symbiosesystem, wie es in Abb. 11 schematisch zu sehen ist, sind keine Uran-Anreicherungsanlagen mehr nötig; es benötigt nur Natururan und Thorium als Feedmaterial. Der große Vorteil ist, daß sowohl Uran als auch Thorium praktisch 100prozentig ausgenützt werden können, und zwar in einem Verhältnis, wie uns die Natur diese Reserven anbietet, denn es gibt gerade etwa 2- bis 4mal mehr Thorium- als Uranreserven.

Als nächster Schritt könnten die HTR mit sekundärem Dampfkreislauf, die heute gerade in den Markt eingeführt werden, mit einer He-Turbine im Direktkreislauf gebaut werden, so daß sie wegen des hohen Temperaturniveaus der Abwärme (120 bis 200°C) an Fernheizsysteme gekoppelt werden können. Das Eidgenössische Institut für Reaktorforschung, Würenlingen, hat sich bekanntlich im Herbst letzten Jahres mit der Kernforschungsanlage Jülich zusammengetan, um solche HHT-Reaktoren zu konzipieren. Eine Symbiose GBR-HHT ist dann ebenfalls möglich.

Mit der beschriebenen Brüter-Hochtemperaturreaktor-symbiose wäre eine gesicherte Primärenergiebasis einer zukünftigen gemischten Wasserstoff-Elektrizitäts-Wirt-

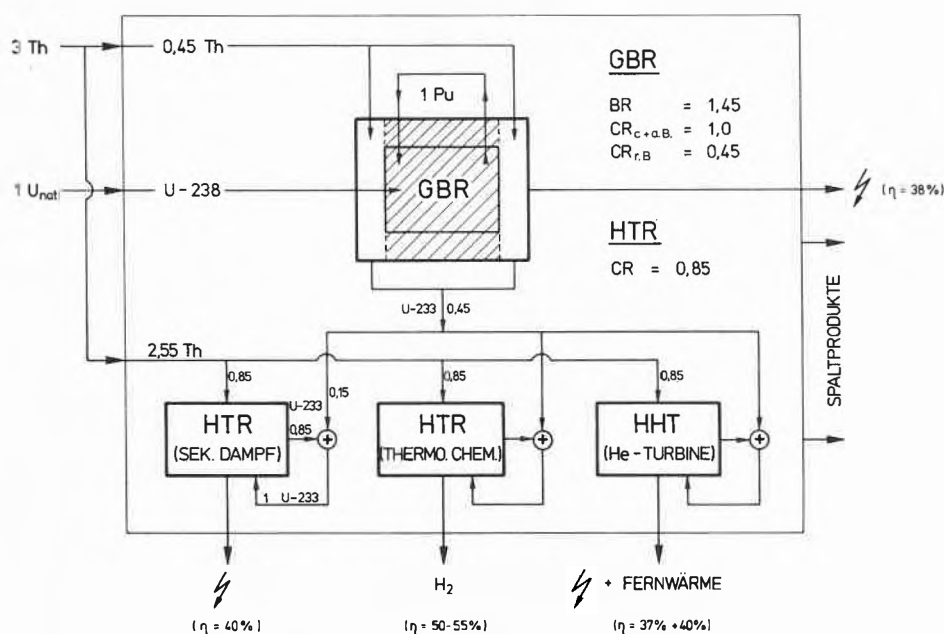


Abb. 11. Eine Einheit eines symbiotischen Reaktorsystems, bestehend aus 1 gasgekühlten Brutreaktor und 3 Hochtemperaturreaktoren. Das System ist brennstoffmäßig autark, d. h. es benötigt nur Natururan und Thorium im Massenverhältnis von 1:3 und liefert Elektrizität, Wasserstoff und Fernwärme. – Diese Primärenergiebasis einer gemischten Elektrizitäts/Wasserstoff-Wirtschaft nützt optimal und im richtigen Verhältnis die Uran- und Thoriumressourcen aus, da in der Natur gerade 2- bis 4 mal mehr Thorium als Uran vorkommt und gewonnen werden kann

schaft auf lange Zeit geschaffen. Die Gasbrüter würden dabei Elektrizität und die HTR bzw. HHT Wasserstoff und Fernheizwärme erzeugen.

Man kann annehmen, daß die Schweiz in fünfzig Jahren etwa 7 Millionen Einwohner und eine stabilisierte installierte spezifische Leistung von 10 kW/Einwohner haben wird. Diese Modellgesellschaft benötigt somit 70 GW an installierter Primärenergie. Würde diese Kapazität allein durch ein gemischt-symbiotisches HTR-FBR/HHT-FBR-Reaktorsystem in Form von Elektrizität, Wasserstoff und Fernwärme bereitgestellt, so müßten dafür etwa 40 Reaktoren (30 HHT + HTR und 10 GBR) der 4000-MW_{th}-Klasse installiert werden. Pro Tag würde dieses System etwa 160 kg Brennstoff (40 kg Uran und 120 kg Thorium) oder umgerechnet, knapp 6 g/EW/Jahr verbrennen. Eine Einlagerung von rund 3000 t Uran und Thorium zum heutigen Preis von etwa 200 Millionen Fr. würde im eingependelten Zustand eine fünfzigjährige Primärenergiereserve garantieren. Diese Menge ist leicht in einer Lagerhalle unterzubringen und ihr Preis außerordentlich günstig, wenn man ihn mit den enormen, in Zukunft noch steigenden Rohölpreisen vergleicht.

10. Ein dynamisches Weltmodell für eine universelle Wasserstoffwirtschaft

In Weltmodellen, die es erlauben sollen, volkswirtschaftliche Entwicklungen vor auszuplanen und vorherzusagen, wie z.B. die bekannte Meadows-Studie *The Limits of Growth*, müssen folgende Größen als Funktion der Zeit und deren Korrelationen untereinander betrachtet werden:

- das Bevölkerungswachstum
- der Energieverbrauch
- die fossilen Brennstoff- und Rohstoffressourcen
- die Umweltverschmutzung
- die Weltproduktion an Waren (auch Agrarprodukte) und Dienstleistungen sowie
- die Kapitalinvestitionsrate

Will man eine Welt modellhaft behandeln, in die die Wasserstoffwirtschaft eingeführt werden soll, so muß man noch die Einführungsrate der Wasserstoffökonomie miteinbeziehen. Es ist qualitativ einleuchtend, daß zwischen dieser Variablen dann insbesondere mit den Größen: Energieverbrauch, Umweltverschmutzung und fossile Ressourcen eine Korrelation zustande kommt. Schließlich kann man dann einen zeitabhängigen Index, LQ, für die «Qualität des Lebens» aus einer geeigneten Verkoppelung der obigen Größen angeben.

Veziroglu hat an der Miami-Konferenz einen solchen Index (ähnlich der Meadows-Studie) wie folgt definiert:

$$LQ(t) \sim \frac{\text{Produktion} \times \text{Ressourcen}}{\text{Bevölkerungsdichte} \times \text{Umweltverschmutzung}}$$

Die Lebensqualität einer Person erhöht sich, wenn der spezifische Energieverbrauch und damit die Masse der

produzierten Güter (materielle Güter und Dienstleistungen) steigt und wenn genügend, d.h. billige Ressourcen vorhanden sind. Eine Wasserstoffwirtschaft würde die fossilen Reserven erhalten, welche die Natur in 700 Millionen Jahren angesammelt hat, und sie einem vernünftigeren Zweck als der einfachen Verbrennung zuführen: nämlich als Rohmaterial für Plastics, Synthetics und Medikamente.

Wie eminent wichtig der Energieverbrauch in einer Gesellschaft ist, und wie sehr er mit der bisherigen technischen Entwicklung gekoppelt ist, zeigt der PrimärLeistungsverbrauch pro Mensch während seiner ganzen Entwicklungsgeschichte. Dazu sei – nach einer Anregung von Professor Burgbacher – der anschauliche Begriff des *Energiesklaven** eingeführt.

Es ergibt sich folgendes Bild:

Zeitalter	Energiesklaven pro Mensch	Mittlere Lebenserwartung, Jahre
Frühzeit des Menschen, feuerlose Sammlerkultur, Menschwerdung	1 (sich selbst)	≤ 18 (?)
Jägerkultur mit Feuer	~4	~18 (Steinzeit)
Einfache Landwirtschaft nach Erfindung des Rades	~10	~32 (Römerzeit)
(Vergleich: In der «Sklavenhaltergesellschaft», z.B. während der Römerzeit, hatte ein Sklavenhalter im Schnitt 6 bis 9 Sklaven zur Verfügung; 15 bis 20 Millionen Bürger des Römischen Weltreiches hielten um Christi Geburt mehr als 130 Millionen Sklaven)		
Fortschrittliche Landwirtschaft mit Kohlefeuerung	~21	32–40 (Mittelalter)
Industriegesellschaft des 19. Jahrhunderts («reiner Kapitalismus»)	~62	45–60 (Mitteleuropa Ende 19. Jahrhundert)
Heutiges technologisches Zeitalter bei hochentwickelten Industrienationen** (EWG der Neun, 1970: 96, Japan 1970: 63, USA 1970: 258)	~150 (entsprechend 9 KW/EW)	68–75 (Mitteleuropa und USA)

* Die Einheit 1 Energiesklave ist 0,06 kW = 60 W äquivalent. Dies ist die durchschnittliche jährliche mechanische Leistung eines Menschen (0,08 PS) während 2400 Stunden. Da ein Mensch bei ausreichender Ernährung (2500 kcal/Tag) einen Leistungsumsatz von ~120 W besitzt, hat ein «Sklave» im Jahresmittel einen Wirkungsgrad von 16 bis 17 %. Der «Lastfaktor» beträgt demnach 27 %.

** Weitere Angaben für Länder und Aufteilung nach Energiequellen siehe *Atomwirtschaft* 2 (1974) 95.

Mir scheint, daß es nicht erstrebenswert wäre, in dieser Tabelle wieder zurückzurutschen, was der Fall wäre, wenn der spezifische Energieverbrauch gedrosselt oder gar rückläufig gemacht würde, wie es von verschiedener Seite manchmal durch ein «Zurück zum einfachen Leben» gefordert wird. Zu beachten ist fernerhin, daß gerade auf dem hohen Niveau einer hochtechnisierten Gesellschaft, die schließlich zum Recycling der Verbrauchsgüter übergeht, beträchtliche zusätzliche Energie zur Verfügung stehen muß. Für ein «lebenswertes» Leben würde ich eine Zahl von 100 bis 300 latenten und nutzbaren Energiesklaven/Einwohner (abhängig von der Wirtschaftsstruktur des betreffenden Landes) für vernünftig halten. Dies wäre in Übereinstimmung mit mehreren Autoren, die für die Zukunft eine asymptotische Ziffer von 10 kW Primärleistung/Einwohner angeben. Zu vermerken ist, daß der Anteil der Nahrung dabei nur etwas mehr als 1% beträgt, wohingegen während der ersten 6000 Jahre unserer Geschichtsschreibung ungefähr 70 Milliarden Menschen lebten, von denen der größte Teil durch Muskelkraft Schwerarbeit verrichten mußte, *nur* um sich und die Familie zu ernähren.

Kehren wir nach diesem Exkurs zur vorhergehenden Definition der Lebensqualität zurück. Wie man sieht, fällt bei hohen Bevölkerungsdichten und bei hohem Verschmutzungsgrad die Lebensqualität. LQ bedarf einer Normierung; sie ist in dieser Betrachtung 1974 willkürlich 1 gesetzt.

Abb.12 zeigt nun, wie sich $LQ(t)$ bis zum Jahre 2100 entwickeln wird. Bei weiterem exponentiellem Bevölkerungswachstum mit einer Verdopplungszeit von 36 Jahren und ohne H_2 -Einführung wird der Lebens-

$$H(t) = H_0 \exp(0,693 t/T_H)$$

mit $H_0 = 5 \times 10^4$ BTU/yr ($1,7 W_{th}$) und unter der Berücksichtigung, daß dieser Wert maximal dem fossilen Energieumsatz entspräche und gewisse maximale Kapitalinvestitionsraten nicht überschritten werden, ergeben sich in Abb.12 die beiden oberen Kurven bei den Verdopplungszeiten $T_H = 1$ und 2 Jahre der H_2 -Einführungsrate.

Man sieht, daß sich interessanterweise die Lebensqualität im Jahre 2020 um den Faktor 10 erhöhen könnte, wenn bis dahin jedes Jahr der Wasserstoffumsatz verdoppelt würde; jedoch würde schon eine Verdopplungszeit von 2 Jahren diesen Effekt um 50 Jahre verschieben. Aus sozialpolitischen Gründen ist es auch wichtig, zu sehen, daß der LQ -Wert in einer H_2 -Wirtschaft stets einem hohen, asymptotisch konstanten Wert entgegenstrebt. Daran kann man ableiten, daß auch mit einem guten gesellschaftlichen Sozialklima gerechnet werden kann und Revolutionen sowie kriegsartige Auseinandersetzungen unwahrscheinlich werden. – Es läßt sich sicher darüber streiten, mit welcher Funktion man die Qualität eines menschlichen Daseins am besten beschreibt und ob es sich überhaupt als solches quantifizieren läßt. Auch wird den globalen Modellen den Vorwurf gemacht, sie würden die lokalen Strukturen von industriellen Ballungsräumen nicht berücksichtigen und nur Weltmittelwerte betrachten. Die Zahl der Variablen würde aber für ein solches differenziertes Modell so stark ansteigen, daß das Modell schnell unübersichtlich und undurchschaubar würde.

Voraussetzung einer Lebensqualitätsdefinition in einem dynamischen Weltmodell ist jedoch, daß die sie be-

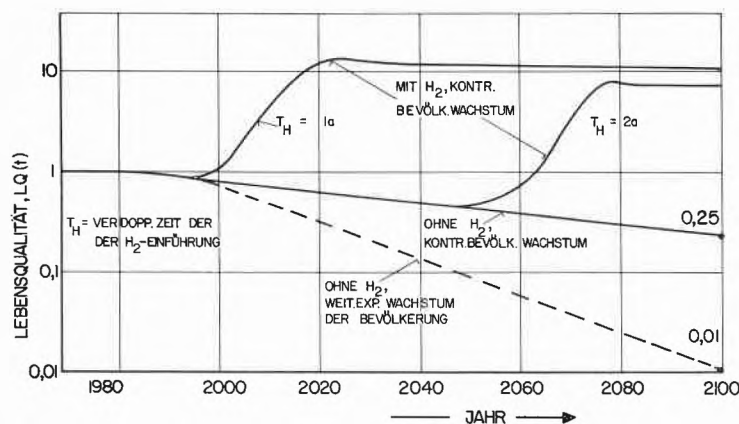


Abb.12. Der Index der Lebensqualität als Funktion der Zeit bis zum Jahre 2100 mit und ohne H_2 -Einführung in die Energiewirtschaft nach einem dynamischen Weltmodell von Veziroglu. Die Erhöhung der Lebensqualität in einer Wasserstoffwirtschaft kommt deutlich zum Ausdruck

qualitätsindex kontinuierlich fallen und im Jahre 2100 auf ein Hundertstel des heutigen Wertes abgesunken sein. Stabilisiert sich die Weltbevölkerung ab etwa dem Jahr 2040 auf 7,6 Milliarden Menschen, so wird im Jahr 2100 der LQ -Wert viermal niedriger als heute sein*. Eine Einführung der Wasserstoffwirtschaft mit einer Rate von

* Die Stabilisierung der Weltbevölkerung ist nicht nur eine Frage der Geburtenkontrolle. Beschreibt man die zeitliche Entwicklung der Zahl der Menschen mit dem Ansatz $Z = Z_0 \exp(0,693 W [t] t/36 \text{ yr})$, so ist der Wachstumsmultiplikator $W(t)$ neben künstlichen Eingriffen (Geburtenkontrolle, Steuergesetze) eine komplizierte Funktion des Sozialprodukts/EW, der Umweltverschmutzung und der Bevölkerungszahl selbst, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll.

schreibenden Variablen mathematisch darstellbar und für die Großzahl der Menschen, unabhängig in welcher Gesellschaftsordnung sie leben, gleichermaßen relevant sind und von ihnen als solche anerkannt werden. Es wird heute von vielen Seiten von der «Qualität des Lebens» gesprochen, aber nur ganz wenige haben den Mut gehabt, eine quantitative und reproduzierbare Definition zu geben. Dies sollte man zumindest dankenswert anerkennen.

Mit Sicherheit ist auch die Definition der Lebensqualität kein statischer Begriff und wird sich weiterentwickeln. In der obigen Definition kann man grob den Zähler als die «materielle» oder «energetische Basis» und den Nenner als die «immaterielle Basis» oder den «Entropiezustand des Lebensraums» des Menschen zusammenfassen. In Zukunft werden selbst bei hinreichender materieller Lebensbasis und sauberer Umwelt weitere immaterielle Größen hinzutreten. Nach dem bekannten Zukunftsforscher R. Jungk sind diese subjektiver und gesellschaftspolitischer Natur: die Sehnsucht und der Anspruch auf Selbstverwirklichung des Menschen, sein Anspruch auf Mitwirkung und Zurückweisung von Fremdbestimmung, sein Wunsch nach Gerechtigkeit und schließlich wohl die Hoffnung auf eine geistige Weiterentwicklung des Menschen.

Demnach ließe sich eine zukünftige Definition der Lebensqualität nach folgendem abstrahiertem Schema angeben:

$$LQ \sim \left(\begin{array}{c} \text{Energetische} \\ \text{Basis} = \\ \text{BTU-Philosophie} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{c} \text{Entropie-} \\ \text{zustand des} \\ \text{Lebensraums} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{c} \text{Entropiezustand} \\ \text{der «Seele» und} \\ \text{der Gesellschaft} \end{array} \right) \times \dots,$$

das zweifelsohne immer schwieriger mathematisch zu quantifizieren sein wird.

Wir sind uns klar darüber, daß sich die Idee einer universellen Wasserstoffwirtschaft in einem embryonalen Zustand befindet. Sie ist ein intellektueller Denkansatz für langfristige Perspektiven, aber mit einem durchdachten und konkreten Bezug zur Wirklichkeit.

Das beschriebene Weltmodell ist wohl das erste Modell nach der Meadows-Studie, das explizit einen möglichen Response der zukünftigen technologischen Entwicklung berücksichtigt und deshalb zu optimistischeren Perspektiven kommt als die Meadows-Studie.

Um es nochmals zu wiederholen: die Idee von einer Wasserstoffökonomie ist als eine konsequent nach vorne gerichtete Energiephilosophie angelegt, um eine Synthese des Energie- und Entropieproblems in einer asymptotisch stabilisierten Welt mit hoher Lebensqualität für den einzelnen zu erreichen.

Verdankung

Der Autor möchte dem EIR Würenlingen für die Möglichkeit der Teilnahme an dieser ersten Wasserstoff-Weltkonferenz danken. Sie erbrachte eine außerordentliche intellektuelle Bereicherung des Wissenstandes über die Wasserstoffökonomie.

Als schweizerischer Vertreter ist der Autor Mitglied und Verbindungsmann zur Schweiz im internationalen Gremium der Promotoren zukünftiger Konferenzen dieser Art. Sitz zur Zeit: The University of Miami, Coral Gables, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Florida 33124.

Literatur

Wenn nicht anders vermerkt, sind die Informationen den Conference Proceedings, *The Hydrogen Economy Miami Energy (THEME) Conference*, 18–20 March 1974, Miami Beach, Florida, entnommen.