Alternative Energie Wasserstoff

Autor(en): **Prechtl, Heinrich**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **106 (1988)**

Heft 42

PDF erstellt am: **28.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-85829

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Alternative Energie Wasserstoff

Die technischen und ökologischen Vorzüge des Wasserstoffs als Energieträger sind seit geraumer Zeit bekannt und durch eine Vielzahl von Experimental- bzw. Pilotanlagen nachgewiesen. Die breite Einführung dieses alternativen Energieträgers scheitert bislang freilich an wirtschaftlichen Kriterien. Im Rahmen der EGES-Szenarien wurde u.a. untersucht, inwieweit eine Wasserstoffwirtschaft für die Schweiz eine langfristige Energieoption darstellen könnte.

Brauchen wir Wasserstoff?

Gegenwärtig: Als Chemischen Rohstoff

VON HEINRICH PRECHTL, ZÜRICH

Herstellung, Speicherung und Anwendung von Wasserstoff gehören in der chemischen Industrie seit Jahrzehnten zum Stand der Technik. Der derzeitige Weltjahresbedarf an Wasserstoff wird auf 350 Mrd. Nm^3 geschätzt. Etwa 50% des Gesamtumsatzes entfallen auf die Herstellung von Ammoniak, 40% auf die Verarbeitung von Mineralöl (Petrochemie) und der Rest auf spezielle chemische Verfahren wie z.B. Methanolsynthese, Erzreduktion, Hydrierung organischer Zwischenprodukte usw.

Da Wasserstoff im Gegensatz zur Kohle oder zum Erdöl kein Rohstoff, sondern ein synthetischer Sekundärenergieträger ist, erfordert seine Herstellung geeignete Primärenergiequellen. Gegenwärtig sind es vor allem fossile Rohstoffe wie Erdöl, Erdgas oder Kohle, die zur Herstellung von Wasserstoff verwendet werden. Die (nichtfossile) elektrolytische Wasserspaltung beschränkt sich aus Kostengründen auf wenige spezielle Anwendungsfälle wie z.B die Ammoniaksynthese in Norwegen, Ägypten und Indien; Länder, die kostengünstigen Strom aus heimischer Wasserkraft beziehen.

Für die Schweiz von Bedeutung sind die Ammoniaksynthese und die Raffination von Erdöl. Etwa dreiviertel des schweizerischen Ammoniakbedarfs (rund 70 000 t/a) werden im Inland mittels einer Hochtemperatur-Crackanlage aus Leichtbenzin erzeugt. Elektrolyseanlagen sind wohl noch vorhanden, aber aus Kostengründen stillgelegt.

Die beiden Schweizer Raffinerien in Cressier und Aigle benötigen rund 50 t Wasserstoff im Jahr, wovon die eine Hälfte für die Isomerisation (nur in Cressier) bzw. zur Entschwefelung dient, während die andere Hälfte zur Prozesswärmeerzeugung gebraucht und damit strenggenommen energetisch genutzt wird.

Dieser kurze Überblick zeigt, dass Wasserstoff gegenwärtig ein wichtiger Rohstoff für die chemische Industrie und die Mineralölwirtschaft ist. Bei weiter wachsender Weltbevölkerung dürften auch der Bedarf an Ammoniak für die Düngemittelproduktion und damit der Verbrauch von Wasserstoff zunehmen. Auch die Veredelung von Kohle und Schwerölen zur Gewinnung hochwertiger (synthetischer) Sekundärenergieträger, die grosstechnisch heute noch keine Rolle spielt, wird künftig an Bedeutung gewinnen und die Nachfrage nach Wasserstoff erhöhen.

In Zukunft: Als Synthetischen Energieträger

Die energetischen Eigenschaften des Wasserstoffs waren bislang nur für die Raumfahrt von Belang. Flüssiger Wasserstoff und Sauerstoff (LH_2, LOX) gelten international als Standardtreibstoff für Trägerraketen. Damit wurde die Raumfahrt zum grössten Abnehmer für flüssigen Wasserstoff und unter Umständen zum Wegbereiter für eine terrestrische Wasserstoff-Energietechnik. Das neuerwachte Interesse an einer energetischen Wasserstoffwirtschaft, d.h. an einem umfassenden kohlenstofffreien Brennstoffzyklus, gründet hauptsächlich auf folgenden Überlegungen:

- Die globale Energienachfrage, die sich gegenwärtig zu 90% auf fossile Brennstoffe konzentriert, muss langfristig auf regenerative und/oder synthetische Energieträger verlagert werden.
- Die durch die fossile Energietechnik verursachte Umweltbelastung muss reduziert werden. Immerhin lassen sich bestimmte Schadstoffemissionen durch aufwendige technische Massnahmen verringern. Die anthropogene Freisetzung von CO_2, die im Verdacht steht, globale Klimaveränderungen zu verursachen, lässt sich freilich mit der fossilen Energietechnik nicht vermeiden.
- Die Wasserstoffenergietechnik eröffnet einen Ausweg aus dem Umweltdilemma. Als einzige Schadstoffe entstehen Stickoxide, sofern Wasserstoff mit Luft verbrannt wird. Mit der katalytischen Oxidation von Wasserstoff und Sauerstoff lässt sich der Idealfall einer absolut schadstofffreien Verbrennung erreichen.
- Sofern der Wasserstoff mit Hilfe regenerativer Energie (Wasserkraft, Solarstrom) erzeugt wird, liegt erstmals ein geschlossenes Kreislaufenergiesystem vor, das die globale natürliche Energiebilanz unterstützt. Das anfallende Wasser geht an die Atmosphäre zurück, die den globalen Ausgleich im Wasserhaushalt der Erde besorgt.
- Der Energieträger Wasserstoff ist mit den etablierten Energiesystemen kompatibel; die entsprechenden Komponenten sind verfügbar und Unwägbarheiten begrenzt. Darüber hinaus bietet Wasserstoff gänzlich neue Anwendungsmöglichkeiten wie z.B. Brennstoffzellen und katalytische Heizer.
- Wasserstoff als Speicher und Transportmedium stellt ein Verbindungsglied zwischen der Solarenergie und den konventionellen Energiesystemen dar.

Die Option einer nichtfossilen Energieversorgung auf der Basis Kernenergie hat in jüngster Zeit gewisse Rückschläge erlitten. Die Substitution nennenswerter Mengen fossiler Energie durch Kernbrennstoffe erfordert bessere (und sichere) Nutzungstechnik als heute üblich. Ob diese Technologie auf breiter Basis akzeptiert wird, scheint offen.

Demgegenüber entwerfen verschiedene Fachleute Visionen einer postfossilen Energiewirtschaft, in der Wasserstoff und Solarenergie aus sonnenreichen Zonen Afrikas und Vorderasiens eine Schlüsselrolle spielen. Die Kritiker dieser Option bezweifeln indes primär nicht die technische Machbarkeit dieser Projektionen als vielmehr die politischen und wirtschaftlichen Annahmen, auf denen sie beruhen.

Wasserstoff-Energietechnik

Anwendungstechnische Eigenschaften

Der massebezogene Heizwert von Wasserstoff (Hu) ist mit 120 MJ/kg rund

dreimal so hoch wie der von Benzin und Erdgas. Bei Atmosphärendruck und 0 °C (Normzustand) benötigt 1 kWh Wasserstoff allerdings den 3000fachen Speicherplatz gemessen am Benzin! Dies deutet bereits einige Möglichkeiten und auch Probleme an, die Wasserstoff als Brenn- und Heizgas mit sich bringt. Weitere wichtige Eigenschaften dieses synthetischen Energieträgers sind seine in weiten Konzentrationsbereichen (4–75 Vol.-% in Luft) liegende Zündfähigkeit, seine minimale Zündenergie, die eine Grössenordnung niedriger liegt als die anderer Brenngase, seine höhere Flammgeschwindigkeit und der hohe Detonationsbereich (18–59 Vol.-% in Luft). Dennoch wäre es falsch, a priori und generell zu behaupten, Wasserstoff sei gefährlicher als z. B. Erdgas. So liegen seine Verbrennungstemperatur relativ niedrig und sein Diffussionsvermögen sehr hoch, was bewirkt, dass sich freiwerdender Wasserstoff rasch verflüchtigt.

In Abwägung aller sicherheitsrelevanten Eigenschaften wird das Risikopotential einer Wasserstofftechnik nicht höher beurteilt als das der heutigen fossilen Energietechnik. Erfahrene Fachleute aus der chemischen Industrie sind freilich der Ansicht, dass primär jene Anwendungsgebiete in Betracht kommen, die über ein hochstehendes Sicherheitssystem verfügen wie z. B. die Luftfahrt.

Verbrennung von Wasserstoff

Die Verbrennung von Wasserstoff gehört in der chemischen Industrie zum Stand der Technik. Allgasbrenner für Stadtgas (bis zu 60% H_2-Anteil) waren lange Zeit auch im Haushaltbereich im Einsatz.

Die katalytische Verbrennung von Wasserstoff ist zwar seit langem bekannt, doch steckt die technische Entwicklung noch in den Kinderschuhen. Die Vorteile katalytischer Heizer liegen in der möglichen Ausnutzung des Brennwertes (Ho) und im schadstofffreien Betrieb. Eine Reihe von technischen Problemen muss freilich noch gelöst werden.

Gasturbinen

Wasserstoffturbinen können mit Vorteil zur Wärmekraftkopplung oder als Strahltriebwerke eingesetzt werden. Entsprechende Versuche führte Boeing in den 50er Jahren durch. Die rückstandsfreie Verbrennung des Wasserstoffs erlaubt die Materialfestigkeit höher auszunutzen. Ferner kann flüssiger Wasserstoff dazu dienen, die Luft am Verdichtereintritt herabzukühlen und so die nutzbare Wellenleistung etwas anzuheben.

Betriebs-temperatur	*Elektrolyt*	*Brennstoff/Oxidationsmittel*
<100 °C	Kalilauge	Wasserstoff; Sauerstoff
	Solid Polymer Electrolyte	Wasserstoff; Luftsauerstoff
200 °C	Phosphorsäure	Wasserstoff aus Erdgas nach externer Reformierung und Konvertierung; Luftsauerstoff
650 °C	Karbonat-schmelze	Wasserstoff aus Erdgas nach interner Reformierung oder aus Kohlevergasung nach Konvertierung und Reinigung; Luftsauerstoff
1000 °C	keramischer Festelektrolyt	Wasserstoff und Kohlenmonoxid aus Kohlevergasung nach Reinigung; Luftsauerstoff

Tabelle 1. Bauarten von Brennstoffzellen

Im Vergleich zu heutigen Maschinen wären wasserstoffbetriebene Flugzeuge ein Gewinn für die Umwelt; dies um so mehr, als sie sich in sehr empfindlichen Schichten der Lufthülle bewegen. Einen ersten konkreten Schritt in diese Richtung tat überraschenderweise die Sowjetunion mit der Entwicklung eines LH_2 - Flugzeugs. Am 15. April 1988 absolvierte eine Tupolew 155, die für den Betrieb mit LH_2 umgerüstet wurde, einen 20minütigen Probeflug. Die Entwicklung eines speziellen LH_2-Verkehrsflugzeuges ist vorgesehen.

Verbrennungskraftmaschinen

Kraftmaschinen mit innerer Verbrennung eignen sich grundsätzlich gut für den Betrieb mit Wasserstoff. Im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen ist insbesondere der schadstoffarme Betrieb von Bedeutung. Dank dem grossen Zündbereich ermöglicht Wasserstoff im Ottomotor nicht nur einen ausgesprochenen Magerbetrieb mit entspechend weniger NO_x-Ausstoss, sondern auch eine Qualitätsregelung, ähnlich wie beim Dieselmotor mit höherem Wirkungsgrad bei Teillast. Gewisse Nachteile der äusseren Gemischbildung lassen sich vermeiden, wenn flüssiger Wasserstoff direkt eingespritzt wird.

In der Bundesrepublik und in Japan wurden verschiedene Serienfahrzeuge auf Wasserstoffbetrieb umgerüstet und erprobt. In der Schweiz entwickelte das Paul Scherrer Institut in Würenlingen (vormals EIR) ein Antriebskonzept für Schwerfahrzeuge, das den Wasserstoff chemisch gebunden als Methylcyclohexan mit sich führt und nach Bedarf in einer Dehydrieranlage abspaltet. 1989 soll ein weiterentwickelter Prototyp eines MTH-Lastwagens die Strassenerprobung aufnehmen.

Dampferzeuger

Der H_2/O_2-Dampferzeuger stellt ein Beispiel für eine neuartige Wasserstoff-Anwendungstechnik dar. Aus der Raketenantriebstechnik abgeleitet, wurde er an der Deutschen Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DVFLR) zur Anwendungsreife entwickelt. Dampfzustände bis zu 90 bar und 900 °C sowie Leistungen zwischen 15 und 40 MW wurden erfolgreich getestet. In bestehenden Dampfkraftwerken kann dieses System als Sekundenreserve eingesetzt werden. Gegenwärtig wird ein Prototyp in einem Dampfkraftwerk der Elektrizitätsversorgung Schwaben (EVS, BRD) eingebaut und erprobt.

Brennstoffzellen

Die elektrochemische Reaktion von Brennstoff und Oxidator zur direkten Elektrizitätserzeugung wurde für eine Vielzahl von Reaktionspartnern untersucht. Die grössten Fortschritte konnten mit der Sauerstoff/Wasserstoffreaktion erzielt werden. So gilt es als sicher, dass ein grosstechnischer Einsatz von Brennstoffzellen eng mit der Wasserstofftechnik verknüpft ist. Die wesentlichen Eigenschaften einer Brennstoffzelle lassen sich pauschal wie folgt beschreiben:

- hoher Wirkungsgrad (50–80%), der mit Teillast eher noch ansteigt
- minimale Schadstoffemissionen
- modularer Aufbau mit wenig bewegten Teilen.

Tabelle 1 listet verschiedene Bauarten auf, die sich nach der Betriebstemperatur und dem verwendeten Elektrolyten unterscheiden lassen. Die Entwicklung tendiert zu Typen mit höheren Betriebstemperaturen, die Produkte aus der Erdgasreformierung bzw. Kohlevergasung umsetzen können. Grosse Brennstoffzellenkraftwerke im MW-Breich mit sauren Elektrolyten wurden in den USA und Japan gebaut und erprobt.

Wasserstoff-Speicherung

Die Speicherung von Energie ist notwendig, weil Energiebedarf und Energieangebot meist weder zeitlich noch

Speicherkonzept	Speicherkapazität (kg H_2/100 kg)	(kg H_2/100 l)	Bemerkungen
Druckgas-Speicherung			
Stahlflasche	1,4	1,4	Druckgasflasche, 200 bar
Al-GfK-Behälter	2,4	1,4	bewickelte Al-Flasche, 50% reduzierte Wanddicke, 200 bar
Stahl-Verbundbehälter	8,2	1,4	mit Kevlar bewickelter Kugelbehälter mit dünnem Stahl-Liner 160 bar
Flüssig-Speicherung LH_2-Behälter	16,6	2,7	superisolierter Behälter, 2 bar
Hydrid-Speicherung			
Fe-Ti-Hydrid	1,2	2,4	Rohrbündel, 50 bar
Mg-Hydrid	2,7	2,4	
Methylcyclohexan (MTH)	6,2	4,7	Wasserstoffbindung an flüssige organische Hydride, drucklos

Tabelle 2. Vergleich verschiedener Wasserstoff-Speicher

örtlich zusammenfallen. Konkret lässt sich feststellen:

- Fossile Energie in chemisch gebundener Form ist sehr gut und mit geringem Aufwand speicherbar.
- Kernbrennstoff ist ein energieintensiver Langzeitspeicher. Die Umwandlung in Strom erfolgt aus technischen und wirtschaftlichen Gründen möglichst kontinuierlich (Bandenergie).
- Hydroenergie ist gut speicherbar; die diesbezüglichen Möglichkeiten sind in der Schweiz jedoch weitgehend ausgeschöpft.
- Solare Energie ist nicht direkt speicherbar. Das Angebot schwankt periodisch, lokal und auch stochastisch (Tag-Nacht, Sommer-Winter, klimatisch).

Die Disparität zwischen Energieproduktion und -nachfrage erfordert Speicher für

- den Tag/Nachtausgleich
- den Wochenzyklus (Arbeitstage/Wochenende)
- den Saisonausgleich (Sommer/Winter).

Ein wesentlicher Vorzug des Wasserstoffs ist darin zu sehen, dass er wie ein Brennstoff befördert und gespeichert werden und diesbezüglich mit fossilen Brennstoffen konkurrieren kann. Tabelle 2 zeigt, dass die verschiedenen Anwendungsbereiche spezifische Speichertechniken favorisieren.

Druckgasspeicher

Kleinere Mengen an Wasserstoff werden üblicherweise in Stahldruckflaschen mit 200 bar abgefüllt und verteilt. Dieses Konzept hat sich in der Praxis bewährt und für die meisten kleineren Wasserstoffbezüger wirtschaftlich als günstig erwiesen. Aufgrund der Erfahrungen in der Erdgaswirtschaft scheint eine grosstechnische Speicherung von Wasserstoff in Kavernen oder Aquiferen durchaus machbar. Die Stadtwerke Kiel (BRD) betreiben seit 1971 einen Kavernenspeicher mit 30 000 m³ Stadtgas, das zu 65% aus Wasserstoff besteht.



Bild 1. Wasserstoff-Versuchsfahrzeug der 2. Generation, Quelle: PSI

Flüssigwasserstoff (LH_2)-Speicher

Bezogen auf die Masse und das Volumen zeigt eine LH_2-Speicherung deutliche Vorteile gegenüber einem Druckgasspeicher. Dass die LH_2-Speicherung, die in der Raumfahrt und in der chemischen Industrie längst zum Stand der Technik gehört, keine grössere Verbreitung gefunden hat, liegt an den technisch aufwendigen und kostspieligen Behältern und am Aufwand für die Verflüssigung: So rechnet man mit Investitionen von etwa 250 Fr./kg LH_2 für einen PW-Tank und mit einem elektrischen Energiebedarf von 10–15 kWh pro kg LH_2 (das entspricht etwa einem Drittel des Heizwerts).

Metallhydridspeicher

Bestimmte Metallegierungen haben die Eigenschaft, Wasserstoff bei niedrigen Drücken und Umgebungstemperatur durch eine Gas-Feststoffreaktion einzuspeichern. Pro Liter Hydridvolumen kann bis zu 1 Nm³ Wasserstoff (90 g) gebunden werden. Gegenüber Druckflaschen haben Hydridspeicher eine höhere volumenbezogene Kapazität und zudem den Vorteil höherer Sicherheit. Dies spielt vor allem bei mobilen Anwendungen eine Rolle.

Metallhydridtanks für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge wurden denn auch schon erfolgreich getestet. Von Nachteil sind die hohen Kosten und das Gewicht eines derartigen Tanks, die einen Einsatz auf den Kurzstreckenbereich beschränken.

Organisch-chemische Wasserstoffspeicherung

1984 stellte das ehemalige EIR ein Wasserstoff-Speicherkonzept vor, das darin bestand, elektrische Energie zu Schwachlastzeiten via Elektrolyse in Wasserstoff umzuwandeln und diesen an flüssige organische Hydride zu binden. Die Bezeichnung MTH enthält das Kürzel der in diesem Konzept verwendeten Substanzen Methylcyclohexan (M), Toluol (T) und Wasserstoff (H). Das System besteht aus folgenden Komponenten:

- Elektrolyseanlagen zur Wasserspaltung
- stationäre Hydrieranlagen zur Anlagerung von H_2 an Toluol
- Saisonspeicher mit Tankstellen
- Dehydrieranlagen auf grösseren mobilen Verbrauchern (siehe Bild 1).

Die chemisch-physikalischen Eigenschaften des Methylcyclohexans und des Toluols gleichen denen von Benzin. Beide Flüssigkeiten lassen sich mit ähnlichem Aufwand und unter vergleichbaren Sicherheitsvorkehrungen speichern.

Herstellung des Wasserstoffs

Das Schlüsselproblem für die Wasserstofftechnologie ist die wirtschaftliche Herstellung des Wasserstoffs. Etwa 95% des weltweiten Bedarfs werden gegenwärtig aus fossilen Quellen gedeckt, wobei das Steamreforming mit Erdgas das energetisch und wirtschaftlich günstigste Verfahren darstellt.

Geht man davon aus, dass Wasserstoff in einer künftigen Energiewirtschaft die heute gebräuchlichen fossilen Brenn- und Kraftstoffe ergänzen, substituieren oder veredeln soll, so muss der hierzu benötigte Wasserstoff mit Hilfe regenerativer oder nuklearer Primärenergie bereitgestellt werden. Es bieten sich folgende Verfahren an:

- Elektrolyse
- Wasserspaltung mittels thermischer Kreisprozesse.

Elektrolyse

Die grosstechnische elektrolytische Wasserzersetzung arbeitet mit alkalischen, wässerigen Elektrolyten, wobei Kathoden- und Anodenraum durch ein poröses Diaphragma getrennt sind, um eine Vermischung der Produktgase zu verhindern. Kommerzielle Elektrolyseure weisen folgende typische Daten auf:

- Arbeitstemperatur: 80 °C
- Stromdichte: 2000 A/m²
- Zellspannung: 1,9–2,0 V
- Energieverbrauch: 4,8 kWh/Nm³ (H_2)
- Wirkungsgrad: 75–85%

Dieser Standard lässt sich weiter verbessern durch

- Erprobung neuer Diaphragmen und Zellkonfigurationen mit dem Ziel, den inneren Widerstand der Elektrolysezellen zu senken
- Entwicklung neuer und billiger Katalysatoren für die Gasabscheidung
- Anhebung der Arbeitstemperatur, um letztlich die Zellspannung zu senken.

Fortschrittliche Elektroyseure mit Zellspannungen von 1,5 V und Stromdichten von 2000 A/m² erzielten im Labor bereits Wirkungsgrade von über 90%. BBC/Schweiz entwickelte in den 70er Jahren ein gänzlich neues Konzept, in dem eine ionenleitende Membran als Festkörperelektrolyt zur Wasserspaltung verwendet wird. Diese MEMBREL (Membran-Elektrolyse) genannte Technik zeichnet sich vor allem durch kompakte Bauweise, hohe Stromdichte und guten Wirkungsgrad aus. Nach langjähriger Erprobung ging 1987 die erste kommerzielle MEMBREL – Elektrolyseanlage in Nyon in Betrieb (Bild 2).

Gegenüber der klassischen Wasserspaltung bietet die Hochtemperatur-Elektrolyse von Wasserdampf erhebliche Vorteile. In der BRD wurde ein diesbezügliches Verfahren namens HOT ELLY zur Laborreife entwickelt. Bis zur kommmerziellen Anwendung sind allerdings noch umfangreiche Optimierungsarbeiten erforderlich.

Wasserspaltung mittels thermochemischer Kreisprozesse

Technische und wirtschaftliche Bedingungen begrenzen die obere Temperatur chemischer Kreisprozesse auf 1100 bis 1200 °C. Eine Wasserspaltung auf diesem Niveau erfordert bereits recht ausgeklügelte mehrstufige Kreisprozesse. Von der Vielzahl theoretisch untersuchter Reaktionen scheinen nur wenige verfahrenstechnisch realisierbar zu sein. Als erfolgversprechend gilt insbesondere der Schwefelsäurezyklus, wie er in einer Pilotanlage am Forschungszentrum der EURATOM in Ispra verwirklicht wurde.

Weitere Verfahren zur Wasserspaltung (photochemisch, photoelektrochemisch, photobiologisch) befinden sich gegenwärtig noch im Versuchs- bzw. Laborstadium.

Kosten der Wasserstoffherstellung

Unter den gegenwärtigen wirtschaftlichen Randbedingungen liefert das Steamreforming von Erdgas den billigsten Wasserstoff, gefolgt von der Vergasung von Braunkohle, Steinkohle und Schweröl sowie von der partiellen Oxidation von Naphta. Erst dann kommt die Elektrolyse, die sich grosstechnisch

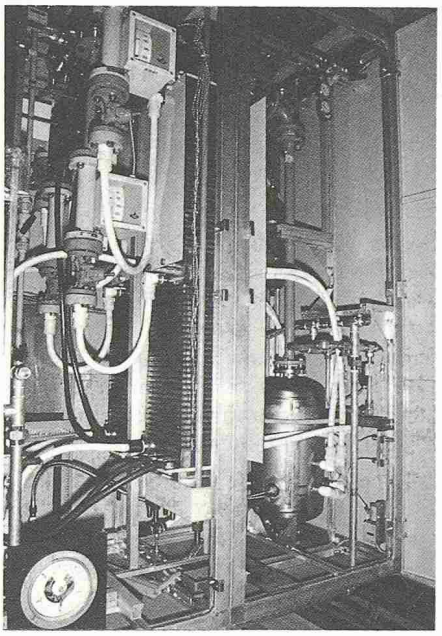


Bild 2. Versuchsaufbau mit 4 MEMBREL – Zellblöcken à 5 Nm³/h, Quelle: ABB Zürich

auch nur an wenigen günstigen Standorten behaupten konnte.

Tabelle 3 stellt die Ergebnisse einer Kostenanalyse aus dem Jahr 1984 dar, wobei sowohl die Daten der konventionellen als auch einer fortschrittlichen Elektrolyseanlage berücksichtigt sind. Da die Erdgaspreise mittlerweile eher noch gesunken sind (1988: 7–8 Fr./GJ) bleibt das Steamreforming bis auf weiteres die wirtschaftlich überlegene Technik.

Um die künftigen Marktchancen für elektrolytischen Wasserstoff in der Schweiz abzuschätzen, wurden dessen Gestehungskosten für das Jahr 2000 hochgerechnet. Grundlage hierfür bilden die Annahmen in den Energieszenarien «Hoch» bzw. «Tief», welche von der Expertengruppe Energieszenarien (EGES) vorgegeben wurden, insbesondere was die Preisentwicklung der fossilen Rohstoffe Erdgas und Naphta sowie der elektrischen Energie betrifft. Demzufolge wird auch im Jahr 2000 die fossile Wasserstofferzeugung einen Ko-

Rohstoff bzw. Verfahren	*Wirkungsgrad*	*Rohstoffpreis* DM/GJ	*Strompreis* DM/kWh	*Anlagekosten* DM/GJ	*Gesamtkosten* DM/GJ	DM/kg
Erdgas	0,74	12		4,2	21,8	2,62
Braunkohle	0,52	4,1		11,1	22,2	2,66
Steinkohle	0,54	8,4		10,9	28,5	3,42
Schweröl	0,60	11,4		8,1	29,6	3,55
Naphta	0,73	17,2		4,4	30,0	3,60
Elektrolyse, alt	0,75		0,12	22,0	65,0	7,80
Elektrolyse, neu	0,92		0,12	15,4	52,0	6,24

Tabelle 3. Kostenvergleich verschiedener Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff Preisbasis: 1984 [5]

stenvorsprung von 20–30% gegenüber der Elektrolyse behalten, selbst wenn diese nur mit einem grenzkostenorientierten Niedertarif belastet wird [1].

Nichtfossile grosstechnische Systeme zur Wasserstofferzeugung

Sollte Wasserstoff zu einem späteren Zeitpunkt und in grösserem Massstab als Energieträger verwendet werden, so setzt dies eine geeignete nichtfossile Primärenergiequelle voraus. Andernfalls könnten ja die fossilen Ausgangsstoffe direkt oder in veredelter Form als Energieträger dienen.

Aus heutiger Sicht scheinen einzig die Elektrolyseverfahren kurzfristig anwendbar. Nichtfossile Wasserstofferzeugung in grosstechnischem Massstab bedeutet damit bis auf weiteres elektrochemische Wasserspaltung, die an einen Stromerzeugungsprozess gekoppelt ist. Diesbezüglich werden folgende Alternativen betrachtet:

- Kernkraft
- Wasserkraft
- Solarthermik
- Photovoltaik
- Windenergie

Die eingangs erwähnten ökologischen Vorteile einer Wasserstoff-Kreislaufwirtschaft kommen allerdings nur bei den 4 letztgenannten regenerativen Energiequellen zum Tragen.

Energie aus *Kernkraftwerken* kann in Form elektrischen Stroms und/oder Hochtemperaturwärme zur Wasserspaltung herangezogen werden. Elektrolyse mit Schwachlaststrom ist zwar technisch möglich, wirtschaftlich aber zweifelhaft, da die teuren Anlagen dann nur teilweise ausgenutzt werden. Wasserstoff aus *Wasserkraft* gehört zum Stand der Technik. Die Möglichkeiten zur Verbesserung dieses Systems beschränken sich auf den Elektrolyseteil.

Die Kombination *solarthermischer Kraftwerke* mit Elektrolyseanlagen scheint vor allem dann sinnvoll, wenn sowohl Strom als auch Hochtemperaturwärme genutzt werden können.

Kleinere *Windenergiekonverter* eignen sich vor allem für die dezentrale Energieversorgung. Die Kombination mit einem Elektrolyseur wurde nicht zuletzt durch die Anlage des schwedischen Ingenieurs O. Tegström bekannt [2]. Die Speicherung von Wasserstoff stellt hier eine Alternative zur Stromspeicherung in Akkumulatoren dar.

Unter all den genannten Systemen hat die Kombination von *Photovoltaik* und Elektrolyse das einfachste und attraktivste Konzept. In lediglich zwei Umwandlungsschritten wird die Solarstrahlung ohne Umweg in speicherbare chemische Energie überführt. Bedeutende Fortschritte in der Solar-Halbleitertechnologie innerhalb weniger Jahre und markante Kostenreduktionen bei der Herstellung und Konfektion von Solarzellen haben der Idee einer solaren Wasserstoffwirtschaft neuen Auftrieb gegeben.

Potential des nichtfossilen Wasserstoffs

Angesichts eines Weltenergieverbrauchs von rund 300 EJ/a (1980) und weiter anhaltendem Bevölkerungswachstum stellt sich die Frage, ob nichtfossiler Wasserstoff jemals in einer Grössenordnung produziert werden kann, um die fossilen Energieträger spürbar zu entlasten.

Diese globale Frage wurde in begrenztem Rahmen auch für schweizerische Verhältnisse untersucht.

Aus Kernkraft

Kernkraftwerke dienen bis heute primär zur Stromerzeugung, wobei sie am günstigsten in der Grundlast betrieben werden. Als Baulinie hat sich praktisch überall der Leichtwasserreaktor durchgesetzt. Weltweit sind rund 380 Kraftwerke mit 260 GW Leistung in Betrieb und weitere 150 GW im Bau [3].
Bis zum Jahr 2030 rechnet man mit etwa 600 GW installierter Kraftwerksleistung. Unter diesen Voraussetzungen zeichnet sich noch in der ersten Hälfte des nächsten Jahrhunderts eine Verknappung der bekannten und zusätzlichen Uranvorräte ab.

Eine nukleare Wasserstoffproduktion von mehreren 10^{12} m³/a setzt eine Vervierfachung der genannten Kraftwerkskapazität voraus. Selbst der massive Einsatz der Brütertechnologie könnte nach Ansicht von Fachleuten kurzfristig nicht wesentlich dazu beitragen, die Uranressourcen zu «strecken» [4]. Davon abgesehen hat die nukleare Wasserstoffoption unter den gegenwärtig vorherrschenden gesellschaftspolitischen Randbedingungen nur wenig Aussicht auf Erfolg.

Aus Wasserkraft

Eine Potentialabschätzung in [5] geht davon aus, dass sich die Jahresproduktion an hydroelektrischer Energie von gegenwärtig etwa 1700 TWh bis zum Jahr 2030 mehr als verdoppeln wird. In den OECD-Ländern könnte ein Drittel des Zuwachses für die elektrolytische Wasserspaltung verwendet werden, was knapp 100 Mrd. Nm³ Wasserstoff entspräche bzw., 3,5% des dannzumaligen Bedarfs. Auf der Basis dieser Zahlen stellt die Wasserkraft global allenfalls eine Ergänzung zu anderen Wasserstofftechnologien dar.

In der Schweiz stammen rund 60% der heimischen Elektroenergie aus Wasserkraftwerken. Bedingt durch das hydrologische Angebot ist die hydraulische Stromerzeugung im Sommer höher als im Winter. Da sich die Nachfrage nach Elektroenergie genau umgekehrt verhält, produzieren die Wasserkraftwerke «Überschuss-Energie», die theoretisch für die Wasserstoffproduktion genutzt werden könnte.

Wie in [6] näher erläutert, basiert der Energieverkehr im europäischen Verbundnetz auf einem Ausgleich frei verfügbarer Energiemengen im Sommer und im Winter. Der Ausgleich erfolgt nach streng wirtschaftlichen Kriterien, wobei das Preisniveau dieser Energie durch die arbeitsabhängigen Kosten der substituierten Energie (z.B. aus Kohlekraftwerken) festgelegt ist. Über das Jahr gesehen, gleichen sich Energieimport und -export weitgehend aus; nur wenige Länder (u.a. Frankreich) können in Netto grössere Strommengen abgeben.
Die kurzfristig und in begrenzten Mengen vorhandene Überschussenergie wird auf dem Spotmarkt abgesetzt. Eine Umwandlung in Wasserstoff wäre nur mit geringer Auslastung der Anlagen und mit relativ hohen Kosten möglich. Erst wenn die Umwandlungsprodukte (H_2, MTH,.....) im Marktwert steigen, lohnt es sich, grössere Mengen zu höheren Preisen zu produzieren.

Aus Windenergie

Eine Potentialabschätzung für windreiche Küstenregionen in Patagonien, Somali und Südwestaustralien rechnet mit einer jährlichen Wasserstoffproduktion von 60 Mrd. Nm³. Daraus folgt, dass grossflächige Windanlagen zwar regional, nicht aber global zur Wasserstofferzeugung beitragen könnten [5].

Aus Solarenergie

Für eine kostengünstige solare Wasserstofferzeugung eignen sich am besten ebene, vegetationslose Flächen mit festem Untergrund, wenig Wind und wenig Niederschlag. Kies- und Steinwüsten, wie sie in Nordafrika, auf der Arabischen Halbinsel und in Australien vorkommen, erfüllen diese Kriterien optimal.

Im Rahmen einer Studie des Geographischen Instituts der Universität Stuttgart wurden rund 600 000 km² als «sehr gut geeignet» eingestuft. Auf dieser Fläche wäre es theoretisch möglich, jährlich 10^{13} Nm³ Wasserstoff zu produzieren; das ist ein mehrfaches des angenommenen Bedarfs im Jahr 2030.

In der Schweiz wird das Gesamtpotential für Solarzellenanlagen mit rund 7,7

GW bzw. 11 TWh angegeben (realisierbares Potential im Jahr 2025). Im Extremfall könnten nach diesem Szenario jährlich etwa 3 Mrd. Nm³ Wasserstoff erzeugt werden, was etwa 6% des heutigen fossilen Endenergieverbrauchs entspricht.

Vergleich grosstechnischer nichtfossiler Systeme zur Wasserstofferzeugung

Um eine Vorstellung vom technischen Aufbau, von den Kosten und den Umweltauswirkungen grosstechnischer Wasserstoffanlagen zu gewinnen, wurden in [5] typische Anlagen modelliert, die, jeweils mit einer Elektrolyseanlage gekoppelt, jährlich 15 Mrd. Nm³ Wasserstoff erzeugen sollen, optimale Standortverhältnisse und fortschrittliche Technik vorausgesetzt. Es handelt sich dabei um

- ein Solarzellenkraftwerk
- eine Solarturmanlage (solarthermisch)
- eine Parabolspiegelanlage mit Stirlingmaschine
- einen Windenergiekonverter

die mit einem Kernkraftwerk und einem konventionellem Wasserkraftwerk verglichen werden.

Rohstoffbedarf

Im Quervergleich weisen solarthermische Anlagen den höchsten Materialbedarf auf, was zum Teil auf das System und andernteils auf die aufwendigen Referenzanlagen zurückzuführen ist. Solarzellenanlagen liegen deutlich niedriger; sie sind quantitativ mit Wasserkraftwerken vergleichbar. Windenergiekonverter benötigen von allen regenerativen Anlagen am wenigsten Material.

Die Wasserstoffproduktion mit Kernenergie schneidet hinsichtlich Rohstoffbedarf am günstigsten ab, wobei allerdings der Aufwand für Gewinnung, Anreicherung, Aufbereitung und Endlagerung des Kernbrennstoffs ausgeklammert ist.

Allen Anlagen gemeinsam ist der hohe Anteil an Beton, gefolgt von Stahl und Glas. Von der Verfügbarkeit der Rohstoffe her bestehen keine Restriktionen, grosstechnische Wasserstoffanlagen auf der Basis regenerativer Energie zu bauen und zu betreiben.

Energierückzahlzeit

An alle regenerativen Energieanlagen wird die Forderung gestellt, die zum Aufbau benötigte (fossile) Energie möglichst rasch durch regenerative Energie zu kompensieren. Als Mass dafür, wie gut diese Forderung erfüllt ist, gilt die *Energierückzahlzeit*. Diese sollte in jedem Fall erheblich kleiner sein als die Lebensdauer des betrachteten Systems. Das Windenergie-Wasserstoffsystem weist die kleinste Energierückzahlzeit auf (knapp 1 Jahr), gefolgt von den Solaranlagen mit zwei bis drei Jahren. Die Photovoltaikvariante weist eine relativ grosse Bandbreite auf (1,5 bis 3,5 Jahre), je nachdem, welche künftige Herstellungstechnik man zugrundelegt. Ein heute kommerziell angebotenes monokristallines Solarmodul der 50 W-Klasse benötigt unter den Einstrahlungsbedingungen des Schweizerischen Mittellandes immerhin noch 6–7 Jahre.

Anlagekosten und Wirtschaftlichkeit

Von den vorgestellten Anlagen ist diejenige mit Windkraft am kostengünstigsten, die mit Solarzellen am teuersten. Bei allen Systemen beanspruchen Energiesammlung und Stromerzeugung rund 70–80% aller Kosten. Aufbauend auf einer Reihe von plausiblen Annahmen lassen sich die Kosten des solaren Wasserstoffs abschätzen und mit denen des fossil erzeugten Wasserstoffs (z.B. aus Erdgas) vergleichen.

Den fossilen Rohstoffen wird hierbei ein Preisanstieg von 3–5% im langjährigen Mittel unterstellt. Hier zeigt sich nun, dass die Gestehungskosten der regenerativen Wasserstoffanlagen auch unter optimistischen Annahmen noch zu hoch sind, um den Wasserstoff im Jahr 2000 zu marktfähigen Preisen anbieten zu können. Erst mit weiteren technischen Verbesserungen und Kostensenkungen könnte nach 2000 die Konkurrenzfähigkeit zu fossilem Wasserstoff erreicht werden.

Auswirkungen auf die Umwelt

Die relativ hohe Umweltverträglichkeit der regenerativen Wasserstofferzeugung und der Wasserstoffanwendung ist ein Hauptargument für die Wasserstoffwirtschaft. Gänzlich umweltneutral ist freilich auch diese Technik nicht:

- Rohstoff- und Energieverbrauch zum Bau solarer Wasserstoffanlagen sind beträchlich höher als beim Bau von fossilen oder nuklearen Kraftwerken.
- bedingt durch die geringe Leistungsdichte des Primärenergieträgers (Sonne, Wind) und durch die relativ niedrigen Wirkungsgrade bei der Energieumwandlung ist der Flächenbedarf solarer Anlagen sehr hoch.
- durch die Überdeckung grosser Flächen wird die natürliche Albedo verändert, was sich lokal positiv wie auch negativ auswirken kann.
- die Eingriffe in den natürlichen Wasserkreislauf können das lokale Klima beeinflussen.

Der interkontinentale Transport von flüssigem oder gasförmigem Wasserstoff unterscheidet sich hinsichtlich seiner ökologischen Auswirkungen und seines lokalen Gefahrenpotentials nicht wesentlich vom heutigen Erdgastransport. Eine Verschmutzung von Meeren oder Küstensäumen, wie sie heute durch Unfälle von Öltankern oder Bohrplattformen verursacht werden können, ist beim Wasserstofftransport ausgeschlossen.

Die nukleare Wasserstoffproduktion ist wie jeder offene Prozess mit der ständigen Freisetzung und zunehmenden Anhäufung von Abfällen belastet, die in diesem speziellen Fall mit erheblichem Aufwand verdichtet und sicher verwahrt werden müssen (Endlagerung), um Schäden an Mensch und Natur zu verhindern.

In seiner Anwendung zeichnet sich der Wasserstoff vor allem dadurch aus, dass beim Verbrennen kein Kohlendioxid (CO_2) entsteht. Der ständigen Anreicherung der Atmosphäre mit CO_2 die heute von vielen Fachleuten als potentielle Gefahr für das globale Klima betrachtet wird, könnte damit wirksam begegnet werden.

Das einzig schädliche Verbrennungsprodukt von Wasserstoff tritt in Form von Stickoxiden (NO und NO_2) auf. Mit der katalytischen Oxidation bei niedriger Temperatur und der Verwendung von Sauerstoff (anstelle von Luft) lässt sich der Idealfall einer absolut schadstofffreien Verbrennung erreichen.

Wasserstoff in der Schweizer Energiewirtschaft

Aufgrund der heutigen und der zukünftig prognostizierten Bedarfsstruktur lässt sich abschätzen, welche Rolle der nichtfossile Wasserstoff in der schweizerischen Energiewirtschaft spielen könnte. Denkbar wären folgende Einsatzmöglichkeiten:

- Einspeisung in die bestehende Gasversorgung, um Bedarfsspitzen abzubauen.
- Integrierte Energieversorgung (Kraft-Wärme) über wasserstoffgespeiste Brennstoffzellen in emmissionsgefährdeten Ballungszentren
- Dezentrale saisonale Energiespeicherung in Verbindung mit Solaranlagen
- Kraftstoffversorgung für ausgewählte Verkehrssysteme, z.B. den öffentlichen Personennahverkehr mit wasserstoffbetriebenen Bussen.

Die genannten Anwendungsmöglichkeiten sind als Marktnischen zu verstehen. Solange sich die Konkurrenzfähigkeit des Wasserstoffs gegenüber fossilen Energieträgern nicht grundlegend ändert, ist keine merkliche Entlastung der Energie- und Schadstoffbilanz zu erwarten.

Was die heimische Produktion von Wasserstoff betrifft, so lassen sich vor dem Hintergrund der Energieszenarien folgende Hypothesen aufstellen:

- Wasserkraft und Kernkraft können in Schwachlastzeiten zur Wasserstofferzeugung herangezogen werden. Die diesbezüglichen Mengen fallen allerdings kaum ins Gewicht. Eine Wettbewerbsfähigkeit ist unter den angenommenen Preisentwicklungen für Erdgas und Elektroenergie (als konkurrierende Energieträger) nicht gewährleistet.
- Solarer Wasserstoff aus heimischer Produktion könnte einige Prozent des fossilen Energieverbrauchs substituieren. Bei den angenommenen Gestehungskosten des Solarstroms ist jedoch in absehbarer Zeit keine Konkurrenzfähigkeit (etwa gegenüber Erdgas) zu erreichen.

Somit scheint es nach den heutigen Vorstellungen sehr unwahrscheinlich, dass nichtfossiler Wasserstoff vor der Mitte des nächsten Jahrhunderts eine wesentliche Rolle in der Energiewirtschaft spielen wird.

Zusammenfassung

Die weltweiten Aktivitäten lassen erkennen, dass das enorme Zukunftspotential der Wasserstofftechnologie erkannt worden ist. Gegenwärtig geht es darum, Techniken zu entwickeln und zu verfeinern, die den späteren Einstieg in eine Wasserstoffenergietechnik ermöglichen. In der Schweiz wurden wichtige Vorarbeiten auf dem Feld der photochemischen Wasserspaltung und bei der Wasserstoffspeicherung (MTH) geleistet.

Seit kurzer Zeit besteht ein Arbeitskreis, der sich mit der Entwicklung und den Anwendungsmöglichkeiten bestimmter Brennstoffzellentypen auseinandersetzen soll. Eine kleine Demonstrationsanlage zur photovoltaischen Wasserstofferzeugung ist geplant. Die genannten Aktivitäten sollen dazu dienen, Erfahrungen zu sammeln und ein breites Fachpublikum mit den offensichtlichen Vorzügen des Wasserstoffs bekannt zu machen.

Literatur

[1] *N. N.:* Alternative Energie Wasserstoff. Studie im Auftrag des Bundesamts für Energiewirtschaft erarbeitet von der Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG, Schriftenreihe Nr. 5 der Expertengruppe Energieszenarien (EGES) Bern, EDMZ, 1987

[2] *Larcher, M.-Th.:* «Aus dem Auspuff kommt reines Wasser», Sonnenenergie 1986, Nr. 5, S. 29 ff

[3] *Fischer, P.U.:* «Elektrizität und Kernenergie», Bulletin SEV/VSE 78 (1987), Nr.2, S. 88 ff

[4] *Baumberger, H.:* «Globale Energieversorgungsengpässe», Bulletin SEV/VSE 78 (1987), Nr. 2, S. 77 ff

[5] *Winter, C.-J., J. Nitsch* (Hrsg.): «Wasserstoff als Energieträger», Berlin, Springerverlag, 1986

[6] *Glavitsch H.:* «Verwertung von elektrischer Überschussenergie», Bulletin SEV/VSE 77 (1986), Nr. 9, S. 495 ff

Adresse des Verfassers: Dr.-Ing. *H. Prechtl,* dipl.El.-Ing., Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG, Abt. Alternativenergie, 8034 Zürich.

Baha'i-Haus der Andacht, New Delhi, Indien

Das im Jahr 1986 nach sechsjähriger Bauzeit fertiggestellte Baha'i-Haus der Andacht - auch «Lotosblume von Bahapur» oder «der Tadsch Mahal des 20. Jahrhunderts» genannt -, stellt eines der bedeutendsten Bauwerke unserer Zeit dar.

VON MOHSEN NAIMI, ZÜRICH

Das Kernstück dieser Anlage ist ein 40,8 m hoher, lotosförmiger Überbau mit einem Durchmesser von 70 m, der den 2500 Plätze umfassenden Versammlungsraum beherbergt. Der Überbau besteht aus 27 äusseren Schalen und einer aus Schalen und Rippen zusammengesetzten Innenkuppel und stützt sich auf 9 ringförmig um die zentrale Halle angeordnete Bögen ab (Bild 1).

Dieses Haus der Andacht in New Delhi,Indien, ist der siebente und jüngste Tempel der Baha'i-Religion. Die anderen befinden sich in Wilmette (USA), Kampala (Uganda), Sydney (Australien), Frankfurt (BRD), Panama City (Panama) und Apia (West Samoa). Alle diese Bauwerke wurden nach der Hauptanforderung der Bauherrschaft, nämlich einer neunseitigen Zentralhalle mit natürlicher Beleuchtung, erstellt. Ferner musste der Tempel in New Delhi auch den traditionellen Ansprüchen Indiens genügen.

Mitte der siebziger Jahre wurde Fariburz Sahba - dank seines überzeugenden Konzeptes - unter vierzig Mitbewerbern ausgewählt und beauftragt, sein Projekt in die Wirklichkeit umzusetzen. Zum Symbol der Lotosblume schrieb F. Sahba folgendes: «Die Lotosblüte hat nicht nur grosse Bedeutung für alle Religionen Indiens, sondern ich halte sie für eine der perfektesten Erscheinungen überhaupt. Sie ist absolut symmetrisch und von exquisiter Schönheit. Der Lotos wächst in einem Sumpf und erzeugt eine Blüte von makelloser Reinheit. Für mich ist sie die endgültige Manifestation des Göttlichen in unserer Welt.»

Übersicht - Projektbeschreibung

Der gesamte Tempelkomplex besteht aus dem eigentlichen Haus der Andacht, dem Anbauteil, welcher die Empfangsräume, die Bibliothek und das Verwaltungszentrum umfasst sowie dem Bereich für die sanitären Anlagen. Der Tempel selbst hat ein Untergeschoss, in dem die elektrischen Anlagen und sonstige Installationen untergebracht sind und einen lotosförmigen Überbau, der den Versammlungsraum beherbergt (Bild 2).

Rund um den Lotosbau umgeben Wege mit gebogenen Balustraden, Brücken und Treppen die neun Wasserbecken, welche die schwimmenden Blätter der Lotosblume darstellen. Abgesehen von ihrem ästhetischen Wert tragen diese Wasserbecken zur Klimatisierung des Gebäudes bei (Bild 2).