

Wasserelektrolyse, Basis einer künftigen Wasserstoffwirtschaft

Autor(en): **Braun, M.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **96 (1978)**

Heft 36: **SIA-Heft, 4/1978: Grosskalibrige Abwasserkanalbauten der Stadt Bern**

PDF erstellt am: **23.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-73740>

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.

Tabelle 2. Baukosten

Objekt	Kosten total (in Mio Fr.)	Kosten spezifisch (Fr./per)
Sammelkanäle mit Untertagevortrieb:		
- SK Wangental (Abschnitt 1/2) Vortrieb im kohäsionslosen Locker- material mit Kontrollschächten und Einleitung der Nebenkanäle; Lichte Weite 3,00 m; Länge = 1493 m	11,260	7 475.-/lfm
- SK Holenacker (Abschnitt 3) im Lockermaterial mit Kohäsion, mit Entlüftungsschacht; Lichte Weite 3,68 m; Länge = 400 m	2,681	6 702.-/lfm
- Entlastungsstollen (Abschnitt 4) im Molassefels mit Mergelschichten; Lichter Querschnitt 10,1 m ² ; Länge = 1066 m	5,347	5 016.-/lfm
Spezialbauwerke im Tagbau		
- Vereinigungsbauwerk von 3 Kanälen im Lockermaterial mit GW-Absenkung; Höhe 27 m; Aushub 4900 m ³ ; Beton 1015 m ³ für total rd. 90 m ³ /s	1,913	21 257.-/m ³ /s
- Regenauslass, zum Teil in Locker- material, zum Teil in Fels; Höhe etwa 35 m; Aushub 4450 m ³ ; Rühlwand 675 m ² ; Entlastungs- wassermenge 90 m ³ /s	2,002	22 243.-/m ³ /s
- Auslaufbauwerk des Entlastungs- stollens in den Vorfluter im Molasse- fels für etwa 110 m ³ /s	0,369	3 355.-/m ³ /s

Zu Beginn der Vortriebsarbeiten hatte die Unternehmung lange Ausfälle infolge Maschinenschäden zu verzeichnen. Zur Ausführung der vorgeschriebenen Sicherungsarbeiten (Fels-

anker+Netze oder Gunit) musste der Vortrieb gedrosselt werden. Zeitweilig betrug die reine Vortriebszeit bloss sechs Stunden im Arbeitstag.

Technische Daten der Teilschnittmaschine:

Gewicht	29 t
Elektr. Leistung	120 PS
Fräsbereich seitlich	3,4 bis 4,0 m
Fräsbereich in der Höhe	3,3 bis 5,10 m
Grösster Fräskopf-Durchmesser	813 mm
Schneidzähne	32 Stück

Auslaufbauwerk, Abschnitt 4

Das Auslaufbauwerk steht auf Molassefels. Die Aushub- und Betonierungsarbeiten wurden im Schutze einer bis auf den Fels geschlagenen *Spundwand* ausgeführt. Die wichtigsten Ausmasse lauten:

Felsausbruch	1080 m ³
Beton	380 m ³
Schalung	600 m ²
Armierung	9 t

Baukosten

Die Baukosten der grossen Sammelkanäle von total rund 3 km Länge mit Schächten und Spezialbauwerken betragen 23,8 Mio Franken (ohne Honorare). Alle drei Bauabschnitte konnten innerhalb des Kostenvoranschlages abgerechnet werden. Die Tabelle 2 zeigt die Kosten der einzelnen Objekte.

Adresse der Verfasser: H. Grossen, dipl. Ing. ETH, und W. Müller, Ing. SIA, c/o Ingenieur-Unternehmung AG Bern, Thunstr. 2, 3000 Bern 6

Wasserelektrolyse, Basis einer künftigen Wasserstoffwirtschaft

Von M. Braun, Baden

Die Primärenergien der Zukunft (Kohle, Wasserkräfte, Kern- und Sonnenenergie) fallen meist nicht am gewünschten Ort, nicht zur gewünschten Zeit und nicht in der gewünschten Form an. Die Verbindung zwischen Primärenergie und Energieendverbrauchern übernehmen Sekundärenergieträger wie beispielsweise die Elektrizität.

Ein *Sekundärenergieträger*, von dem viele Fachleute annehmen, dass er in Zukunft neben der *Elektrizität* und der *Fernwärme* zur Nutzung der Abwärme von Wärmekraftwerken eine wichtige Rolle spielen werde, ist der Wasserstoff. Er weist nämlich folgende *Vorzüge* auf:

- Er ist kompatibel mit den zukünftigen Hauptenergiequellen, d.h., er lässt sich sowohl aus fossilen (Kohle, Teersande) als auch mit Hilfe nicht fossiler (Kernkraftwerk, geothermischen und solaren) Energiequellen aus Wasser herstellen.
- Er ist kompatibel mit andern sekundären Energieträgern, z.B. mit der Elektrizität. Mit ihrer Hilfe kann er durch Elektrolyse aus dem Wasser gewonnen und in Brennstoffzellen oder Gasturbogeneratoren wieder in sie zurückverwandelt werden. Er eignet sich auch als Brennstoff für Heizkraftwerke.
- Er ist kompatibel mit den meisten Energieendformen, d.h., er lässt sich beim Endverbraucher in elektrische Energie umwandeln. Er kann aber auch direkt in Wärmekraftmaschinen (wie Kolbenmotoren oder Turbinen) oder in

Haushalt und Industrie zu Wärmegewinnungszwecken verbrannt werden.

- Wasserstoff ist speicherbar, sowohl im gasförmigen (Druckflasche, Aquiferspeicher) als auch im flüssigen (Kryotanks) oder festen Zustand (Metallhydride).
- Bei der Verteilung von Wasserstoff kann auf bestehende Infrastrukturen zurückgegriffen werden, z.B. auf Erdgasnetze nach geringfügigen Modifikationen.
- Er ist umweltfreundlich. Wasserstoff lässt sich aus Wasser herstellen. Einziges Nebenprodukt ist dabei Sauerstoff. Bei der Verbrennung von Wasserstoff entsteht wieder nur Wasser. Das Verbrennungsprodukt NO_x kann bei richtiger Prozessführung vermieden werden. Wasserstoff ist daher der sauberste chemische Brennstoff überhaupt; seine Verbrennung beeinflusst auch den CO₂-Kreislauf der Natur nicht.
- Er ist bezüglich Sicherheit im praktischen Einsatz dem Erdgas ungefähr gleichzustellen.

Gegenwärtiger Stand und Entwicklungsmöglichkeiten

Schon heute gibt es einen ansehnlichen Markt für Wasserstoff. Damit ist selbstverständlich auch ein breites Know-how für Erzeugung, Speicherung Transport und Verwendung vorhanden. Dieser Markt hat ein Volumen von über 270 × 10³ m³, entsprechend 25 × 10² t und wächst mit rund 7% je Jahr (Tab. 1).

Etwa 95% stammen aus *fossilen Quellen*, zur Hauptsache aus *Naphtha* (einem Erdölderivat) und *Erdgas*. Rund 15% werden aus *Kohle* erzeugt, nur 1–2% durch *Wasserelektrolyse*, dem Prozess also, dem man die Hauptaufgabe bei der zukünftigen Wasserstoffherzeugung aus nicht fossilen Energiequellen zuordnet.

Der überwiegende Teil des Wasserstoffmarktes ist ein *gebundener Markt*, d.h., der Wasserstoff wird beim Verbraucher erzeugt, meist in direkt auf den spezifischen Zweck zugeschnittenen Anlagen. Mehr als 50% der Weltproduktion wird in der *Kunstdüngerindustrie* (für Ammoniak) gebraucht, rund 40% in *Raffinerien*.

Die *Herstellverfahren* von Wasserstoff aus fossilen Quellen sind seit Jahren kommerziell erprobt; das wichtigste ist die *Wasserdampfreaktion mit Naphtha oder Erdgas*. Die *Wasserelektrolyse* ist ebenfalls ein erprobtes Verfahren; in den letzten Jahren sind neue Ideen zu seiner Verbesserung aufgetaucht, von denen hier die Rede sein wird.

Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff aus *Wärme* stehen noch im Forschungsstadium. Mit ihrer Kommerzialisierung ist in diesem Jahrhundert nicht mehr zu rechnen.

Dem heutigen Markt entsprechend besteht ein *recht grosses Know-how in Transport und Speicherung von kleinen Wasserstoffmengen*. Man hat aber auch 40 Jahre Erfahrung mit einem 400 km langen *Industrierohrleitungsverbundsystem* für Wasserstoff im *Ruhrgebiet*. Die *Untertagespeicherung muss hingegen noch praktisch erprobt werden*.

Über Transport und Lagerung von flüssigem Wasserstoff hat man im Rahmen des *amerikanischen Weltraumprogramms* grosse Erfahrungen gewonnen. So wird Wasserstoff heute in kommerziellem Rahmen flüssig in Eisenbahn- und Tanklastwagen transportiert und in grossen Kryotankanlagen gelagert. Grössere Flüssiggasleitungen sind hingegen noch nicht kommerziell erprobt.

Für automotiv Anwendungen steht die Speicherung von *Wasserstoff in Form von Metallhydriden* im Vordergrund. Erste *Versuchsautomobile* zeigten sehr ermutigende Resultate mit diesem System.

Anwendungen von Wasserstoff als *Chemierohstoff* und als *Brenngas* haben sich schon lange kommerziell bewährt. Wasserstoff hat sich ausserdem als *bester Brennstoff für Brennstoffzellen* erwiesen; ein kommerzieller Durchbruch dieser Technik ist aber bis jetzt ausgeblieben. Bei der Verwendung von Wasserstoff in *Kolbenmotoren* und *Gasturbinen* gibt es keine grossen technischen Hindernisse. Beide Arten von Antrieben wurden bereits erfolgreich mit Wasserstoff geprüft. Es waren jeweils nur kleine Änderungen gegenüber dem Betrieb mit konventionellen Brennstoffen nötig.

Für eine Einführung der Wasserstoffwirtschaft auf der *Basis nicht fossiler Energiequellen* müssen besonders die Wasserstoffgewinnungs- sowie auch die Transport- und Speichertechniken noch verbessert werden. Die Einführung der Wasserstoffwirtschaft kann fliessend erfolgen; das Tempo hängt von der Wirtschaftlichkeit ab.

Entwicklungsschwerpunkt bei BBC auf dem Gebiet der Wasserstoffwirtschaft ist die *Wasserelektrolyse*, und zwar aus drei Gründen:

1. Sie liegt BBC als einem Elektrokonzern am nächsten;
2. Die Entwicklung einer verbesserten Elektrolýsetechnik ist Bedingung für den Durchbruch der Wasserstoffwirtschaft;
3. BBC blickt auf eine 75jährige Tätigkeit auf diesem Gebiet zurück. Dies macht das Unternehmen zu einem der erfahrensten Hersteller von Wasserelektrolyseanlagen. Für das *Kunstdüngewerk Kima in Assuan* baut BBC eine der grössten Wasserelektrolyseanlagen der Welt. Dabei handelt es

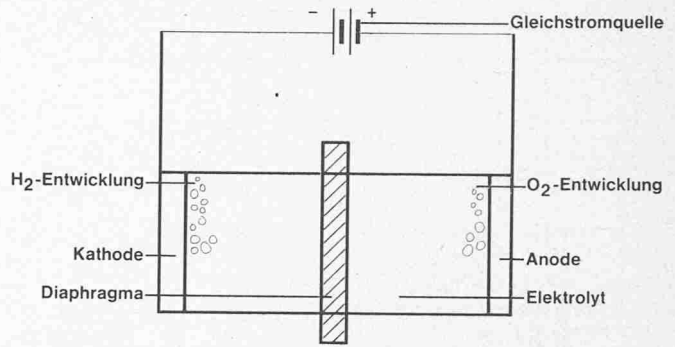


Bild 1. Prinzipschema der Wasserelektrolyse

Tabelle 1. Herkunft und Verbrauch von Wasserstoff heute

Marktvolumen: 1974 $270 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \approx 25 \cdot 10^6 \text{ t}$
Wachstumsrate: etwa 7% pro Jahr

a) Rohstoffe und Herstellungsverfahren (Welt 1974)

Rohstoff	Verfahren	Prozentanteil
Rohöl	Steam reforming	} 48
	Partielle Oxidation	
Erdgas	Steam reforming	} 30
	Cracking	
Kohle	Vergasung	} 16
	Dampf / Eisen Prozess	
Chloralkali-Elektrolyse		3
Diverse	(z. B. Wasserelektrolyse)	3

b) Verbraucher (Welt 1974)

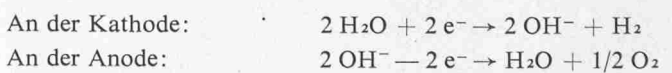
Verbraucher	Prozentanteil
Ammoniak	54
Raffinerien	38
– als Hydrierwasserstoff	22
– als Heizgas	16
Methanol	6
Diverses	2

sich um den Ersatz einer älteren Anlage anderer Herkunft, der 1980 abgeschlossen sein wird. Bei einem Elektrizitätsverbrauch von rund 160 MW wird die Kapazität 32400 m³ Wasserstoff pro Stunde betragen.

Neben der laufenden Entwicklung zur Verbesserung der bestehenden Technik laufen zur Zeit Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an der sogenannten 2. Elektrolyseurgeneration. Doch zunächst zum Prinzip der Wasserstoffelektrolyse.

Prinzip der Wasserelektrolyse

Bei der Wasserelektrolyse wird Gleichstrom an eine elektrochemische Zelle mit inerten Elektroden angeschlossen (Bild 1). Der Elektrolyt muss so beschaffen sein, dass nur die Wasserzersetzungreaktion stattfinden kann. Bei der heutigen Elektrolýsetechnik wird eine wässrige Kalilauge verwendet. An den Elektroden laufen dann folgende Reaktionen ab:



Dies ergibt als Brutto-reaktion die Zersetzung des Wassers nach



Dazu ist theoretisch eine elektrische Mindestspannung E_{th} notwendig, die der freien Energie ΔG dieser Reaktion entspricht.

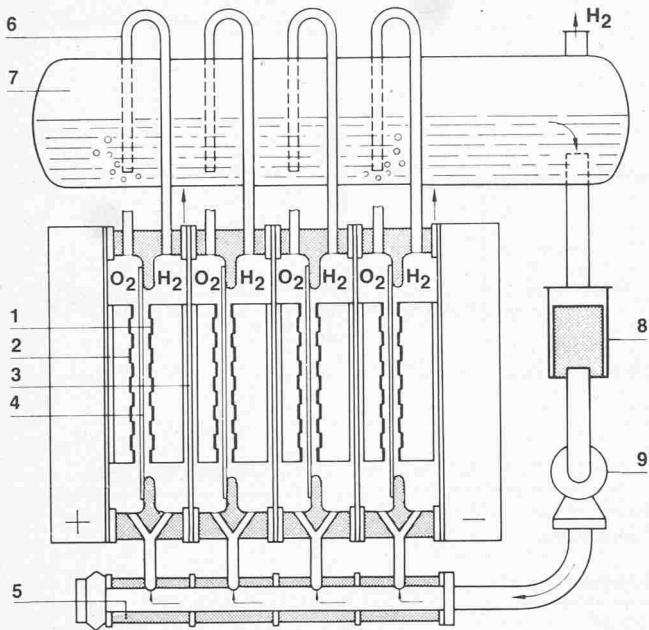


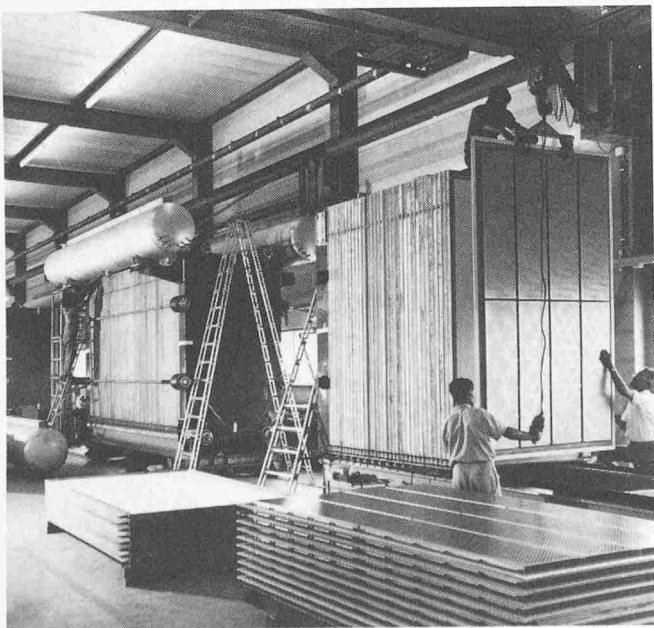
Bild 2. Schnittbild eines heutigen BBC-Elektrolyseurs (schematisch)

- | | |
|---------------------------------|---|
| 1 Kathode | 6 Überlaufrohre (nur für Wasserstoffseite gezeichnet) |
| 2 Anode | 7 Gasabscheider |
| 3 Zelltrennwand | 8 Elektrolytfilter |
| 4 Diaphragma | 9 Elektrolytpumpe |
| 5 Verteilleitung für Elektrolyt | |

Weitere Forderungen an den Elektrolyseur

Von einem Wasserelektrolyseur ist selbstverständlich auch zu fordern, dass er die Produktgase Wasserstoff und Sauerstoff vollständig getrennt herstellt, da sonst das explosive *Knallgas* entstehen würde. Wasserstoff bildet mit Luft bei Konzentrationen zwischen 4 und 75 Vol.-% H₂ bzw. mit reinem Sauerstoff zwischen 4 und 94% H₂ Knallgas. Ist der Wasserstoffgehalt kleiner als 4 oder grösser als 75 bzw. 94%, so kann das Gemisch nicht explodieren, wohl aber verbrennen. Die Trennung von Wasserstoff und Sauerstoff wird im Elektrolyseur durch ein flüssigkeitsdurchlässiges, aber gasundurchlässiges Diaphragma aus Asbestgewebe bewirkt, das Anoden- und Kathodenraum voneinander trennt.

Bild 3. Montage von Elektrolyseuren



Entscheidend aber ist die *Wirtschaftlichkeit* des Verfahrens. Dabei muss zwischen der Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu Konkurrenzverfahren *und* zur verfahrenseigenen Optimierung der Wirtschaftlichkeit unterschieden werden. Da die elektrolytische Wasserstoffgewinnung zu Energiezwecken gegenüber den fossilen Verfahren erst beim Auslaufen der Vorräte an Erdöl und Erdgas wirtschaftlich konkurrenzfähig wird, soll hier nur die *Optimierung von Betriebs- und Investitionskosten* der Wasserelektrolyse besprochen werden.

Bei konstanter Stromdichte ist die produzierte Wasserstoffmenge der Elektrodenfläche proportional. Die spezifischen Investitionskosten, das sind die Investitionskosten je m² Elektrodenfläche, hängen sehr wesentlich von der Konstruktionsart und der Auswahl der verwendeten Materialien ab. Von BBC wird dabei die raumsparende sogenannte *Bipolarbauweise* angewendet, bei der bis zu 80 Zellen elektrisch in Serie geschaltet sind, der Strom aber nur an die beiden Endzellen angeschlossen wird. Die übrigen Zellwände wirken als Spannungsteiler. Die Bipolarbauweise ermöglicht eine sehr rationelle Fertigung, weil viele identische Teilstücke verwendet werden. Die Bilder 2, 3 und 4 zeigen das Bauschema eines heutigen BBC-Elektrolyseurs sowie Montage und Einsatz.

Das zentrale Problem: die Zellspannungscharakteristik

Die Betriebskosten eines Wasserelektrolyseurs sind vor allem eine Funktion des Wirkungsgrades und damit der Zellspannung; Überwachung und Unterhalt gehen bei guten Elektrolyseuren nämlich nicht wesentlich in die Betriebskosten ein.

Der *Wirkungsgrad* der Wasserelektrolyse ist gegeben durch:

$$\eta_{el} = \frac{1,48}{\text{Zellspannung in Volt}}$$

Die Reduktion der Zellspannung bildet daher die wichtigste Aufgabe bei der Verbesserung der Elektrolysetechnik. Die Zellspannung U_z setzt sich im wesentlichen additiv aus vier Termen zusammen:

$$U_z = E_{th} + \eta_a + \eta_k + iR$$

wobei:

E_{th} = theoretisch notwendige Zersetzungsspannung

η_a = anodische Überspannung (materialbedingt)

η_k = kathodische Überspannung (materialbedingt); die beiden Überspannungen werden vom Ladungsdurchtritt durch die Phasengrenze Elektrode-Elektrolyt verursacht.

iR = Ohmsche Verluste beim Durchgang des Stroms durch den Elektrolyten

i = Stromdichte

R = flächenbezogener Ohmscher Widerstand. Er hängt hauptsächlich von der Leitfähigkeit und dem Gasgehalt des Elektrolyten, von der Durchlässigkeit des Diaphragmas und vom Abstand der Elektroden ab.

Bei 25 °C beträgt E_{th} 1,23 V und nimmt mit steigender Temperatur um 0,82 mV je °C ab, bei einer Verzehnfachung des Druckes um 44,4 mV zu. Auch η_a und η_k nehmen mit wachsender Temperatur leicht ab.

Aus der Gleichung für die Zellspannung ist ersichtlich, dass diese mit der Stromdichte ungefähr linear ansteigt. Ferner verläuft die Stromdichte nahezu umgekehrt proportional zu den Investitionskosten, d.h., ein Apparat mit hoher Stromdichte produziert viel Gas je m² Elektrodenfläche und umgekehrt. Das entspricht der in der Technik häufigen Situation,

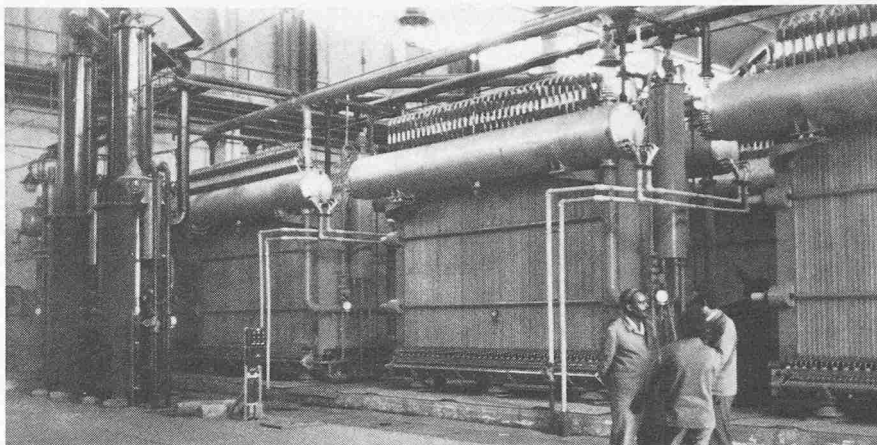


Bild 4. Wasserstoffproduktion mit BBC-Elektrolyseuren in der Grossanlage KIMA in Assuan, Ägypten. Links: Ein Doppelaggregat für Gaswaschung und Kühlung

dass bei stärkerer Belastung der Apparatur (d. h. bei höherer Stromdichte) die spezifischen Investitionskosten abnehmen, die spezifischen Betriebskosten (wegen des sinkenden Wirkungsgrades) dagegen steigen.

Für jede Anlage muss daher individuell das wirtschaftliche Optimum zwischen diesen beiden Kostebanteilen ermittelt werden, zumal dieses Optimum natürlich sehr stark vom Strompreis und von der Anzahl Betriebsstunden je Jahr abhängt. BBC hat zur Berechnung dieses Optimums Rechenprogramme ausgearbeitet.

Bei konstanter Stromdichte kann die Zellspannung reduziert und damit der Wirkungsgrad gesteigert werden, durch:

- Erhöhung der Betriebstemperatur,
- Verwendung sogenannter aktivierter Elektroden, d. h. Elektroden mit besonders kleiner Überspannung,
- Reduktion des flächenbezogenen Ohmschen Widerstandes R .

Diese technischen Möglichkeiten wurden für die bestehende Elektrolyseurgeneration in einem dreijährigen Entwicklungsprogramm voll ausgeschöpft (Tab. 2). Das Programm wird in diesem Jahr auslaufen. Trotz der grossen Fortschritte zeigten sich aber auch klare Grenzen dieser Technik. Deshalb arbeitet BBC heute auch an neuen Wasserelektrolysetechniken. Die oben beschriebenen Gesetze und Abhängigkeiten bleiben dabei selbstverständlich gültig, doch machen es einige prinzipielle Neuerungen möglich, die Grenzen der heutigen Elektrolysetechnik zu überschreiten. Die neuen Techniken, man spricht auch von der 2. Wasserelektrolyseurgeneration, befinden sich allerdings alle noch im Laborstudium. Man erwartet von ihnen einen Wirkungsgrad von mehr als 80% bei bis 2-3 mal kleineren spezifischen Investitionskosten. Die ersten Resultate sind erfolversprechend.

Tabelle 2. Erreichter Stand der konventionellen, kommerziellen BBC-Elektrolysetechnik

Zellspannung	2,05 V bei 2 kA/m ² Stromdichte ohne aktivierte Elektroden entsprechend 72% Wirkungsgrad
Stromdichte	1,5-2,5 kA/m ²
Betriebstemperatur	80 °C
Wasserstoffreinheit	99,8%
Sauerstoffreinheit	99,6%
Produktionskapazität je Einheit	5 bis 260 m ³ H ₂ /h, ab Ende 1978 bis zu 500 m ³ H ₂ /h
Druck der Gase	atmosphärisch
Verfügbarkeit der Anlage	98%
Standzeit	20 bis 40 Jahre, mit Generalrevision nach jeweils 8 bis 12 Jahren

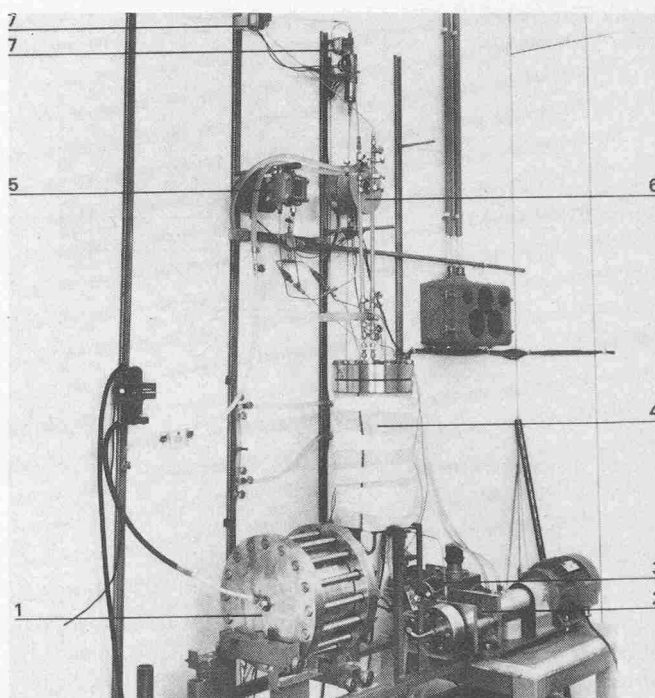


Bild 5. Versuchsanlage zur Entwicklung der Hochdruckwasser-elektrolyse

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| 1 6zelliger Elektrolysemodul | 5 Differentialdruckmessgerät |
| 2 Umwälzpumpe | 6 Absolutdruckmessgerät |
| 3 Speisewasserpumpe | 7 Gasablassventile |
| 4 Gasabscheider | |

Die 2. Wasserelektrolysegeneration

Gegenwärtig stehen *drei neue Verfahren*, jedes mit andern technischen Problemen, miteinander im Wettstreit:

Wässrige alkalische Hochdruckelektrolyse (HDE)

Dabei wird, wie bei der heutigen Technik, eine *wässrige alkalische Lösung* erhöhter Konzentration bei einer Temperatur bis zu 160 °C elektrolysiert. Um ein Sieden und zu hohe Wasserverluste durch Verdampfen zu verhindern, wird die Elektrolyse *unter erhöhtem Druck* durchgeführt. Durch die erhöhte Temperatur erhält man eine Reduktion der Zellspannung. Bild 5 zeigt eine für Druckwerte bis 100 bar und Temperatur bis zu 200 °C ausgelegte Versuchsanlage, mit der zurzeit spezielle Probleme dieser Technik abgeklärt werden, die vor allem die chemische Beständigkeit von Diaphragma- und Dichtungsmaterialien betreffen.

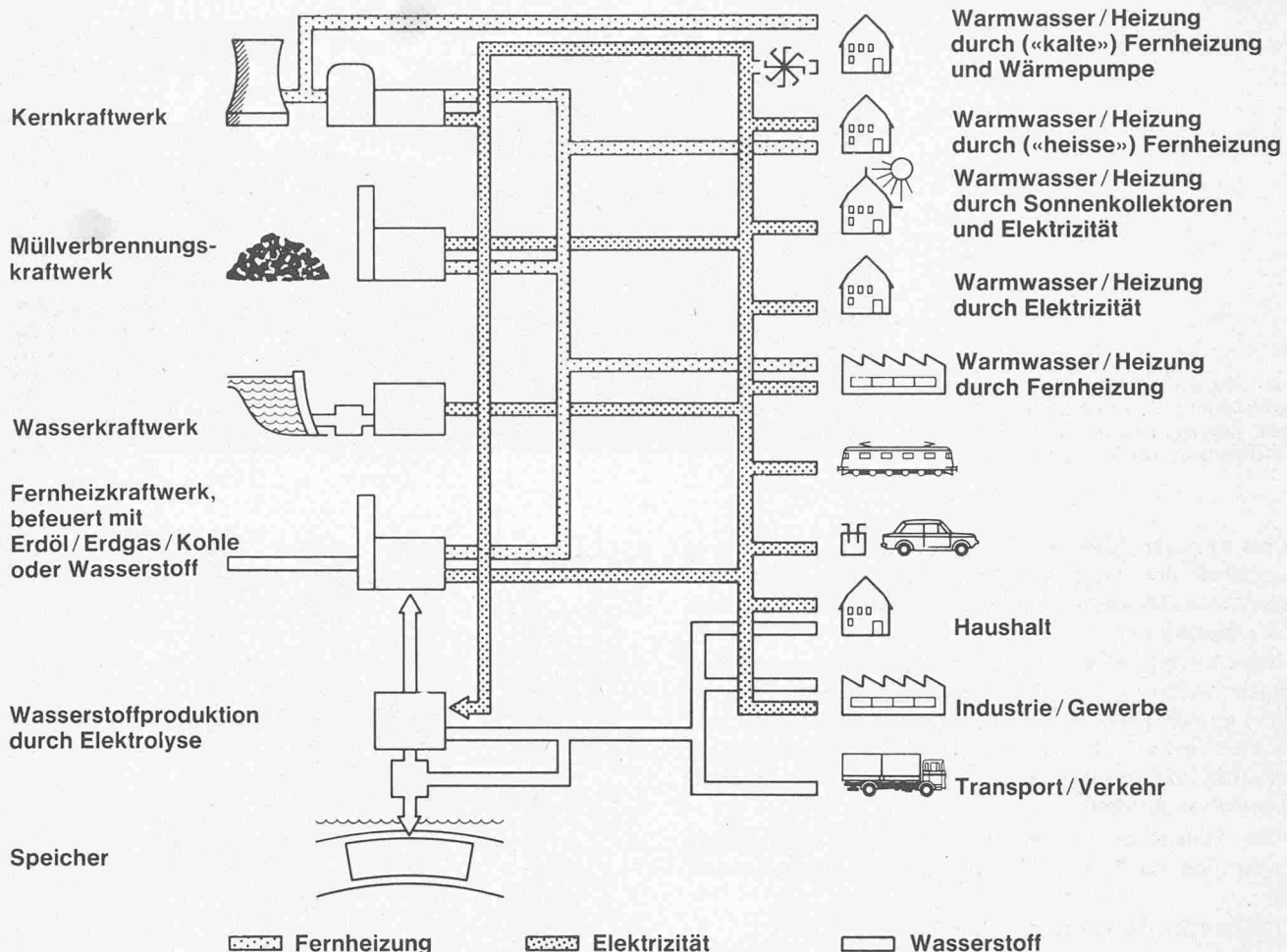


Bild 6. Energiekonzept mit teilweiser oder totaler Substitution des Erdöls. Kolonne links: Erzeuger. Kolonne rechts: Verbraucher

Elektrolyse mit einem Solid Polymer Elektrolyte (SPE)

Das Verfahren, ursprünglich von der amerikanischen Firma General Electric für Brennstoffzellen von Raumschiffen entwickelt, ist dadurch gekennzeichnet, dass als Elektrolyt an Stelle der Lauge eine Ionenaustauschermembran verwendet wird. Diese Membran wirkt gleichzeitig als Diaphragma. Die Membran kann sehr dünn (z. B. 0,1 mm) gehalten werden, was die Ohmschen Verluste stark reduziert. Auch diese Elektrolyse wird vorzugsweise bei erhöhter Temperatur (120–150 °C) und erhöhtem Druck (bis zu 200 bar) betrieben.

Das technische Hauptproblem ist die chemische Beständigkeit des Anodenmaterials, das mit der sauren Membran in Berührung kommt und damit starken Korrosionseinflüssen ausgesetzt ist.

Hochtemperaturelektrolyse (HTE)

Wasserdampf kann bei hohen Temperaturen (600–1000 °C) in einer Zelle elektrolysiert werden, die eine Zirkonoxidkeramik als Elektrolyt enthält. Die Keramik leitet Sauerstoffionen und wirkt gleichzeitig als Diaphragma und Elektrolyt. Der Vorteil dieser Elektrolysetechnik besteht darin, dass bei so hohen Temperaturen keine Überspannungen mehr auftreten und auch die Ohmschen Verluste klein sind.

Eine technische Schwierigkeit liegt darin, dass bei der Betriebstemperatur von etwa 800 °C immer ein Gemisch von Wasserstoff und Wasserdampf anfällt. Dieses Gemisch kann heute nur durch Abkühlen und Auskondensieren getrennt werden, ein verfahrenstechnisches Handicap dieser Technik. Daneben treten die üblichen Materialprobleme von Hochtemperaturtechniken auf.

Da bis jetzt noch nicht entschieden werden konnte, welche der drei Techniken die vorteilhafteste ist und bei welcher die technischen Schwierigkeiten am leichtesten überwunden werden können, hat man bei BBC bis Ende 1977 alle parallel verfolgt. Die Arbeiten werden dezentral durchgeführt, und zwar

- im Zentrallaboratorium der Konzerngruppe Schweiz in Baden,
- in der Konzerngruppe Frankreich,
- im Konzernforschungszentrum Dättwil,
- im Zentrallabor Heidelberg.

Ab 1978 wird jedoch die HTE-Technik nunmehr in reduziertem Rahmen verfolgt. Sie wird ihre Marktreife voraussichtlich viel später erreichen als die beiden andern, mit denen in den frühen achtziger Jahren gerechnet werden kann.

Zusammenfassung

Es sind die Voraussetzungen geschaffen worden, elektrolytisch gewonnenen Wasserstoff als wichtigen Sekundärenergie-träger – neben Elektrizität und Fernwärme – allmählich auf dem freien Energiemarkt einzuführen. Der folgende Zeitplan erscheint realistisch:

1. Stufe (ab etwa 1985): Allmähliche Substitution von fossil hergestelltem Wasserstoff für die chemische Industrie durch solchen, der auf der Basis von nuklearer Schwachlastenergie oder entfernten Wasserkraften durch Elektrolyse gewonnen wird.

2. Stufe (nach 2000): Allmähliche Substitution von Erdgas und Erdöl durch nicht fossil erzeugten Wasserstoff für reine

Energiezwecke. Dabei kann dem Erdgas in einer ersten Phase bis zu 10% Wasserstoff zugemischt werden, ohne dass die Gasinstallationen geändert werden müssten.

Der zeitliche Ablauf der Marktdurchdringung von Wasserstoff wird vor allem von der relativen Entwicklung der Preise von Elektrizität und fossilen Brennstoffen bestimmt werden. Bild 6 zeigt, wie man sich ein Energiekonzept mit teilweiser oder totaler Substitution von Erdöl und Erdgas vorstellen könnte.

Adresse des Verfassers: Dr. M. Braun, Fachbereich Zentrallabor Konzerngruppe Schweiz, BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie., 5401 Baden.

Umschau

Phosphate sinnvoll nutzen

Die kurz als Phosphate bezeichneten Verbindungen des Elements Phosphor spielen in der Umweltdiskussion der letzten Jahre eine besondere Rolle. Nicht weil diese Stoffe besonders gefährlich oder giftig wären, sondern gerade weil sie ausgesprochen «nahrhaft» sind, wird ihnen die Verschmutzung von Oberflächengewässern durch Eutrophierung (Überdüngung) angelastet. Die öffentliche Diskussion über diese Erscheinung ist bisher nicht immer mit der notwendigen Sachkunde und Objektivität geführt worden. Die *Fachgruppe Wasserchemie* in der *Gesellschaft Deutscher Chemiker* (GDCh) hat mit einer Studie, die jetzt dem für Umweltfragen zuständigen Bundesinnenministerium übergeben wurde, einen wesentlichen Beitrag zur Objektivierung der Tatbestände und zu einer ausgewogenen Beurteilung des Phosphatproblems geleistet.

Phosphorverbindungen werden vor allem in der *Landwirtschaft* als *Dünge- und Futtermittel* verwendet. Hier können sie durch keinen anderen Stoff ersetzt werden. Ausserdem setzt man sie im industriellen Bereich, besonders in den *Wasch- und Reinigungsmitteln*, ein und verwendet sie als spezielle Produkte auf verschiedenen technischen Gebieten, so auch bei der *Nahrungsmittelherstellung*.

In den letzten Jahrzehnten hat die Verwendung von Phosphorverbindungen ständig zugenommen. Das hat dazu geführt, dass diese Substanzen vor allem in den *kommunalen Abwässern* und in den *Oberflächengewässern* in zunehmenden Konzentrationen vorhanden sind. Sie lassen sich durch die mechanisch-biologische Abwasserreinigung nur in begrenztem Umfang entfernen und gelangen auf diesem Wege in die Flüsse, Bäche, Seen und Talsperren. Durch *zusätzliche* Reinigungsverfahren können sie aus dem Abwasser in grösserem Umfang entfernt werden.

Auch aus der Landwirtschaft gelangen die Düngerphosphate über landwirtschaftliche Betriebsabwässer, aus der Tierhaltung und durch Erosionsprozesse vor allem ackerbaulich genutzter Flächen, in die Oberflächengewässer.

Phosphorverbindungen an sich sind keine Schadstoffe. In Seen, Talsperren und Stauhaltungen können aber alle diese Substanzen durch *Sekundärprozesse* zu einer *erheblichen Verschlechterung der Gewässerbeschaffenheit* führen. Man fasst diese Vorgänge unter dem Begriff «Eutrophierung» zusammen. Die unerwünschte Veränderung hat nachteilige Folgen für die Nutzung der Gewässer, zum Beispiel für die *Gewinnung von Trinkwasser* und für die *Fischerei*. Auch der *Erholungswert* von Seen und Stauhaltungen wird erheblich geschmälert.

Europa hat keine eigenen Phosphatvorkommen. Die Deckung des Phosphatbedarfs beruht auf Importen aus Ländern mit Rohphosphatvorkommen. Die Sicherstellung der Nahrungsmittelversorgung hängt zum Teil davon ab, dass diese Phosphorverbindungen auch künftig importiert werden können.

Aus der Notwendigkeit der Sicherstellung der Phosphorversorgung und der zunehmenden Eutrophierung stehender und langsam fliessender Gewässer ergibt sich die Notwendigkeit, vorausschauend die Zusammenhänge zwischen Phosphorzufuhr,

Phosphorverbrauch und Phosphorverbleib zu ermitteln. Das Bundesministerium des Innern hat deshalb in Abstimmung mit dem Bundesministerium für Forschung und Technologie die *Fachgruppe Wasserchemie* der *Gesellschaft Deutscher Chemiker* (GDCh) beauftragt, eine Studie über die Wege und den Verbleib des Phosphors in der Bundesrepublik unter besonderer Berücksichtigung des Umweltschutzes und der Rohstoffversorgung zu erstellen. Diese Aufgabe wurde vom *Hauptausschuss «Phosphate und Wasser»* der *Fachgruppe Wasserchemie* unter dem Vorsitz von *H. Bernhardt*, Siegburg, übernommen.

Die Studie behandelt qualitativ und quantitativ die Bedeutung der Phosphorverbindungen für die verschiedenen Anwendungsbereiche und beschreibt ihren Fluss in der Bundesrepublik Deutschland einschliesslich West-Berlin von der Herkunft über die Verwendung bis zum Austritt aus der Bundesrepublik.

Erhöhter Bestellungseingang im Stahlbau

Die Schweizerische Zentralstelle für Stahlbau, deren Hauptziel in der Zweckforschung liegt, hielt anlässlich ihrer Generalversammlung 1978, unter der Leitung ihres Präsidenten, Dr. Ulrich Geilinger, Küssnacht, Rückschau auf die wirtschaftliche Entwicklung der Branche in den ersten sechs Monaten 1978.

Für das Inland konnte ein erfreuliches Anziehen der Offertanfragen sowie einen höheren Bestellungseingang gegenüber dem Vorjahr registriert werden. Insbesondere im Industriebau – der wichtigsten Sparte der Stahlbauweise – sind die Auftragsgänge deutlich gestiegen. Entgegen den Erwartungen ist aber auch bei den Aufträgen der öffentlichen Hand bis jetzt kein Rückgang eingetreten. Weniger erfreulich sieht die Situation beim Exportgeschäft aus. Wohl ist die Anfragetätigkeit weiterhin rege; die Auftragsgänge sind aber andererseits klar rückläufig. Die Ursachen sind in der ungünstigen Kursentwicklung des Schweizerfrankens zu suchen. Dabei ist keineswegs nur die Relation des Schweizerfrankens zum Dollar für die negative Entwicklung verantwortlich. Auch die Höherbewertung des Frankens gegenüber der DM ist für die schweizerische Stahlbau-Industrie von grosser Bedeutung, werden doch oftmals Geschäfte im Nahen und Mittleren Osten zusammen mit deutschen Generalunternehmern in DM abgewickelt. Bei derartigen Geschäften ist eine Absicherung durch die ERG nicht möglich. Devisenterminverkäufe kommen aber auch nicht in Frage, weil weder Umfang noch Zeitpunkt der Zahlungseingänge bestimmbar sind. Erhebliche Devisenverluste sind deshalb die Folge.

Dank den Exportgeschäften konnten in den letzten Jahren wertvolle Kapazitäten und damit Arbeitsplätze erhalten werden. Es wäre wirklich schade, wenn die neu gewonnenen Erfahrungen auf fremden Märkten – bedingt durch den hohen Schweizerfrankens – nicht auch in Zukunft genutzt werden können.

Die Beschäftigungslage hat sich gegenüber dem Vorjahr nicht wesentlich geändert. Die Kapazitätsauslastung kann als knapp zufriedenstellend bezeichnet werden. Nach wie vor unbefriedigend sind andererseits die Preise. Erst eine volle Kapazitätsauslastung wird hier zu einer Verbesserung führen. Für die nähere Zukunft rechnet die schweizerische Stahlbau-Industrie mit einer weiteren langsamen Erholung auf dem Inlandmarkt, währenddem die Exportchancen eher zurückhaltender beurteilt werden müssen.

Qualitätskontrolle der Zementlieferungen durch die EMPA im Jahre 1977

Im Rahmen der Qualitätskontrolle der Zementlieferungen, die aufgrund eines Abkommens zwischen dem VSZKGF, dem SIA und der EMPA aus dem Jahre 1956 durchgeführt wird, sind an der EMPA im Jahr 1977 insgesamt 404 Zementproben (PC, PCS 5, HPC) gemäss der Norm SIA 115 (1953) untersucht worden. Bei der produzierten Zementmenge von etwa 3,5 Mio. t ergibt sich eine Prüffrequenz von etwa 1 Probe / 8700 t Zement (Soll: 1 Probe / 10000 t Zement).

402 Proben (= 99,5%) zeigten normgemässe Güterwerte. Lediglich *zwei Proben* (= 0,5%) entsprachen den Anforderungen der Norm SIA 115 (1953) *nicht* in allen Punkten: eine PC-Probe mit zu hohem Glühverlust: 4,26% statt max. 4,0% und eine PC-Probe mit zu hohem SO₃-Gehalt: 3,36% statt max. 3,2%.