

## Wasserstoff und Sauerstoff aus regenerativen Energiequellen für die Energieversorgung und Umwelttechnik.

S. Schulien, N. Späth

### 1. Einleitung

Fossile Energieträger - Kernenergie - regenerative Energien: die Energiefrage ist eines der wichtigsten technischen und politischen Probleme, das in naher Zukunft gelöst werden muß. Die Frage ist sehr komplex und historisch belastet. Da imperiale Ansprüche mit der Energiefrage verknüpft sind, ist die Diskussion heikel und voller Fallgruben und Vernebelungen. Nichts hat die Geschichte der letzten hundert Jahre so geprägt wie der Kampf um die Kontrolle der Ölreserven der Welt. Dem Erdöl wird von F. William Engdahl die wichtigste Rolle im Kampf um die Weltmacht zugeschrieben /1/, aber auch von anderen Beobachtern /2/.

Zu Anfang des Jahrhunderts zeigte sich, daß die zukünftige technische und wirtschaftliche Entwicklung sehr eng mit dem Erdöl verknüpft sein wird. Automobile und Flugzeuge benötigen zu ihrem Betrieb Benzin, das aus Erdöl destilliert wird.

Nach dem ersten Weltkrieg mußte Deutschland seine Rechte an dem mesopotamischen Erdöl (Bagdadbahn) an die Siegermächte abtreten. Es hatte damit keine nennenswerten Energievorräte mehr, abgesehen von der Steinkohle im Ruhrgebiet, nachdem die oberschlesischen Gruben an Polen, die saarländischen an Frankreich gegangen waren. Deutschland hatte zu jener Zeit allerdings noch beträchtliche geistig-technische Ressourcen. Seine Wissenschaftler und Techniker entwickelten in kurzer Zeit ein effektives Verfahren, um aus dem heimischen Rohstoff Kohle durch Hydrierung Benzin zu produzieren. Damit war Deutschland wieder autark, was nicht überall große Begeisterung hervorrief. Das künstliche Benzin war natürlich teurer als das durch Destillation aus dem Erdöl gewonnene - aber die Erpressungsmöglichkeiten (Scheichs) waren reduziert. Das Problem war technisch gelöst, aber nicht politisch - was darum zu kriegerischen Auseinandersetzungen führte.

Heute stehen wir vor einer ähnlichen Situation, nur sollten wir - statt wie damals Kohle zu hydrieren -  $\text{CO}_2$  hydrieren, um nicht nur die Energieprobleme, sondern auch die Umweltprobleme zu lösen.

Es ist nötig, unter Einsatz sehr großer Mittel eine neue Energietechnik auf der Basis von Sonnenenergie, Wasserstoff und  $\text{CO}_2$  zu entwickeln, wenn die bevorstehenden Kriege um die Ressourcen vermieden werden sollen. Für diese Entwicklung braucht man jeden arbeitsfähigen Ingenieur und Wissenschaftler - arbeitslose Techniker könnte man sich nicht leisten.

### 2. Vor- und Nachteile des Wasserstoffs als Energieträger

Da die regenerativen Energien nur mit geringer Intensität und unregelmäßig angeboten werden, der Bedarf aber kontinuierlich ist, haben sie nur dann eine Chance, sich in größerem Maße durchzusetzen, wenn das Problem der Energiespeicherung gelöst ist. Der optimale Speicher für regenerative Energien ist Wasserstoff, da er leicht und in unbegrenztem Maße gewonnen werden kann, da er gut speicherbar und transportabel, sein

Verbrennungsprodukt mit Sauerstoff bei hoher Energieausbeute reines Wasser ist. Der mit Hilfe von regenerativen Energien erzeugte Wasserstoff kann nun direkt als Energieträger und -speicher verwendet werden oder als Rohstoff für die Erzeugung von Methanol mit  $\text{CO}_2$  aus Verbrennungsprozessen (s. Gleichung 3). Diese "künstliche Photosynthese" bietet ein erhebliches Entwicklungspotential /3/.

Die Fachhochschule Wiesbaden hat in Zusammenarbeit mit Industriefirmen und Instituten in den vergangenen Jahren eine Wind-Wasserstoffanlage mit einer installierten Leistung von 20 kW entwickelt und betrieben /4/ sowie eine Solarwasserstoffanlage mit einer Leistung von 2 kW /5/.

Die benötigten Verbraucher für den Wasserstoffbetrieb - Motoren, Heizungen, Kocher usw. - wurden gleichzeitig entwickelt, gebaut und getestet /6/.

Die experimentellen Untersuchungen zeigten, daß das Problem der Druckelektrolyse technisch gelöst ist und hier ein bedeutendes Entwicklungspotential zur Kostenreduktion der Wasserelektrolyse besteht. Das eigentliche Kostenproblem bei kleinen und mittleren Energieversorgungsanlagen der Wasserstofftechnik liegt in der Wasserstoffspeicherung, die unverhältnismäßig teuer ist. Dabei ist es gleichgültig, ob der Wasserstoff gasförmig in Drucktanks, flüssig als tiefkalter Wasserstoff oder als Hydrid gespeichert wird - die Kosten sind in allen drei Fällen erheblich.

Für die Einführung des gasförmigen Wasserstoffs als Energieträger im großen Maßstab wäre die gesamte technische und organisatorische Infrastruktur neu aufzubauen, also alle Installationen zum Speichern, Transport, Verteilen und Verbrauch. Vor allem im Verkehrsbereich bestehen für die Einführung des Wasserstoffs erhebliche Hemmnisse. Hier haben flüssige Energieträger bedeutende Vorteile, die gesamte Infrastruktur ist auf flüssige Brennstoffe ausgerichtet.

### 3. Weiterentwicklung der Wasserstofftechnik zur künstlichen Photosynthese

Wie kann man aus gasförmigem Wasserstoff, der mittels regenerativer Energien erzeugt worden ist, einen flüssigen, verlustfrei speicherbaren und transportablen, einfach zu handhabenden Energieträger machen? Flüssigwasserstoff ist aus Kostengründen und wegen der sehr aufwendigen Technik keine praktikable Lösung für einen breiten Einsatz.

Hier ist es zweckmäßig, sich zu vergegenwärtigen, wie die Natur das Problem der Energiespeicherung gelöst hat /7/.

Die Pflanze erzeugt aus Wasser (meist über die Wurzeln aufgenommen) und Kohlendioxid aus der Luft mit Hilfe der Sonnenenergie Biomasse mit hohem Energieinhalt, z.B. Zucker, Öle usw. Bei diesem Prozeß wird Sauerstoff frei, der z.B. über die Blätter abgegeben wird. Vereinfacht kann man den Prozeß für die Glucoseproduktion folgendermaßen formulieren:



Die Sonnenenergie wird im wesentlichen dazu verwendet, daß Wasser in seine Grundbestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zu zerlegen gemäß der Gleichung (2) :



Der Wasserstoff aus diesem Prozeß reagiert mit dem von der Pflanze aus der Luft aufgenommenen  $\text{CO}_2$  über verschiedene Verfahrensschritte zu  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ , der Sauerstoff wird an die Atmosphäre abgegeben.

Der Umkehrprozeß zur Photosynthese - die Gleichung (1) von rechts nach links gelesen - also die Zersetzung von Biomasse zu Wasser und Kohlendioxid, benötigt Sauerstoff für seinen Ablauf. Dabei wird die bei der Photosynthese gespeicherte Bindungsenergie wieder frei. Dieser Prozeß dient in der Natur zur Energieversorgung und Aufrechterhaltung des Lebens von Tier und Mensch. Er läuft in ähnlicher Form bei der Verrottung, dem Abbau sowie der Verbrennung von Biomasse, von fossilen Energieträgern u.ä. ab.

Die Lösung unseres Speicherproblems ist in den Gleichungen (1) und (2) gegeben. Wenn man den durch Wasserelektrolyse erzeugten Wasserstoff mit  $\text{CO}_2$  reagieren läßt, entstehen flüssige Kohlenwasserstoffe, im einfachsten Fall z.B. Methanol:



Die verfahrenstechnischen Probleme dieses Prozesses der Methanolsynthese sind seit langem gelöst. Im Zusammenhang mit den regenerativen Energien ist hier ein vielversprechender Weg gezeigt /8/, /9/, /10/.

Das Methanol ist ein leistungsfähiger Energieträger und vielseitig verwendbarer Chemierohstoff. Zu dem Prozeß (3) gibt es eine Vielzahl von Varianten, abhängig vom Verfahrensablauf.

Das  $\text{CO}_2$  erscheint hier nicht als Schadstoff, sondern als wertvoller Rohstoff für die Energietechnik und Kohlenstoffchemie. Der Sauerstoff aus der Wasserelektrolyse ist kein wertloses Abfallprodukt mehr, sondern er wird für den Abbau der Biomasse gemäß Gleichung (1) benötigt. Auf diese Weise wird der natürliche Brennstoffkreislauf geschlossen, wie er auch in der Natur seit jeher abläuft: am Anfang des Kreislaufs stehen  $\text{CO}_2$  und Wasser, als Reaktionsprodukt erhält man wieder Wasser und Kohlendioxid, das aufgefangen und in einen weiteren Kreislauf eingeschleust werden kann.

Die technischen Möglichkeiten der Wasserstoff- und Sauerstoffgewinnung mittels regenerativer Energien sind durch die Entwicklung leistungsfähiger alkalischer Druckelektrolyseure gegeben, das  $\text{CO}_2$  kann aus den verschiedensten Verbrennungs-, Vergärungs- oder Verrottungsprozessen gewonnen werden, aus Holzvergasung, Kläranlagen, aus Quellenkohlenensäure, Zementwerken, Fischer-Tropsch-Synthese u.ä.

Aufgabe der Technik ist es nun, optimierte Verfahren zur Erzeugung flüssiger Brennstoffe aus Wasserstoff und  $\text{CO}_2$  zu entwickeln.

Eine der Möglichkeiten ist in Bild 1 skizziert. Wasserstoff und Sauerstoff werden von einem optimierten Druckelektrolyseur bereitgestellt, das  $\text{CO}_2$  kommt aus der Holzvergasung. Die Gase  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2$  werden gemischt und reagieren in einem geeigneten Reaktor zu Methanol (Gleichung 3).

Es ist eine Vielzahl von Varianten dieser Anlage denkbar. Ein Zementwerk produziert z.B.  $100.000 \text{ m}^3/\text{h}$  Abgas; der  $\text{CO}_2$ -Gehalt des Abgases liegt üblicherweise bei 25%. Das entspricht einem  $\text{CO}_2$ -Ausstoß von etwa  $49.000 \text{ kg/h}$ . Für die Reaktion (3) benötigt man etwa  $75.000 \text{ m}^3/\text{h}$   $\text{H}_2$ . Dabei entstehen ca.  $35.600 \text{ kg/h}$  Methanol, d.h. etwa  $300.000 \text{ t/Jahr}$ .

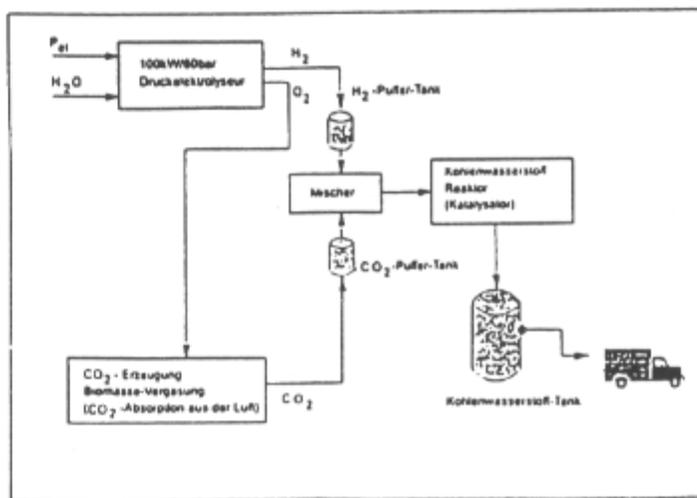


Bild 1. Schematische Darstellung einer Anlage zur Erzeugung flüssiger Energieträger.

Der Sauerstoff aus der Wasserelektrolyse wird entweder dem Holzvergasungsprozeß zugeführt oder dient dem Abbau von Biomasse in einer dezentralen Kläranlage. Im speziellen Fall wurde eine Anlage zur Behandlung von Weinbauabwässern, die beim Reinigen von Mühlen, Maischebehältern, Keltern, Filtern, Pumpen, Fässern, Betriebsräumen usw. anfallen, entwickelt und gebaut. Der Sinn der Sauerstoffbehandlung der Abwässer ist durch Gl. (1) beschrieben. Von rechts nach links gelesen besagt sie, daß Sauerstoff und organische Substanz (z.B. Glucose) zu Wasser und  $\text{CO}_2$  reagieren, wobei Energie frei wird (Umkehrreaktion der Photosynthese). Die organische Substanz ist damit abgebaut. Je mehr Sauerstoff dem belasteten Abwasser zugesetzt wird, um so mehr organische Substanz kann abgebaut werden. Mit reinem Sauerstoff erhält man eine fünfmal größere Abbauleistung als mit Luft (78 %  $\text{N}_2$ , 21 %  $\text{O}_2$ ).

Bild 2 gibt eine schematische Darstellung der Reinigungsanlage: Sie besteht aus dem Elektrolyseur, dem Aquainjektor, in dem das Abwasser mit Sauerstoff gemischt wird, dem Bioreaktor, in dem die Abbaureaktion mit Hilfe von Mikroorganismen stattfindet und dem Aquaseptor, in dem nicht abgebaute organische Partikel abgeschieden werden.

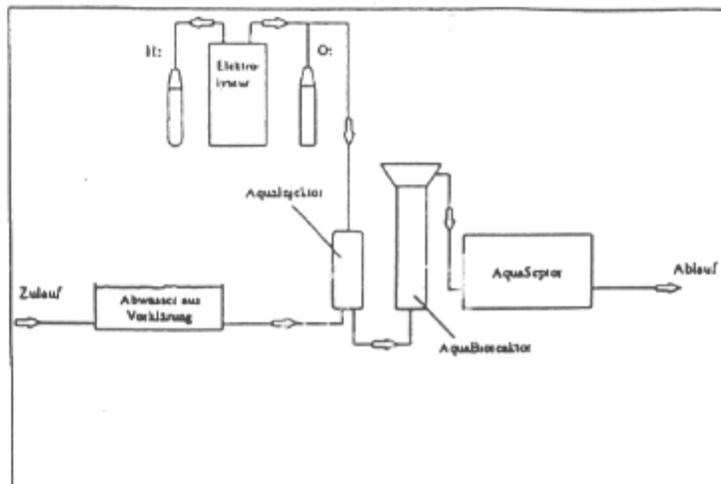


Abb. 2 Schematische Darstellung einer AquaPlan-Reinigungsstraße

Mit dem beschriebenen Energiesystem kann ein geschlossener Energie- und Stoffkreislauf verwirklicht werden, wie er in der Natur seit Urzeiten abläuft.

#### 4. Erdöl als Rohstoff für die chemische Industrie - kein Brennstoff

Zweifellos ist es billiger, die Energie aus Kohle, Erdöl oder Erdgas zu gewinnen - die vor hunderten von Millionen Jahren kostenfrei durch Photosynthese erzeugt worden sind - als aus synthetisch hergestelltem Methanol o.ä. Andererseits: wie sinnvoll ist es, energiereiche Kohlenwasserstoffe aus Erdöl in Automobilen und Heizungen zu CO<sub>2</sub> und Wasser zu verheizen, während man Kunststoffe u.ä. mit hohem Energieaufwand synthetisiert?

In diesem Zusammenhang ist es bestimmt energetisch effektiver, aus dem Erdöl wertvolle Gebrauchsmaterialien zu produzieren, z.B. synthetische Fasern, Waschmittel, Kunststoffe, Farben, Lebensmittel, Medikamente /11/, /12/, /13/.

Obwohl schon ein Anteil von über 10 % der Raffinerieprodukte in die chemische Industrie geht, ist hier noch viel Entwicklungsarbeit zu leisten, sowohl bei der Herstellung von Gebrauchsmaterialien aus Erdöl sowie bei der Hydrierung von CO<sub>2</sub> und CO. Es ist unbedingt erforderlich, den Raubbau an den Schätzen der Natur zu beenden und für die Zukunft den von der Natur vorgezeichneten Stoff- und Energiekreislauf nutzbar zu machen.

Ob das allerdings politisch durchsetzbar ist, ist eine nicht beantwortete Frage /14/.

Wer die Geschichte der vergangenen Jahrzehnte verfolgt, gewinnt nicht den Eindruck, daß die Mächtigen beabsichtigen, das Erdöl als Energieträger zu ersetzen. Die erdölbereichen Gebiete - z.B. die Länder um das kaspische Meer, dem persischen Golf oder in Mittelasien - sind Gebiete steigender politischer Spannung.

Die Rätsel, die sich anlässlich der Wiedervereinigung Deutschlands ergaben, sind bisher nicht gelöst worden. Warum konnten die DDR-Firmen ihre Märkte im Ostblock nicht weiter bedienen, bei allmählicher Anpassung an die Marktwirtschaft? Die ehemalige Sowjetunion hätte die ost- und westdeutschen Lieferungen nicht mit Geld bezahlen können, aber mit Erdöl und Erdgas trotz bestehender Lieferverträge. In Osteuropa ist ein derartiger Bedarf an neuer Technik, daß es in Deutschland heute keine arbeitslosen Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker gäbe, wenn die Chancen Anfang der neunziger Jahre ergriffen worden wären. Die Weichen sind insgeheim anders gestellt worden, in Richtung auf die seit Jahrzehnten bekannte Politik des Verheizens von Erdöl, wobei der Rohstoff in den Händen weniger mächtiger Gruppen bleibt. Die regenerativen Energien, die Wasserstofftechnik oder die künstliche Photosynthese haben keinen Platz in diesem Energiesystem. Ein unbefangener Beobachter könnte den Eindruck gewinnen, daß die regenerativen Energien von der Politik nur so lange unterstützt werden, wie sie keine Beeinträchtigung der Globalisierung auf der Basis der Erdölwirtschaft bewirken können.

## 5. Literatur

- |      |  |   |
|------|--|---|
| /1/  | F. William Engdahl                         | Mit der Ölwanne zur Weltmacht<br>Dr. Böttiger Verlags-GmbH 1993   |
| /2/  | Anton Zischka                              | Ölkrieg<br>Wilhelm-Goldmann-Verlag 1939   |
| /3/  | S. Schulien, G. Sandstede<br>H.W. Hahn     | Kohlendioxid und Wasserstoff als<br>Rohstoffe für eine umweltfreundliche<br>Energietechnik<br>Windkraftjournal 1/96 S. 16 |
| /4/  | S. Schulien, M. Steinmetz                  | Gas, Erdgas 130 (1989) S. 678 - 686   |
| /5/  | P. Bernhard, S. Schulien                   | Gaswärme. International 43 (1994)<br>S. 550 - 555   |
| /6/  | S. Schulien, D. Dahlinger, M. Fender       | Wasserstofftechnik 6/93 S. 1 - 44   |
| /7/  | Maurer/Winkler                             | Biogas. C.F. Müller 1980  |
| /8/  | S. Stucki, A. Schuler<br>M. Constantinescu | Int. J. Hydrogen Energy 20 (1995)<br>D. 653 - 663   |
| /9/  | M. Specht, A. Bandi                        | Forschungsverbund Sonnenenergie,<br>Themen 94/95  |
| /10/ | V. Plzak, H. Wendt                         | Chem. Ing.-Techn. 64 (1992)<br>S. 1084 - 1095   |
| /11/ | G. Bischoff, W. Gocht                      | Energietaschenbuch Vieweg 1979  |
| /12/ | P. Coll                                    | Erdöl, Arena-Verlag 1969  |
| /13/ | W. Theimer                                 | Öl und Gas aus Kohle<br>dtv wissenschaft 1980   |
| /14/ | Joachim Fernau                             | Halleluja, Ullstein 1995  |