

# Kohlendioxid und Wasserstoff als Rohstoffe für eine umweltfreundliche Energietechnik

Prof. Dr. S. Schulien, Dr. G. Sandstede, Dr.-Ing. H.-W. Hahn

## 1. Vor- und Nachteile des reinen Wasserstoffs als Energieträger

Sonnenenergie und Windenergie werden unregelmäßig und meist mit geringer Intensität angeboten, der Energiekonsument verlangt eine kontinuierliche Lieferung bzw. bedarfsgerechte Verfügbarkeit. Zudem sollten regenerative Energien auch für Antriebszwecke oder mobilen Einsatz abgekoppelt von bestehenden Energieversorgungsnetzen genutzt werden können. Hieraus folgt für die praktische Anwendung, daß für beide regenerativen Energieformen ein leistungsfähiger Speicher erforderlich ist. Wasserstoff ist der ideale Speicher für regenerative Energien, da er durch Wasserelektrolyse leicht zu gewinnen ist, mit technisch ausgereiften Methoden gespeichert und transportiert werden kann, und weil sein Verbrennungsprodukt mit Sauerstoff reines Wasser ist, bei geeigneter Verbrennung also keine Umweltprobleme auftreten.

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 [1], sowie eine Wasserstoffanlage mit einer Leistung von 2 kW [2]. Die benötigten Verbraucher für den Wasserstoffbetrieb - Motoren, Heizungen, Kocher usw. - wurden gleichzeitig entwickelt, gebaut und getestet [3].

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 gas-

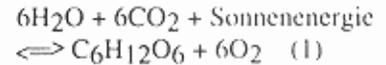
förmig in Drucktanks, flüssig als tiefkalter Wasserstoff oder als Hydrid gespeichert wird - die Kosten sind in allen drei Fällen erheblich.

Für die Einführung des Wasserstoffs als Energieträger in 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. Diese Probleme werden vermutlich die Einführung eines Wasserstoff-Energiesystems noch auf lange Zeit verhindern, wenn nicht gar endgültig scheitern lassen. Im Gegensatz hierzu haben flüssige Energieträger bedeutende Vorteile, da die gesamte Infrastruktur bereits auf flüssige Brennstoffe ausgerichtet ist.

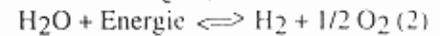
## 2. Weiterentwicklung der Wasserstofftechnik zur künstlichen Photosynthese

Wie kann man aus gasförmigem Wasserstoff, der mittels regenerativer Energien erzeugt worden ist, einen flüssigen, verlustfrei speicherbaren und transportablen, einfach handhabbaren 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 [4].

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:



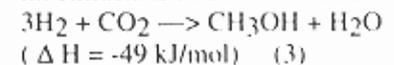
Die Sonnenenergie wird im wesentlichen dazu verwendet, das Wasser in seine Grundbestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zu zerlegen gemäß der Gleichung (2)



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 ihren 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 sind seit langem gelöst. Im Zusammenhang mit den regenerativen Energien ist hier ein vielversprechender Weg gezeigt [5], [6], [7].

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 Energie-

technik und Kohlenstoffchemie. Der Sauerstoff aus der Wasserelektrolyse ist kein wertloses Abfallprodukt mehr, sondern 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 Energiekreislaufes steht  $\text{CO}_2$ , als Reaktionsprodukt erhält man wieder Kohlendioxid, das aufgefangen und in einen weiteren Kreislauf eingeschleust werden kann.

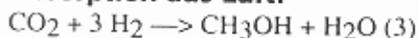
Im Gegensatz zur Nutzung der fossilen Energieträger, bei der kontinuierlich  $\text{CO}_2$  emittiert wird, ist die durch eine solche Energiewirtschaft verursachte  $\text{CO}_2$ -Anreicherung der Atmosphäre also gleich Null ( $\text{CO}_2$  neutraler Energiezyklus).

Die technischen Möglichkeiten der Wasserstoff- und Sauerstofferzeugung mittels regenerativer Energien sind durch die Entwicklung leistungsfähiger, alkalischer Druckelektrolyseure gegeben; das  $\text{CO}_2$  kann aus den verschiedensten Verbrennungs-, Vergärungs- oder Verrotungsprozessen gewonnen werden, aus Holzvergasung, Kläranlagen, aus Quellenkohlenäure etc., und sogar über Absorber direkt aus der Luft [8]. Es gilt 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. Der bei der Elektrolyse anfallende Sauerstoff kann hier vorteilhaft bei der Vergasung eingesetzt werden (weniger Rückstände, einfachere Anlage). Die Gase  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2$  werden gemischt und mit dem vom Druckelektrolyseur vorgegebenen Systemdruck (ca. 60 bar) in einen optimierten Synthese-Prozeß eingespeist, wo Wasserstoff und  $\text{CO}_2$  bei diesem Druck und geeigneter Temperatur in einem Reaktor (Katalysator) zu flüssigem Kraftstoff bzw. Methanol reagieren (Gleichung 3).

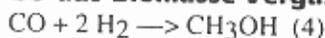
Je nach Kohlenstoff-Quelle ergeben sich folgende Reaktionsgleichungen für die Methanol-Synthese:

**$\text{CO}_2$  aus Holzvergasung o.**

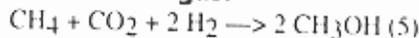
**Absorption aus Luft:**



**$\text{CO}$  aus Biomasse-Vergasung:**



**$\text{CO}_2$  aus Biogas:**



Bei dem Einsatz von  $\text{CO}$  aus Biomassenvergasung erhält man nach Gleichung (4) bei Verwendung eines 50-kW-Elektrolyseurs (ca.  $11 \text{ m}^3/\text{h}$   $\text{H}_2$ ) ca. 8 kg Methanol pro Stunde, das entspricht einer Produktion von 10 l/h. Wird Biogas verwendet (Gleichung 5), erhält man etwa 20 l/h Methanol, bei der Holzvergasung nach Gleichung (3) ca. 6,7 l/h.

Die Energieaufnahme des Elektrolyseurs liegt bei 180 MJ, der Heizwert des erzeugten Methanols (21 MJ/kg) beträgt 169 MJ (Gleichung 4). Die Prozeßwärme aus Elektrolyse und Verbrennung ist nutzbar.

Der Energieinhalt von Methanol im Vergleich zu anderen Energieträgern ist eher niedrig (Heizöl und Erdgas ca. 47 MJ/kg, Holz 14 MJ/kg, Fettkohle 30 MJ/kg, Methanol 21 MJ/kg), sein Vorteil ist die einfache Herstellung mittels regenerativer Energien. Methanol - hergestellt aus  $\text{CO}_2$  und Solar- und Windwasserstoff - ist ein hervorragender Speicher für regenerative Energien.

#### Literatur

- [1] S. Schulien, M. Steinmetz; Gas, Erdgas 130 (1989) S. 678 - 686
- [2] P. Bernhard, S. Schulien; Gas-

wärme International 43 (1994) S. 550 - 555

- [3] S. Schulien, D. Dahlinger, M. Fender; Wasserstofftechnik 6/93 (1993) S. 1 - 44
- [4] Maurer/Winkler; Biogas, C.F. Müller 1980
- [5] S. Stucki, A. Schuler, M. Constantinescu; Int. f. Hydrogen Energy 20 (1995) S. 653-663
- [6] M. Specht, A. Bandi; Forschungsverbund Sonnenenergie, Themen 94/95
- [7] V. Plzak, H. Wendt; Chem.-Ing.-Tech. 64 (1992) S. 1084 - 1095
- [8] M. Specht et al.; Electrochemical  $\text{CO}_2$  Recovery and Reduction Methods for Fuel Generation. Proc. of The Int. Symp. on  $\text{CO}_2$ , Tokyo, Japan 1993

#### Adressen :

Prof. S. Schulien  
 Fachhochschule Wiesbaden  
 Wasserstofflabor  
 D-65428 Rüsselsheim  
 Dr. G. Sandstede  
 Technologie-Consulting  
 Esparantostr. 5  
 D-60598 Frankfurt/M.  
 Dr.-Ing. H.-W. Hahn  
 vonHoerner-System GmbH  
 Schloßplatz 8  
 D-68723 Schwetzingen

## 4 Wasserstoffbusse für Oslo

**Ab 1997 werden in Oslo Wasserstoffbusse im Stadtverkehr eingesetzt. Die Oslo Lokaltrafikk wird in Gemeinschaft mit der Follo Busstrafikk 4  $\text{H}_2$ -Busse betreiben und den Einsatz in der Praxis erproben. Das Projekt ist eine Gemeinschaftsarbeit von Norsk Hydro, Raufoss Technology, Ulstein Beregn Diesel und dem Askerhus Energiverk.**

**Hinter diesen ersten vier Bussen steht der Wille zu einer sauberen Stadtluft. Auf 100 Busse soll in 5-6 Jahren die Wasserstoff-Flotte der Oslo Lokaltrafikk aufgestockt werden, wenn der Probetrieb der ersten 4 Busse erfolgreich verläuft.**

**Die Beteiligten rechnen damit, daß die Preise für die Busse deutlich sinken, wenn eine größere Anzahl von Bussen produziert wird. Noch ist das Projekt ein Forschungs- und Demonstrationsvorhaben und wird vom norwegischen Staat gefördert.**

**Der Wasserstoff stammt aus der Wasserstoff-Produktion der Norsk Hydro. Die Norsk Hydro betreibt in Norwegen bedeutende Wasserkraft - Kapazitäten. Schon seit einiger Zeit wird mit den saisonalen Überschüssen aus der norwegischen Wasserkraft im großen Stil Wasserstoff produziert. Der Wasserstoff wird in das europäische Erdgas - Netz eingespeist oder für die Zeiten bevorratet, in denen die Wasserkraftwerke eingefroren sind - oder demnächst im Stadtverkehr verbraucht. //**

**Oslo og Follo Busstrafikk A/S, Box 544, SF-1411 Kolbotn  
 Wir danken Olof Tegström, Schweden.**