

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

S. Schulien, D. Dahlinger, M. Fender  
Fachhochschule Wiesbaden

### 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 dann 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, Windenergie, Biomasse, 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. Allerdings stellt sich die Frage: ist die Energieversorgung der heutigen Industriegesellschaft mit Hilfe von Sonnen- bzw. Windenergie oder Biomasse überhaupt durchführbar?

## 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 durch Wasserzersetzung 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/.

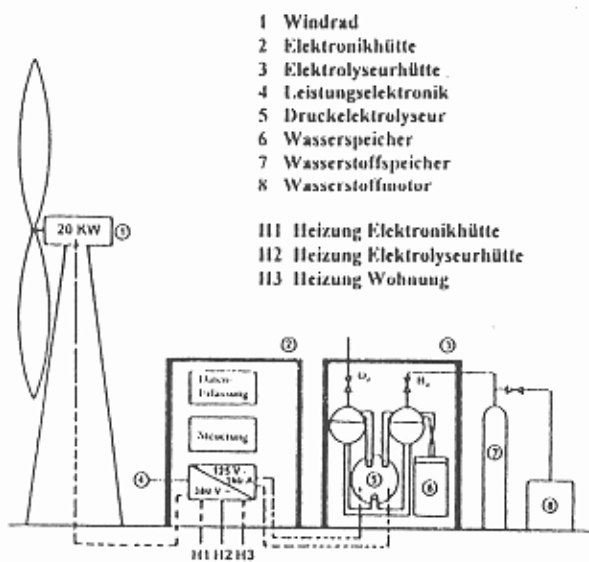


Bild 1: Skizze des Wind-Wasserstoffsystems

Die Wind-Wasserstoff-Anlage ist im Bild 1 skizziert. Ein Windrad mit einer Leistung von 20 kW bei 11 m/s Windgeschwindigkeit erzeugt die elektrische Energie, die nötig ist, um Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zu zersetzen (Gleichung 2). Die Zersetzung erfolgt in einem alkalischen Druckelektrolyseur (20 kW) bei 30 bar. Der Wasserstoff wird in einem Druckbehälter bei 30 bar gespeichert. Bei Energiebedarf treibt er ein Notstromaggregat (8 kW) mit einem Wasserstoffmotor an. Die Anlage ist sechs Jahre 1987-1994 autark auf dem Kleinen Feldberg im Taunus gelaufen.

Bild 2 zeigt ein Schema der Solar-Wasserstoffanlage. Die von Solarzellen ( $2 \text{ kW}_p$ ) erzeugte elektrische Energie dient zur Zersetzung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff in einem alkalischen Druckelektrolyseur (2 kW, 20 bar). Die Gase werden in Druckbehältern gespeichert und bei Bedarf einer alkalischen Brennstoffzelle zugeführt, in der bei der Rekombination der beiden Gase elektrische Energie frei wird (Gleichung (2) von rechts nach links gelesen).

Die Gase dienen als Langzeitenergiespeicher für Sonnen- bzw. Windenergie.

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. Ein großes Problem sind die Kosten, die bei der Energiegewinnung aus Wasserstoff anfallen. Bild 3 zeigt die Energiepreise für den Wasserstoff, der mit der oben beschriebenen Wind-Wasserstoff- bzw. mit der Solar-Wasserstoff-Anlage erzeugt wurde. Die Preisberechnung wurde nach der Annuitätsmethode durchgeführt. Der Solar-Wasserstoff ist wesentlich teurer als der Wind-Wasserstoff, der Energiepreis fällt stark mit steigender Anlagengröße. 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 Speicherkosten sind in allen drei Fällen erheblich.

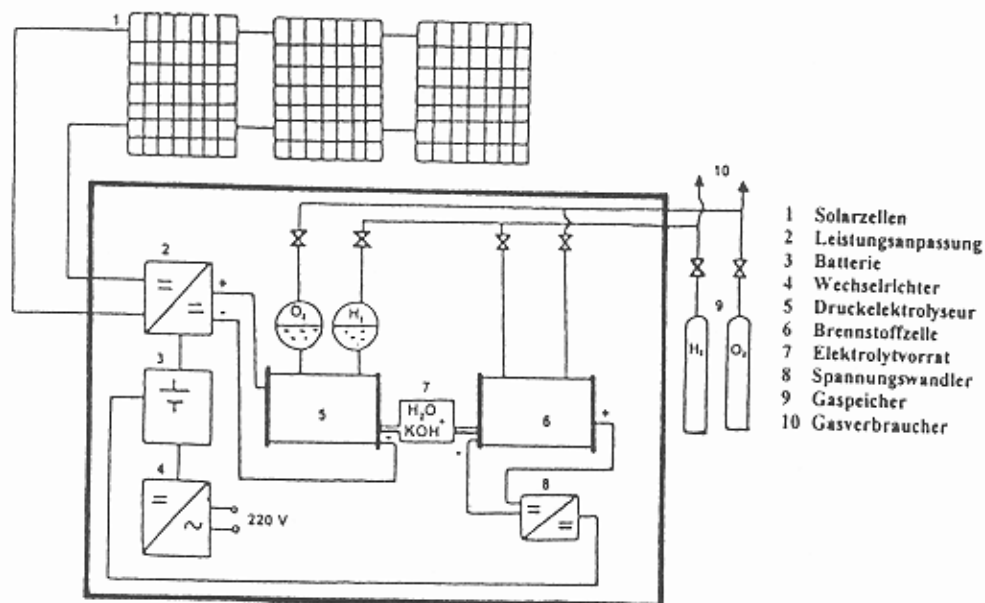


Bild 2: Schema der Solar-Wasserstoffanlage.

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.

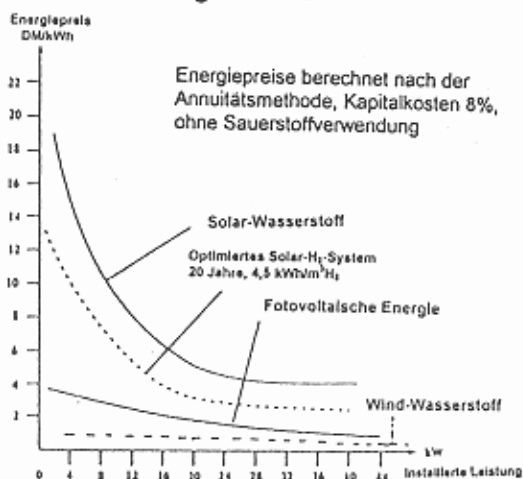


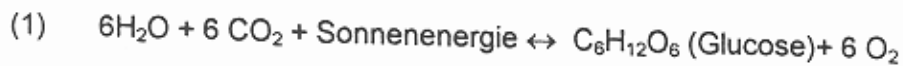
Bild 3: Energiepreise als Funktion der installierten Leistung

### 3. Weiterentwicklung der Wasserstofftechnik zur künstlichen Photosynthese

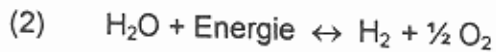
Wie kann man aus gasförmigen Wasserstoff, der mittels regenerativer Energien erzeugt worden ist, einen flüssigen, verlustfrei speicherbaren und transportablen, einfach zu handhabenden Energieträger machen? Flüssigwasserstoff ist aus Kostengründen und wegen der sehr aufwendigen Technik keine praktikable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



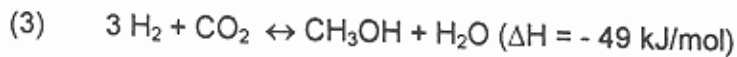
Die Sonnenenergie wird im wesentlichen dazu verwendet, das Wasser in den Blättern in seine Grundbestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zu zerlegen (Wasserelektrolyse) gemäß der Gleichung (2):



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. Glucose, Fette u.ä. sind gespeicherte Sonnenenergie und dienen dem Pflanzensamen, der beim Anwachsen noch keine Blätter hat, zur Energieversorgung.

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 Sonnenenergie 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

CO<sub>2</sub> 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 Druckelektrolyseure gegeben, das CO<sub>2</sub> kann aus den verschiedensten Verbrennungs-, Vergärungs- oder Verrottungsprozessen gewonnen werden, aus Holzvergasung, Kläranlagen, aus Quellenkohensäure, Zementwerken, Fischer-Tropsch-Synthese u.ä.

Aufgabe der Technik ist es nun, optimierte Verfahren zur Erzeugung flüssiger Brennstoffe aus Wasserstoff und CO<sub>2</sub> zu entwickeln.

Eine der Möglichkeiten ist in Bild 4 skizziert. Wasserstoff und Sauerstoff werden von einem optimierten Druckelektrolyseur bereitgestellt, das CO<sub>2</sub> kommt aus der Holzvergasung. Die Gase CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> werden gemischt und reagieren in einem geeigneten Reaktor zu Methanol (Gleichung 3).

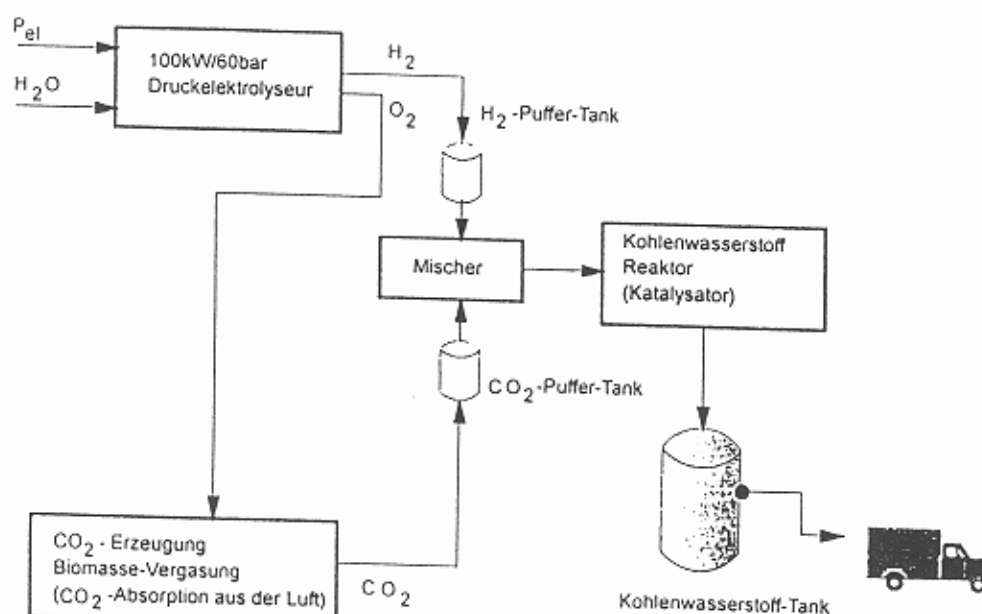


Bild 4: Schematische Darstellung einer Anlage zur Erzeugung flüssiger Energieträger.

Bild 5 zeigt einen typischen Holzvergaser der Firma Imbert, die auch die Holzvergaser für den Antrieb von privaten Automobilen im 2. Weltkrieg gebaut hat. Das Holz wird von oben in den Zylinder eingefüllt und allmählich auf Temperaturen bis zu 1400°C erwärmt wobei es allmählich vergast wird. Das entstandene Holzgas kann zum Betrieb von Motoren verwandt werden. Seine Zusammensetzung kann folgendermaßen aussehen:

H <sub>2</sub>	10 - 25 %
CO <sub>2</sub>	2 - 20 %
CO	20 - 30 %
CH <sub>4</sub>	0 - 4 %
N <sub>2</sub>	45 - 60 %

Diese Gase können für die Methanolerzeugung gemäß Gleichung (3) verwendet werden, zusammen mit dem Wasserstoff aus der Elektrolyse.

Die Biomassevergasung stellt eine Möglichkeit, große Wasserstoffmengen zu erzeugen, wie aus der angeführten Zusammensetzung des Holzgases hervorgeht. Es enthält 10%-25 % Wasserstoff, mit dem man in einer Brennstoffzelle Strom und Wärme erzeugen kann.

Eine andere Variante ist die Verwendung des  $\text{CO}_2$  aus der Zementherstellung. Ein Zementwerk produziert etwa  $100.000 \text{ m}^3/\text{h}$  Abgas. Der  $\text{CO}_2$ -Anteil dieses Abgases liegt bei ca. 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  $300.000 \text{ t/Jahr}$ .

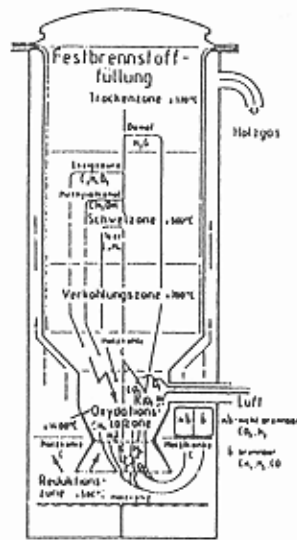


Bild 5: Vergaser für stückiges Holz

Bild 6 zeigt ein Blockschaltbild einer Anlage zur Herstellung von Methanol aus Abgasen einer Zementfabrik. Dieses Methanol ist allerdings teurer als das auf dem Weltmarkt gehandelte, das aus Erdgas ( $\text{CH}_4$ ) hergestellt wird.

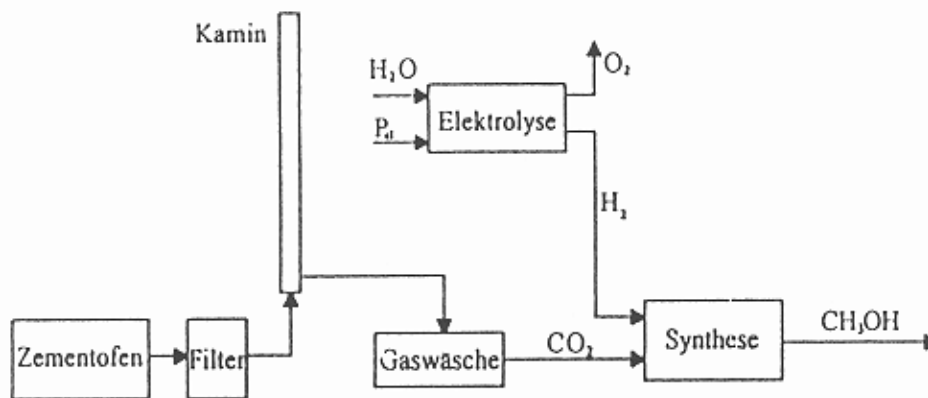


Bild 6: Blockschaltbild der Methanolsynthese mit  $\text{CO}_2$  aus Zementfabriken.

Der Sauerstoff aus der Wasserelektrolyse kann in Kläranlagen zum Abbau von Biomasse verwendet werden. Der Abbauprozess ist durch Gleichung (1) beschrieben, von rechts nach links gelesen. Wenn man unter geeigneten Bedingungen Biomasse mit Sauerstoff reagieren lässt, wird die Biomasse zersetzt, wobei  $\text{CO}_2$  und Wasser entsteht und Energie frei wird. In normalen Kläranlagen wird dem zu reinigenden Abwasser Luft zugesetzt (78 %  $\text{N}_2$ , 21 %  $\text{O}_2$ ). Mit reinem Sauerstoff erhält man eine fast fünfmal höhere Abbauleistung. Durch die Verwendung des bei der Wasserelektrolyse entstandenen Sauerstoffs kann der Wasserstoffpreis erheblich gesenkt werden.



Bild 7 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 Aquaseparator, in dem nicht abgebaute organische Partikel abgeschieden werden. Mit dem beschriebenen Energiesystem zusammen mit der Reinigungsanlage kann ein geschlossener Energie- und Stoffkreislauf verwirklicht werden, wie er in der Natur seit Urzeiten abläuft und wie er in Gleichung (1) beschrieben ist.

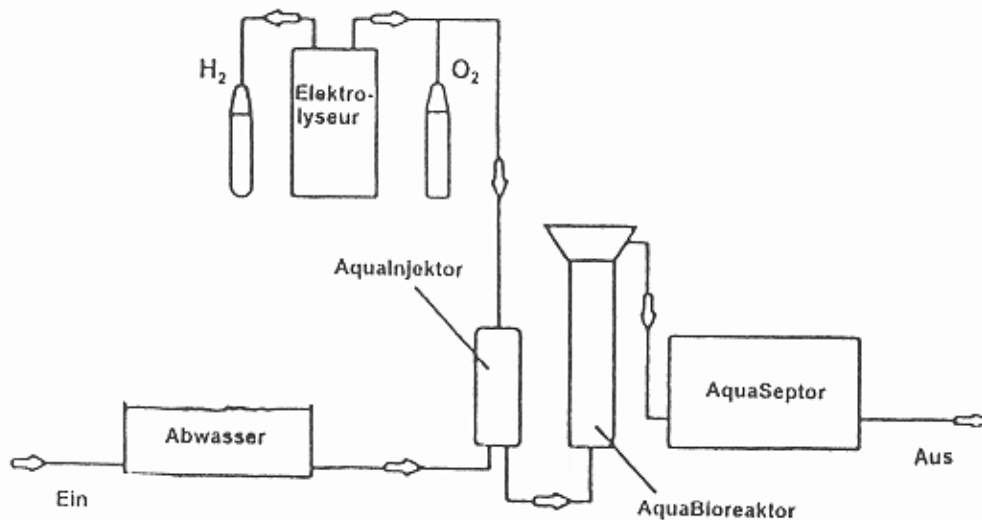


Bild 7: Schematische Darstellung einer Anlage zur Reinigung von Abwässern.

Die experimentellen Untersuchungen an der in Bild 7 skizzierten Reinigungsanlage für hochbelastete Abwasser eines Weinbaubetriebs zeigten, daß durch den Zusatz von Sauerstoff und geeigneten Enzymen ein starker chemischer Abbau von Biomasse stattfindet, der nicht von der Anwesenheit empfindlicher Mikroorganismen abhängt.

Bei starker Belastung des Abwassers ist also eine zweistufige Reinigung empfehlenswert: in der ersten Stufe chemischer Abbau mittels hoher Sauerstoff- und Enzymkonzentrationen, in der zweiten Stufe biologischer Abbau bei niedriger Sauerstoffkonzentration im Abwasser. Damit entfallen die in den Kläranlagen häufigen Probleme mit der Biologie, die u.a. auftreten, wenn die Abwasser unregelmäßig und stark belastet sind.

#### 4. Die Brennstoffzelle als Initialzündung für die neue Energietechnik

Die Überlegungen und Messungen zur Wasserstofftechnik haben nur akademischen Wert, solange es keine leistungsfähigen Verbraucher für den mit regenerativen Energien erzeugten Wasserstoff gibt. Die Situation hat sich dadurch völlig verändert, daß alle großen Automobilfabriken der Welt sich entschlossen haben, bis zum Jahre 2004 ein serienreifes Brennstoffzellenauto auf den Markt zu bringen.

Dadurch werden erhebliche Mittel in die Entwicklung gebrauchsfähiger preiswerter Brennstoffzellen investiert.

Mit der so entwickelten Brennstoffzelle steht zum ersten Male ein leistungsfähiger Wasserstoffverbraucher zur Verfügung, mit dem durch Verbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff elektrische und thermische Energie erzeugt werden kann (Gl. 2 von rechts nach links gelesen). Das bedeutet, daß Anlagen wie die in Bild 2 skizzierte in jedem Haus zur Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt werden können.

Da die Fotovoltaik noch relativ teuer ist, werden diese Kleinkraftwerke zunächst mit Erdgas oder Propan betrieben werden. Die Anlagen benötigen also einen Reformier, welcher der Brennstoffzelle vorgeschaltet ist. Er hat die Aufgabe, vom Erdgas ( oder Propan) den Wasserstoff abzuspalten, wobei CO<sub>2</sub> entsteht. Der Wasserstoff wird in der Brennstoffzelle mit Sauerstoff verbrannt (Gl. 2). Bei dieser Verbrennung entsteht Wasser sowie elektrische und thermische Energie.

Die Automobilindustrie benötigt die Brennstoffzelle als Stromerzeugungsaggregat für ihre Autos, die mit Elektromotoren angetrieben werden. Ihr Entwicklungsschwerpunkt ist die PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell). Außer an der PEM-Brennstoffzelle wird an der Entwicklung der alkalischen Brennstoffzelle AFC (Alcaline fuel-cell), der phosphorsauren Brennstoffzelle PAFC (Phosphoric Acid FC), der Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle MCFC ( Molten-Carbonate FC) und der Festoxid-Brennstoffzelle SOFC (Solid oxide FC) gearbeitet.

Die Eigenschaften dieser Zellen sind in Tab. 1 angegeben. Zudem wird die Direktmethanol-Brennstoffzelle entwickelt, in der Methanol mit Sauerstoff reagiert, wobei elektrische und thermische Energie frei wird.

Da die Brennstoffzelle vibrationsfrei ist, geräuschlos und ohne Abgase arbeitet, wird sie auf Dauer die Blockheizkraftwerke ersetzen im Bereich von Milliwatt bis viele Megawatt. Sie repräsentiert die bessere und weiter fortgeschrittene Technik.

Die Tabelle 2 zeigt Einsatzmöglichkeiten für Brennstoffzellen. Die technischen Voraussetzungen für die Einführung der neuen Energietechnik sind also gegeben: wesentliche Geräte – wie Elektrolyseure und Brennstoffzellen, Motoren und Heizungen – sind entwickelt. Die Politik hält sich allerdings noch bedeckt.

Typ Betriebs- temperatur	Brenngas Oxidant	Elektroden- reaktion ( leitendes Ion)	Elektrolyt	Elektroden ( mg / cm <sup>2</sup> )	U in V	S in mA/ cm <sup>2</sup>	Zellen- leist.g kW/m <sup>2</sup> (Zellen- dicke)	System- Komponenten	η Zelle System	Besonder- heiten Anmerkungen
AFC 60 - 90 °C	Reinst H <sub>2</sub> Reinst O <sub>2</sub>	K: 1/2O <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O+2e <sup>-</sup> → 2OH <sup>-</sup> A: H <sub>2</sub> + 2OH <sup>-</sup> → H <sub>2</sub> O + 2e <sup>-</sup> ION: OH <sup>-</sup>	Kalilauge ( 30 Gew % KOH)	A: Raney Ni (110) K: Raney Ag ( 60 )	0,8	400	3,2 (0,55cm)	BZ, Wasseraus- schleußung (Elektrolytum- wälzung), Inverter	60 - 70 %	hohe Leistung bei geringem Gewicht noch sehr teuer Leistungsbereich 1 - 100 kW, Anwendung Elektrotraktion
PEMFC 60 - 80 °C (120 °C)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , Luft	K: 1/2O <sub>2</sub> +2H <sup>+</sup> +2e <sup>-</sup> → H <sub>2</sub> O A: H <sub>2</sub> → 2H <sup>+</sup> +2e <sup>-</sup> ION: H <sup>+</sup>	protonenleitende Polymer-Elektrolyt- membran (Nafion- oder Dow-Polymer- Folien)	A / K Pt ( 4 )	0,6	850- 1200	5,1-7,2 (0,3cm)	BZ, Wasseraus- schleußung, Kühlung,(Inverter, Luftverdichter)	50 - 68 % 43 - 58 % (Luftver- dichter)	( siehe AFC )
PAFC 160 - 220 °C	Erdgas , Biogas O <sub>2</sub> , Luft	K: 1/2O <sub>2</sub> +2H <sup>+</sup> +2e <sup>-</sup> → H <sub>2</sub> O A: H <sub>2</sub> → 2H <sup>+</sup> +2e <sup>-</sup> ION: H <sup>+</sup> ( H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> )	konzentrierte Phosphorsäure 30% H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	A / K Pt (0,25/0,5)/ C (PTFE gebunden )	0,7	300	2 (0,5cm)	Reformer,BZ, Wärmetauscher- verbund,Druck- wechseladsorption Inverter	55 % 40 %	Größe der Einheiten z. Zt 200 kW Anwendung : BHKW (Gesamt- wirkungsgrad 80%)
MCFC 620 - 660 °C	Erdgas,Kohlegas, Biogas ,H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , Luft	K: O <sub>2</sub> +2CO <sub>2</sub> +4e <sup>-</sup> → 2CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> A: H <sub>2</sub> + 2CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> → H <sub>2</sub> O+CO <sub>2</sub> +2e <sup>-</sup> CO +CO <sub>2</sub> → 2CO <sub>2</sub> +2e <sup>-</sup> ION: CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Alkalikarbonat- Schmelzelektrolyt Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> und K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	A: Ni K: NiO	0,7	150	1 (0,5cm)	Kohlevergasung oder Reformier (event.interne Reformierung),BZ, GUD-Anlage zur Wärme- und Rest- enthalpienutzung, Inverter	65 % 55 % ext. Reforming 60 % Int. Reforming	Größe der Einheiten bis einige MW denk- bar;CO <sub>2</sub> muß im Kreislauf der Zelle geführt werden Anwendung: BHKW
SOFC 800 - 1000 °C	Erdgas,Kohlegas, Biogas ,H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , Luft	K: 1/2O <sub>2</sub> +2e <sup>-</sup> → O <sup>2-</sup> A: H <sub>2</sub> + O <sup>2-</sup> → H <sub>2</sub> O+2e <sup>-</sup> ION: O <sup>2-</sup>	Yttriumstabilisiertes Zirkonoxid (ZrO <sub>2</sub> / YO <sub>3</sub> )	A: Ni Cermet K: LaSrMnO <sub>3</sub>	0,7	500	3,5 (0,3cm)	( siehe MCFC )	60 - 65 % 68 % internes Reforming	Größe der Ein- heiten bis einige MW denkbar, im Prinzip ein- fache System- technik Anwendung: größ.Kraftwerke

System-  
wirkungsgrad  
steigt /  
Zellen-  
wirkungsgrad  
sinkt

Material  
sinken  
Ansprü-  
Reinhe-  
Prozess-  
steiger

Tab. 1 Eigenschaften verschiedener Brennstoffzellentypen /14/



1 W:	Stromquellen für tragbare Computer, Radios, Sender usw.
10 W:	Stromquellen für Lichtsignale, unbemannte Raumfahrt usw.
100 W:	Tragbare Stromerzeuger für Wohnwagen, Rettungsdienste, Militär usw.
1 kW:	Stromerzeuger für Handwerker und Montageteams Stromquellen für Fahrzeuge, Wohnwagen, Berghütten, Segelboote Antrieb für kleinere Hybridfahrzeuge (Brennstoffzelle und Batterie)
10 kW:	Stromerzeugende Gasbrenner für Hausheizungen Antrieb für Kraftfahrzeuge, Bordstromversorgung für Reisebusse, Lastkraftwagen, Bahn, Schiffe, Flugzeuge Mini-Heizkraftwerke Stromerzeugung für Gebäude, Anlagen, Gewerbebetriebe Notstromaggregate
100 kW:	Blockheizkraftwerke, Stromerzeugung mit Biogas, Gichtgas usw. Antrieb von schweren Fahrzeugen, Bahnen, Schiffen stationäre Stromerzeugung
1 MW:	Blockheizkraftwerke, dezentrale Stromerzeugung
10 MW:	Dezentrale Kleinkraftwerke (Brennstoffzelle + Gasturbine)
100 MW:	Effiziente Großkraftwerke (Brennstoffzelle + Gasturbine + Dampfturbine)

Tab. 2 Einsatzmöglichkeiten für Brennstoffzellen /15/

## 5. 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 /16/.

## 6. Hindernisse für die Einführung der neuen Energietechnik

Wer die Geschichte der vergangenen Jahrzehnte verfolgt, gewinnt nicht den Eindruck, daß die Mächtigen beabsichtigen, das Erdöl als Energieträger zu ersetzen. Die erdölreichen 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.

Bei dieser Entscheidung sind politische Überlegungen maßgebend, keine technischen oder humanitären. Wenn Deutschland seine Energierechnungen mit Technik bezahlt hätte, wäre dies von den USA als feindlicher Akt betrachtet worden. Eine ähnliche Situation führte in den dreißiger Jahren zur Feindschaft der USA gegen Deutschland, weil Deutschland seine Einfuhren aus Südamerika und dem Balkan mit Technik bezahlte und nicht mit Dollar, die es gegen Zinsen an der Wallstreet hätte leihen müssen. Wenn andere Länder das auch getan hätten, wäre der Dollar - und damit die USA - am Ende gewesen. Und das wäre ja nicht gut.

Warum kommt die neue Energietechnik nicht voran? Was könnte ihre Entwicklung fördern, was sie behindern? Teuer ist die Entwicklung neuer Energietechniken allemal, Beispiele dafür sind die Entwicklung des synthetischen Benzins (Kohleverflüssigung) oder der Kernenergie (Projekt Manhattan).

Wie stehen die maßgeblichen Kräfte der Gesellschaft zur Einführung einer neuen Energietechnik auf der Basis von Wasserstoff und künstlicher Photosynthese? Die Standpunkte der Befragten gehen von vorsichtiger Zustimmung (Realisierung allerdings erst in 50 Jahren) bis zu vollständiger Ablehnung (völlig unwirtschaftlich). Das Meinungsspektrum zur Erdölwirtschaft vor hundert Jahren war kaum anders, als man das Benzin zum Betrieb des Autos in der Apotheke kaufen mußte. Allerdings zeigte der erste Weltkrieg dann, daß es ohne Benzin nicht mehr ging.

Es ist ein undankbares Geschäft, die Beweggründe der einzelnen gesellschaftlichen Gruppen für ihre Einstellung zur neuen Energietechnik zu analysieren. Man würde dabei in zu viele Fettnäpfchen treten. Als maßgebliche gesellschaftliche Gruppen und eventuelle Geldgeber kommen infrage: die unterschiedlichen Ministerien, die EU, die Wirtschaft, die Gewerkschaften, die Parteien, die Wissenschaft, die Medien, die Erdölländer usw. So ist z.B. der Staat mit seinen Ministerien und Behörden durch die Benzinsteuern u.ä. an die Erdölwirtschaft gebunden und nicht an einer neuen umfassenden Energietechnik interessiert. Die Motive der einzelnen Gruppen für ihre Ablehnung der Energietechnik sind unterschiedlich, das Ergebnis ist das Gleiche: Ablehnung. Es ist auch kaum zu erwarten, daß irgendein Staat sich aus der Abhängigkeit der Ölmultis und des Dollars befreien wird. Er verdient ja daran, und außerdem geht es allen sehr gut. Die Warnzeichen werden geflissentlich übersehen.

## 7. 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 | 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, M. Constantinescu	Int.J.Hydrogen Energy 20 (1995) D.653-663
/9/	M. Specht, A. Bandi	Forschungsverbund Sonnenenergie, Themen 94/95
/10/	V. Plzak, H. Wendt	Chem.Ing.-Techn. 64 (1992) 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. dtv wissenschaft 1980
/14/	R. Haberstumpf	Wasserstofftechnik 1/99
/15/	U. Bossel	Brennstoffzellen HGC 1998
/16/	Joachim Fernau	Halleluja, Ullstein 1995

## 8. Diplomarbeiten zum Thema

Die beschriebenen Anlagen wurden durch die nachfolgend zitierten Diplomarbeiten in den Fachbereichen Physikalische Technik und Elektrotechnik entwickelt, aufgebaut und optimiert. Ein Großteil der Messungen wurde in Laborarbeiten des Wasserstofflabors durchgeführt, die hier nicht spezifiziert sind, sowie in den Labors für elektrische Maschinen und für Energieelektronik des Fachbereichs Elektrotechnik der FHW.

1. Rainer Freichel  
Produktion von Wasserstoff mit Solarenergie  
1984
2. Birgit Kufs  
Konstruktion, Bau und Inbetriebnahme eines  
Druckelektrolyseurs zur Erzeugung von Wasserstoff  
1985
3. Hans Glöckner  
Speicherung von Wasserstoff in Hydridspeichern und  
Druckflaschen für einen Wasserstoffmotor  
1986
4. Michael Steinmetz  
Anpassung eines Druckelektrolyseurs an einen  
Solargenerator. Katalytische Rekombination  $H_2O_2$   
1986
5. Ricarda Schmittner  
Wärmeenergieversorgung eines autarken Hauses auf  
der Basis der Wasserstofftechnik  
1987
6. Bernd Weiland  
Anpassung eines Druckelektrolyseurs an einen 500  
Watt-Solargenerator  
1987
7. Stefan Bär  
Untersuchung der physikalischen Eigenschaften  
katalytischer Heizsysteme  
1988

8. Olav Hahn  
Optimierung eines 500-Watt-Druckelektrolyseurs.  
Konstruktion eines 20-kW-Druckelektrolyseurs  
1988
9. Carmen Lachner  
Auswahl, Entwicklung und Umbau von Meßwertgebern  
für alkalische Druckelektrolyseure  
1988
10. Joachim Kleber  
Konstruktion, Bau und Inbetriebnahme eines  
Teststandes für einen Wasserstoff-Motor  
1988
11. Uwe Rudersdorf  
Auslegung der Datenerfassung und Datenverarbeitung  
eines Wind-Wasserstoff-Systems  
1988
12. Gerhard Raudasch  
Konstruktion, Bau und Inbetriebnahme einer  
Elektrolyseanlage zum testen von Elektroden und  
Diafragmen  
1988
13. Thilo Gebhard  
Bau von Reglereinrichtungen für einen  
wasserstoffbetriebenen Otto-Motor  
1989
14. Michael Bäuerle  
Umbau eines Otto-Motors auf Wasserstoffbetrieb  
1989
15. Rolf Hofmann  
Konstruktion und Bau eines katalytischen Brenners.  
Wirkungsgradmessungen  
1989
16. Peter Häring  
Inbetriebnahme und Optimierung eines 20-kW-  
Druckelektrolyseurs  
1989
17. Martin Strippel  
Steuerung einer 20-kW-Energieversorgungsanlage  
1989
18. Matthias Meckle  
Datenerfassung und -verarbeitung eines 20-kW  
Energieversorgungssystems  
1989
19. Klaus Krumb  
Messungen an Elektroden und Diafragmen zur  
Optimierung eines Druckelektrolyseurs  
1989
20. Michael Wüst  
Konstruktion und Bau eines Teststandes zur offenen  
Wasserstoffverbrennung  
1989
21. Wolfgang Flohr  
Umbau eines Einzylinder-Otto-Motors auf  
Wasserstoffbetrieb  
1989
22. Hans-Jürgen Gerbig  
Konstruktion und Bau eines Teststandes zur  
Untersuchung von Katalysatoren für H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Rekombination  
1989
23. Ulrich Hartmann  
Optimierungsmessungen am Notstromaggregat mit  
Wasserstoffbetrieb  
1989
24. Waltraud Jackl  
Messungen zur Optimierung eines Wind-  
Wasserstoffsystems  
1989
25. Karl-Heinz Päsold  
Untersuchungen zur Erhöhung des Wirkungsgrades des  
Wind-Wasserstoff-Systems  
1989
26. Norbert Späth  
Optimierung eines 20-kW-Druckelektrolyseurs  
1989

27. Rainer Höreth  
Konstruktion und Bau eines katalytischen Brenners mit einer Leistung von 1 kW  
1990
28. Ralf Jochim  
Konstruktion und Bau eines katalytischen  $H_2-O_2$ -Brenners 2kW  
1991
29. Gerlinde Bergold  
Messungen an einer Brennstoffzelle  
1990
30. Dettmer Mayer  
Windkanalmessungen am 1:10-Modellrotor der Windkraftanlage BW 120  
1990
31. Hans Welzel  
Berechnung, Auslegung und Bau eines 1:10-Modells der Windkraftanlage BW 120  
1990
32. E. Hohl  
Anpassungselektronik für Solargenerator und Wasserelektrolyseur (Cuk-Konverter)  
1990
33. Ahmet Yilmaz  
Optimierung eines 20-kW-Druckelektrolyseurs  
1990
34. Helmut Zerbe  
Anpassung einer elektronischen Zündzeitverstellung und Konzeption eines BHKW für einen Wasserstoffmotor  
1990
35. Joachim Barton  
Inbetriebnahme einer Wasserpumpe mit  $H_2$ -Motor  
1990
36. Ralf Reutter  
Konzeption einer dezentralen Energieversorgung auf der Basis von Wasserkraft und Wasserstoff für ein Mehrfamilienhaus mit Gaskessel  
1991
37. Peter Bernhard  
Konzeption und Datenerfassung eines 2 kW-Energieversorgungssystems auf der Basis von Solarenergie, Wasserstoff, Brennstoffzelle  
1991
38. Themistokles Sikalopoulos  
Konstruktion, Bau und Inbetriebnahme einer Gasreinigungsanlage ( $H_2$  in  $O_2$ ,  $O_2$  in  $H_2$ )  
1991
39. Christian Mohn  
Messungen am System Solarzelle-Elektrolyseur-Brennstoffzelle  
1991
40. Oliver Bettmann  
Konstruktion und Bau eines BHKW auf der Basis eines Opel-Corsa-Motors für  $H_2$ -Betrieb  
1991
41. Jürgen Klungler  
Konstruktion und Bau eines Druckelektrolyseurs 2 kW, 20 bar  
1992
42. Jürgen Roscher  
Messungen an einer Wasserstoffheizung  
1992
43. Clemens Heinz  
Optimierung des Systems Solarzelle-Elektrolyseur-Brennstoffzelle  
1992
44. Horst-Stefan Jochum  
Konstruktion eines optimierten alkalischen Druckelektrolyseurs 2 kW, 20 bar  
1992
45. Michael Hoffmann  
Aufbau der Datenverarbeitung für das System Solarzelle-Elektrolyseurs-Brennstoffzelle  
1992

- |                           |  |
|---------------------------|--|
| 46. Dieter Weller         | Messungen an einer Brennstoffzelle 1,2 kW<br>1992  |
| 47. Reinhard Rau          | Optimierungsmessungen am System Solarzelle-<br>Elektrolyseur-Brennstoffzelle<br>1992   |
| 48. Hans-Peter Schneiders | Konstruktion und Bau einer Lötanlage mit<br>Knallgasbrenner<br>1992  |
| 49. Kai Haegelen          | Untersuchung der Wirtschaftlichkeit einer autonomen<br>Energieversorgung auf der Basis von Windenergie und<br>Wasserstoff<br>1993  |
| 50. Torsten Leber         | Konstruktion und Optimierung eines H <sub>2</sub> -Brenners für<br>eine Gasheizung<br>1993   |
| 51. Uwe Halm              | Konstruktion eines katalytischen Brenners für H <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> -<br>Gemische (4 kW)<br>1993                          |
| 52. Sahin Dönmez          | Entwicklung eines Geräts zur Konzentrationsmessung<br>von KOH<br>1993  |
| 53. Rainer Korzendörfer   | Entwicklung einer Meerwasserentsalzungsanlage mit<br>einem BHKW als Energiequelle<br>1992  |
| 54. Olaf Wünn             | Entwicklung eines Geräts zur Gasreinheitsmessung (H <sub>2</sub><br>in O <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> in H <sub>2</sub> )<br>1993 |
| 55. Thomas Preiß          | Optimierung eines 2 kW-Elektrolyseurs<br>1994  |
| 56. Alexander Schramm     | Konstruktion und Bau eines Gasmischers für Erdgas-<br>Wasserstoff-Gemische<br>1995   |
| 57. Andreas Kessel        | Messungen an der Solar-Wasserstoff-Anlage<br>1995  |
| 58. Bernd Isler           | Konstruktion und Bau eines katalytischen H <sub>2</sub> -Luft-<br>Brenners 10 kW<br>1995   |
| 59. Matthias Prescher     | Optimierung eines 2 kW-Elektrolyseurs zur O <sub>2</sub> -<br>Erzeugung<br>1995  |
| 60. Michael Neuendorff    | Umbau eines Dieselmotors auf H <sub>2</sub> -Betrieb<br>1995   |
| 61. Ralf Heger            | Konstruktion eines 50-kW-Plattenelektrolyseurs<br>1996   |
| 62. Susanne Krämer        | Messungen an einer neuartigen Sauerstoffversorgung<br>für die Klärtechnik<br>1996  |
| 63. Andreas Laudert       | Konstruktion und Inbetriebnahme einer neuartigen<br>Sauerstoffversorgung für die Klärtechnik<br>1996                               |
| 64. Detlev Ott            | Konstruktion und Bau eines katalytischen Brenners für<br>nichtexplosive Wasserstoff-Luft-Gemische<br>1998                          |



65. Hubert Dieffenbacher  
Konstruktion und Bau eines neuartigen alkalischen  
Druckelektrolyseurs  
1997
66. Andreas Kurz  
Entwicklung neuartiger Elektroden und Diafragmen für  
die alkalische Wasserelektrolyse  
1997
67. Fernando Soeiro  
Entwicklung eines Gasanalyse- und -reinigungssystems  
für die alkalische Druckelektrolyse  
1997
68. Jutta Huxel  
Messungen an einer dezentralen Kläranlage  
1998
69. Gunther Schmidt  
Optimierungsmessungen an einer rechnergesteuerten  
Solar-Wasserstoff-Anlage  
1998
70. Dieter Schad  
Konstruktion und Bau eines katalytischen Brenners (10  
kW) für nichtexplosive Wasserstoff-Luft-Gemische  
1998
71. Michael Ruhe  
Optimierung einer dezentralen Kläranlage für  
Weinbaubetriebe  
1999
72. Frank Nauth  
Konstruktion einer Anlage zur Trinkwasseraufbereitung  
mit elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff  
1999
73. Manuel Keitsch  
Konstruktion eines alkalischen Druckelektrolyseurs 100  
kW  
2000
74. W. Bornath  
Inbetriebnahme eines 20 kW-Windrades mit  
kondensatorerregtem Asynchrongenerator zur  
Wasserstoffherzeugung  
1988
75. Glombitza  
Bau eines 28V/20A-Batterieladers, der ohne  
Fremdenergie am Windrad mit 28V bis 200V  
Eingangsspannung arbeitet  
1988
76. Brockhues  
Regeleinrichtung für den Batterielader  
1988
77. Weber  
Kondensatorerregter Asynchrongenerator mit  
Gleichrichterlast  
1989
78. Ludwig  
Übergeordnetes Regelverfahren für ein 20 kW-Windrad  
bei veränderlicher Drehzahl für Wasserstoffherzeugung  
1989
79. Walla  
Speicherprogrammierbare Steuerung für  
Wasserstoffherzeugung mit Windkraft  
1990
80. Beranek  
Datentransfer zwischen Laptop und Oszilloskop für  
Messungen am Windrad  
1991
81. Gronau  
Grafische Darstellung  
1991
82. Kathe  
Tiefsetzsteller für 600V/125A für Wasserstoffherzeugung  
mit 160 V  
1990
83. Wenz  
Permanenterregter Generator für ein 300 W-Windrad  
1993

- |                      |   |
|----------------------|---|
| 84. Stauder          | Untersuchung einer PKW-Lichtmaschine für<br>Windkraftnutzung<br>1994  |
| 85. Decker           | I-Umrichter zur Erregung eines<br>Käfigläuferasynchronmotors der als Windkraftgenerator<br>im Inselbetrieb läuft<br>1994  |
| 86. Bätz             | dto.  |
| 87. Ickstadt         | Regeleinrichtung für I-Umrichter für kondensatorerregte<br>Asynchrongeneratoren für Windräder<br>1995   |
| 88. Wolf Flothow     | 80A-MOSFET-Tiefsetzsteller<br>1990  |
| 89. Stefan Heimfarth | Entwicklung eines DC-DC Netzteils für 1000V mit<br>IGBT's<br>1991   |
| 90. Andreas Schäfer  | Analoge Extremwertregelung für Solargenerator<br>1990   |
| 91. Petra Stahlheber | Digitale MPP-Regelung eines Solargenerator<br>1990  |
| 92. Stefan Besier    | Solarwechselrichter für Netzeinspeisung<br>1991   |
| 93. Frank Ernst      | Meßtechnische Erfassung der Anpaßelektronik einer<br>photovoltaische MPP-Regelung<br>1991   |
| 94. Ulrich Grosse    | Anpaßelektronik für Photovoltaik-Wasserstoffanlage<br>1991  |
| 95. Alexander Kramp  | MOSFET-Hochsetzsteller für Brennstoffzelle<br>1991  |
| 96. Bernhard Palm    | Leistungsteil eines Cuk-Konverters<br>1991  |
| 97. Rupert Plaschke  | Steuerelektronik für stromgeregelten Cuk-Konverter<br>1991  |
| 98. G. Rauch         | Konstruktion und Bau eines katalytischen H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> -<br>Brenners mit einer Leistung von 4 kW<br>1993   |
| 99. P. Frisch        | Wirtschaftlichkeitsanalyse einer dezentralen Kläranlage<br>mit optimierter Sauerstoffversorgung am Beispiel eines<br>Unternehmens der Weinbauwirtschaft<br>FB Wirtschaft 1998 |
| 100 M. Werner        | Untersuchungen an einem Direkt-Methanol-<br>Brennstoffzellen-System<br>2000   |
| 101 B. Lämmersdorf   | Auswahl und Bewertung von Pumpenkonzepten zur<br>Wasserstoffumwälzung in Brennstoffzellensystemen für<br>Fahrzeuge<br>2000  |

Die Arbeiten wurden gefördert durch Zuwendungen des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, des Hessischen Ministeriums für Umwelt und Energie, der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, der Firmen vH-S und Griesser Apparatebau, Opel AG, Messer-Griesheim u.a., wofür hier gedankt sei.