Wasserstofftechnik an der Fachhochschule Wiesbaden

Wasserstoff als alternativer Energieträger (1993)

Wasserstoff und Sauerstoff aus regenerativen Energiequellen für die Energieversorgung und Umwelttechnik (1997)

Messungen an einem Energieversorgungssystem auf der Basis von Windenergie und Wasserstoff (1989)

Regenerative Energien mit Wasserstoff als Speichermedium (1991)

Geräte für die Wasserstofftechnik (2003)

Dezentrale Kläranlage mit optimierter Sauerstoffversorgung (1999)

Hydrogen and carbon dioxide as raw materials for an ecological energy technology (1998)

WASSERSTOFFTECHNIK

Informationsblatt der Arbeitsgruppe
Wasserstofftechnik an der
Fachhochschule Wiesbaden

FHW · Projekt Wasserstofftechnik · Heinr.-Lersch-Str. 1 65428 Rüsselsheim

6/93 August 1993

Wasserstoff als alternativer Energieträger - Erzeugung, Speicherung, Nutzung

S. Schulien, D. Dahlinger, M. Fender

	Seite
1. Einleitung	1
2. Dezentrales Wind-Wasserstoffsystem	1
3. Dezentrales Solar-Wasserstoffsystem	17
4. Energiekosten	26
5. Komponenten für die Wasserstofftechnik	28
6. Anwendungsmöglichkeiten	43

1. Einleitung

Da die fossilen Energieträger Erdöl, Kohle, Erdgas nicht unbegrenzt verfügbar sind und weil ihre Verbrennung auf Dauer Schäden in Umwelt und Atmosphäre verursacht, ist es eine der wichtigsten Aufgaben von Wissenschaft und Technik, andere Energiesysteme zu entwickeln.

Ein großer Teil des Energiebedarfs könnte über Solarenergie oder Windenergie gedeckt werden. Der wesentliche Nachteil dieser Energieformen liegt darin, daß sie sehr unregelmäßig und in geringer Konzentration angeboten werden, der Energiebedarf aber kontinuierlich gedeckt werden muß.

Wenn diese Energieformen sich für den allgemeinen Bedarf durchsetzen sollen, muß das Problem der Energiespeicherung gelöst sein. Hier bietet sich der Wasserstoff als Energieträger und -speicher an: er ist ein praktisch unerschöpflicher umweltfreundlicher Energieträger mit hohem Energiegehalt (ca. 39 kWh/kg).

Er kann durch Zersetzung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gewonnen werden gemäß der Reaktionsgleichung

$$(1) \quad H_2O + \text{Energie} \rightarrow H_2 + \tfrac{1}{2} O_2$$

Die Energie zur Zersetzung des Wassers kann man aus Sonnen- oder Windkraftwerken entnehmen. Der Wasserstoff ist gut speicherbar und transportabel, die in ihm gespeicherte Energie leicht in andere Energieformen wandelbar, nämlich

$$(2) \quad H_2 + \tfrac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O + \text{Energie}$$

Sein Verbrennungsprodukt mit Sauerstoff ist reines Wasser, es tritt also keine Umweltbelastung auf. Bei einigen Verbrennungsprozessen mit Luft können Stickoxide entstehen.
Die FHW hat in den letzten Jahren konsequent Systeme und Komponenten für die Wasserstoffenergietechnik entwickelt.

2. Dezentrales Wind-Wasserstoffsystem

Die Fachhochschule Wiesbaden betreibt in Zusammenarbeit mit der Universität Frankfurt auf dem Kleinen Feldberg im Taunus eine Versuchsanlage zur Energieversorgung auf der Basis von Windenergie und Wasserstoff (s. Bild 1).

Ein 20-kW-Windrad liefert die Energie zur Zersetzung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff in einem alkalischen Druckelektrolyseur (30 bar). Der erzeugte Wasserstoff wird in Druckflaschen (2,4 m³) bei 30 bar gespeichert und bei Bedarf zum Antrieb eines Motors verwendet, der mit einem Stromgenerator gekoppelt ist (8 bzw. 4 kW). Ziel der Entwicklung ist die Optimierung des Gesamtsystems Windrad-Elektrik-Druckelektrolyseur-Speicher-Generator sowie der Einzelkomponenten.

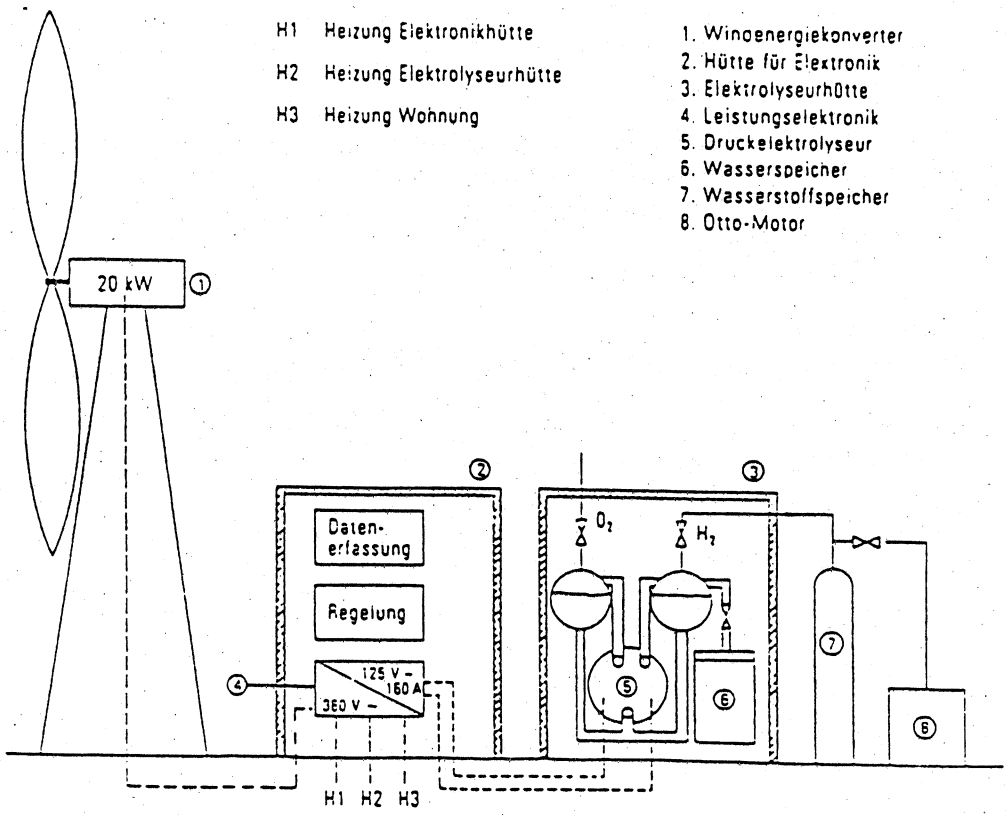


Bild 1 Skizze des Energieversorgungssystems

Die erste Ausbaustufe des Systems enthält einen bipolar aufgebauten Elektrolyseur mit zehn hintereinander geschalteten Zellen (ca. 2-3 kW), der Endausbau enthält 50 Zellen.

Windrad

Als Windrad wird ein kommerzielles Gerät der Firma Brümmer (BW 120) mit einer Leistung von 20 kW bei einer Windgeschwindigkeit von 11 m/s (Bild 2) verwendet. Es ist für Inselbetrieb ausgelegt mit einem kondensatorerregten Asynchrongenerator. Die vom Windrad gelieferte elektrische Energie betreibt den Druckelektrolyseur. Außerdem dient sie zur Heizung der Meßhütten und von Wohnräumen. Das Windrad ist seit Juli 1988 in Betrieb.

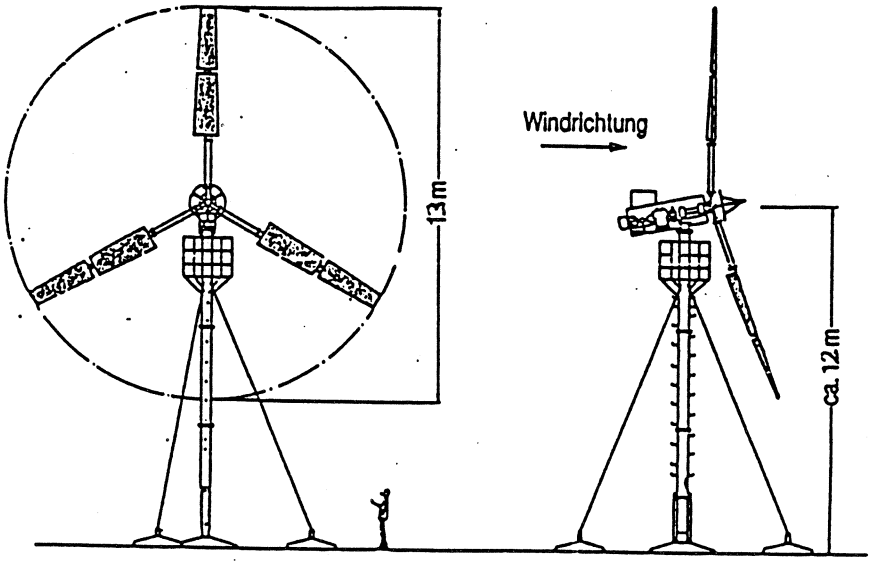


Bild 2 Windrad BW 120

Leistungselektronik

Bild 3 zeigt die elektrische Schaltung der Anlage. Die eingezeichneten Kondensatoren (sie sind den Statorspulen parallel geschaltet) sorgen für die Erregung des Generators. Eine Kondensatorumschaltung ermöglicht den Betrieb mit veränderlicher Drehzahl. Ein Mikroprozessor wählt die Kondensatorgröße aus -es sind drei Kondensatorblöcke vorhanden - und paßt so die Windradkennlinie der Last an.

Die Elektronik steuert den Leistungsfluß entweder zur Heizung, zum Elektrolyseur oder zu einer Batterie, die die Stromversorgung des Meß- und Regelsystems für Windflauten übernimmt. Der Elektrolyseur benötigt Gleichstrom 125 V, 160 A (Maximalwerte). Ein ungesteuerter Gleichrichter liefert den Gleichstrom, die Spannung von 20 - 125 V wird von einem Tiefsetzsteller bereitgestellt.

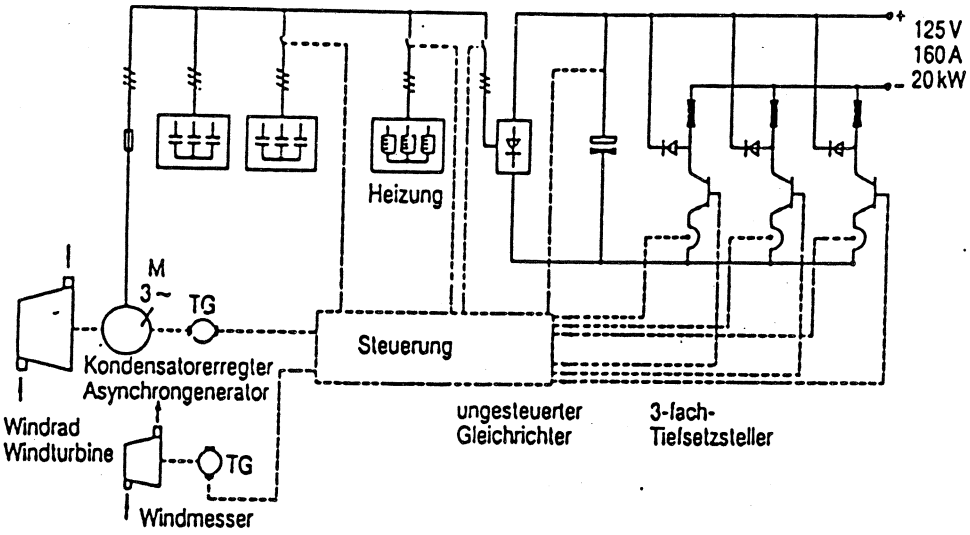


Bild 3 Elektrische Schaltung der Anlage

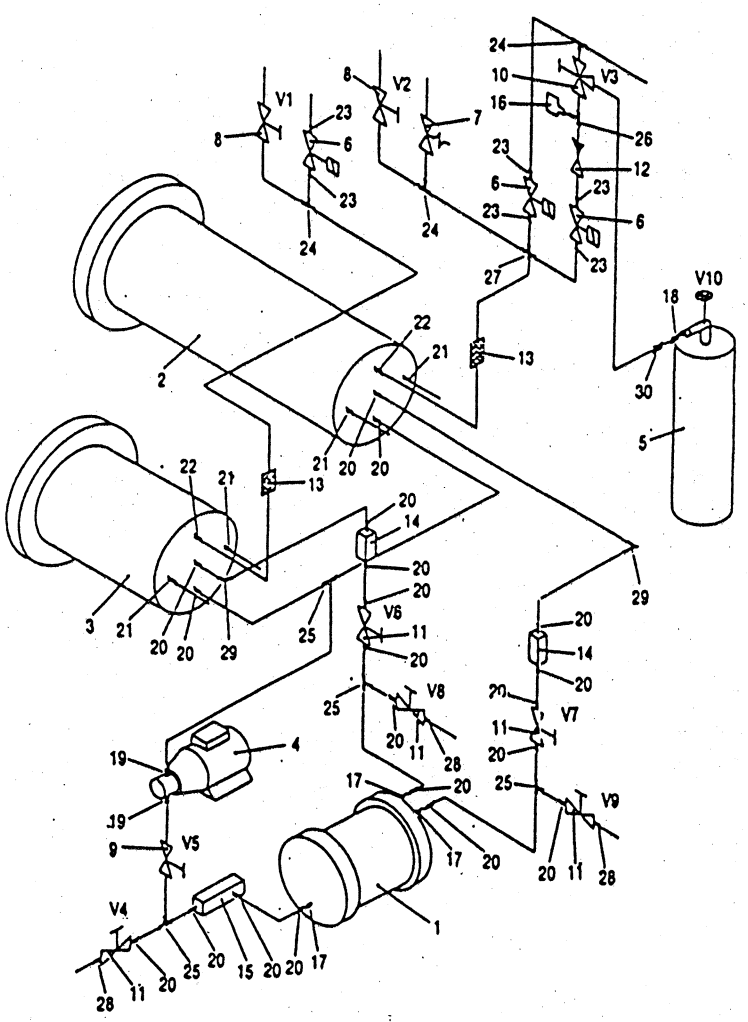
Elektrolyseur

Der Druckelektrolyseur erzeugt 4 m^3_n/h Wasserstoff und 2 m^3_n/h Sauerstoff bei einer Leistungsaufnahme von ca. 20 kW. Der Gasdruck beträgt dabei ca. 25 - 30 bar.

Elektrolyseure dieser Art sind auf dem Markt serienmäßig nicht zu erhalten. Deswegen wurde ein geeignetes Gerät in Zusammenarbeit mit der TH Darmstadt entwickelt und gebaut.

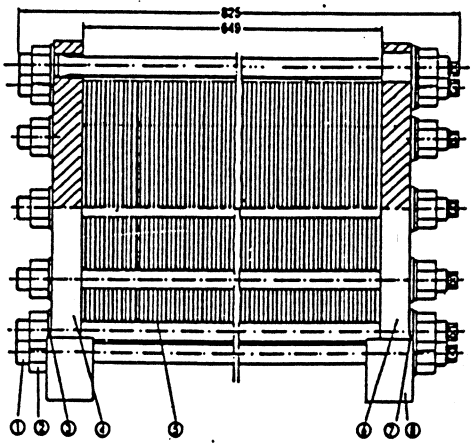
Ein Rohrleitungsplan des Elektrolyseurs ist in Bild 4 dargestellt, der Zellenblock in Bild 5 und der schematische Aufbau der Elektrolysezellen in Bild 6. Bei der Konstruktion wurde Wert darauf gelegt, daß nur Bauteile aus der Serienfertigung der Industrie verwendet wurden, die im Bedarfsfall hinsichtlich des Einsatzes in der Wasserstofftechnik modifiziert wurden. Dies gilt für Ventile, Armaturen, Pumpen, Meßinstrumente, Filter usf. Einrichtungen zur Gasanalyse und Gasreinigung mußten neu entwickelt werden, da die marktgängigen Geräte sehr teuer sind.

Die Regelung der Elektrolyseure erfolgt über speicherprogrammierbare Steuerungen. Es sind immer zwei Elektrolyseure in Betrieb. Ein Elektrolyseur wird mit Gleichstrom gespeist (im Labor), ein anderer arbeitet auf dem Kleinen Feldberg mit stark pulsierendem Gleichstrom. Der Elektrolyseur im Labor arbeitet im Dauerbetrieb seit März 1988, der Elektrolyseur auf dem Feldberg erzeugt Wasserstoff und Sauerstoff seit Oktober 1988.



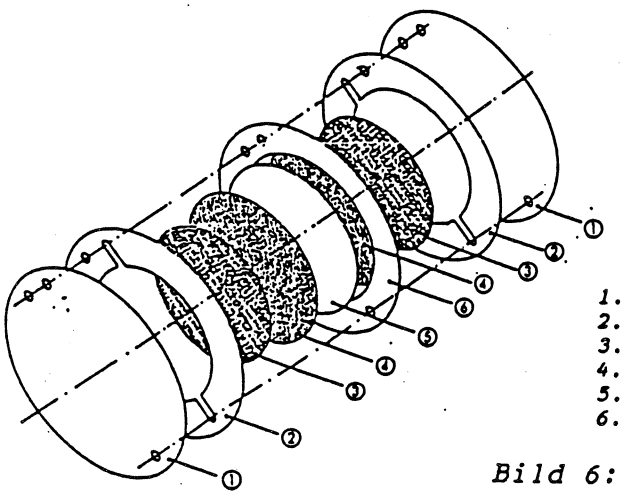
Pos.	Menge	Bezeichnung
1	1	Elektrolysezellenblock
2	1	H_2-Separationsbehälter
3	1	O_2-Separationsbehälter
4	1	KOH-Umwälzpumpe
5	1	H_2-Gasdruckflasche
6	3	Magnetventil
7	1	Sicherheitsventil
8	2	2-Wege-Handventil
9	1	2-Wege-Handventil
10	1	3-Wege-Handventil
11	5	2-Wege-Handventil
12	1	Rückschlagventil
13	2	Gasfilter
14	2	Schauglas (PMMA)
15	1	Isolierstück (PMMA)
16		Druckaufnehmer
17	3	Adapter
18	1	H_2-Flaschenanschluß
19	2	Einschraubverschraubung
20	20	Einschraubverschraubung
21	4	Einschraubverschraubung
22	2	Einschraubverschraubung
23	6	Einschraubverschraubung
24	3	T-Verschraubung
25	4	T-Verschraubung
26	1	T-Verschraubung
27	1	Kreuzstück
28	3	Schlauchtüllen
29	2	Winkelverschraubung
30	1	Aufschraubverschraubung

Bild 4: Rohrleitungsplan des Elektrolyseurs



1. Dehnschraube
2. Muttern
3. Unterlegscheiben
4. Anschluß-Blindflansch (-)
5. 50 Zellen
6. Blindflansch (+)
7. Isolierbuchsen
8. Halterung

Bild 5: Zellenblock



1. Bipolare Wand aus vernickelten St. 37
2. ITC-Dichtung zur Zellenbildung
3. Abstandshalter aus gewelltem Lochblech, vernickelt
4. Ni-Lochblech als Elektrode
5. Asbest-Diaphragma
6. ITC-Dichtung zur Aufnahme des Diaphragmas

Bild 6: Aufbau einer Zelle des 20-kW-Elektrolyseurs

Wasserstoffmotor

Die verwendeten Wasserstoffmotoren sind in Kapitel 5 (Komponenten für die Wasserstofftechnik) beschrieben.

Messungen

Die einzelnen Komponenten des Systems - Windrad, Leistungselektronik, Elektrolyseur, Speicher, Stromaggregat (s. Bild 1) - wurden im Sommer 1988 gebaut und zu einem Gesamtsystem montiert, das seit Anfang Oktober 1988 läuft.

Bei den Konstruktionen war maßgebend, daß nur marktgängige Teile - möglichst aus der Serienfertigung - verwendet wurden, die nur geringe konstruktive Änderungen für die Anpassung an das System erforderlich machten.

Messungen an den Elektrolyseuren

Auf der Basis des in Bild 6 gezeigten Zellenaufbaus wurden unterschiedliche Zellenkonstruktionen getestet und verschiedene Diaphragmen und Elektrodenmaterialien untersucht. Die Optimierung des Elektrolyseurs erfolgte in bezug auf Montierbarkeit, Dauerstandsfestigkeit, niedrige Kosten, Wirkungsgrad.

An Diaphragmen wurden im Labor untersucht: verschiedene Asbestgewe-

be, Polysulfon-Filz, Asbestpapiere, Filter mehrerer Hersteller. Die Elektroden bestanden aus Nickelblechen, deren Oberflächen unterschiedlich vorbehandelt waren: sandgestrahlt oder katalytisch aktiviert. Im Dauerbetrieb haben sich nur die sandgestrahlten Nickelelektroden (Lochblech der Firma Veco) bewährt, während die katalytisch aktivierten nach einigen Wochen Dauerbetrieb schlechter wurden.

Was die Diaphragmen angeht, so ist die Gasdurchlässigkeit aller Gewebe zu hoch, was zu unzulässigen Gasverunreinigungen führt.

Relativ gute Werte in bezug auf Gasreinheit und elektrischen Widerstand ergab das Asbestpapier eines französischen Herstellers. Die Festigkeit dieses Materials verringert sich allerdings im Laufe der Zeit. Es muß also gut gestützt sein durch die beiden Nickelelektroden.

Für die Dauermessungen in der Anlage auf dem Kleinen Feldberg wurden nur sandgestrahlte Nickelelektroden und Diaphragmen aus Asbestpapier verwendet. Die wirksame Elektrodenfläche liegt bei ca. 340 cm^2. Um unterschiedliche Betriebszustände des Gesamtsystems untersuchen zu können, wurde zunächst ein Elektrolyseur aus neun hintereinander geschalteten Zellen (Leistung 24 V x 160 A), später einer aus 21 bipolaren Zellen (51 V x 160 A) eingebaut sowie mehrere Zellenblöcke mit 25 bzw. 30 Zellen.

Die Elektrolyseure wurden zunächst im Gleichstrombetrieb im Labor untersucht, danach bei dem stark pulsierenden Gleichstrom aus der Windkraftanlage auf dem Kleinen Feldberg getestet.

Bild 7 zeigt, wie sich Windgeschwindigkeit, Generatorleistung, Generatorstrom und Generatorspannung zeitlich ändern.

Bei Stromstärken unter 20 A war die Gasverunreinigung zu groß, so daß erst ab einer Stromstärke von 30 A elektrolysiert werden konnte. Der Elektrolyseur mit neun Zellen hat eine maximale Leistungsaufnahme von etwa 3,8 kW, der mit 21 Zellen nimmt maximal 8 kW auf. Liefert das Windrad eine höhere Leistung, so geht diese in die Heizelemente für die Gebäudeheizung. Strom-Spannungskennlinien für den kleinen Elektrolyseur mit der Temperatur als Parameter sind in Bild 8 angegeben. Der Wasserstoff enthält weniger als 1% Sauerstoff, während der Sauerstoff fast 4% Wasserstoff enthalten kann, was für einen sicheren Dauerbetrieb nicht zulässig ist. Diese hohen Gasverunreinigungen konnten durch Verwendung eines anderen Asbest-Papiers und eine andere Einspannung des Asbestpapiers wesentlich reduziert werden.

Für den Wirkungsgrad der Elektrolyse ergibt (nach Le Roy) die Theorie

$$\eta = \frac{U_0}{U_{gen}}, \text{ wobei } U_0 = 1{,}48 \text{ V}$$

und U_{gen} die gemessene Zellenspannung ist. Dieser theoretische Wirkungsgrad ist nicht ganz korrekt, da die Nebenanlagen des Elektrolyseurs (Pumpen, Ventile, Wasserreinigung) Energie verbrauchen. Berücksichtigt man diesen Energiebedarf bei der Wirkungsgradberechnung, so erhält man die in Bild 9 angegebenen Werte.

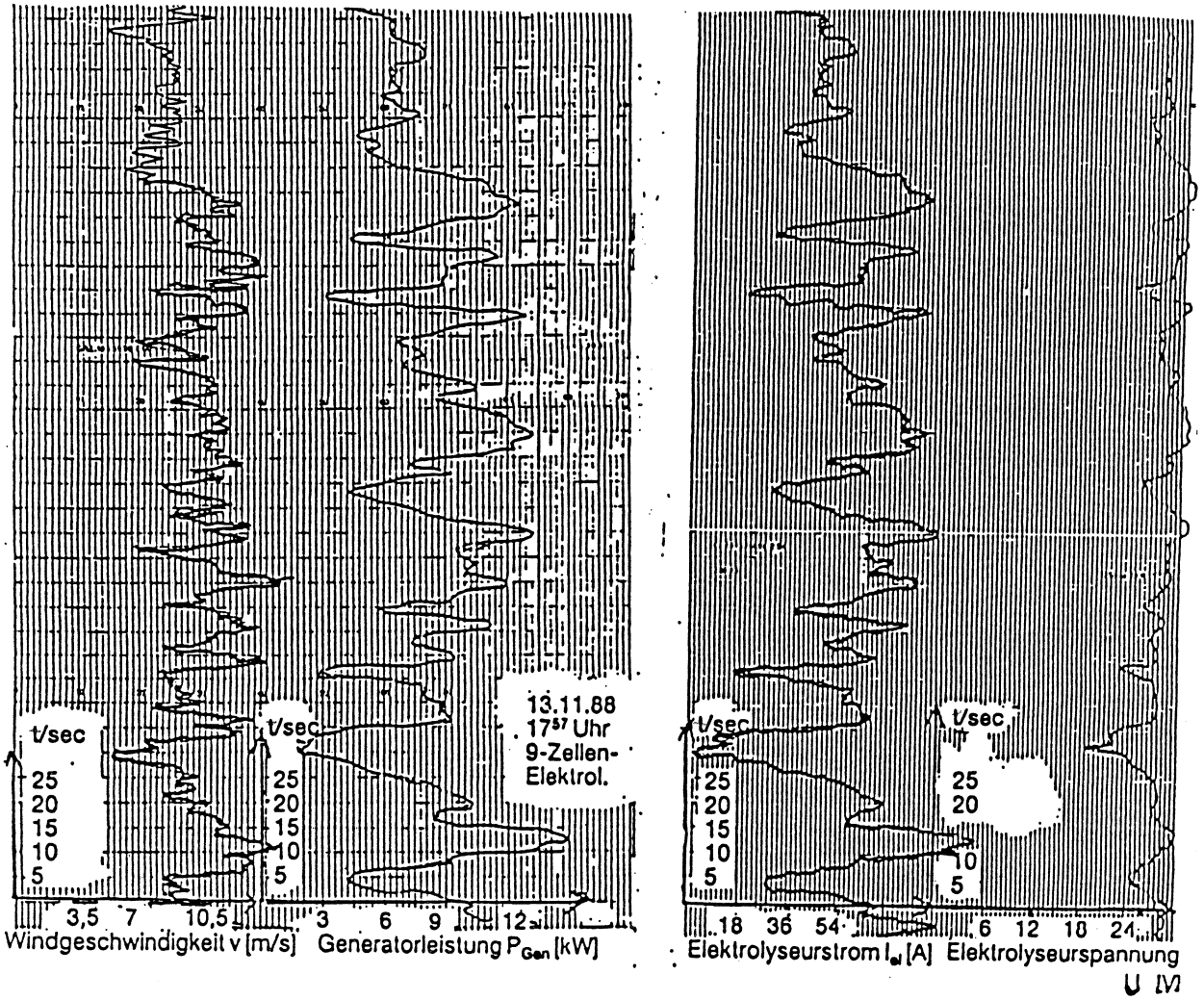
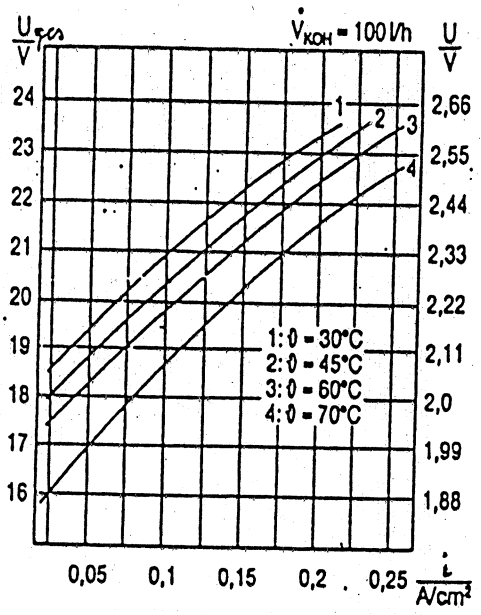


Bild 7 Windgeschwindigkeit, Generatorleistung, Elektrolysestrom, Elektrolysespannung in Abhängigkeit von der Zeit

Die beschriebenen Messungen an dem neun-Zellen-Elektrolyseur wurden mit REX-Asbestpapier als Diafragmen durchgeführt. Das Asbestpapier eines anderen Herstellers brachte Wirkungsgrade, die ca. 10% höher lagen und bessere Gasreinheiten ergaben.

Die stark pulsierende Gleichspannung beim Betrieb mit dem Windrad verändert die Meßergebnisse. Bild 10 zeigt zwei Strom-Spannungskennlinien bei intermittierendem Betrieb. Für eine Temperatur von 11°C ist exemplarisch der zeitliche Verlauf des Stroms angegeben: innerhalb etwa einer Sekunde steigt der Strom von A (0A) auf B (68 A), fällt dann auf C, um anschließend auf D zu steigen. Die Wirkungsgrade bei dieser Betriebsart ergeben sich aus Bild 11. Die Gasreinheit ist beim intermittierenden Betrieb wesentlich besser als beim kontinuierlichen. Man hat etwa 0,4% O_2 im Wasserstoff und höchstens 2,7% H_2 im Sauerstoff.



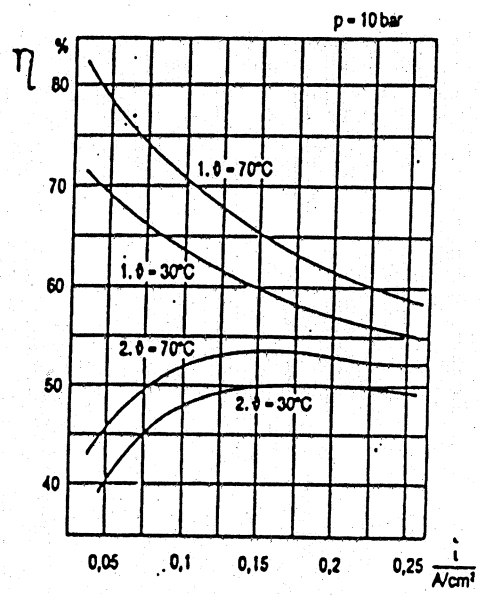
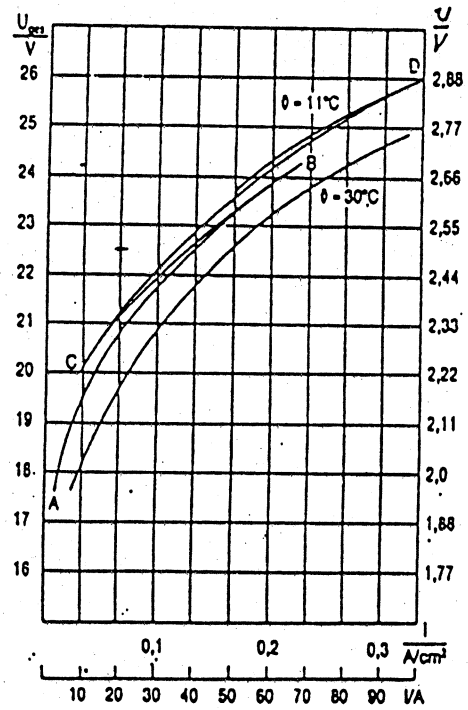


Bild 8 *Strom-Spannungskennlinie des 2-kW-Elektrolyseurs im kontinuierlichen Betrieb*

Bild 9 *Wirkungsgrade der Anlage in Abhängigkeit von der Stromdichte (1 Wirkungsgrad nach LeRoy, 2 Wirkungsgrade mit Energiebedarf aus Nebenanlagen*



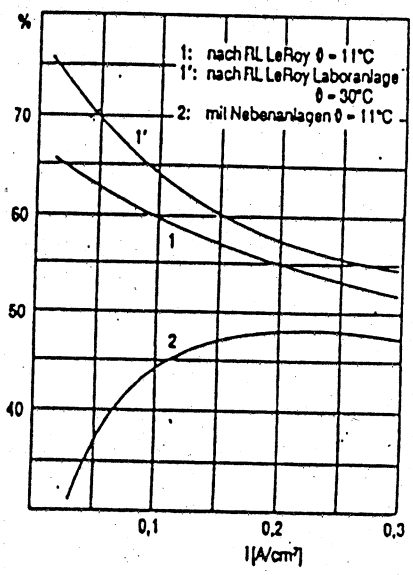
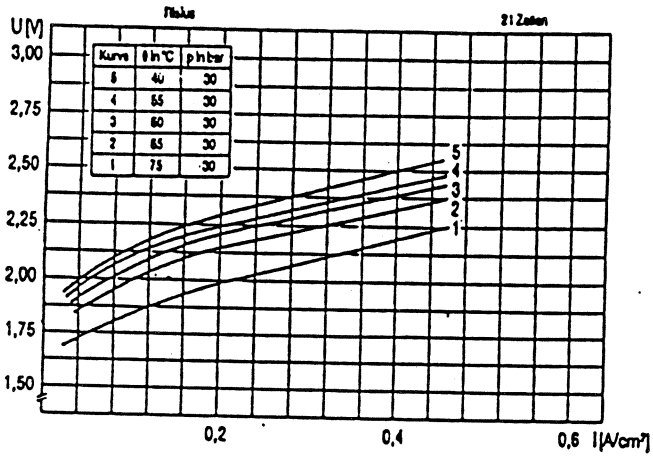


Bild 10 *Strom-Spannungskennlinie bei intermittierndem Betrieb*

Bild 11 *Wirkungsgrade bei intermittierendem Betrieb*

Bild 12 zeigt die Kennlinien des 21-Zellen-Blocks bei verschiedenen Temperaturen, Bild 13 gibt die Verhältnisse für den 50-Zellen-Elektrolyseur (20 kW) im kontinuierlichen Betrieb. Bei diesem 50-Zellen-Block werden aus Wirtschaftlichkeitsgründen quadratische Elektroden verwendet. Die Gasreinheit ist merklich besser als bei den kleineren Elektrolyseuren, sie liegt bei maximal 0,3% Wasserstoff im Sauerstoff.



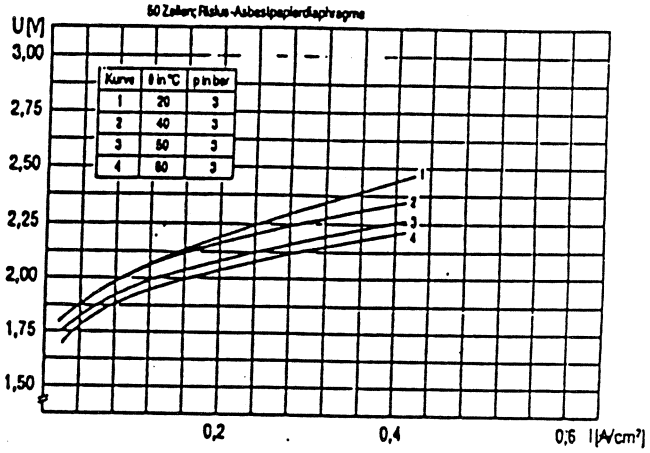


Bild 12 Strom-Spannungskennlinie des 21-Zellen-Elektrolyseurs

Bild 13 Spannungs-Stromdichte-Kennlinie des 50-Zellen-Elektrolyseurs

<u>Messungen am Gesamtsystem</u>

Bild 1 zeigt eine Skizze des Energieversorgungssystems mit den Verbrauchern H1, H2, H3 und Elektrolyseur 5.

Die vom Windrad gelieferte elektrische Energie geht auf die Heizkörper H1 (3x2 kW), Elektronikhütte), H2 (3x2 kW, Elektrolyseurhütte) und H3 (3x2 kW, Taunusobservatorium). Bei den kleineren Elektrolyseuren (2 kW und 8 kW) war die Steuerung so eingestellt, daß die 3 Heizkörper H1, H2, H3 jeweils 2 kW elektrische Leistung erhielten, der Rest der Leistung ging auf den Elektrolyseur. Auch bei eventuellem Ausfall des Elektrolyseurs lief das Windrad nicht im Leerlauf.

Das Windrad liefert ca. 1500 kWh elektrische Energie pro Monat. Bild 14 zeigt dies exemplarisch für den Monat Dezember 1988. Diese Energielieferung läßt sich erhöhen durch Umbauten an der Windkraftanlage.

Seit Anfang Oktober 1988 wird Wasserstoff auf dem Kleinen Feldberg erzeugt. Der automatische Betrieb läuft seit Anfang Dezember. Mit dem kleinen Elektrolyseur (9 Zellen, ca. 2 - 3 kW) werden etwa 25 m^3_N Wasserstoff pro Monat erzeugt, s. Bild 15. Nachteiligen Einfluß auf die Wasserstoffproduktion hatte der Umstand, daß die Stromversorgung des Elektrolyseurs auf 20 kW ausgelegt ist. Bei diesem kleinen Elektrolyseur war immer sehr schnell die maximale Stromstärke von 160 A erreicht, bei der die Steuerung den Energiefluß kurzzeitig auf die Heizkörper umlegte. Der 21-Zellen-Elektrolyseur

läuft wesentlich ruhiger, die abrupten Stromänderungen sind nicht so ausgeprägt, die Wasserstoffproduktion liegt bei etwa 6 m^3_N pro Tag, Umbauten und Schwachwindperioden eingerechnet.

Im Monat März 1989 lieferte das Windrad etwa 1500 kWh elektrische Energie (s. Bild 16). Der relativ niedrige Wert ist auf die nicht optimal funktionierende Regelung zurückzuführen.

Die Gasproduktion im März betrug etwa 100 m^3 Wasserstoff (s. Bild 17) und 50 m^3 Sauerstoff. Der Wasserstoff wurde in Druckflaschen gespeichert und zum Antrieb eines Notstromaggregats verwendet, das mit einem Wasserstoff-Motor läuft.

Im Dauerbetrieb liefert der 8 kW-Elektrolyseur ca. 9-10 m^3 Wasserstoff pro Tag. Etwa 700 kWh Energie wurden im März 89 für die Elektrolyse verbraucht, ca. 800 kWh für die Raumheizung.

Das dynamische Verhalten des 21-Zellen-Elektrolyseurs (8 kW) zeigt weniger abrupte Stromänderungen als beim 9-Zellen-Elektrolyseur. Die Gasreinheit im intermittierenden Betrieb ist besser als beim Betrieb mit Gleichstrom im Labor.

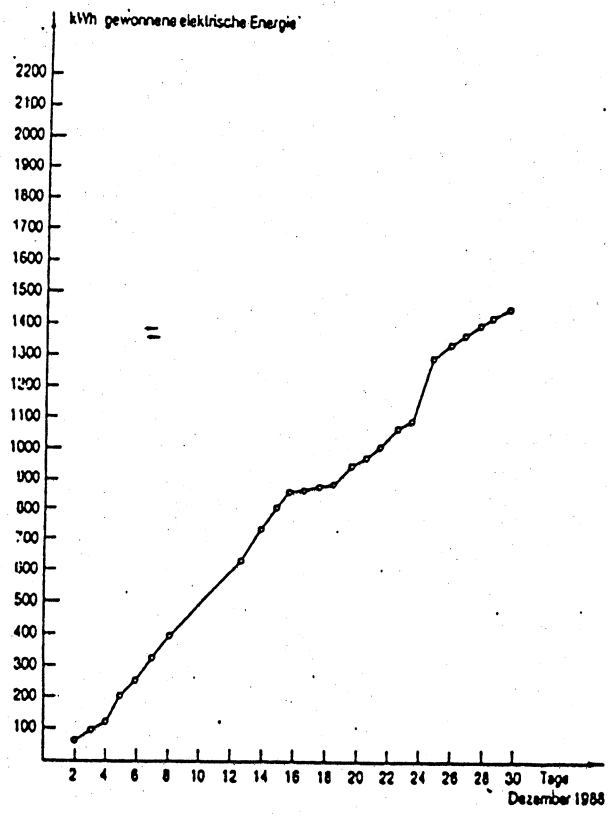


Bild 14 Energielieferung des Windrades im Monat Dezember 1988

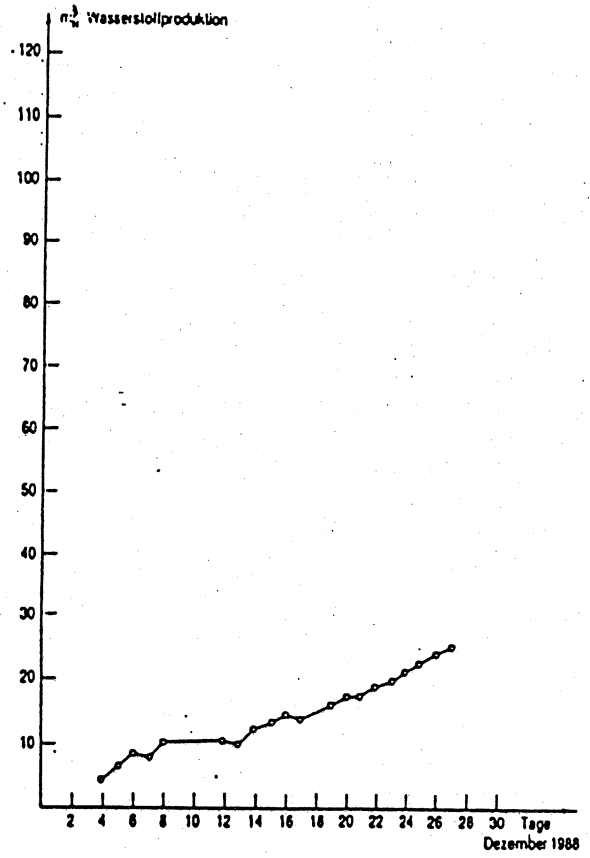
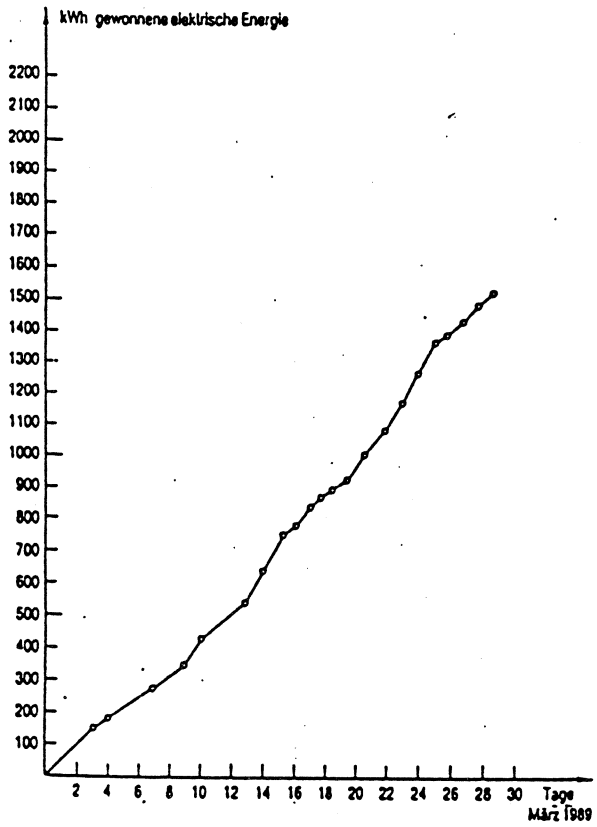


Bild 15 Wasserstofferzeugung des 2 kW-Elektrolyseurs im Dezember 1988



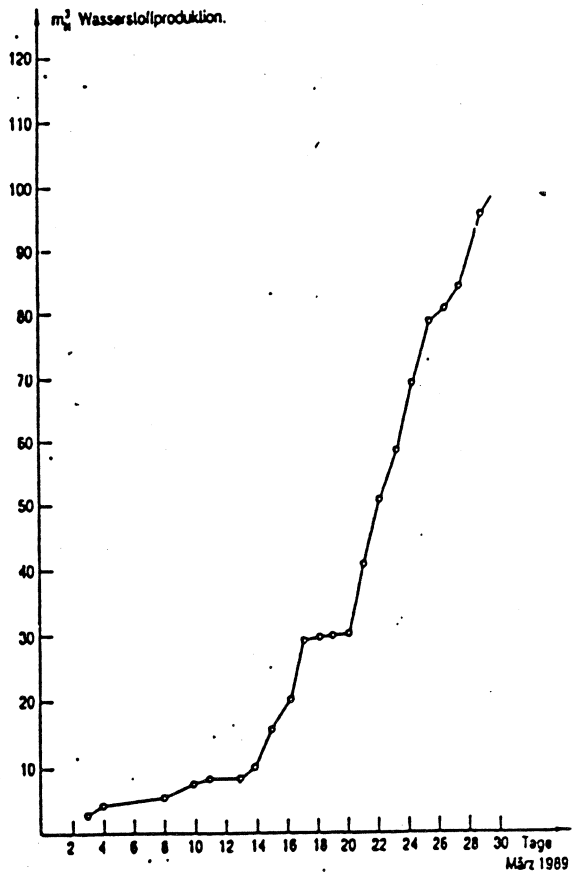


Bild 16 Elektrische Energie aus dem Windrad im März 1989

Bild 17 Wasserstoffproduktion des 8 kW-Elektrolyseurs im März 1989

Im Jahre 1989 wurden 8266 kWh elektrische Energie für Heizung und Elektrolyse erzeugt und 637 m^3 Wasserstoff produziert. Die mittlere Energie zur Erzeugung von 1 m^3 Wasserstoff lag bei Jahresende 1989 bei ca. 5,6 kWh/m^3H_2 (Gesamtenergiebedarf von Elektrolyseur und Energieelektronik).

Optimierung des Systems

Zur Optimierung der Anlage werden im Dauerbetrieb Messungen durchgeführt. Es werden unterschiedliche Elektrolyseure und Betriebsprogramme für das System sowie Komponenten für die Wasserstofftechnik getestet. Die Meßwerte werden über Telefonleitung vom Feldberg nach Rüsselsheim übertragen und dort ausgewertet.

Im folgenden sind exemplarisch einige Meßwerte vom November 1989 angegeben. Die Daten dienen dazu, System und Komponenten zu optimieren und verkaufsfähig zu machen.

Es werden vier Datenblöcke aufgenommen:

1. Die Tageswerte als Zehn-Minuten-Mittelwerte (s. Bild 18 - 23).

2. Kurzzeitwerte. Dies sind 1-Sekunden-Mittelwerte einiger für das System relevanter Daten (s. Bild 24 - 28).

3. Monatswerte (s. Bild 14 - 17).

4. Sondermessungen an einzelnen Komponenten.

Durch die Messungen konnten die Programme für den Betrieb der Anlage verbessert und zuverlässige Komponenten entwickelt werden.

Bei den Tageswerten sind zwischen 14.30 Uhr und 17.30 Uhr keine Werte aufgezeichnet, weil zu dieser Zeit Kurzzeitwerte aufgenommen wurden (Bilder 24-28).

Im Jahre 1990 wurden vom Windrad 8756 kWh geliefert, vom Elektrolyseur über 1000 m^3 Wasserstoff produziert. Die Energieflüsse sind in Bild 29 dargestellt: W_{El} ist die Energie, die in den Elektrolyseur geflossen ist, W_{Ster} die Energie für Steuerungs- und Hilfsanlagen, W_{Heiz} der Energiefluß in die Heizkörper und W_{Verl} die Verlustenergie, z. B. der Energieelektronik.

In den Jahren 1991 und 1992 war die Anlage nicht kontinuierlich in Betrieb wegen Reparaturen am Windrad.

Durch Verbesserung der Elektrolyseure konnte der Wirkungsgrad des Systems verbessert werden. Der Energiebedarf zur Erzeugung von 1 m^3 Wasserstoff liegt bei ca. 4,6 kWh.

Die mechanische Steuerung des Windrades wurde verbessert.

Die Betriebsprogramme für die Steuerung der Anlage wurden optimiert.

Das beschriebene Wind-Wasserstoffsystem hat seine Funktionsfähigkeit erwiesen. Die Kostenabschätzungen in Kapitel 4 (Seite 26 f) zeigen, daß es unter bestimmten Umständen wirtschaftlich arbeitet.

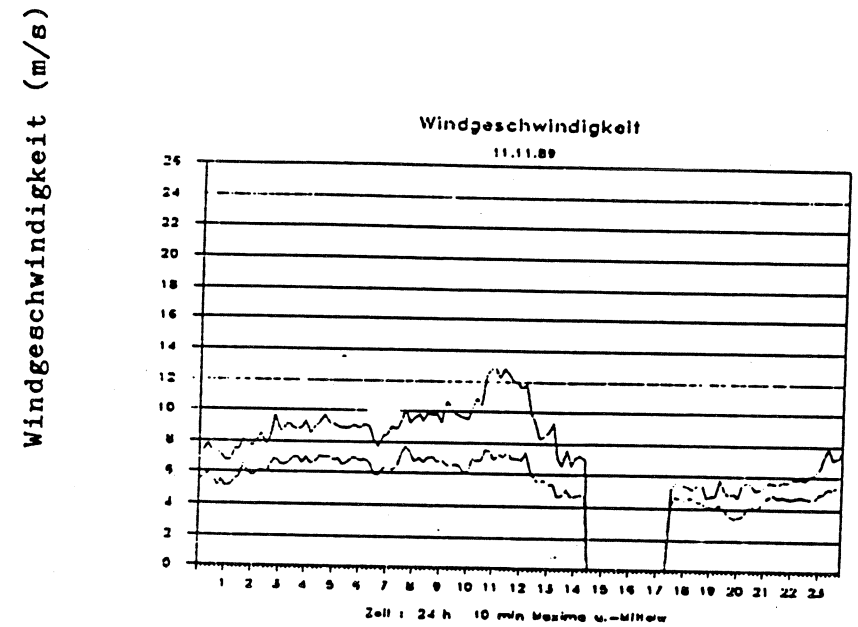


Bild 18: Windgeschwindigkeit am 11.11.89. Man erkennt die starke Böigkeit des Windes (s. auch Bild 24)

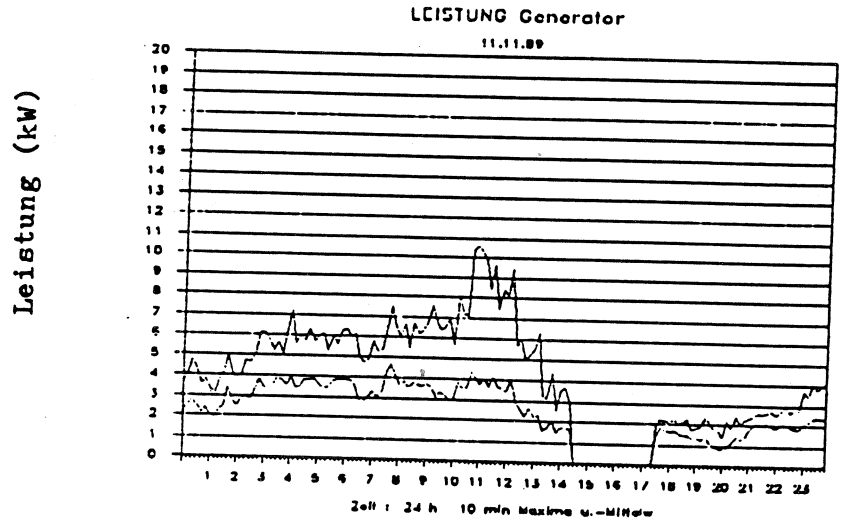


Bild 19: Abgegebene Leistung des Generators am 11.11.89. Die Leistungsabgabe ist stark schwankend entsprechend den Windverhältnissen

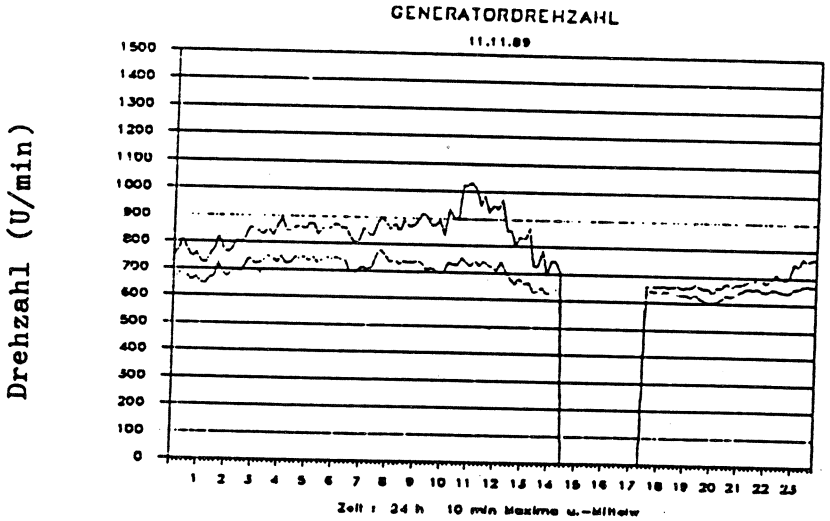


Bild 20: Generatordrehzahl Aus Bild 20 geht hervor, daß das Windrad nicht seine Nenndrehzahl erreicht

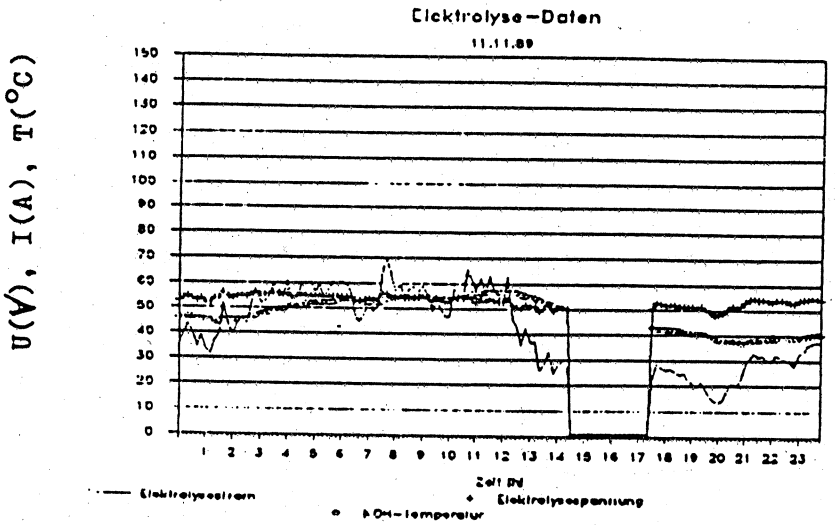


Bild 21:Elektrolysespannung, Elektrolysestrom, Elektrolyseurtemperatur am 11.11.89. Elektrolysestrom und -spannung schwanken sehr stark

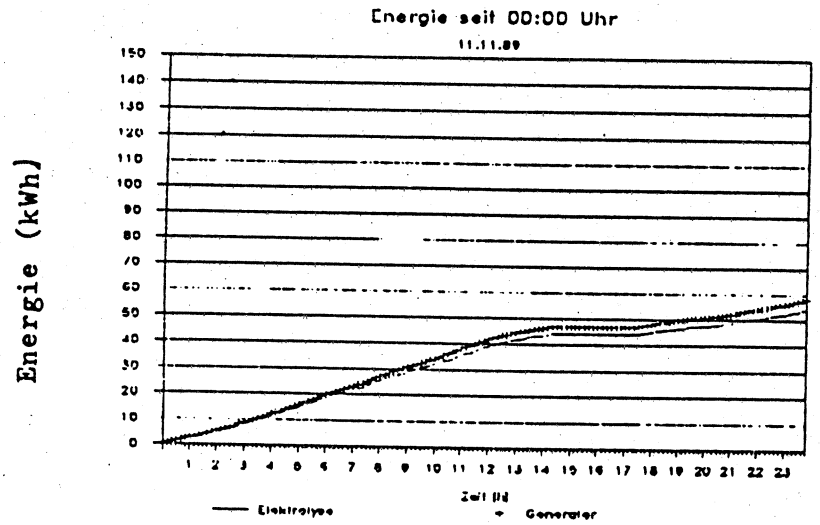


Bild 22: es zeigt die vom Generator abgegebene bzw. die vom Elektrolyseur aufgenommene Energie. Die Differenz zwischen Generator- und Elektrolyseurenergie geht in die Heizung bzw. die Energieelektronik. Die Energieelektronik enthält Pumpen, Steuerung, Wasseraufbereitung usf. für den Elektrolyseur

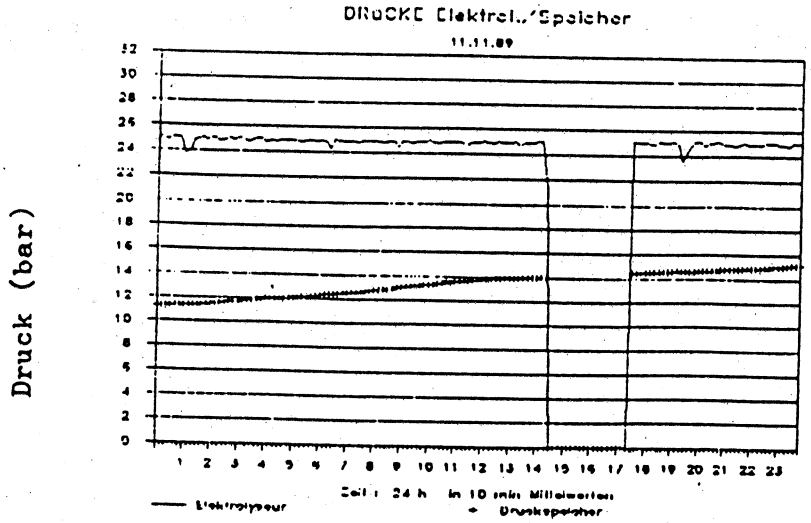


Bild 23: Drucke im Elektrolyseur bzw. Druckspeicher am 11.11.89. Wenn der Druck im Elektrolyseur auf 25 bar angestiegen ist, gibt er den Wasserstoff in den Tank und den Sauerstoff an die Luft

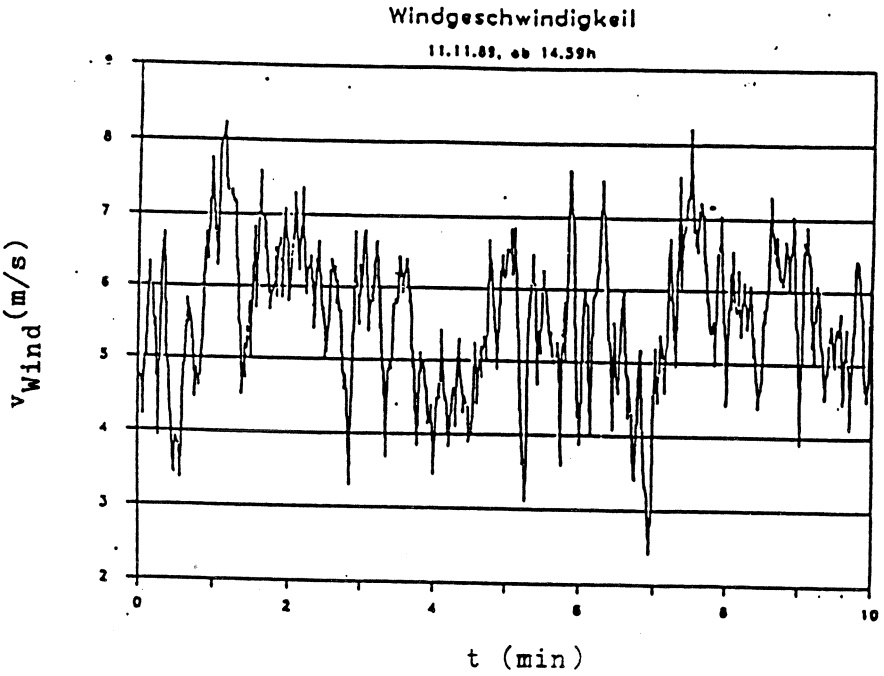


Bild 24: 1-Sekunden Mittelwerte der Windgeschwindigkeit

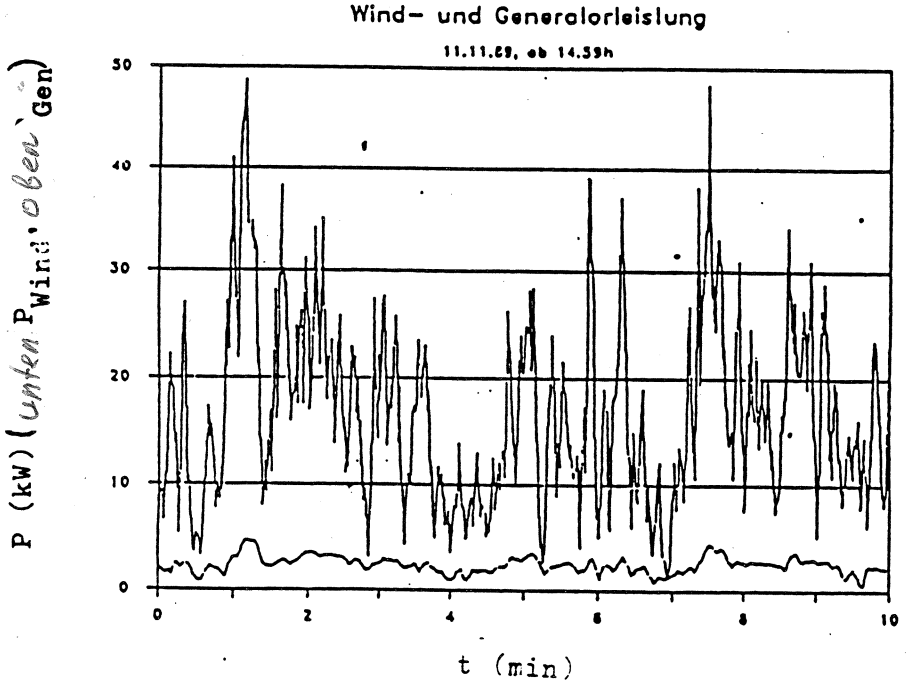


Bild 25: Kurzzeitmessungen der Generatorleistung und der insgesamt im Wind enthaltenen Leistung

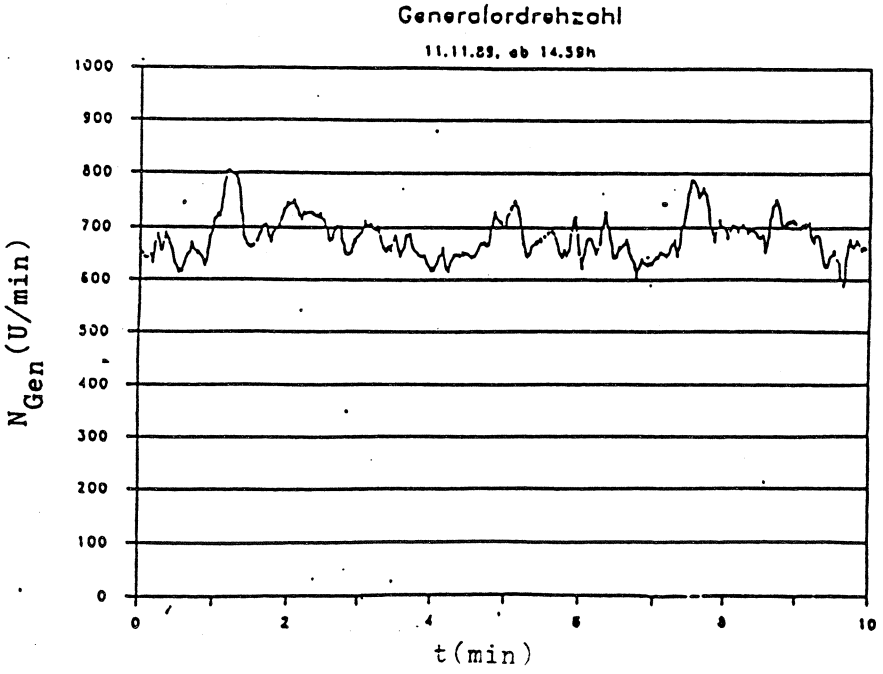


Bild 26: Sekundenmittelwerte der Generatordrehzahl

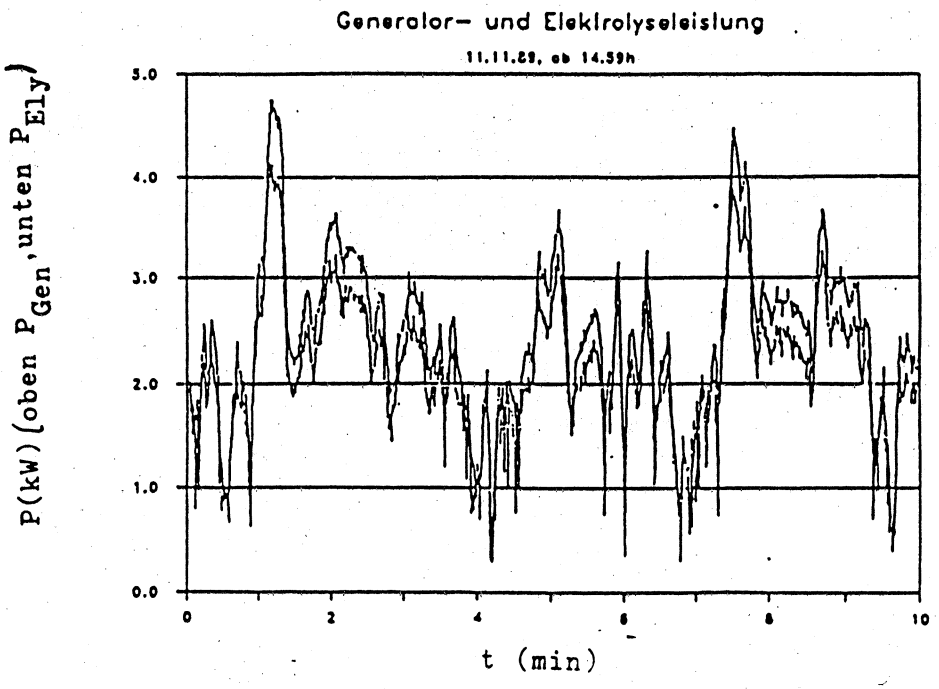


Bild 27 Sekundenmittelwerte der Generator- und Elektrolyseleistung. Die Differenz der beiden Leistungen geht in die Energieelektronik, Elektrolyseuraggregate (Pumpen, Wasseraufbereitung etc.)

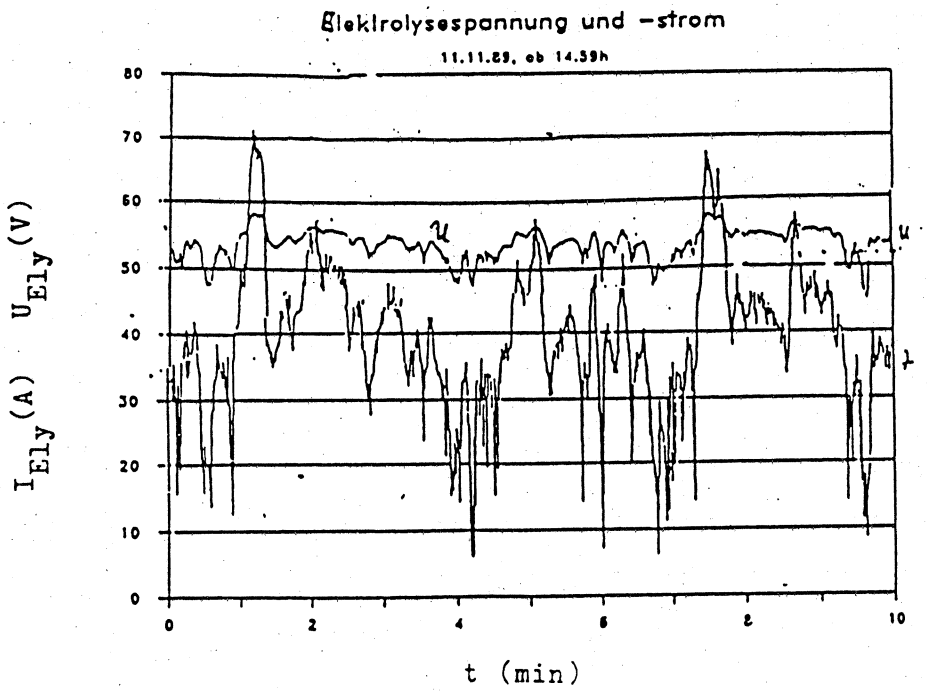


Bild 28 Sekundenmittelwert von Elektrolysespannung und -strom

Die Messungen zeigen, daß ein 20 kW-Windrad, das bei einer Windgeschwindigkeit von ca. 5,5-6 m/s elektrische Energie im Betrag von

55000 kWh pro Jahr erzeugt, in der Lage ist, ein größeres Einfamilienhaus energieautark zu machen, wenn die Überschußenergie des Windrades zur Wasserstofferzeugung verwendet wird. Man benötigt allerdings einen Tank von ca. 50 m³ Inhalt bei 30 bar.

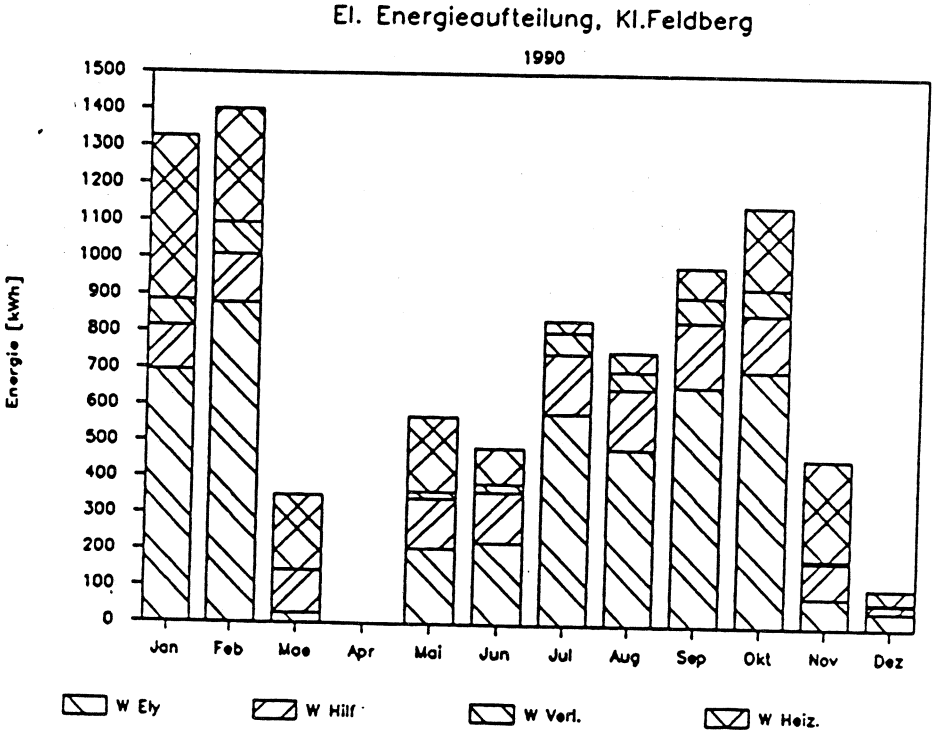


Bild 29 Energieaufteilung des Wind-Wasserstoff-Systems auf dem Kl. Feldberg

3. Dezentrales Solar-Wasserstoffsystem

Außer der Wind-Wasserstoffanlage hat die FHW ein dezentrales Energieversorgungssystem der solaren Wasserstofftechnik aufgebaut, das seit 1991 im Dauerbetrieb arbeitet. Dieses System dient dazu, Optimierungsmessungen an Komponenten und Betriebsprogrammen durchzuführen.

Bild 30 zeigt eine schematische Darstellung dieses dezentralen Energieversorgungssystems. Ein Solargenerator 1 mit einer installierten Leistung von ca. 1,5 kW_p lädt über den MPP-Tracker 2 eine Batterie 3 (Kapazität ca. 350 Ah). Die Batterie speist über den Wechselrichter 4 ein Inselnetz (220 V, 50 Hz). Die Leistung, die die Batterie oder das Inselnetz nicht aufnimmt, wird im Druckelektrolyseur 5 zur Zersetzung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff verwendet (Reaktion 1). Die Gase fallen mit einem Druck von 20 bar an und werden in dem Druckspeicher 9 gespeichert. Bei Energiebedarf werden sie der Brennstoffzelle 6 zugeführt, in der gemäß Reaktion (2) die beiden Gase zu Wasser rekombinieren, wobei die Reaktionsenergie als elektrische Energie bei ca. 10 V frei wird. Diese Energie wird über einen Hochsetzsteller 8 in die Batterie 3 eingespeist. Ein Charakteristikum des Systems ist, daß Elektrolyseur und Brennstoffzelle einen gemeinsamen Elektrolytkreislauf 7 haben, wodurch eine aufwendige Wasseraufbereitung für die Brennstoffzelle entfällt.

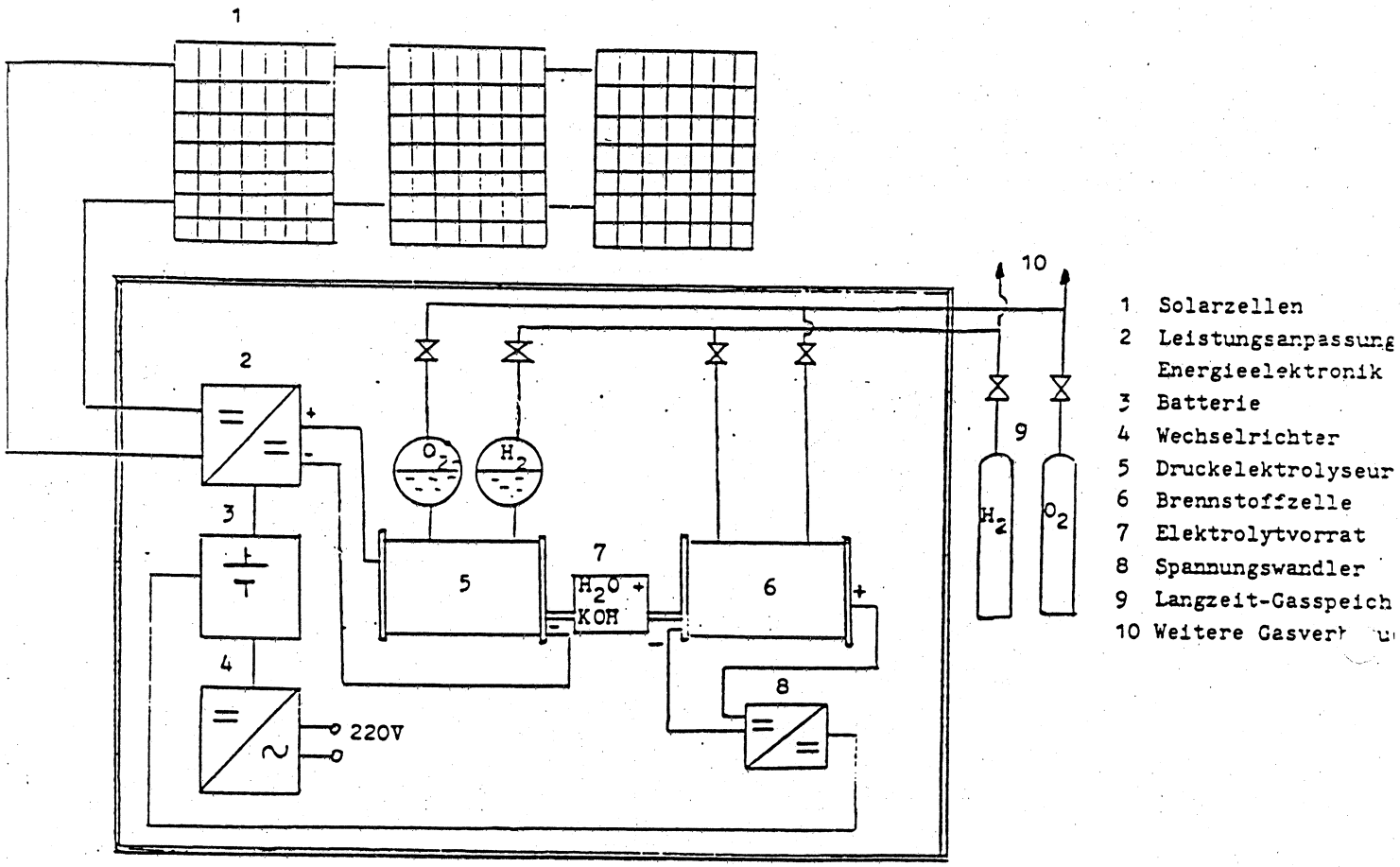


Bild 30 Schematische Darstellung des Solar-Wasserstoff-Systems

Bild 31 zeigt den Sensorikplan, Tab. 1 gibt eine Liste der Meßstellen.

Um den Betrieb der Solar-Wasserstoffanlage kontinuierlich zu überwachen und das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten zu optimieren, wurde ein Datenerfassungssystem entwickelt und installiert, das auf die speziellen Bedürfnisse der Anlage zugeschnitten ist. Schematisch ist das System in Bild 32 dargestellt.

Die Sensoren liefern Normsignale 0 - 10 V an die Datenerfassungskarte PCI-03. Die digitalisierten Daten werden von einem PC aufgenommen und auf einer Festplatte gespeichert. Zur Auswertung können diese Daten über eine serielle Schnittstelle auf einen weiteren PC überspielt werden, wo die Datenauswertung erfolgt, ohne laufende Messungen zu beeinträchtigen.

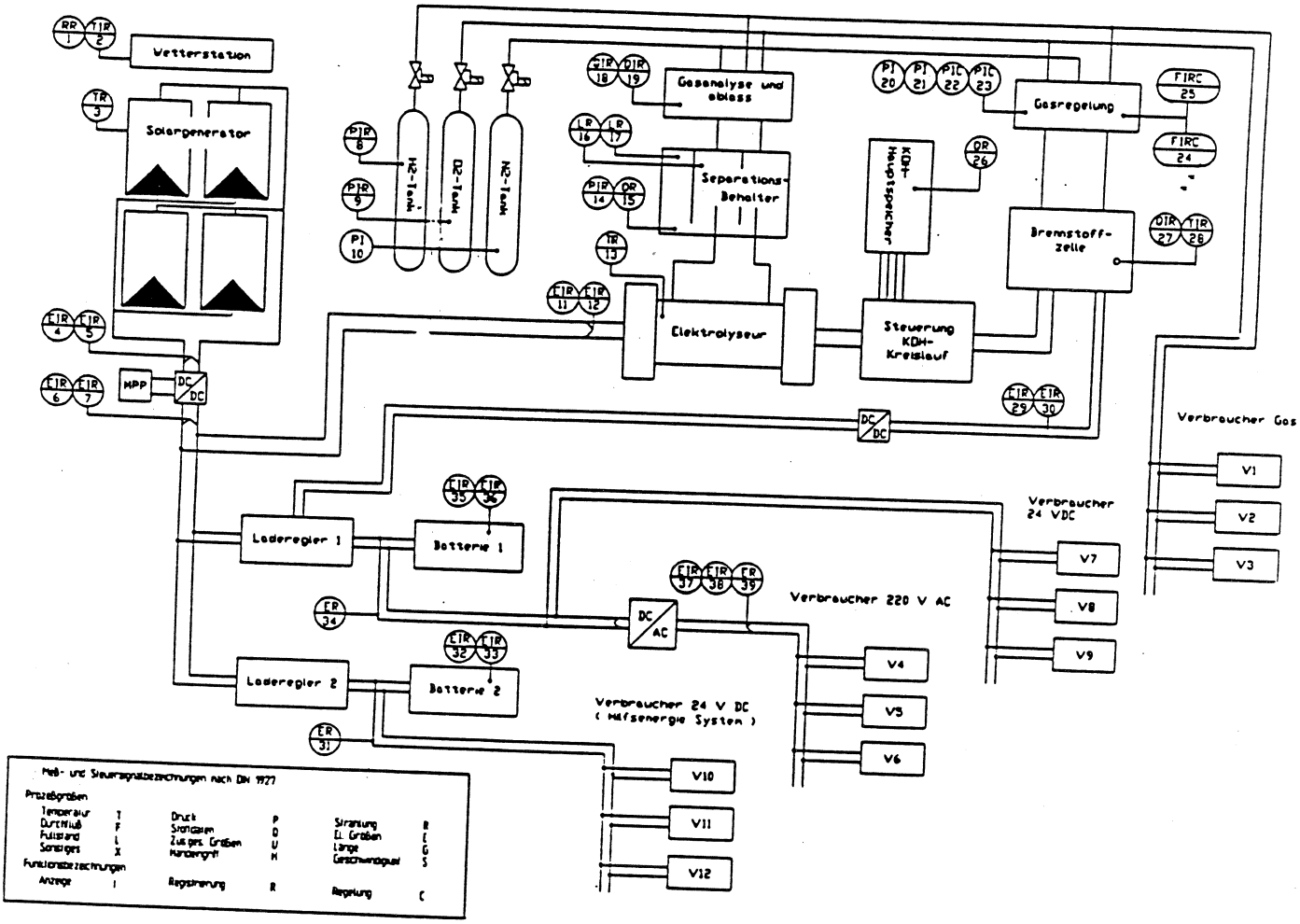


Bild 31 Sensorikplan der Anlage

Kanalnr.	Kennb.	Meßgröße
1	RR	Sonneneinstrahlung
2	TIR	Außentemperatur
3	TR	Oberflächentemperatur Solarpanel
4	EIR	Spannung Solargenerator
5	EIR	Strom Solargenerator
6	EIR	Spannung MPP-Tracking Ausgang
7	EIR	Strom MPP-Tracking Ausgang
8	PIR	Druck H_2-Tank
9	PIR	Druck O_2-Tank
10	PI	Druck N_2-Tank
11	EIR	Spannung Elektrolyse
12	EIR	Strom Elektrolyse
13	TIR	Temperatur im Elektrolyseur
14	PIR	Druck im Elektrolyseur
15	QR	Konzentration KOH im Separationsbehälter
16	LR	Niveau der KOH im H_2-Separationsbehälter
17	LR	Niveau der KOH im O_2-Separationsbehälter
18	QIR	Konzentration H_2 in O_2
19	QIR	Konzentration O_2 in H_2
20	PI	Druck H_2 Eingang MFC1
21	PI	Druck O_2 Eingang MFC2
22	PIC	Druck H_2 Brennstoffzelle Eingang
23	PIC	Druck O_2 Brennstoffzelle Eingang
24	FIRC	Durchfluß O_2 zur Brennstoffzelle
25	FIRC	Durchfluß H_2 zur Brennstoffzelle
26	QR	Konzentration KOH im Hauptspeicher
27	QIR	Konzentration KOH in der Brennstoffzelle
28	TIR	Temperatur KOH in der Brennstoffzelle
29	EIR	Spannung an der Brennstoffzelle
30	EIR	Strom Brennstoffzelle Ausgang
31	ER	Strom Systemverbraucher 24 VDC
32	EIR	Spannung Systembatterie
33	EIR	Strom in/aus Systembatterie
34	ER	Strom Verbraucher
35	EIR	Spannung Leistungsbatterie
36	EIR	Strom in/aus Leistungsbatterie
37	EIR	Spannung Wechselrichter Ausgang
38	EIR	Strom Wechselrichter Ausgang
39	EIR	Wirkleistung Wechselrichter Ausgang

Tab. 1 Tabelle der Meßstellen

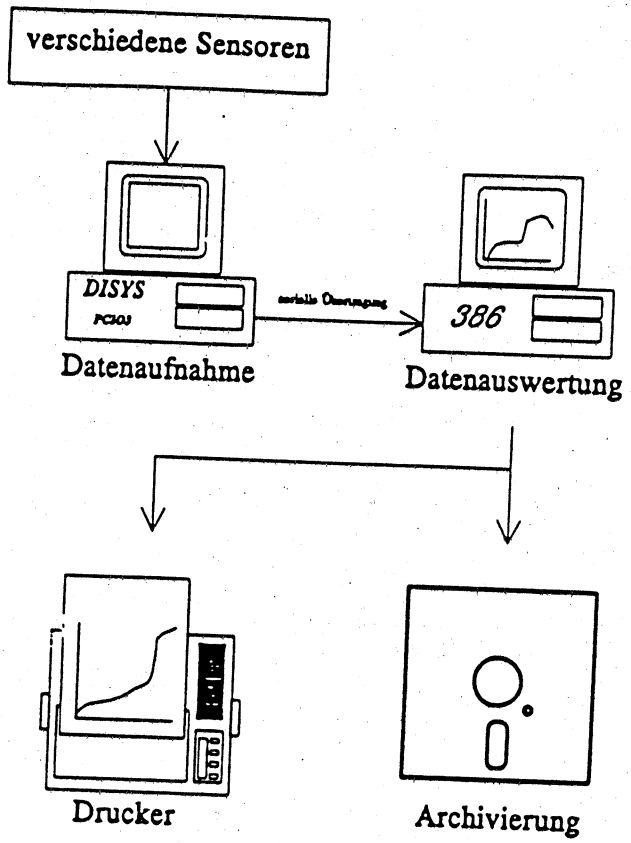


Bild 32 Schematischer Aufbau der Datenerfassung

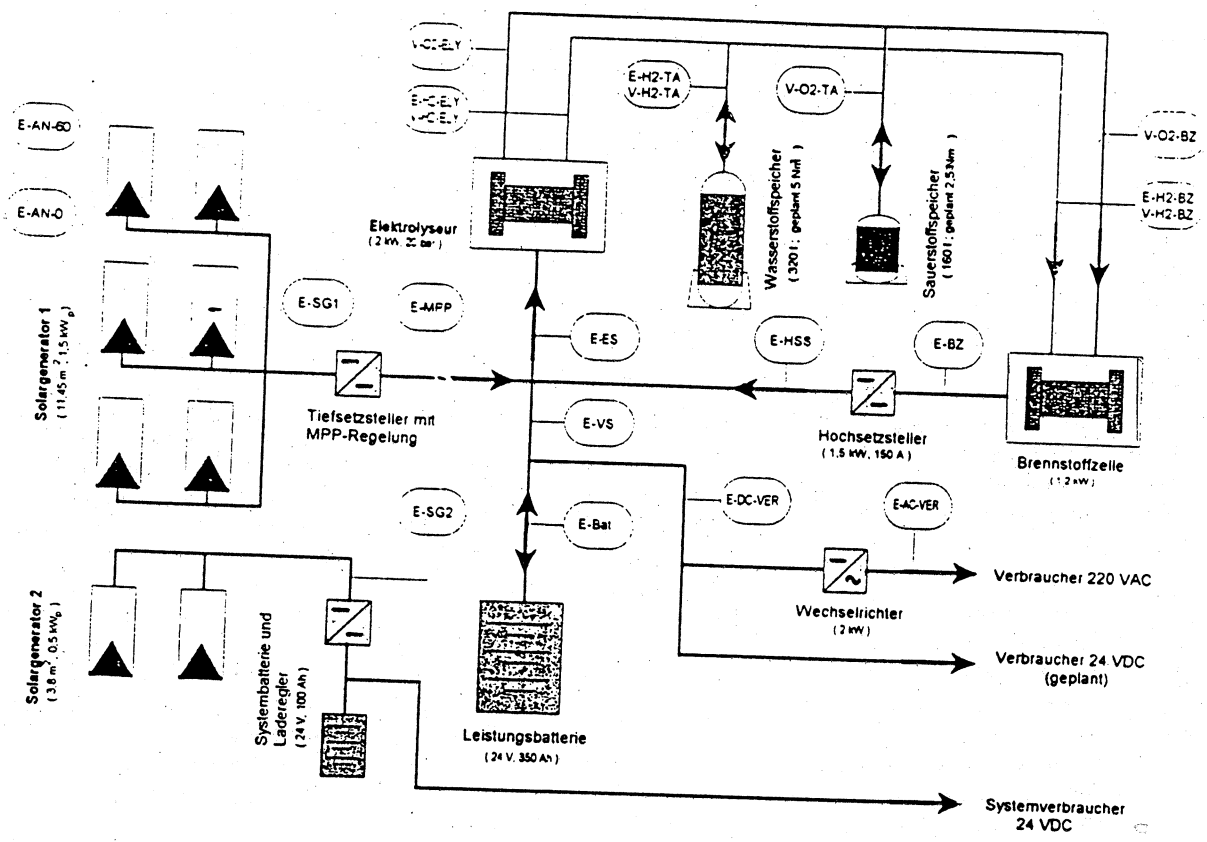
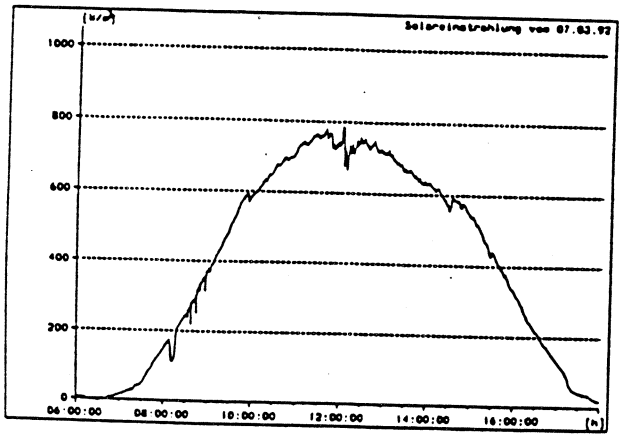
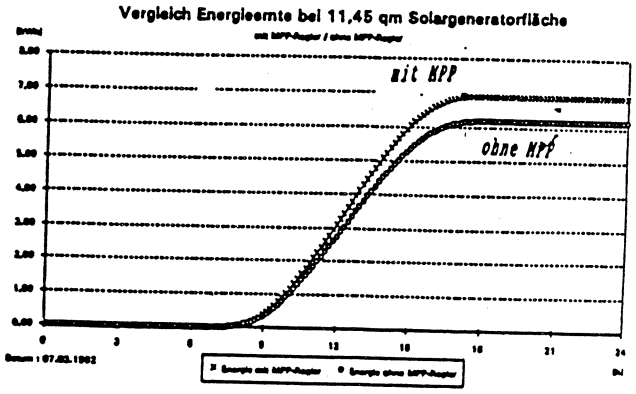


Bild 34 Meßaufbau für die Energieflüsse

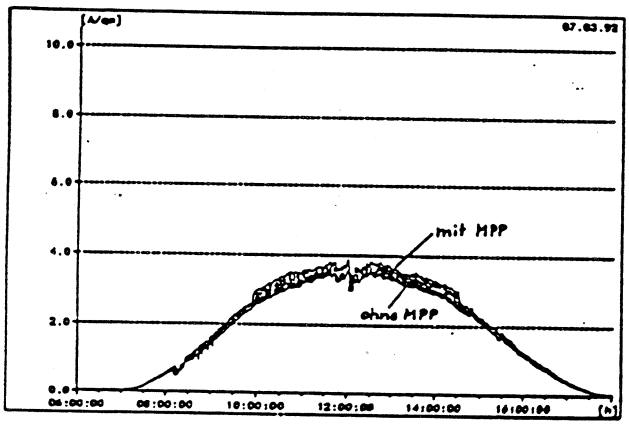
Bild 33 zeigt eine Auswahl von Meßwerten aus dem Datenerfassungssystem der Solar-Wasserstoffanlage.



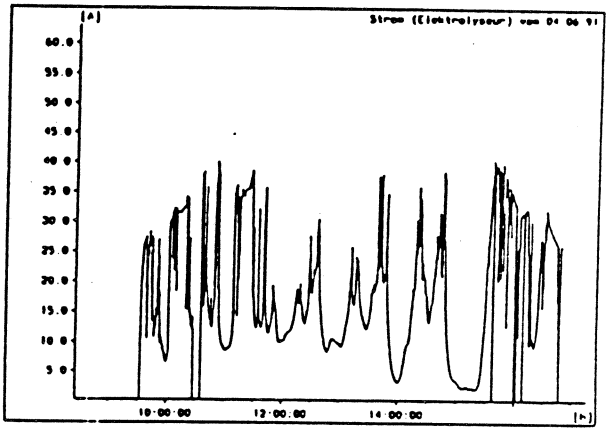
Solareinstrahlung



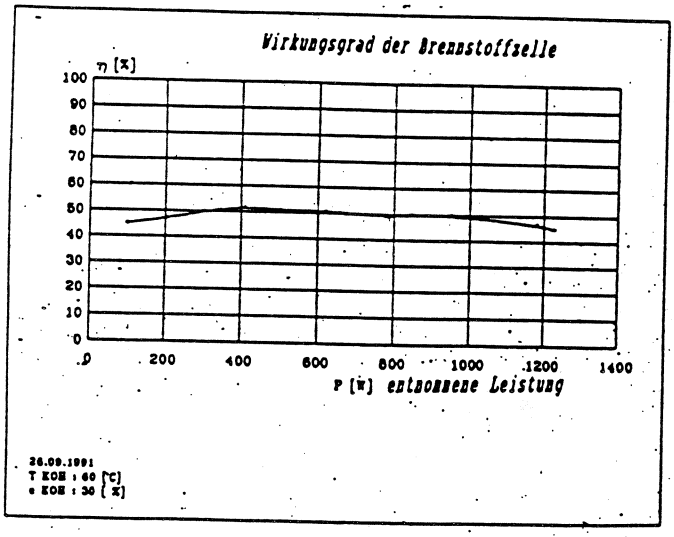
Energie aus Solargenerator mit und ohne MPP-Tracker



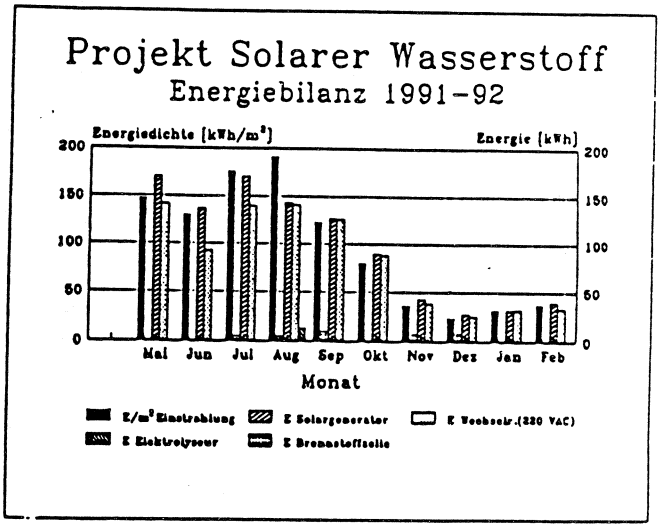
Spezifische Stromausbeute des Solargenerators mit und ohne MPP-Regelung



Elektrolysestrom



Wirkungsgrad der Brennstoffzelle in Abhängigkeit von der Leistung



Monatliche Energieflüsse

Bild 33 Meßwerte aus dem Datenerfassungssystem der Solar-Wasserstoffanlage

Um Aussagen über den Wirkungsgrad der Gesamtanlage zu erhalten, wurden u. a. die Energieflüsse im Jahr 1992 gemessen. In Bild 34 ist der Meßaufbau für die Energieflüsse dargestellt. Energieverbraucher waren der Elektrolyseur und elektrische Haushaltsgeräte in einem Inselnetz 220 V/50 Hz.

Bild 35 zeigt die monatliche Globalstrahlung für das Jahr 1992, Bild 36 die mittlere tägliche Globalstrahlung in Rüsselsheim, Bild 37 die Energieernte E-MPP, Bild 38 die Energie E-ES, die in den Elektrolyseur geflossen ist, Bild 39 den Energiefluß in den Wechselrichter, Bild 40 die Energieabgabe der Brennstoffzelle. Bild 41 zeigt die Verteilung der Energien auf Wechselrichter und Elektrolyseur.

Die im Elektrolyseur erzeugten Gase Wasserstoff und Sauerstoff wurden nur zum Teil der Brennstoffzelle zugeführt. Der Wasserstoff wurde zum größten Teil in Gasgeräten verbraucht, die im Wasserstofflabor der FHW entwickelt worden sind, also Kocher, Lampen, Kühlschrank, Motoren.

Das Ziel des Meßprogramms 1992 war, die Funktionsfähigkeit der einzelnen Komponenten zu überprüfen und erste Anhaltswerte für die Wirkungsgrade zu erhalten.

In weiteren Meßprogrammen soll der Gesamtwirkungsgrad der Anlage systematisch untersucht und verbessert werden.

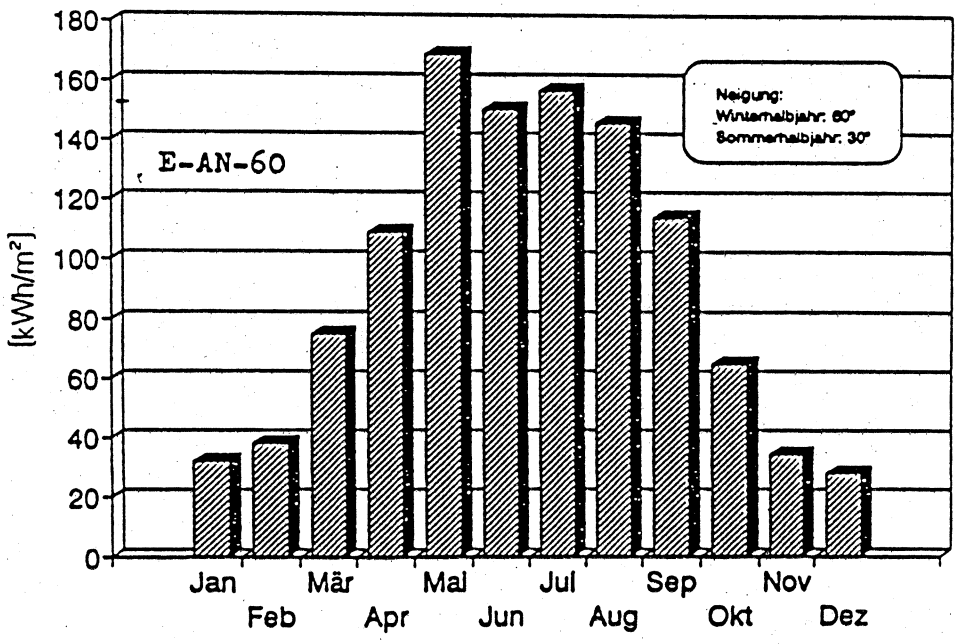


Bild 35 Globalstrahlung 1992

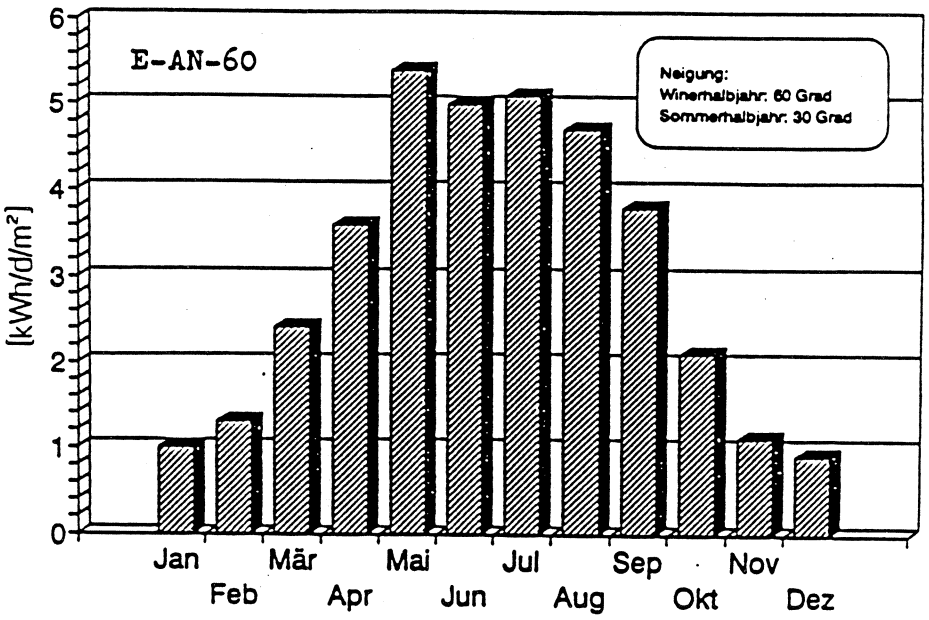


Bild 36 Mittlere tägliche Globalstrahlung

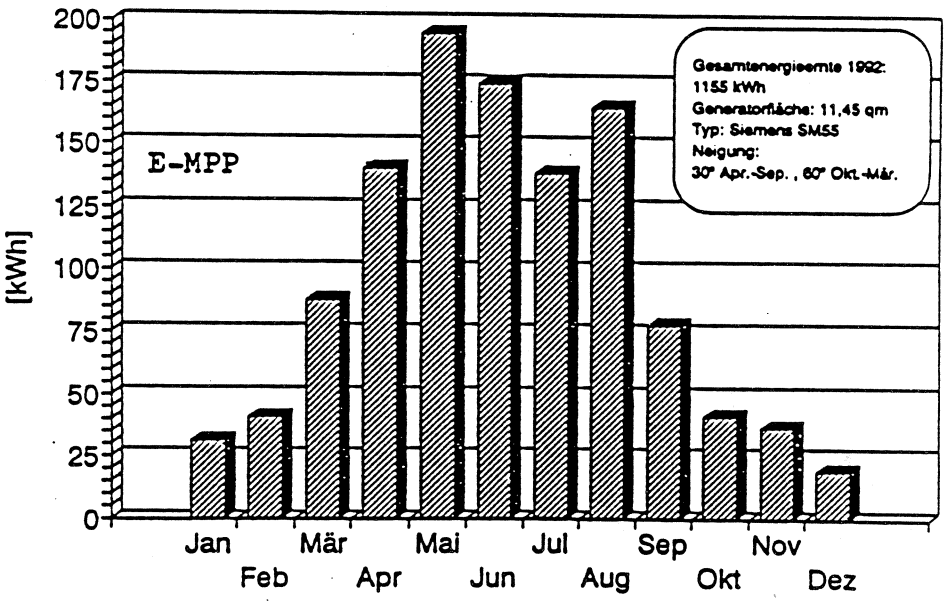


Bild 37 Energieernte 1992

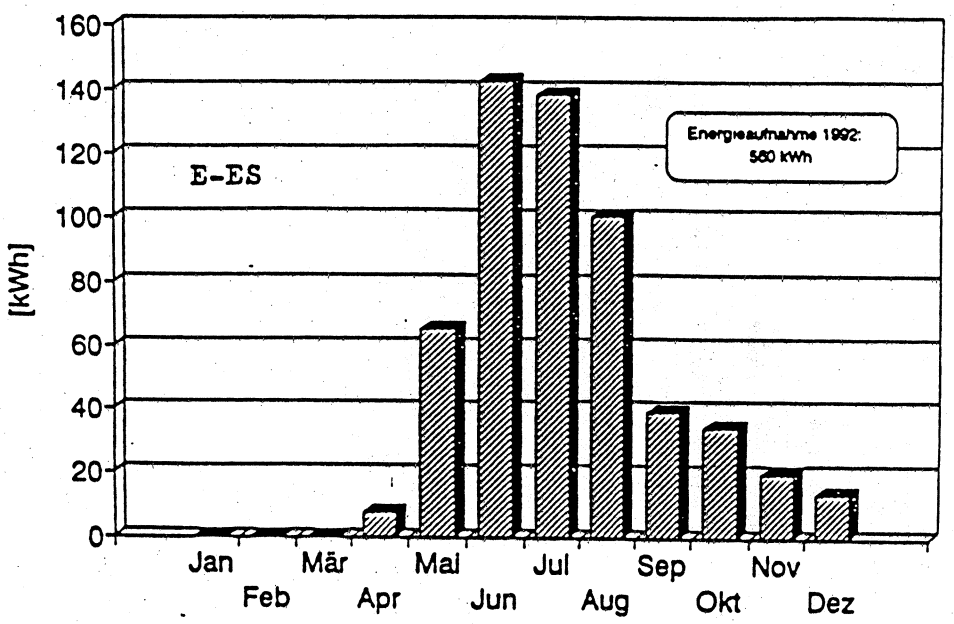


Bild 38 Energie in Elektrolyseur

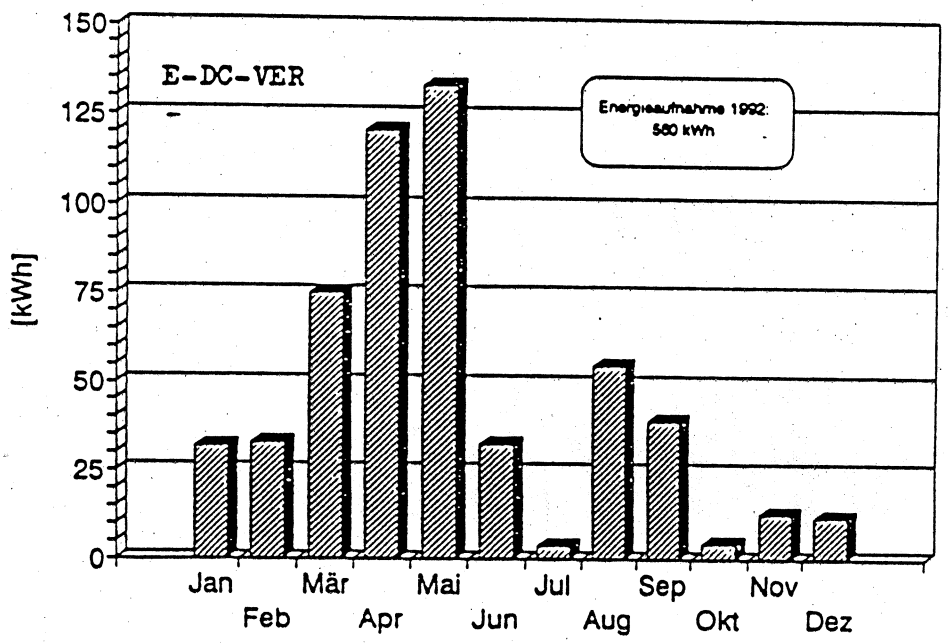


Bild 39 Energiefluß in den Wechselrichter

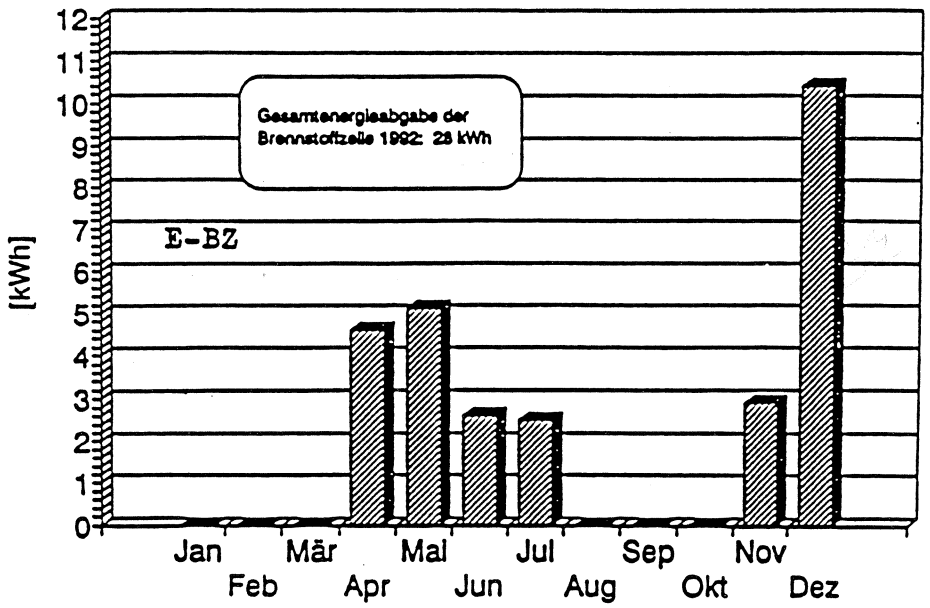


Bild 40 Energieabgabe der Brennstoffzelle

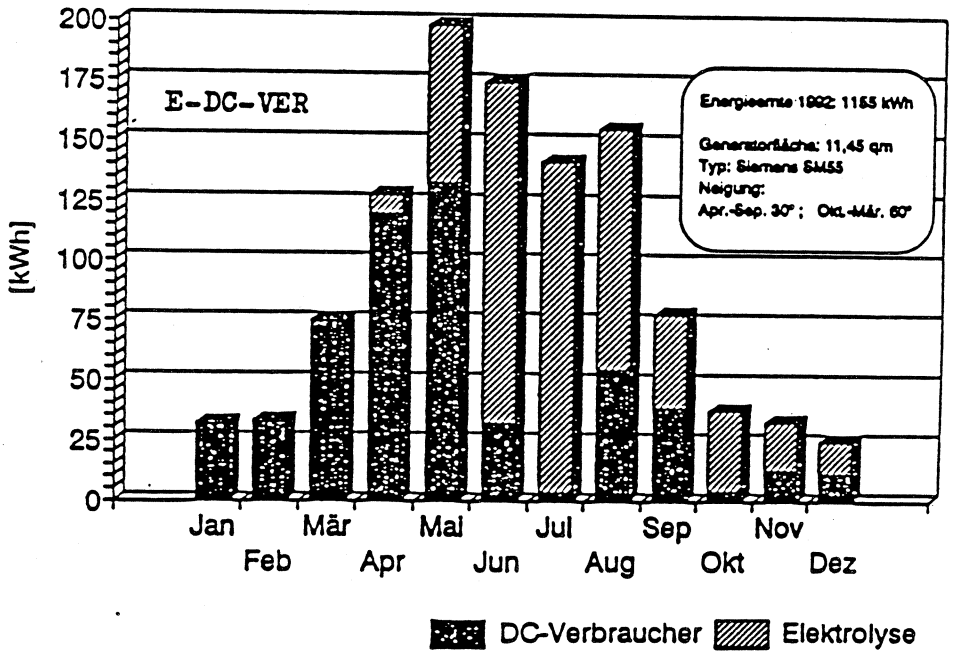


Bild 41 Verteilung der Energie an Wechselrichter und Elektrolyseur

4. Energiekosten

Die beiden beschriebenen dezentralen Energieversorgungsanlagen sind teilweise seit Jahren in Betrieb, so daß erste Wirtschaftlichkeitsrechnungen gemacht werden konnten.

Tab. 2 zeigt, wie die Kosten der Wind-Wasserstoffanlage nach der Annuitätsmethode berechnet worden sind. In Bild 42 sind die Energiekosten in Abhängigkeit von der installierten Leistung aufgetragen.

Die obere Kurve gibt die Energiekosten für den Fall, daß nur Wasserstoff als Energieträger verwendet wird, keine Elektrizität. Die untere Kurve zeigt zum Vergleich die Stromkosten des Windrades.

Tabelle 2

Wind-Wasserstoffsystem 20 kW

Generatorleistung	20 kW
Jahresenergieertrag bei V_v=5,5 m/s	55.000 kWh
Eigenenergiebedarf der Wind-Wasserstoffanlage	2.000 kWh
Energie in Elektrolyseur	53.000 kWh
Energiebedarf des Elektrolyseurs	4,8 kWh/m³ H_2
Mögliche H_2-Produktion bei 80% Verfügbarkeit	8.833 m³ H_2/a
Mögliche H_2-Produktion in 10 Jahren	88.330 m³ H_2
Mögliche O_2-Produktion	44.165 m³ O_2

Investitionskosten I

Windrad	DM 75.000
Fundament	DM 12.000
20_kW-Elektrolyseur	DM 90.000
Speicher (5 m³, 18 bar)	DM 3.000
Energieelektronik	DM 10.000
Elektrik	DM 5.000
Container	DM 5.000
Blockheizkraftwert (8 kW_{el}, 27 kWth)	DM 25.000
	DM 225.000
+ 15% MWSt.	DM 33.750
	DM 258.750

Investitionskosten	DM 258.750
Instandhaltungskosten (1%)	DM 2.587
Zinssatz	8%
Nutzungsdauer	10 Jahre
Annuitätsfaktor	14,9%
Kapitalkosten	41.553 DM/a
Betriebskosten	2.600 DM/a
Versicherungskosten	2.600 DM/a
Gesamtkosten	46.753 DM/a
Kosten in 10 Jahren	467.530 DM
Kosten des Wasserstoffs	5,29 DM/m³ H_2
Energieinhalt von 1 m³ H_2	3,54 kWh/m³ H_2
Energiekosten (Speicherung mit H_2)	1,49 DM/kWh
Leistungskosten (auf I bezogen)	12.937 DM/kW

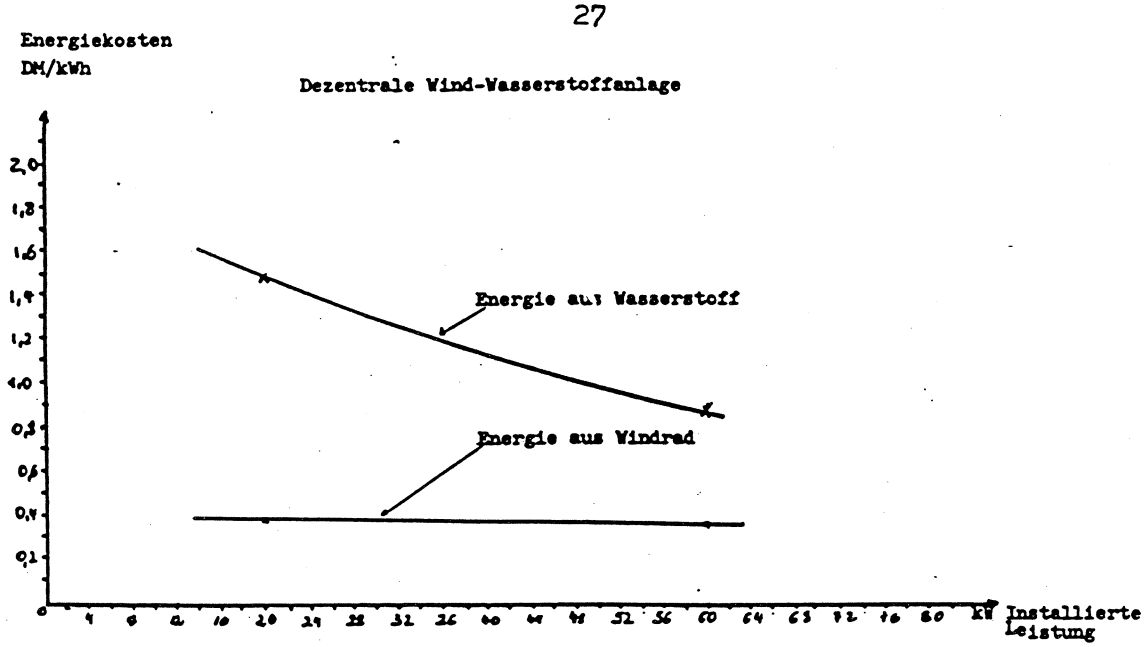
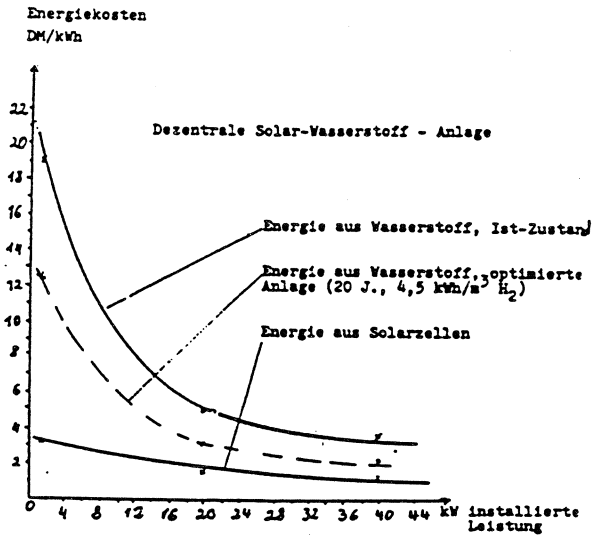


Bild 42 Energiekosten der Wind-Wasserstoffanlage in Abhängigkeit von der installierten Leistung

Für die Solar-Wasserstoff-Anlage wurden ähnliche Kalkulationen durchgeführt. Bild 43 zeigt die Energiekosten in Abhängigkeit von der installierten Leistung.

In der oberen Kurve sind die Energiekosten für reinen Wasserstoffbetrieb aufgetragen, in der unteren Kurve für reinen Solarzellenbetrieb mit Pufferbatterie. Zwischen diesen beiden Kurven liegen die Energiepreise für eine technisch verbesserte Solar-Wasserstoff-Anlage. Man sieht, daß für kleine Anlagen erhebliche Energiepreise zu zahlen sind. Bei größeren Anlagen ab ca. 25 kW Leistung werden die Energiekosten interessant.

Bild 44 zeigt die Leistungskosten in Abhängigkeit von der installierten Leistung. Es zeigt sich, daß Anlagen mit einer installierten Leistung von ca. 25 kW konkurrenzfähige Energieversorgungssysteme darstellen.



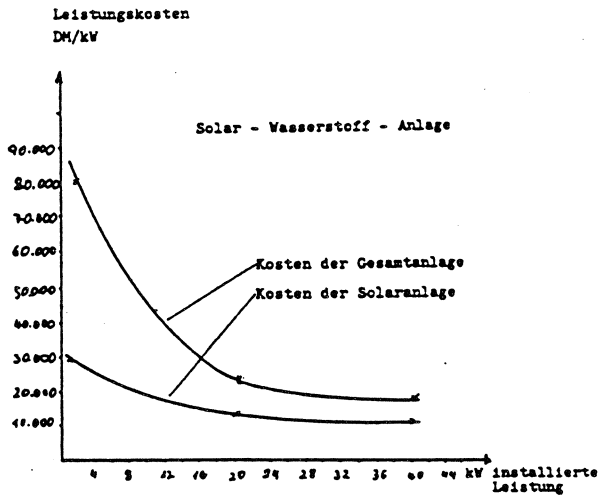


Bild 43: Energiekosten der Solar-Wasser-Anlage in Abhängigkeit von der installierten Leistung

Bild 44: Kosten pro Leistungseinheit in Abhängigkeit von der installierten Leistung

5. Komponenten für die Wasserstofftechnik

In diesem Kapitel sollen einige Geräte beschrieben werden, die im Wasserstofflabor der FHW entwickelt und gebaut worden sind und die im Dauerbetrieb laufen.

Wasserstoffheizung

Der Brennwertkessel Condensola von Viessmann ist im Wasserstofflabor der FHW von Erdgas- auf Wasserstoffbetrieb umgebaut worden. Bild 45 zeigt eine Fotografie des Kessels ohne Verkleidung. Der Brennerraum ist horizontal angeordnet, darunter befinden sich die Wärmetauscherrohre, die von den heißen Gasen durchströmt werden. Der Schornsteinanschluß und Kondensatablaß ist im unteren Bereich des Kessels.

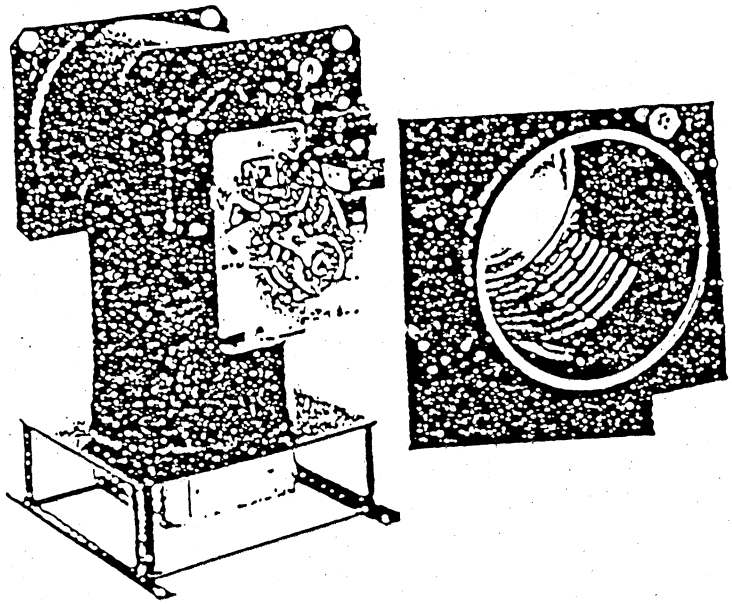


Bild 45
Brennwertkessel ohne Verkleidung und Brennkammer (links)

Der Brenner wurde komplett neu konstruiert sowie eine geeignete Flammüberwachung eingebaut. Bild 46 zeigt eine Skizze des Wasserstoffbrenners.

Der Kessel hat einen Wirkungsgrad von 107% bezogen auf den unteren Heizwert von Wasserstoff. Dieser Wert kann noch verbessert werden. Da die Heizung mit Luft und nicht mit reinem Sauerstoff als Oxidationsmittel betrieben wird, hat man außer Wasserdampf noch Stickoxide als Verbrennungsprodukt. Die Stickoxidbildung soll durch geeignete Konstruktionen und Verfahren reduziert werden.

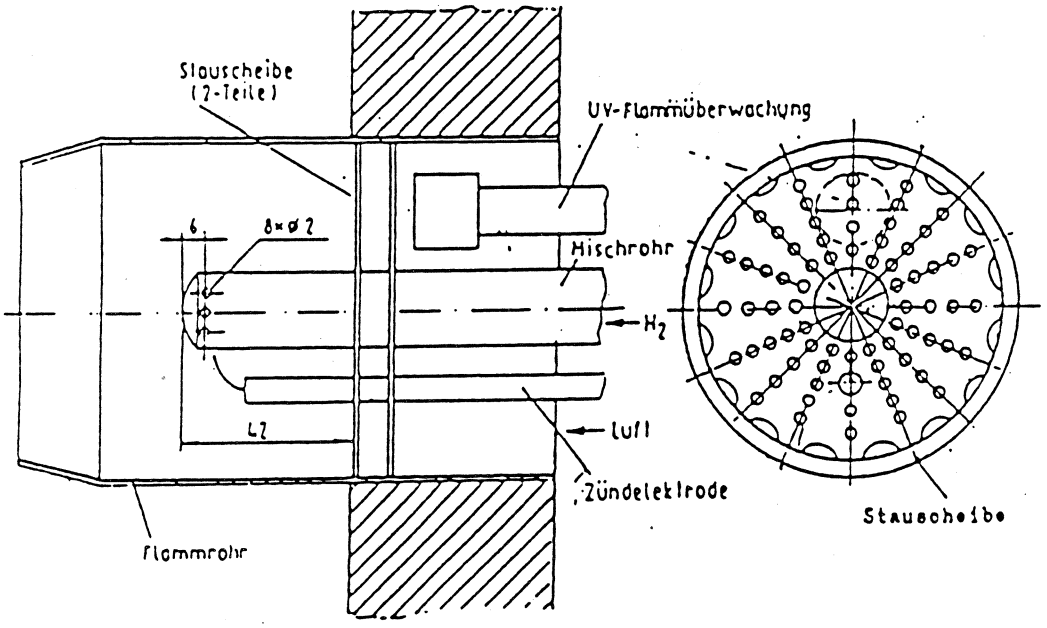


Bild 46 Wasserstoffbrenner

Bild 47 zeigt den Versuchsaufbau für Optimierungsmessungen am Heizkessel und Brenner.

Die Heizung ist bisher in reinem Wasserstoffbetrieb gefahren werden. Es ist vorgesehen, sie auch mit verschiedenen Wasserstoff-Erdgas-Gemischen zu betreiben und Erkenntnisse über die unterschiedllichen Betriebsarten zu gewinnen.

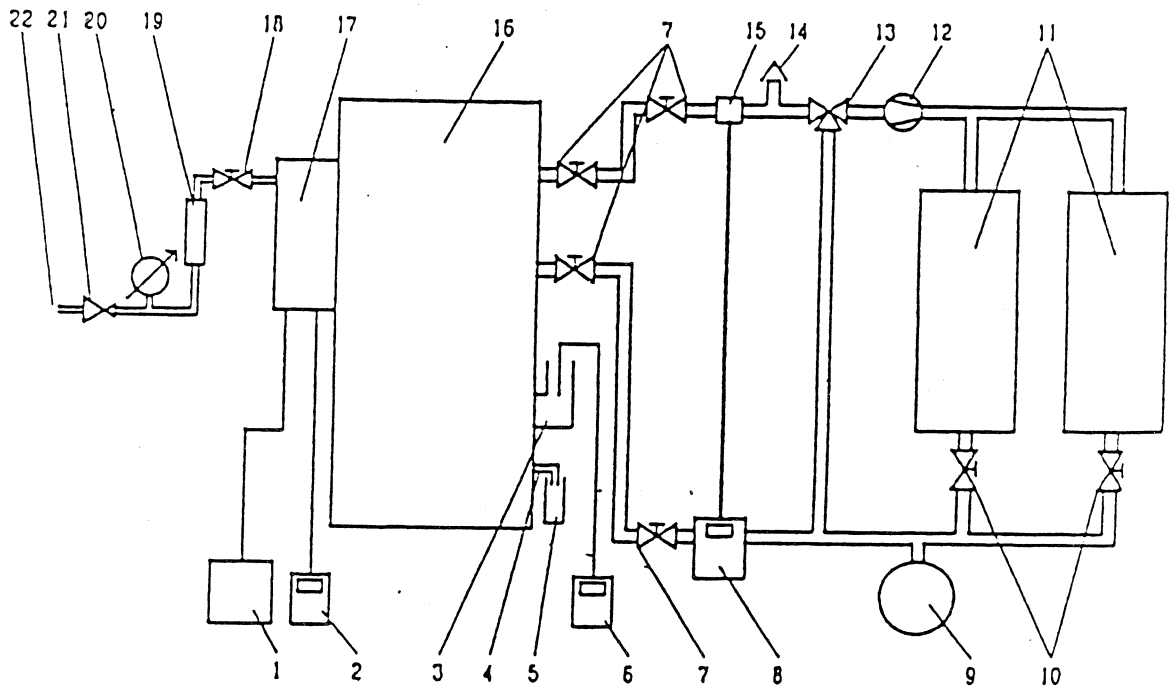
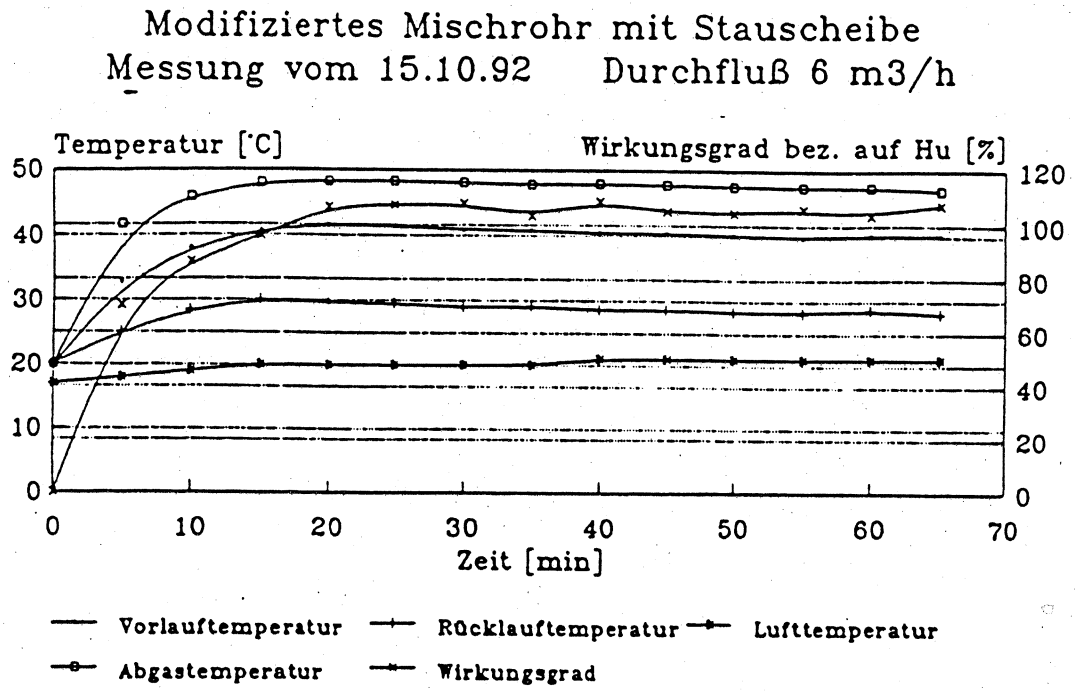


Bild 47 Meßaufbau zur Optimierung des Brenners

1 Flammüberwachungsgerät der Firma Fireye mit UV-Sonde
2 Digitalmultimeter der Firma VOLTCRAFT M-3610B mit Temperaturadapter TA1 und NiCr-Ni-Thermoelementfühler (max. Meßfehler 0,75%) zur Bestimmung der Temperatur an der UV-Sonde
3 Schornsteinanschluß für das Abgas
4 Kondensatablauf
5 Auffangbehälter für das Kondensat (Becherglas)
6 Digitalmultimeter der Firma VOLTCRAFT M-3610B mit Temperaturadapter TA1 und NiCr-Ni-Thermoelementfühler (max. Meßfehler 0,75%) zur Bestimmung der Abgastemperatur
7 Absperrhahn
8 Wärmemengenzähler der Firma Kundo
9 Ausdehnungsgefäß
10 Absperrhähne zur Einstellung des Wasserdurchflußes durch die Wärmetauscher
11 Wärmetauscher mit Radialgebläse
12 Umwälzpumpe
13 Dreiwege-Ventil
14 Entlüftung
15 Vorlauftemperaturfühler des Wärmezählers der Firma Kundo
16 Brennwertkessel Condensola der Firma Viessmann
17 Gebläsebrenner
18 Absperrhahn zur Einstellung des Wasserstoff-Durchflußes
19 Schwebekörper-Durchflußmeßgerät der Firma Heinrichs (auf Wasserstoff kalibriert)
20 Manometer, Rohrfeder-Manometer der Firma WIKA (0-400 mbar)
21 Druckminderer, der Firma Regel und Messtechnik GMBH, (0,03-0,1 Bar)
22 Wasserstoff-Vorrat (6 Gasflaschen a 40 Liter, p_{max} = 20 bar)

Bild 48 zeigt den zeitlichen Verlauf von Temperaturen und Wirkungsgraden der Heizung in Abhängigkeit von der Betriebsdauer für einen Wasserstoffverbrauch von 6 m³/h, Bild 49 gibt die Wirkungsgrade der Heizungsanlage für unterschiedliche Wasserstoffdurchflüsse.



Mittlere abgeführte Wärmeleistung im stationären Zustand 17,88 kW
Kondensat 38 ml/min

Bild 48 Zeitlicher Verlauf der Temperaturen und Wirkungsgraden der Heizungsanlage

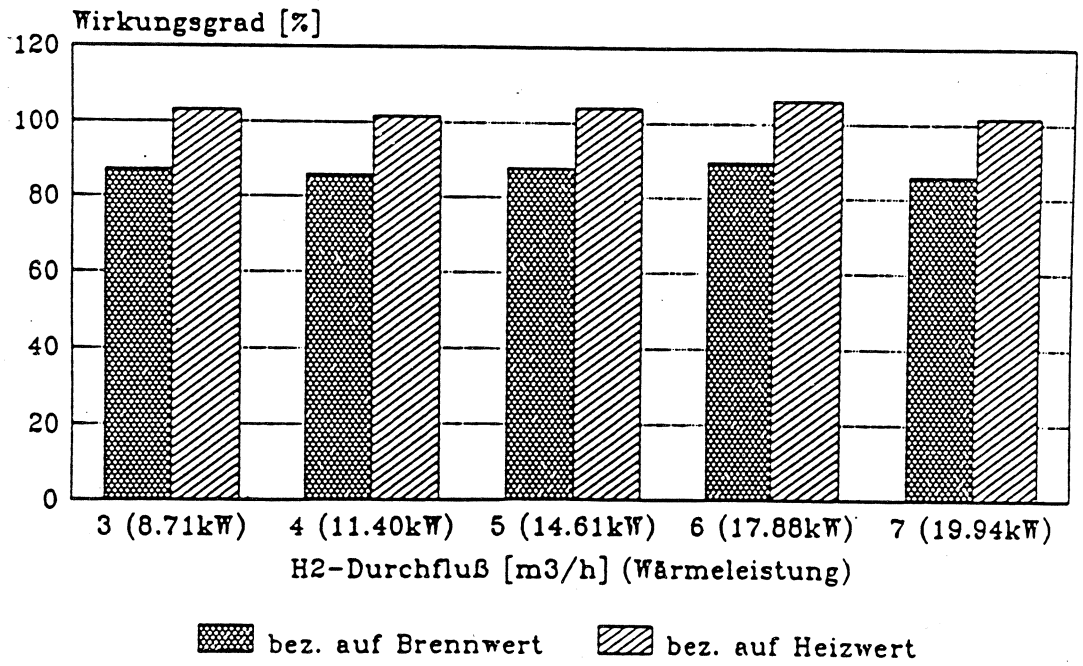


Bild 49 Wirkungsgrade der Heizung in Abhängigkeit vom Wasserstoffverbrauch

Wasserstoffmotor

Serienmäßige Otto-Motoren können so modifiziert werden, daß sie mit Wasserstoff-Luft-Gemischen statt mit Benzin-Luft-Gemischen gefahren werden können.

Es wurden zwei Motoren von Benzin- auf Wasserstoffbetrieb umgebaut, ein Motor der Firma Opel und ein Motor der Firma Briggs und Stratton. Beide Motoren wurden mit einem Generator zu einem Stromaggregat zusammengebaut und erhielten jeweils eine eigene Gasdosier- und -mischeinrichtung. In beiden Fällen entschied man sich für äußere Gemischbildung, d. h. Wasserstoff und Luft werden vor dem Einströmen in dem Verbrennungsraum gemischt. Die Zündenergie von Luft-Wasserstoff-Gemischen liegt bei Luft/Wasserstoffverhältnissen von 1 bis 3 bei einem Zehntel derjenigen von Benzin (ca. 21 mJ), die Zündtemperatur beträgt etwa 560°C. Hieraus ergibt sich, daß beim Wasserstoffbetrieb durch Frühzündungen unregelmäßige Verbrennungsabläufe auftreten können: das Wasserstoff-Luft-Gemisch wird durch heiße Stellen im Motor gezündet und nicht durch den Zündfunken der Kerze. Um diese Frühzündungen zu verhindern, sind Änderungen am Motor und an der Zündanlage erforderlich. Die beiden Motoren sind so umgebaut worden, daß sie störungsfrei im Wasserstoffbetrieb laufen.

Opel-Motor

Es wurde ein serienmäßiger Vierzylinder-Viertakt-Motor 1.0 S OHV der Adam Opel AG auf Wasserstoffbetrieb umgebaut. Die Daten des Motors sind:

Hubraum : 993 cm^3
Nennleistung : 21 kW bei 3000 U/min.
max. Drehmoment: 68 Nm bei 2600 - 3800 U/min.

Der an den Motor angeflanschte Drehstrom-Innenpol-Generator von A. van Kaick hat folgende Kennwerte:

Nenndrehzahl : 3000 U/min.
Scheinleistung : 7,5 kVA
Nennspannung : 380/220 V

Eine Skizze des Notstromaggregats zeigt Bild 50. Um den Motor einwandfrei im Wasserstoffbetrieb betreiben zu können, mußte eine geeignete Gemischbildungsanlage entwickelt werden. Bild 51 zeigt diese Anlage, mit der Dauerbetrieb bei einer Last von über 8 kW möglich ist.

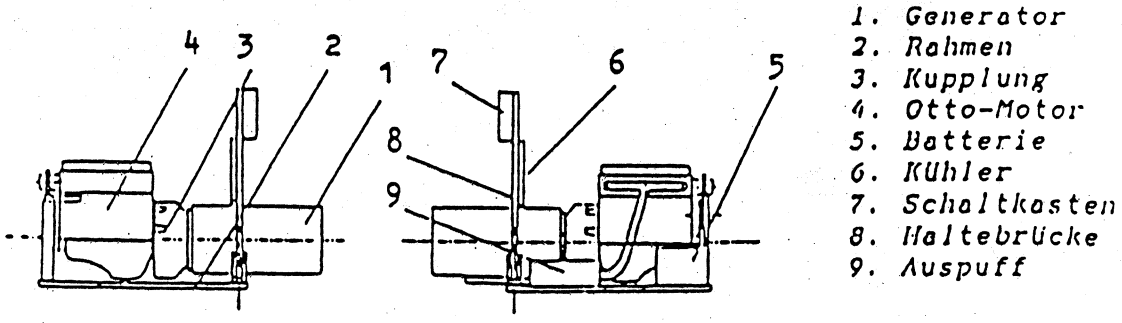


Bild 50 Skizze des Notstromaggregats

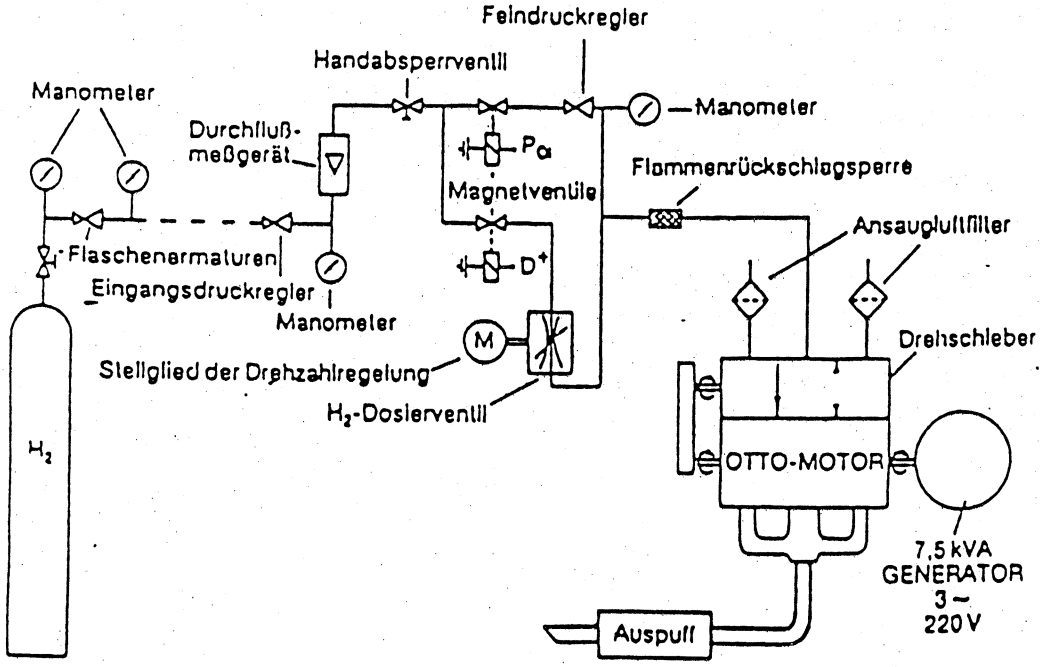


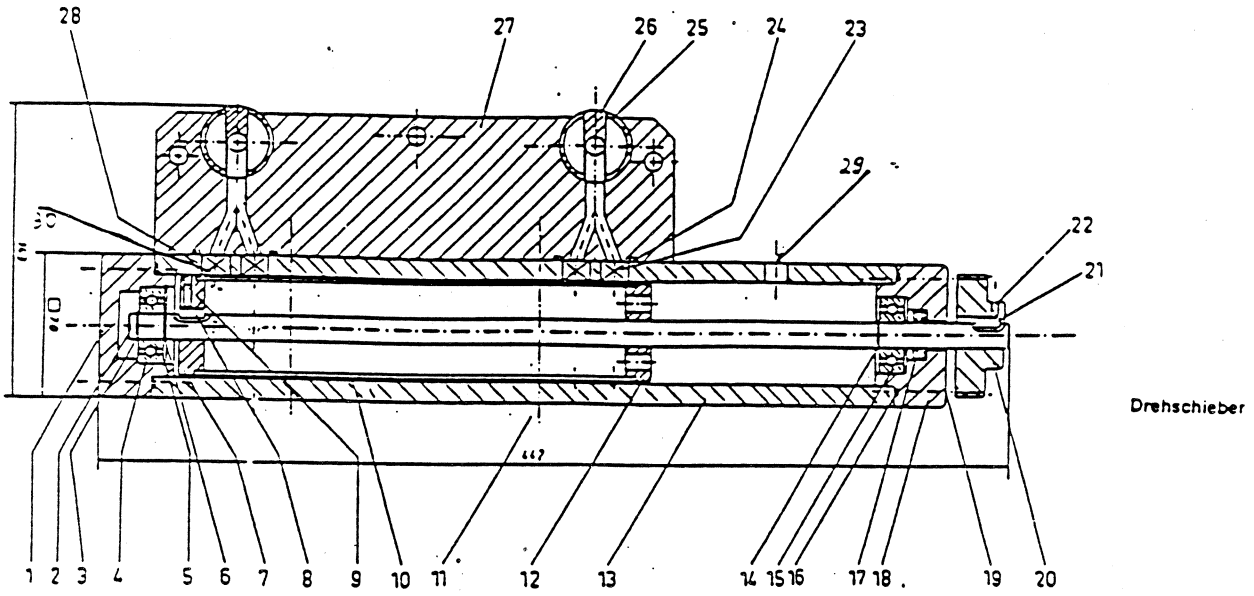
Bild 51 Gemischbildungsanlage des Opel-Motors

Der Motor läuft mit einer Drehzahl von 1500 U/min. Sinkt bei Belastung die Drehzahl, öffnet das Dosierventil und läßt mehr Wasserstoff in den Zylinder. Bei steigender Drehzahl schließt das Ventil.

Das Herzstück der Gemischbildungsanlage ist der Drehschieber, der

statt des Vergasers das brennbare Gasgemisch herstellt. Er ist in Bild 52 dargestellt. Der Drehschieber sorgt dafür, daß der Wasserstoff nur während der Ansaugphase in den Motorzylinder strömt. Die Luft gelangt durch die Ansaug-Luftfilter und über die Saugrohre 25 in den Motor. Die einströmende Luft kühlt die heißen Motorteile vor. Anschließend läßt der Drehschieber kurz Wasserstoff in das Saugrohr strömen, wo er sich mit der Luft vermischt und dann in den Motorzylinder gelangt. Dort wird das Gemisch durch die Zündkerze gezündet. Der vom Wasserstoff-Dosierventil kommende Wasserstoff tritt durch die Öffnung 29 in das Drehschiebergehäuse 13 ein (s. Bild 52). In diesem Gehäuse rotiert der Rotor 10, der von der Welle 2 und den Halteschei ben 7 und 12 getragen wird. Der Rotor 10 enthält insgesamt acht Öffnungen für den Wasserstoffaustritt. Jeweils zwei sind parallel geschaltet und lassen den Wasserstoff für eine Zylinderfüllung eines Viertakt-Motors durch. Der Wasserstoff tritt durch das Saugrohr 25 in den jeweiligen Motorzylinder ein. Die Abdichtung zwischen Rotorgehäuse 13 und Rotor 10 erfolgt über geeignete Gleitringdichtungen 23.

Durch diesen Drehschieber wird der Wasserstoff stets im richtigen Augenblick in den Zylinder eingebracht. Vor der Wasserstoff-Einbringung erfolgt eine Luftvorlagerung, die das Restgas im Motorzylinder abkühlt. Der Drehschieber bewirkt also eine pulsierende Wasserstoff-Zufuhr zu den Zylindern. Es ist ein rückzündungsfreier Dauerbetrieb bei Nennleistung des Generators (8 - 9 kW) möglich.



1. Lagerschild
2. Welle
3. Sicherungsring
4. Rillenkugellager
5. Sicherungsring
6. Sicherungsring
7. Halteschei be
8. Paßfeder
9. Gewindestift
10. Rotor
11. Sechskantschraube
12. Halteschei be
13. Gehäuse
14. Sicherungsring
15. Rillenkugellager
16. O-Ring
17. Radialwellendichtring
18. Lagerschild
19. Zylinderschraube
20. Zahnriemenscheibe
21. Paßfeder
22. Gewindestift
23. Gleitringdichtung
24. O-Ring
25. Saugrohr
26. Einblassteg
27. Grundblock
28. Führungshülse
29. Wasserstofteinlaß
30. Wasserstoffauslaß

Bild 52 Drehschieber für Gasmotor

Motor von Briggs und Stratton

Neben dem Vierzylinder-Motor wurde ein Einzylinder von Benzin- auf Wasserstoff-Betrieb umgebaut, nämlich der Motor 11 HP von Briggs und Stratton. Er wurde mit dem Generator G 6000 von Bosch zu einem Stromaggregat zusammengebaut. Die Kenndaten des Motors sind:

Hubraum	:	*650 cm³*
Nennleistung	:	*8,2 kW bei 3600 U/min.*
		5,9 kW bei 3000 U/min.
Drehmoment	:	*22 Nm bei 3000 U/min.*

Der Generator G 6000 von Bosch ist ein selbsterregter zweipoliger Synchron-Innenpolgenerator. Er hat folgende Daten:

Nennleistung	:	*5 kVA/4,7 kW*
Nennspannung	:	*230/400 V*

Auch für dieses Aggregat mußte eine geeignete Gemischbildungsanlage entwickelt werden. Sie ist schematisch in Bild 53 dargestellt.

Die Umbaumaßnahmen für den Wasserstoffbetrieb sind weniger aufwendig als beim Opel-Motor. Es konnte ein serienmäßiger Gasregler für den Propan-Betrieb verwendet werden. Dieses Gerät hat die gleiche Funktion wie der Drehschieber beim Vierzylinder-Motor.

Der Motor läuft rückzündungsfrei bei Vollast. Schwierigkeiten ergeben sich beim Starten des Motors bei niedrigen Temperaturen (< 0°C). Durch Kondenswasser werden die Zündkerzen kurzgeschlossen. Beim Opel-Motor wurde das Problem durch Einbau einer Hochspannungs-Zündanlage gelöst.

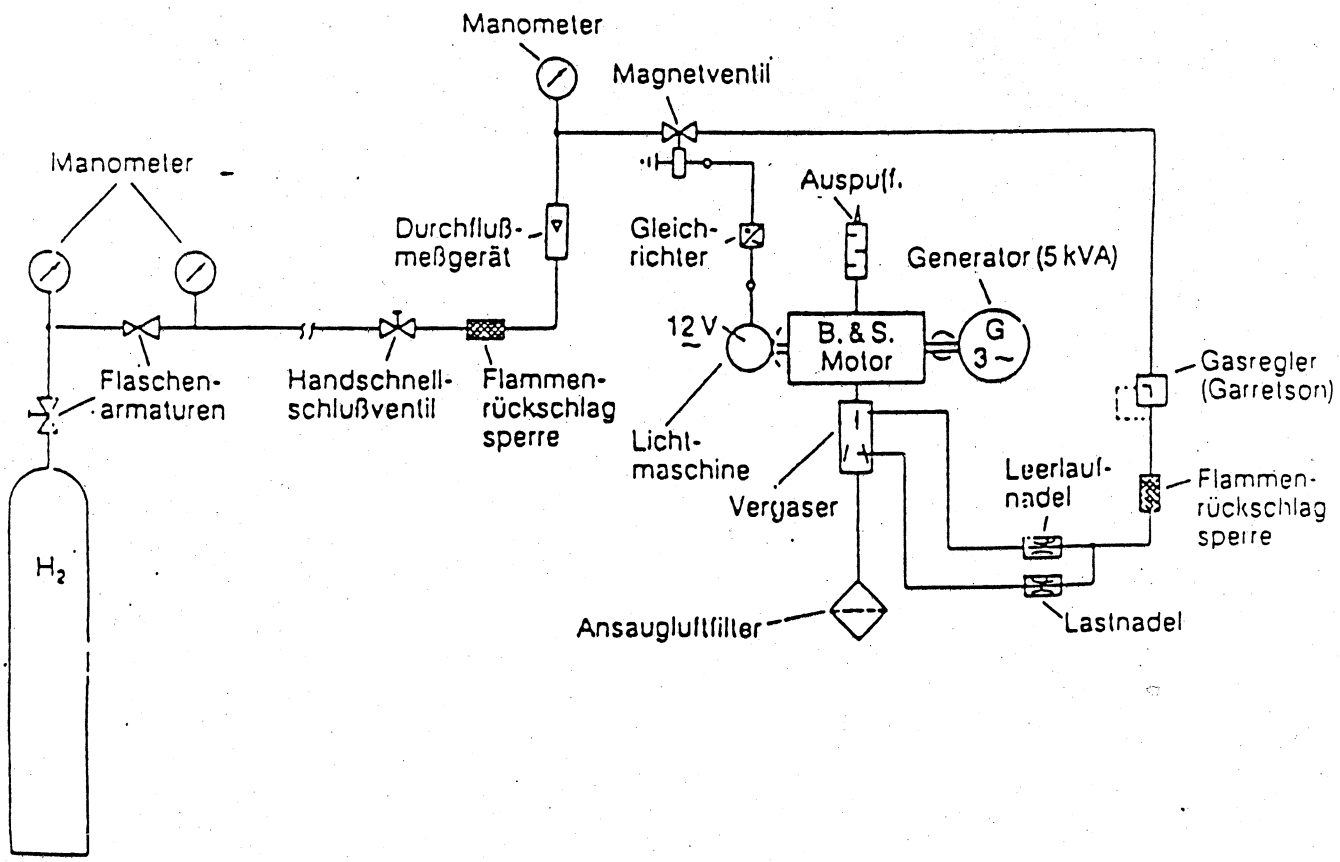


Bild 53 Gemischbildungsanlage für Briggs + Stratton-Motor

Messungen an den Motoren

Opel-Motor

Nachdem die beiden Motoren so umgebaut worden waren, daß sie störungsfrei im Wasserstoff-Betrieb laufen, wurden zunächst Verbrauchsmessungen durchgeführt. Bild 54 zeigt den Wasserstoffverbrauch des Opel-Motors in Abhängigkeit von der Belastung des Generators (ohmsche Last), der spezifische Kraftstoffverbrauch ergibt sich aus Bild 55. Den Wirkungsgrad für verschiedene Leistungen kann man Bild 56 entnehmen.

Das Luftverhältnis ist bei der vorliegenden Gemischbildungsanlage veränderlich und liegt zwischen 4,3 und 2. In Bild 57 ist es als Funktion der abgegebenen Generatorleistung dargestellt.

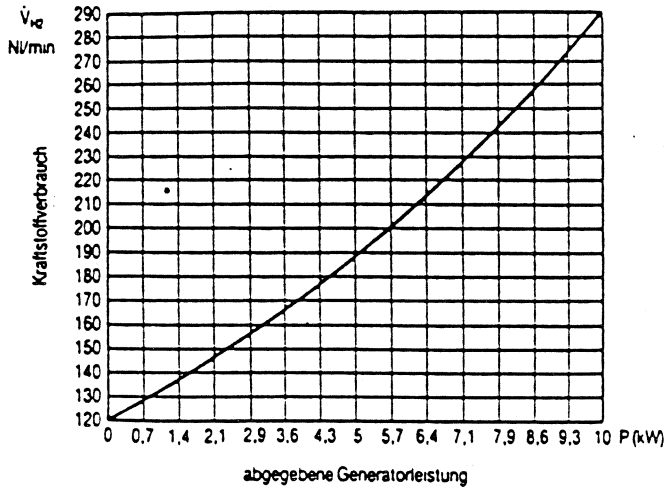


Bild 54 Wasserstoffverbrauch des Opel-Motors in Abhängigkeit von der Belastung des Generators

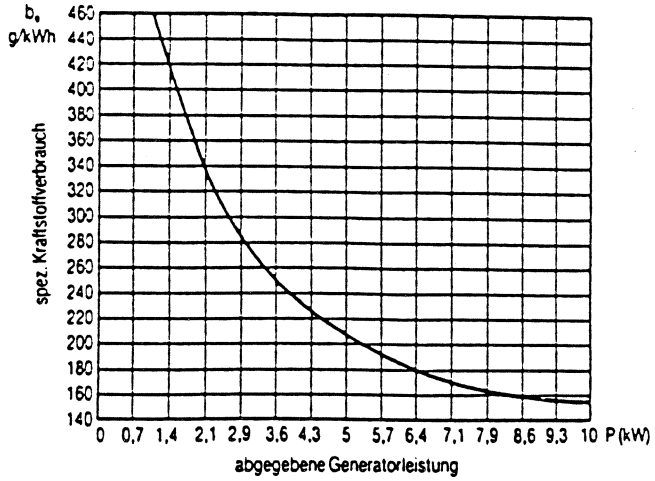


Bild 55 Spezifischer Kraftstoffverbrauch des Opel-Motors in Abhängigkeit von der Belastung

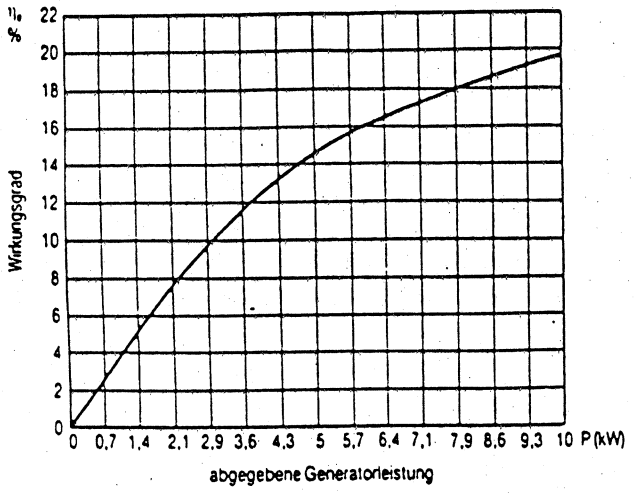


Bild 56 *Wirkungsgrad des Systems Motor-Generator als Funktion der abgegebenen Leistung*

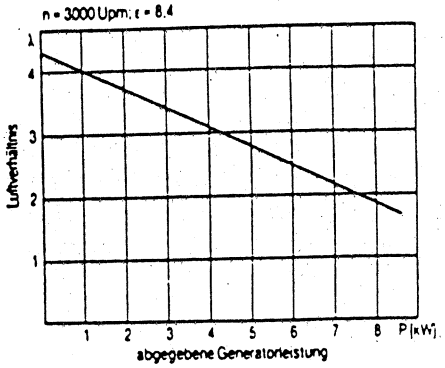


Bild 57 *Luftverhältnis als Funktion der Generatorleistung*

Motor von Briggs und Stratton

Ähnliche Messungen wie am Opel-Motor wurden am Aggregat von Briggs und Stratton durchgeführt. Den Wasserstoffverbrauch in Abhängigkeit von der Generatorleistung zeigt Bild 58.

Einsatzgebiete für diese Motoren sind Blockheizkraftwerke, motorgetriebene Pumpen, Kompressoren, Baumaschinen, landwirtschaftliche Geräte.

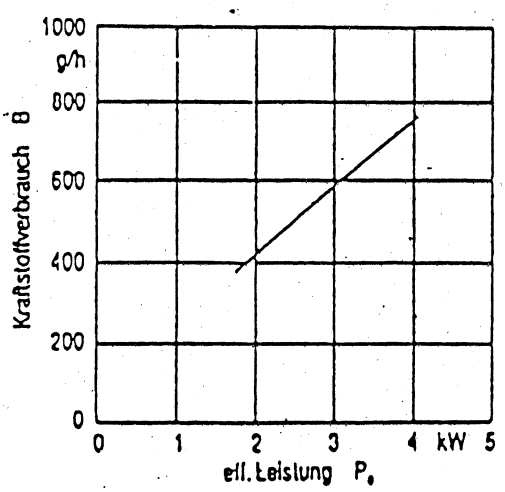


Bild 58 *Wasserstoffverbrauch als Funktion der Generatorbelastung*

Blockheizkraftwerk

Der Wirkungsgrad des Notstromaggregats mit dem Opel-Corsa-Motor liegt bei ca. 19%, wenn die Leistungsabgabe des Generators ca. 8,5 kW beträgt, wie aus Bild 56 hervorgeht. Der Energieinhalt des teu-

ren Wasserstoffs wird also sehr schlecht ausgewertet. Durch den Auspuff und die Motorkühlung werden relativ hohe thermische Leistungen an die Umluft abgegeben.

Aus diesem Grunde wurden in die Abgasleitung und in den Kühlkreislauf je ein Wärmetauscher eingebaut, welche die thermische Energie des Abgases bzw. des Kühlwassers an eine Heizung abgeben (s. Bild 59). Bei einer Leistungsabgabe des Generators von 8 kW ist die thermische Leistung aus dem Kühlwasser etwa 18 kW, die Leistung aus dem Abgas beträgt etwa 8 kW, der Wasserstoffverbrauch liegt bei 14 m^3/h, der Wirkungsgrad bei 80%.

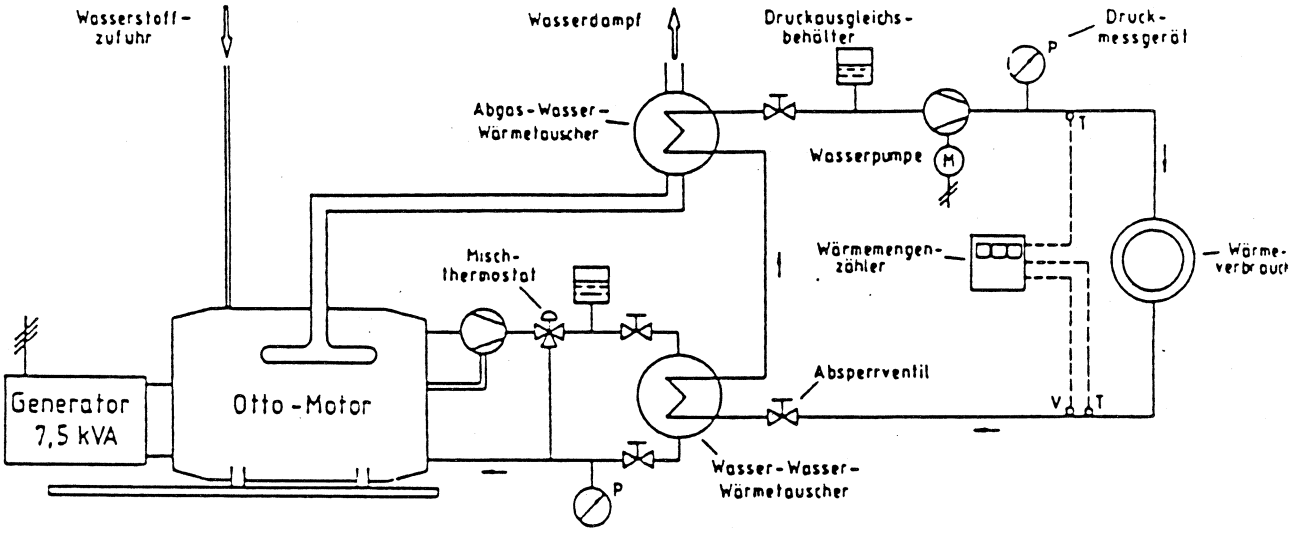


Bild 59 Schaltbild des Blockheizkraftwerks

Das Luftverhältnis bei dieser Leistung beträgt etwa $\lambda = 2$. Eine NO_x-Emission war nicht meßbar.

Eine Auskopplung der thermischen Energie aus dem Ölkreislauf ist nicht vorgesehen, um eine Kondensation des Wasserdampfes im Motor zu vermeiden. Durch konstruktive Änderungen läßt sich der Wirkungsgrad des BHKW erhöhen.

Motorpumpe

Der Motor IC 3HP von Briggs + Stratton wurde von Benzin- auf Wasserstoffbetrieb umgebaut. Der Umbau war analog dem in Bild 33 beschriebenen für den Motor 11 HP. An diesen Motor wurde statt eines Stromgenerators eine Wasserpumpe angeflanscht. Als geeignet stellte sich die Pumpe NP4B von Mast-Pumpen GmbH in Aichwald heraus (s. Bild 60).

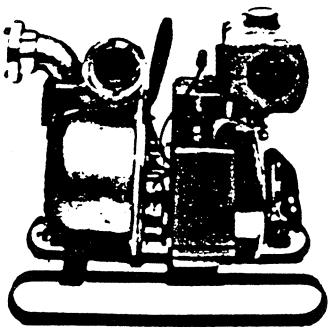


Bild 60 Wasserpumpe

Diese Pumpe hat eine Fördermenge von 450 l/min. bei Förderhöhe bis 8,4 m ist sie selbstansaugend und zum Fördern von Öl und Wass geeignet.

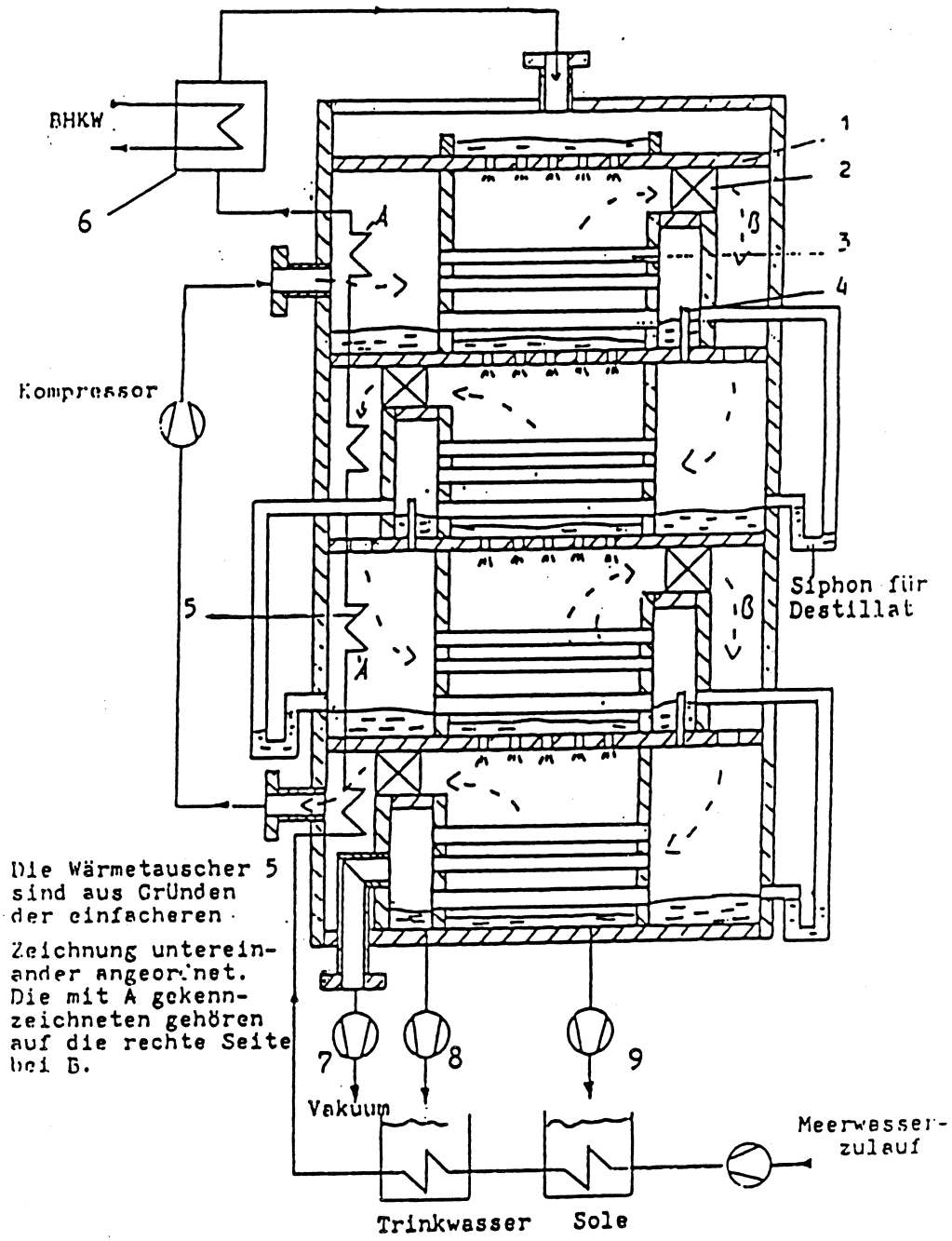
Meerwasserentsalzungsanlage

Es wurde eine MED-Meerwasserentsalzungsanlage entwickelt, die ih. gesamte Energie aus dem oben beschriebenen Blockheizkraftwe. erhält, die elektrische Energie für Pumpen und Kompressoren aus d Stromgenerator.

Die sechsstufige MED-Anlage (Multiple-Effect-Destillation) kann 1 m³ Trinkwasser pro Stunde erzeugen.

Eine schematische Darstellung der Anlage ist in Bild 61 gegeben.

Die Wassertemperaturen in den einzelnen Stufen sind in Abb. 62 a gegeben. Das Meerwasser wird mit ca. 28°C angesogen und über d Solebehälter sowie den Destillatbehälter geleitet, wobei sei Temperatur auf 29,5°C ansteigt. Anschließend läuft es über Wärme tauscher 5, an denen Wasserdampf kondensiert, so daß das Meerwasse bis auf 44°C aufgeheizt wird. In einem Wärmetauscher 6, der v Blockheizkraftwerk aufgeheizt wird, erhält das Wasser eine Tempera tur von 48°C. Dieses Meerwasser wird auf den ersten Lochboden 1 d Meerwasserentsalzungsanlage geleitet. Dieser Boden enthält Bohru gen, durch die das Wasser auf die Rohre 3 tropft. Durch eine Vak umpumpe 7 ist die Anlage evakuiert. Auf den Rohren 3 verdampft e Teil des Wassers. Der Wasserdampf wird über den Demistor 2 in d nächste Stufe gepumpt (gestrichelte Linie). Er kondensiert in d Rohren 3. Der Demistor ist ein Gewebe, in dem Salzwassertröpfche niedergeschlagen werden. Der in den Rohren 3 kondensierende Wasser dampf heizt die Rohre 3 auf. Dadurch wird das Meerwasser auf d Außenseite der Rohre verdampft. Das Süßwasserkondensat wird übe ein Siphon in die nächste Stufe geleitet. Die Löcher in den Lochb den 1 sind so dimensioniert, daß das Meerwasser auf dem Lochbod ca. 10 cm hoch steht. Der Unterdruck in den einzelnen Stufen wir durch eine Wasserringpumpe 7 hergestellt, wobei die einzeln Stufen durch Verbindungsrohre 4 verbunden sind.



1 Lochboden
2 Demistor
3 Wärmetauscherrohr
4 Verbindungsrohr
5 Wärmetauscher zur Erwärmung des Meerwassers
6 Wärmetauscher vom BHKW
7 Vakuumpumpe
8 Süßwasserpumpe
9 Solepumpe

Abb. 61 Skizze einer vierstufigen Entsalzungsanlage

Der Wasserdampf der letzten (sechsten) Stufe wird als Energiequelle der ersten Stufe verwendet: ein Kompressor pumpt den Wasserdampf von der sechsten in die erste Stufe. Durch die Kompression erhöht sich die Temperatur des Wasserdampfs von 33°C auf über 51°C, so daß dieser Dampf in den Rohren 3 kondensiert. Das auf die Rohre 3

tropfende Meerwasser wird verdampft, der Dampf wird in der nächsten Stufe kondensiert.

Die Anlage ist für einen Durchsatz von 2 m^3/h Meerwasser konzipiert. Es entsteht 1 m^3/h Destillat. Sie benötigt vom Blockheizkraftwerk eine thermische Leistung von 21 kW und eine elektrische Leistung (Pumpen, Kompressoren) von 5 kW.

Den Wasserstoff für den Betrieb der Anlage liefern die 20 kW-Elektrolyseure der FHW.

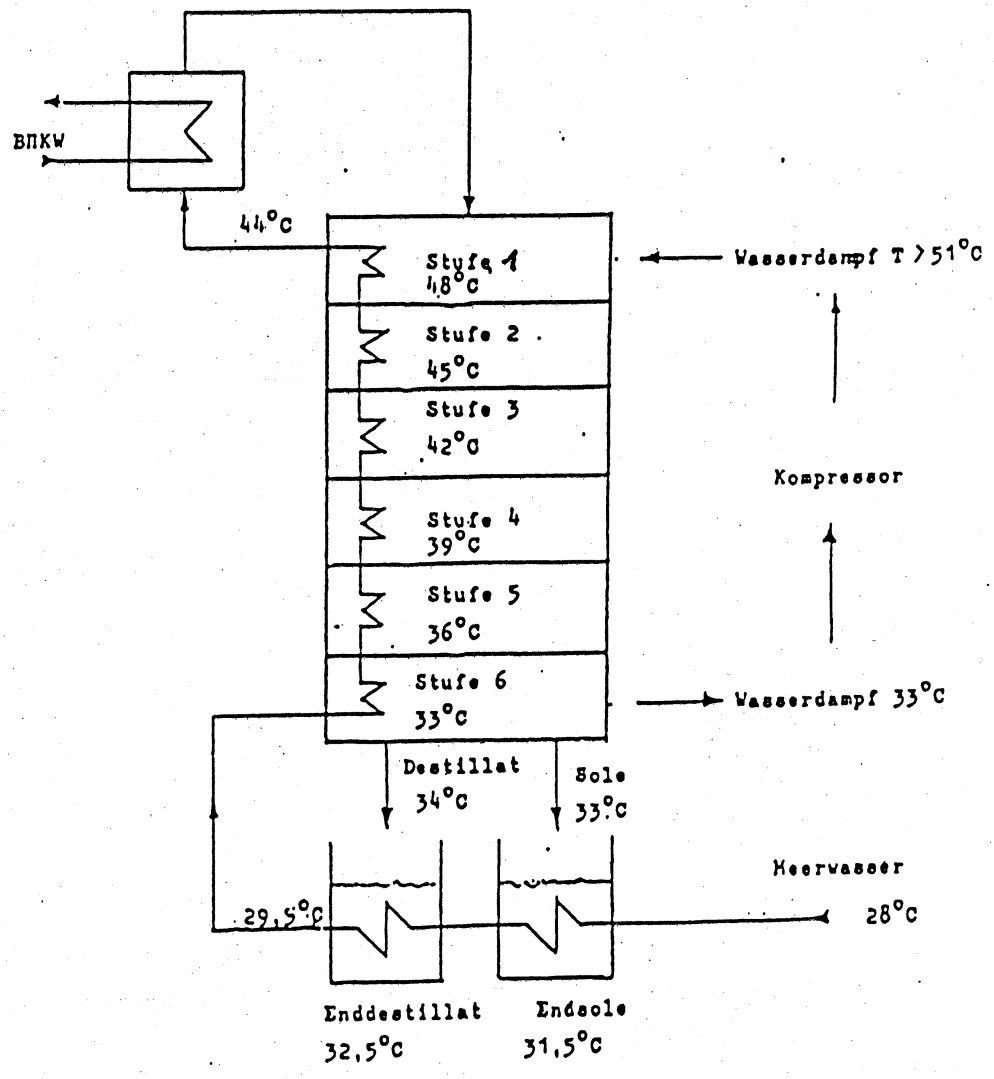


Abb. 62 Temperaturen in den einzelnen Stufen der Anlage

H_2-O_2-Erzeuger

Der Bedarf an Wasserstoff oder Sauerstoff in Betrieben oder Laboratorien wird seit langem dadurch befriedigt, daß die Gase in Druckflaschen oder -behältern angeliefert werden. Es entstehen dadurch hohe Transportkosten und Mietkosten für die Flaschen. Außerdem ist eine aufwendige Infrastruktur für die Belieferung, die Lagerung und den Transport der Gase zu unterhalten.

Durch die Entwicklung von leistungsfähigen Druckelektrolyseuren ist es möglich geworden, die Gase Wasserstoff und Sauerstoff vor Ort kostengünstig selbst herzustellen. Nach einem an sich bekannten Verfahren wird in einem alkalischen Druckelektrolyseur Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zersetzt. Die Gase können dabei im Augenblick ihrer Entstehung entnommen oder in einem Druckbehälter zwischengespeichert werden. Es ist kein Kompressor erforderlich.

Die an der FHW entwickelte Anlage ist in Bild 63 skizziert:

Im Zellenblock (1) wird Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zersetzt gemäß der Reaktionsgleichung

$$H_2O + \text{Energie} \rightarrow H_2 + \tfrac{1}{2}\, O_2$$

Die zur Wasserzersetzung benötigte Energie wird aus dem Netz entnommen. Die Gase fallen bei einem Druck von 20 bar an. Als Elektrolyt dient 30%-ige Kalilauge. Die Gase werden im Separationsbehälter (2) vom Elektrolyten getrennt und in den Druckflaschen (3) und (4) gespeichert. Sie können über die Reduzierventile (7) entnommen werden. Der Elektrolyseur ist mit Stromversorgung (10) und Steuerung (11) in einem stabilen Stahlgehäuse untergebracht (Bild 46 links). Die Wasserstoffproduktion liegt bei 400 l/h, die Sauerstoffproduktion bei 200 l/h, der Wasserverbrauch beträgt 800 cm³ pro Normkubikmeter erzeugten Wasserstoff, die Leistungsaufnahme liegt bei 2 kW.

1 Zellenblock
2 Separationsbehälter
3 Sauerstofflasche
4 Wasserstofflasche
5 Gasanalyse
6 Druckmessung
7 Reduzierventil
8 Gaswarngerät
9 Temperaturmessung
10 Stromversorgung
11 Steuerung
12 Umluft

Spezifikation des Elektrolyseurs

Maximale Leistungsaufnahme	1800 W
Anzahl der bipolaren Zellen	12
Spannung	22-30
Maximaler Strom	60 A
Betriebstemperatur	40-70°
Maximaler Arbeitsdruck	20 bar
Wirkungsgrad	80 %
Erzeugter Wasserstoff	380 l/h
Erzeugter Sauerstoff	190 l/h
Sauerstoff in Wasserstoff	0,6 %
Wasserstoff in Sauerstoff	1,2 %
Elektrodenfläche	160 cm^2
Elektrolyt	30 % KO

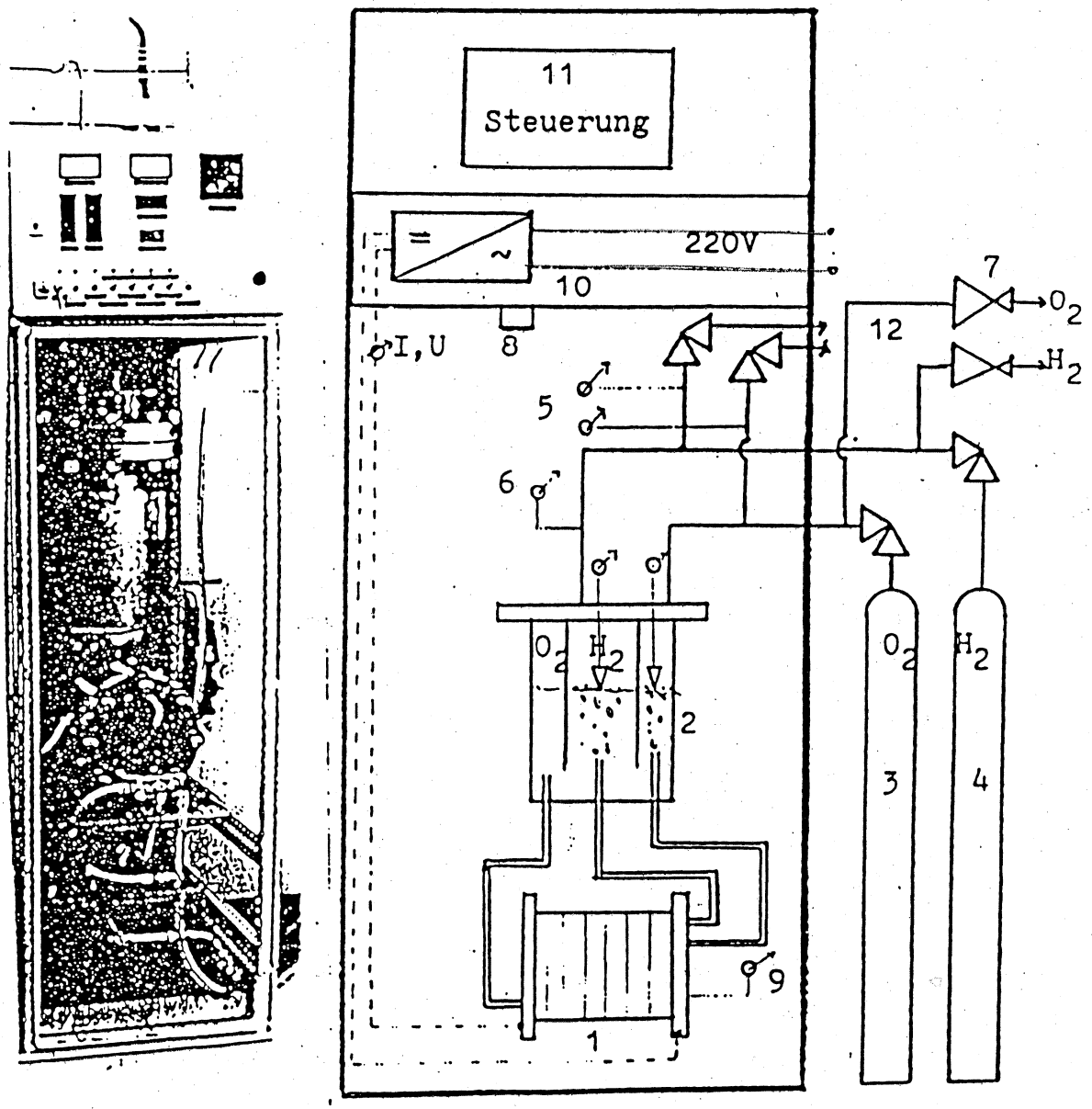


Bild 63 H_2-O_2-Generator

Weitere Geräte sind von Erdgas auf Wasserstoffbetrieb umgebaut worden, z. B. Kühlschränke, Gasherde, Gaslampen. Andere Geräte, z. B. katalytische Heizungen sind neu entwickelt worden. Gassensoren, Armaturen, Sicherheitssysteme wurden im Dauerbetrieb getestet und optimiert.

6. Anwendungsmöglichkeiten

Alle Erfahrung lehrt, daß die Einführung eines neuen Energieversorgungssystems ihre Zeit braucht, die nach Jahrzehnten zu rechnen ist. In dieser Zeit werden die Komponenten und Systeme entwickelt, sind manche Umwege und auch Irrwege zu gehen und Erfahrungen zu sammeln.

Wo können die beschriebenen Systeme schon heute eingesetzt werden?

Es sind zunächst Anwendungen in Marktnischen denkbar. Die funktionsfähigen Systeme können als Energieversorgungseinheiten in abgelegenen Gebieten, Hochgebirgs- oder Insellagen verwendet werden.

Industrieanwendungen sind mit dem Wasserstoff-Sauerstoff-Erzeuger möglich, der ebenfalls in Kapitel 5 skizziert ist, für Schweißen, Wärmebehandlung, Heizen usf.

Wir danken dem Hessischen Minister für Umwelt und Energie für die Unterstützung dieser Arbeiten.

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 mesopotanischen 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 - 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 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 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:

(1) $$6H_2O + 6\,CO_2 + \text{Sonnenenergie} \rightleftharpoons C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2$$

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

(2) H_2O + Energie $\rightleftharpoons$ $H_2 + 1/2\ O_2$

Der Wasserstoff aus diesem Prozeß reagiert mit dem von der Pflanze aus der Luft aufgenommenen CO_2 über verschiedene Verfahrensschritte zu $C_6H_{12}O_6$, 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 CO_2 reagieren läßt, entstehen flüssige Alkohole , im einfachsten Fall z.B. Methanol:

(3) $3\ H_2 + CO_2 \Rightarrow CH_3OH + H_2O$ (ΔH = -49 kJ/mol)

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 Proezß (3) gibt es eine Vielzahl von Varianten, abhängig vom Verfahrensablauf.

Das 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_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 CO_2 kann aus den verschiedensten Verbrennungs-, Vergärungs- oder Verrottungsprozessen gewonnen werden, aus Holzvergasung, Kläranlagen, aus Quellenkohlensäure, Zementwerken.

Aufgabe der Technik ist es nun, optimierte Verfahren zur Erzeugung flüssiger Brennstoffe aus Wasserstoff und CO_2 zu entwickeln.

Eine der Möglichkeiten ist in Bild 1 skizziert. Wasserstoff und Sauerstoff werden von einem optimierten Druckelektrolyseur bereitgestellt, das CO_2 kommt aus der Holzvergasung. Die Gase CO_2 und 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 m^3/h Abgas; der CO_2-Gehalt des Abgases liegt üblicherweise bei 25%. Das entspricht einem CO_2-Ausstoß von etwa 49.000 kg/h. Für die Reaktion (3) benötigt man etwa 75.000 m^3/h H_2. Dabei entstehen ca. 35.600 kg/h Methanol, d.h. etwa 300.000 t/Jahr.

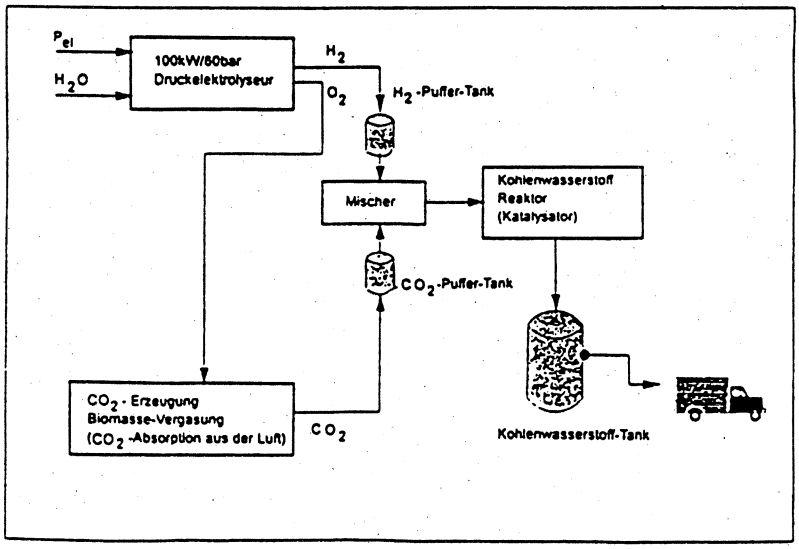


Bild 1: Schematische Darstellung einer Anlage zur Erzeugung flüssiger Energieträger.

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 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 % N_2, 21 % 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.

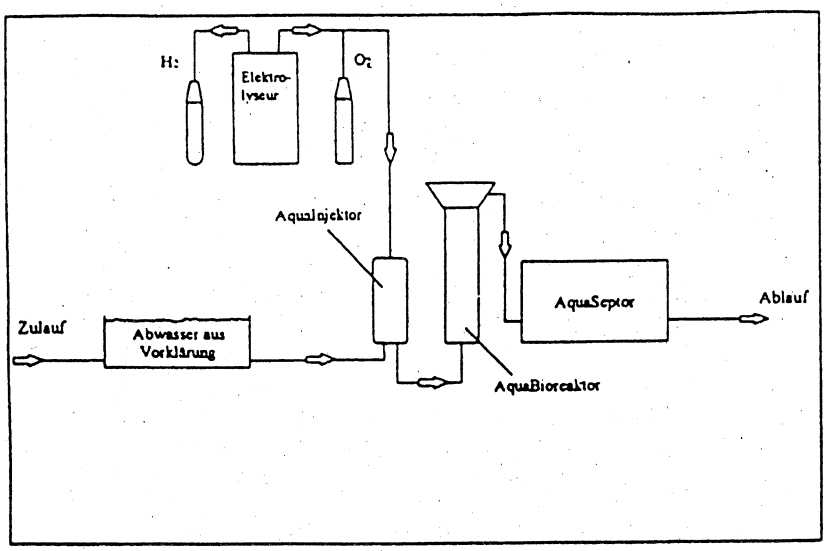


Abb. 2 Schematische Darstellung einer AquaPlan-Reinigungsstraße

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_2 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_2 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 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. 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 Ölwaffe zur Weltmacht Dr. Böttiger Verlags-GmbH 1993
/2/	Anton Zischka	Ölkrieg Wilhelm-Goldmann-Verlag 1939
/3/	S. Schulien, G. Sandstede H.W. Hahn	Kohlendioxid und Wasserstoff als Rohstoffe für eine umweltfreundliche Energietechnik 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) 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/	Joachim Fernau	Halleluja, Ullstein 1995

Messungen an einem Energieversorgungssystem auf der Basis von Windenergie und Wasserstoff

Sigurd Schulien und Michael Steinmetz

Schlagwörter: Windenergie, Wasserstofftechnik, Wasserelektrolyse, Wasserstoffmotor

Die Fachhochschule Wiesbaden betreibt in Zusammenarbeit mit der Universität Frankfurt auf dem Kleinen Feldberg im Taunus eine Versuchsanlage zur dezentralen Energieversorgung auf der Basis von Windenergie und Wasserstoff. Es wird das System Windrad-Druckelektrolyseur-Druckspeicher-Wasserstoffmotor beschrieben. Die bisherigen Meßergebnisse werden mitgeteilt.

Vieles spricht dafür, daß in den nächsten Jahrzehnten Wasserstoff als Energieträger eine wichtige Rolle spielen wird. Gemäß der Reaktionsgleichung

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O + 39{,}5 \text{ kWh/kg } H_2$$

wird bei der Verbrennung von Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser die Energie von 39,5 kWh/kg H_2 frei. Das Reaktionsprodukt ist reines Wasser. Der Wasserstoff kann durch den umgekehrten Prozeß erzeugt werden, indem man Wasser durch Zuführung von Energie in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Dies geschieht in Elektrolyseuren. Wenn man die zur Wasserzersetzung benötigte elektrische Energie aus einem Windenergiekonverter bezieht, verfügt man über ein Energiesystem, bei dem die prinzipiellen Fragen der Verfügbarkeit (Wasser ist genügend vorhanden), Speicherbarkeit (Wasserstoff läßt sich leicht speichern) und Umweltverträglichkeit gelöst sind.

Die Verbrennung des Wasserstoffs kann nun in Otto-Motoren, katalytischen Brennern, Gasbrennern, Brennstoffzellen, Triebwerken usw. erfolgen. Die einzelnen Komponenten für diese Wasserstofftechnik sind noch zu entwickeln und in Langzeitversuchen zu erproben.

Prof. Sigurd Schulien und Dipl.-Ing. Michael Steinmetz, Fachhochschule Wiesbaden.

1. Konzept einer dezentralen Energieversorgungsanlage der Wasserstofftechnik

Die Fachhochschule Wiesbaden betreibt in Zusammenarbeit mit der Universität Frankfurt auf dem Kleinen Feldberg im Taunus eine Versuchsanlage zur Energieversorgung auf der Basis von Windenergie und Wasserstoff (s. *Bild 1*).

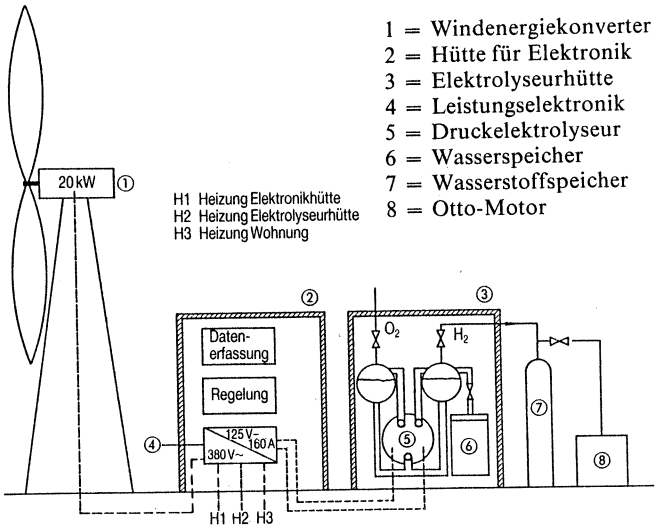


Bild 1. Skizze des Energieversorgungssystems.

Ein 20-kW-Windrad liefert die Energie zur Zersetzung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff in einem alkalischen Druckelektrolyseur (30 bar). Der erzeugte Wasserstoff wird in Druckflaschen (2,4 m^3) bei 30 bar gespeichert und bei Bedarf zum Antrieb eines Motors verwendet, der mit einem Stromgenerator gekoppelt ist (8 kW bzw. 4 kW). Ziel der Entwicklung ist die Optimierung des Gesamtsystems Windrad-Elektrik-Druckelektrolyseur-Speicher-Generator sowie der Einzelkomponenten.

Die erste Ausbaustufe des Systems enthält einen bipolar aufgebauten Elektrolyseur mit zehn hintereinander geschalteten Zellen (ca. 3 kW), der Endausbau enthält 50 Zellen.

2. Windrad

Als Windrad wird ein kommerzielles Gerät der Firma Brümmer (BW 120) mit einer Leistung von 20 kW bei einer Windgeschwindigkeit von 11 m/s (s. *Bild 2*) verwendet. Es ist für Inselbetrieb ausgelegt mit einem kondensatorerregten Asynchrongenerator. Die vom Windrad gelieferte elektrische Energie betreibt den Druckelektrolyseur; außerdem dient sie zur Heizung der Meßhütten und von Wohnräumen. Das Windrad ist seit Juli 1988 in Betrieb.

3. Leistungselektronik

Bild 3 zeigt die elektrische Schaltung der Anlage. Die eingezeichneten Kondensatoren (sie sind den Statorspulen parallel geschaltet) sorgen für die Erregung des

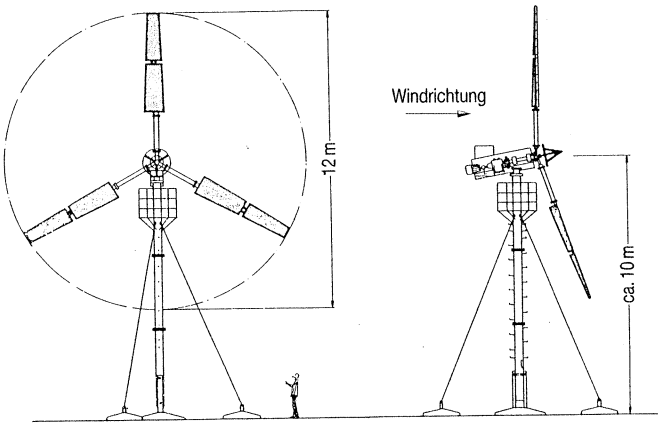


Bild 2. Windrad BW 120.

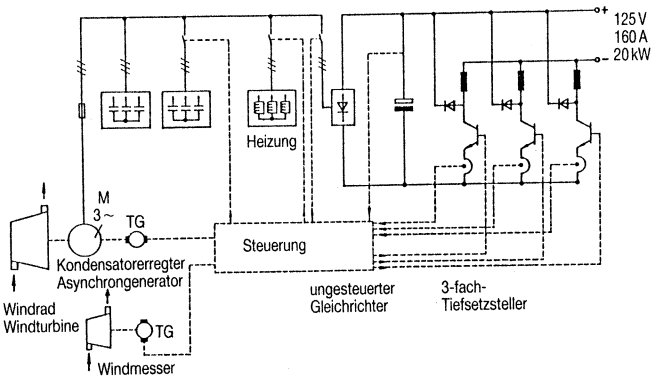


Bild 3. Elektrische Schaltung der Anlage.

Generators. Eine Kondensatorumschaltung ermöglicht den Betrieb mit veränderlicher Drehzahl. Ein Mikroprozessor wählt die Kondensatorgröße aus – es sind drei Kondensatorblöcke vorhanden – und paßt so die Windradkennlinie der Last an.

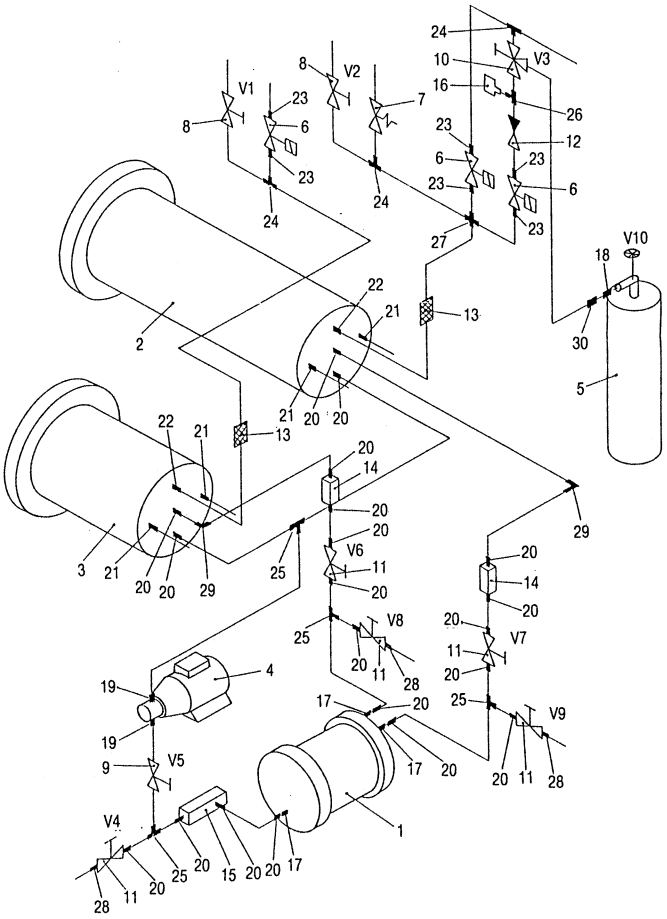
Die Elektronik steuert den Leistungsfluß entweder zur Heizung, zum Elektrolyseur oder zu einer Batterie, die die Stromversorgung des Meß- und Regelsystems für Windflauten übernimmt. Der Elektrolyseur benötigt Gleichstrom 125 V, 160 A (Endausbau, Maximalwerte). Ein ungesteuerter Gleichrichter liefert den Gleichstrom, die Spannung von 20 V bis 125 V wird von einem Tiefsetzsteller bereitgestellt.

4. Elektrolyseur

Der Druckelektrolyseur soll ca. 3 m^3/h Wasserstoff und 1,5 m^3/h Sauerstoff bei einer Leistungsaufnahme von ca. 20 kW erzeugen. Der Gasdruck soll dabei ca. 25 bis 30 bar betragen.

Elektrolyseure dieser Art sind auf dem Markt serienmäßig nicht zu erhalten. Deswegen wurde ein geeignetes Gerät in Zusammenarbeit mit der TH Darmstadt entwickelt und gebaut.

Ein Rohrleitungsplan des Elektrolyseurs ist in *Bild 4* dargestellt, der Zellenblock in *Bild 5* und der schematische Aufbau der Elektrolysezellen in *Bild 6*. Die Anlage wird über eine speicherprogrammierbare Steuerung be-



Pos.	Menge	Bezeichnung	10	1	3-Wege-Handventil	21	4	Einschraub-verschraubung
1	1	Elektrolysezellen-block	11	5	2-Wege-Handventil	22	2	Einschraub-verschraubung
2	1	H_2-Separations-behälter	12	1	Rückschlagventil	23	6	Einschraub-verschraubung
3	1	O_2-Separations-behälter	13	2	Gasfilter	24	3	T-Verschraubung
4	1	KOH-Umwälzpumpe	14	2	Schauglas (PMMA)	25	4	T-Verschraubung
5	1	H_2-Gasdruckflasche	15	1	Isolierstück (PMMA)	26	1	T-Verschraubung
6	3	Magnetventil	16		Druckaufnehmer	27	1	Kreuzstück
7	1	Sicherheitsventil	17	3	Adapter	28	3	Schlauchtüllen
8	2	2-Wege-Handventil	18	1	H_2-Flaschenanschluß	29	2	Winkelverschraubung
9	1	2-Wege-Handventil	19	2	Einschraub-verschraubung	30	1	Aufschraub-verschraubung
			20	20	Einschraub-verschraubung			

Bild 4. Rohrleitungsplan des Elektrolyseurs.

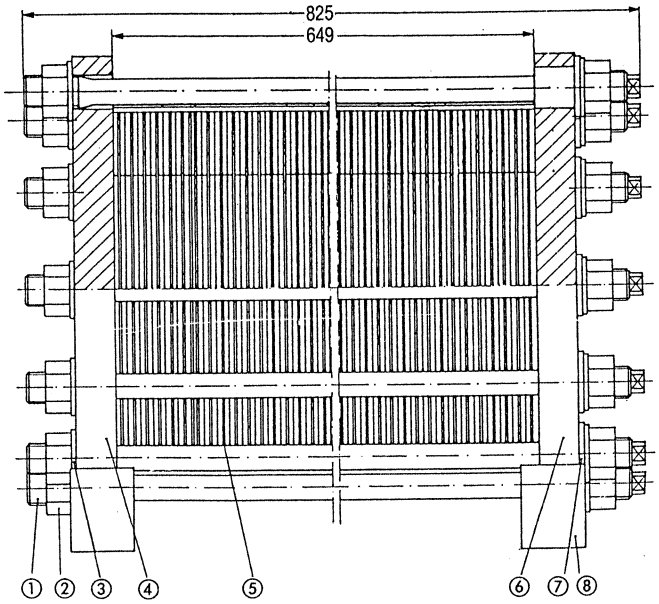


Bild 5. Zellenblock.

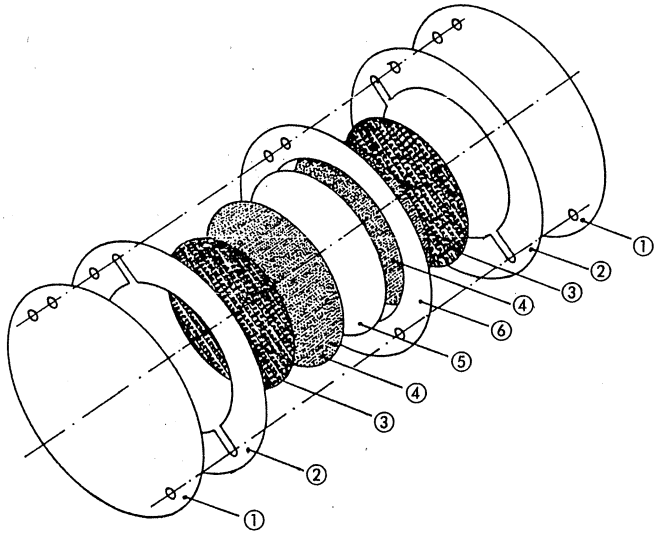


Bild 6. Schematischer Aufbau einer Elektrolysezelle.
1 = Bipolare Wand aus vernickeltem Stahl
2 = ITC-Dichtung zur Zellenbildung
3 = Abstandshalter aus gewelltem Lochblech
4 = Ni-Lochblech als Elektrode
5 = Asbest-Diaphragma
6 = ITC-Dichtung zur Aufnahme des Diaphragmas

trieben. Ein Elektrolyseur wird mit Gleichstrom gespeist (im Labor), ein anderer arbeitet auf dem Kleinen Feldberg mit stark pulsierendem Gleichstrom. Der Elektrolyseur im Labor arbeitet im Dauerbetrieb seit März 1988, der Elektrolyseur auf dem Feldberg erzeugt Wasserstoff und Sauerstoff seit Oktober 1988.

5. Wasserstoffmotor

Serienmäßige Otto-Motoren können so modifiziert werden, daß sie mit Wasserstoff/Luft-Gemischen statt mit Benzin/Luft-Gemischen gefahren werden können.

Für das hier besprochene Projekt wurden zwei Motoren umgebaut, ein Motor der Firma Opel und ein Motor der Firma Briggs und Stratton. Beide Motoren wurden mit einem Generator zu einem Stromaggregat zusammengebaut und erhielten jeweils eine eigene Gasdosier- und -mischeinrichtung. In beiden Fällen entschied man sich für äußere Gemischbildung, d.h. Wasserstoff und Luft werden vor dem Einströmen in den Verbrennungsraum gemischt. Die Zündenergie von Luft/Wasserstoff-Gemischen liegt bei Luft/Wasserstoff-Verhältnissen von 1 bis 3 bei einem Zehntel derjenigen von Benzin (ca. 21 mJ), die Zündtemperatur beträgt etwa 560 °C. Hieraus ergibt sich, daß beim Wasserstoffbetrieb durch Frühzündungen unregelmäßige Verbrennungsabläufe auftreten können: das Wasserstoff/Luft-Gemisch wird durch heiße Stellen im Motor gezündet und nicht durch den Zündfunken der Kerze. Um diese Frühzündungen zu verhindern, sind Änderungen am Motor und an der Zündanlage erforderlich. Die beiden Motoren sind so umgebaut worden, daß sie störungsfrei im Wasserstoffbetrieb laufen.

6. Opel-Motor

Es wurde ein serienmäßiger Vierzylinder-Viertakt-Motor 1.0 S OHV der Adam Opel AG auf Wasserstoffbetrieb umgebaut. Die Daten des Motors sind:

Hubraum: 993 cm³,
Nennleistung: 21 kW bei 3000 U/min.,
max. Drehmoment: 68 Nm bei 2600 bis 3800 U/min.

Der an den Motor angeflanschte Drehstrom-Innenpol-Generator von *A. van Kaick* hat folgende Kennwerte:

Nenndrehzahl: 3000 U/min.,
Scheinleistung: 7,5 kVA,
Nennspannung: 380/220 V.

Ein Blockschaltbild des Notstromaggregats geht aus *Bild 7* hervor. Um den Motor einwandfrei im Wasserstoffbetrieb betreiben zu können, mußte eine geeignete Gemischbildungsanlage entwickelt werden. *Bild 8* zeigt diese Anlage, mit der Dauerbetrieb bei einer Last von über 8 kW möglich ist.

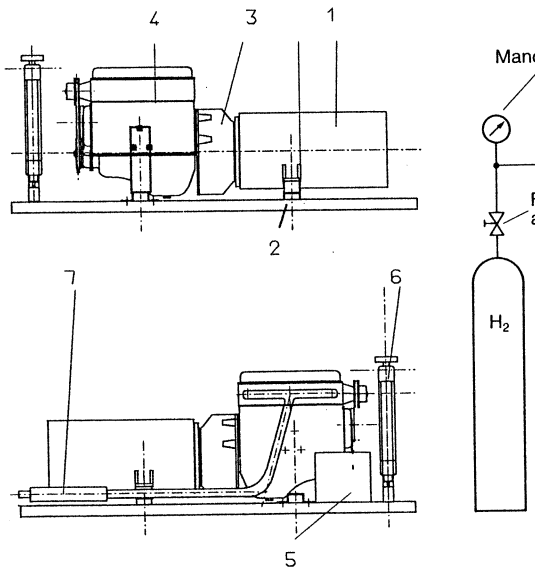


Bild 7. Notstromaggregat mit Opel-Motor.
1 = Generator 4 = Motor 6 = Kühler
2 = Rahmen 5 = Batterie 7 = Schaltkasten
3 = Kupplung

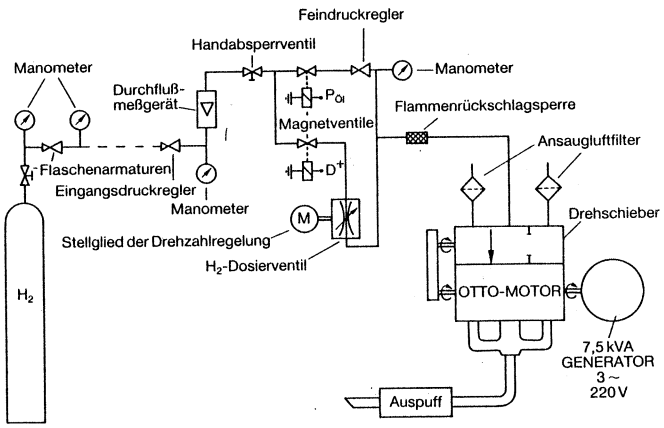


Bild 8. Gemischbildungsanlage des Opel-Motors.

7. Motor von Briggs und Stratton

Es wurde der Motor 11 HP von *Briggs* und *Stratton* mit den Generator G 6000 von Bosch zu einem Stromaggregat zusammengebaut. Der Motor ist ein Ein-Zylinder-Viertakt-Ottomotor. Seine Kenndaten:

Hubraum: 650 cm³,
Nennleistung: 8,2 kW bei 3600 U/min.,
5,9 kW bei 3000 U/min.,
Drehmoment: 22 Nm bei 3000 U/min.

Der Generator G 6000 von Bosch ist ein selbsterregter zweipoliger Synchron-Innenpolgenerator. Er hat folgende Daten:

Nennleistung: 5 kVA/4,7 kW,
Nennspannung: 230/400 V.

Auch für dieses Aggregat mußte eine geeignete Gemischbildungsanlage entwickelt werden. Sie ist schematisch in *Bild 9* dargestellt.

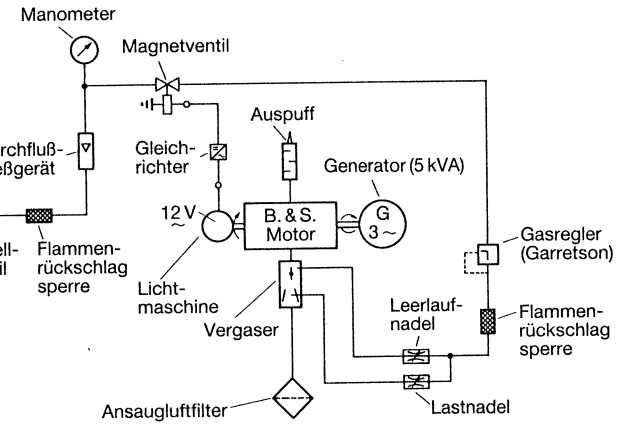


Bild 9. Gemischbildungsanlage für Briggs- + Stratton-Motor.

8. Messungen an dem System

Die einzelnen Komponenten des Systems – Windrad, Leistungselektronik, Elektrolyseur, Speicher, Stromaggregat (s. *Bild 1*) – wurden im Sommer 1988 gebaut und zu einem Gesamtsystem montiert, das seit Anfang Oktober 1988 läuft.

Bei den Konstruktionen war maßgebend, daß nur marktgängige Teile – möglichst aus der Serienfertigung – verwendet wurden, die nur geringe konstruktive Änderungen für die Anpassung an das System erforderlich machten.

9. Messungen an den Elektrolyseuren

Es wurden unterschiedliche Zellenkonstruktionen, Diafragmen- und Elektrodenmaterialien untersucht. Für die Serienmessungen am Gesamtsystem auf dem Kleinen Feldberg wurden allerdings nur sandgestrahlte Nikkelelektroden und Diafragmen aus Asbestpapier ver-

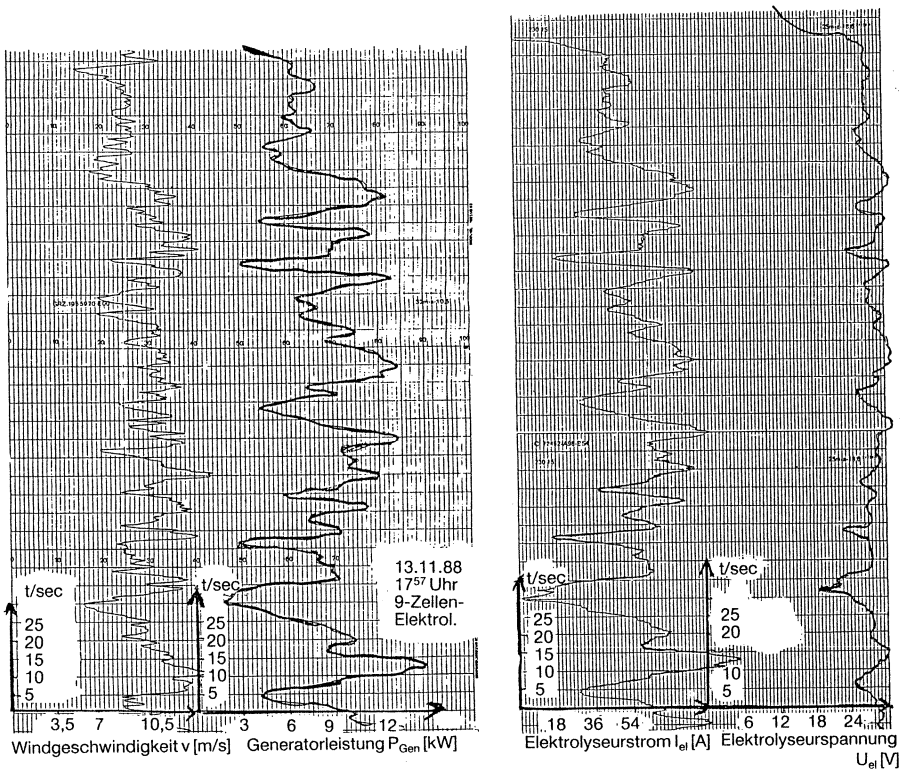


Bild 10. Windgeschwindigkeit, Generatorleistung, Elektrolysestrom, Elektrolysespannung in Abhängigkeit von der Zeit.

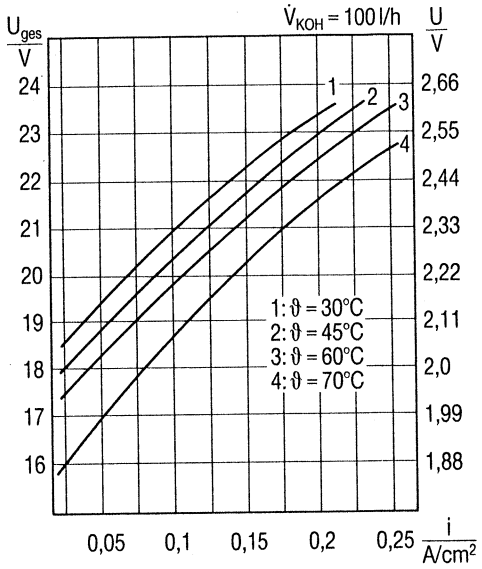


Bild 11. Strom-Spannungs-Kennlinie des 2-kW-Elektrolyseurs im kontinuierlichen Betrieb; 9 Zellen mit REX-Asbestpapier; Druck = 10 bar.

wendet. Die wirksame Elektrodenfläche liegt bei 340 cm^2. Um unterschiedliche Betriebszustände des Gesamtsystems untersuchen zu können, wurde zunächst ein Elektrolyseur aus neun hintereinander geschalteten Zellen (24 V × 160 A), später einer aus 21 bipolaren Zellen (51 V × 160 A) eingebaut.

Die Elektrolyseure wurden zunächst im Gleichstrombetrieb im Labor untersucht, danach bei dem stark pulsierenden Gleichstrom aus der Windkraftanlage auf dem Kleinen Feldberg getestet.

Bild 10 zeigt, wie sich Windgeschwindigkeit, Generatorleistung, Generatorstrom und Generatorspannung zeitlich ändern.

Bei Stromstärken unter 20 A war die Gasverunreinigung zu groß (ca. 4% H_2 in O_2), so daß erst ab einer Stromstärke von 30 A elektrolysiert werden konnte. Der Elektrolyseur mit neun Zellen hat eine max. Leistungsaufnahme von etwa 3,8 kW, der mit 21 Zellen nimmt max. 8 kW auf. Liefert das Windrad eine höhere Leistung, so geht diese in die Heizelemente für die Gebäudeheizung. Strom-Spannungskennlinien für den kleinen Elektrolyseur mit der Temperatur als Parameter sind in *Bild 11* angegeben. Der Wasserstoff enthält weniger als 1% Sauerstoff, während der Sauerstoff fast 4% Wasserstoff enthalten kann, was für einen sicheren Dauerbetrieb nicht zulässig ist.

Für den Wirkungsgrad der Elektrolyse ergibt (nach *LeRoy*) die Theorie

$$\eta = \frac{U_o}{U_{gem}},$$

wobei $U_o = 1{,}48$ V und U_{gem} die gemessene Zellenspannung ist. Dieser theoretische Wirkungsgrad ist nicht ganz korrekt, da die Nebenanlagen des Elektrolyseurs (Pumpen, Ventile) Energie verbrauchen. Berücksichtigt man diesen Energiebedarf bei der Wirkungsgradberechnung, so erhält man die in *Bild 12* angegebenen Werte.

Die oben beschriebenen Messungen an dem 9-Zellen-Elektrolyseur wurden mit REX-Asbestpapier als Diafragmen durchgeführt. Das Asbestpapier eines anderen Herstellers brachte Wirkungsgrade, die ca. 10% höher lagen und bessere Gasreinheiten ergaben.

Die stark pulsierende Gleichspannung beim Betrieb mit dem Windrad verändert die Meßergebnisse. *Bild 13* zeigt zwei Strom-Spannungskennlinien bei intermittierendem Betrieb. Für eine Temperatur von 11 °C ist exemplarisch der zeitliche Verlauf des Stroms angegeben: innerhalb etwa einer Sekunde steigt der Strom von A (0A) auf B (68 A), fällt dann auf C, um anschließend auf D zu steigen. Bemerkenswert ist die Hysterese, die hierbei beobachtet werden kann. Die Wirkungsgrade bei dieser Betriebsart ergeben sich aus *Bild 14*. Die Gasreinheit ist beim intermittierenden Betrieb wesentlich besser als beim kontinuierlichen. Man hat etwa 0,4% O_2 im Wasserstoff und höchstens 2,7% H_2 im Sauerstoff.

Bild 15 zeigt die Kennlinien des 21-Zellen-Blocks bei verschiedenen Temperaturen, *Bild 16* gibt die Verhältnisse für den 50-Zellen-Elektrolyseur (20 kW). Bei diesem 50-Zellen-Block werden aus Wirtschaftlichkeitsgründen quadratische Elektroden verwendet. Die Gasreinheit ist merklich besser als bei den kleineren Elektrolyseuren; sie liegt bei etwa 0,3% Wasserstoff im Sauerstoff.

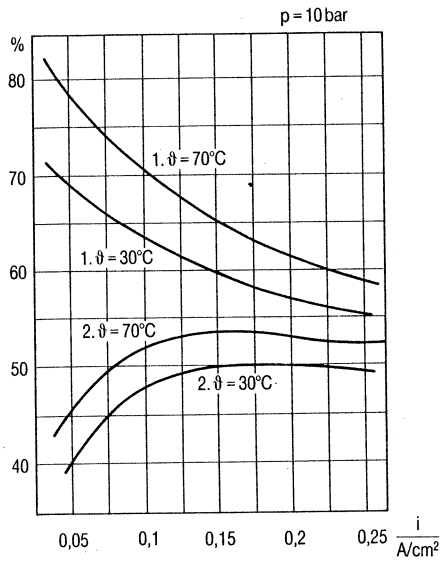


Bild 12. Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Stromdichte des 2-kW-Elektrolyseurs.
1 = nach *R. L. LeRoy*
2 = mit Nebenanlagen

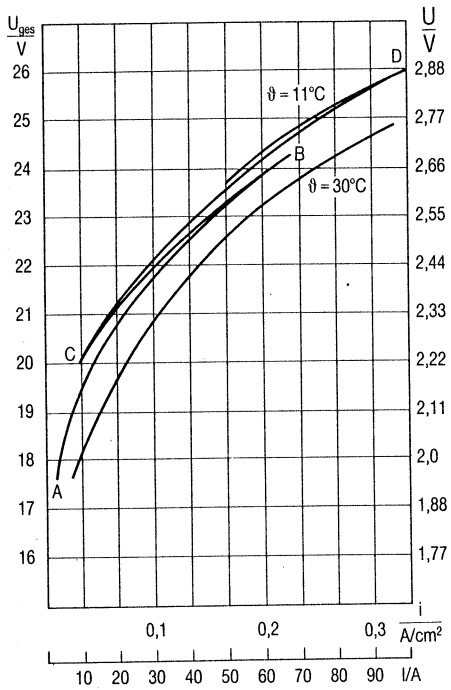


Bild 13. Strom-Spannungskennlinie bei intermittierendem Betrieb; Zellenaufbau mit REX-Diaphragma.

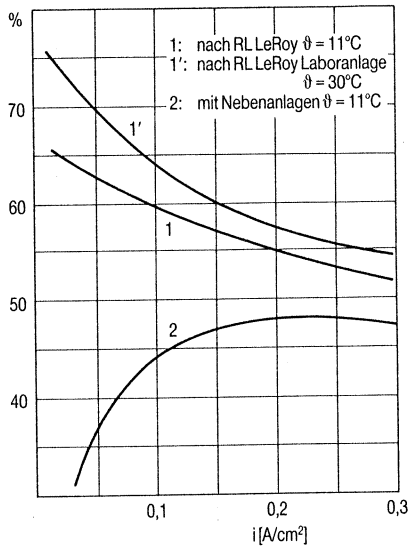


Bild 14. Wirkungsgrade bei intermittierendem Betrieb; Zellenaufbau mit REX-Diaphragma.

Bild 15. Strom-Spannungs-Kennlinie des 21-Zellen-Elektrolyseurs. ▽

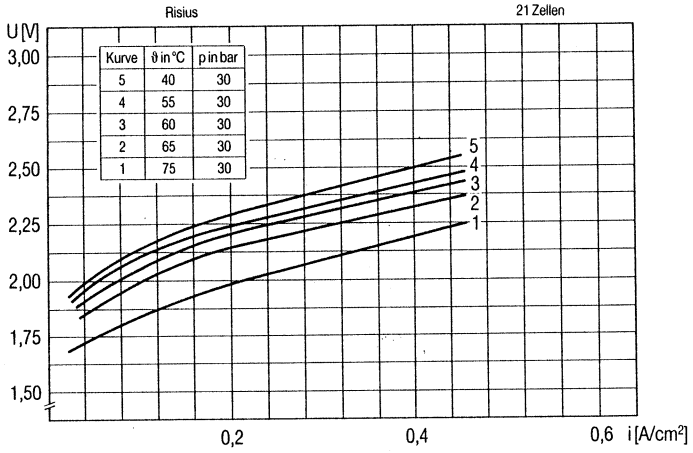
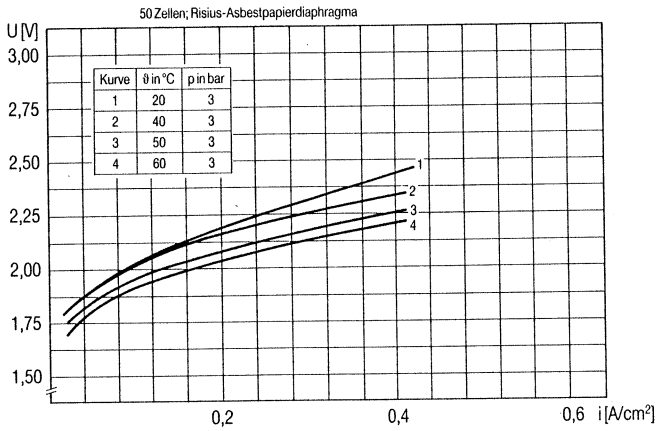


Bild 16. Strom-Spannungs-Kennlinie des 50-Zellen-Elektrolyseurs. ▽



10. Messungen an den Motoren

10.1 Opel-Motor

Nachdem die beiden Motoren so umgebaut worden waren, daß sie störungsfrei im Wasserstoffbetrieb laufen, wurden zunächst Verbrauchsmessungen durchgeführt. *Bild 17* zeigt den Wasserstoffverbrauch des Opel-Motors in Abhängigkeit von der Belastung des Generators (Ohmsche Last), der spezifische Kraftstoffverbrauch ergibt sich aus *Bild 18*. Den Wirkungsgrad für verschiedene Leistungen kann man dem *Bild 19* entnehmen.

Das Luftverhältnis ist bei der vorliegenden Gemischbildungsanlage veränderlich und liegt zwischen 4,3 und 2. In *Bild 20* ist es als Funktion der abgegebenen Generatorleistung dargestellt.

10.2 Motor von Briggs und Stratton

Ähnliche Messungen wie am Opel-Motor wurden am Aggregat von *Briggs* und *Stratton* durchgeführt. Den Wasserstoffverbrauch in Abhängigkeit von der Generatorleistung zeigt *Bild 21*.

Aus den Messungen ergibt sich, daß die Motoren die Stromversorgung eines Inselnetzes, das von Windkraftanlagen gespeist wird, übernehmen können. Um diese Aufgabe erfüllen zu können, wird die Anlage automatisiert und ihr Langzeitverhalten untersucht.

11. Messungen am Gesamtsystem

Bild 1 zeigt eine Skizze des Energieversorgungssystems mit den Verbrauchern H1, H2, H3 und Elektrolyseur 5.

Die vom Windrad gelieferte elektrische Energie geht auf die Heizkörper H1 (3 × 2 kW, Elektronikhütte), H2 (3 × 2 kW, Elektrolyseurhütte) und H3 (3 × 2 kW, Taunusobservatorium). Bei den kleineren Elektrolyseuren (2 kW und 8 kW) war die Steuerung so eingestellt, daß die drei Heizkörper H1, H2 und H3 jeweils 2 kW elek-

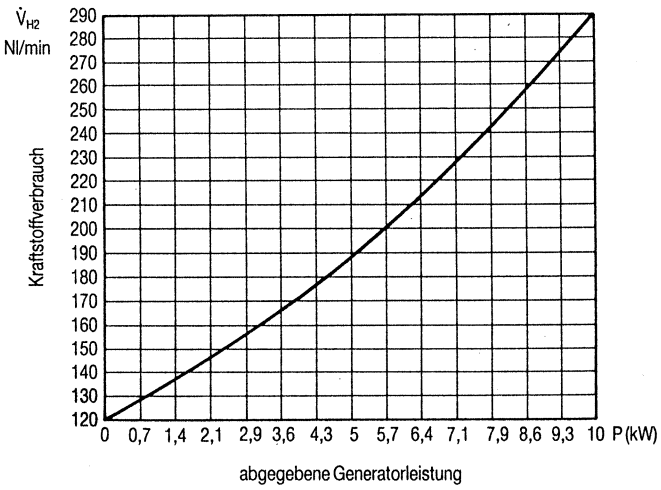


Bild 17. Wasserstoffverbrauch des Opel-Motors in Abhängigkeit von der Belastung des Generators.

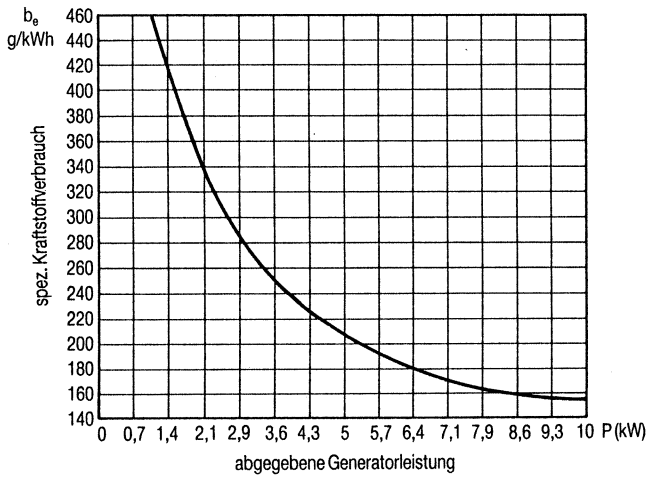


Bild 18. Spezifischer Kraftstoffverbrauch des Opel-Motors in Abhängigkeit von der Belastung.

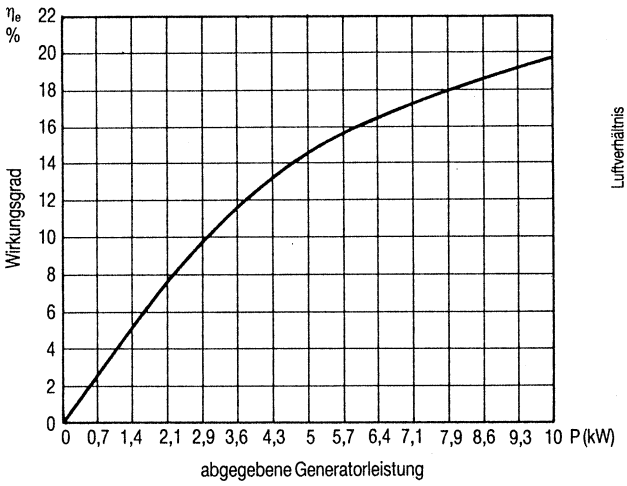


Bild 19. Wirkungsgrad des Systems Motor-Generator als Funktion der abgegebenen Leistung.

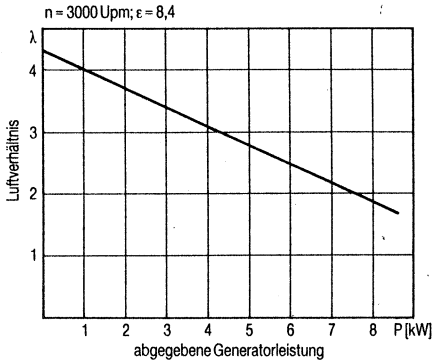


Bild 20. Luftverhältnis als Funktion der Generatorleistung.

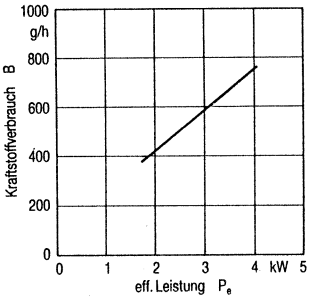


Bild 21. Wasserstoffverbrauch als Funktion der Generatorbelastung.

trische Leistung erhielten; der Rest der Leistung ging auf den Elektrolyseur. Auch bei evtl. Ausfall des Elektrolyseurs lief das Windrad nicht im Leerlauf.

Das Windrad liefert ca. 1500 kWh elektrische Energie pro Monat. *Bild 22* zeigt dies exemplarisch für den Monat Dezember 1988. Diese Energielieferung läßt sich erhöhen durch Umbauten an der Windkraftanlage.

Seit Anfang Oktober 1988 wird Wasserstoff auf dem Kleinen Feldberg erzeugt. Der automatische Betrieb läuft seit Anfang Dezember. Mit dem kleinen Elektrolyseur (neun Zellen, ca. 2 kW bis 3 kW) werden etwa 25 m³ Wasserstoff pro Monat erzeugt (s. *Bild 23*). Nachteiligen Einfluß auf die Wasserstoffproduktion hatte der Umstand, daß die Stromversorgung des Elektrolyseurs auf 20 kW ausgelegt ist. Bei diesem kleinen Elektrolyseur war immer sehr schnell die max. Stromstärke von 160 A erreicht, bei der die Steuerung den Energiefluß kurzzeitig auf die Heizkörper umlegte. Der 21-Zellen-Elektrolyseur läuft wesentlich ruhiger, die abrupten Stromänderungen sind nicht so ausgeprägt (s. *Bild 10*), die Wasserstoffproduktion liegt bei durchschnittlich etwa 4 m³ pro Tag, Umbauten und Schwachwindperioden eingerechnet.

Da nun größere Elektrolyseure verwendet werden (20 kW), wird in Zukunft der größte Teil der Leistung auf den Elektrolyseur gehen, die Überschußleistung dient der Heizung.

Im Monat März 1989 lieferte das Windrad etwa 1500 kWh elektrische Energie (s. *Bild 24*). Der rel. niedrige Wert ist auf die nicht optimal funktionierende Regelung des Windrads zurückzuführen. Die Regelung wird z. Z. umgebaut.

Die Gasproduktion im März 1989 betrug etwa 100 m³ Wasserstoff (s. *Bild 25*) und 50 m³ Sauerstoff. Der Wasserstoff wurde in Druckflaschen gespeichert und zum Antrieb eines Notstromaggregats verwendet, das mit einem Wasserstoffmotor läuft.

Im Dauerbetrieb liefert der 8-kW-Elektrolyseur maximal 9 m³ bis 10 m³ Wasserstoff pro Tag. Etwa 700 kWh Energie wurden im März für die Elektrolyse verbraucht, ca. 800 kWh für die Raumheizung.

Der Elektrolyseur ist noch nicht optimiert. Für die Herstellung von 1 m³ Wasserstoff werden etwa 7 kWh elektrische Energie benötigt. Dies beinhaltet die Zersetzungsenergie und die Energie zum Betrieb der Anlage (Pumpen, Wasseraufbereitung usw.).

Das dynamische Verhalten des 21-Zellen-Elektrolyseurs (8 kW) zeigt weniger abrupte Stromänderungen als beim 9-Zellen-Elektrolyseur. Die Gasreinheit im intermittierenden Betrieb ist besser als beim Betrieb mit Gleichstrom im Labor.

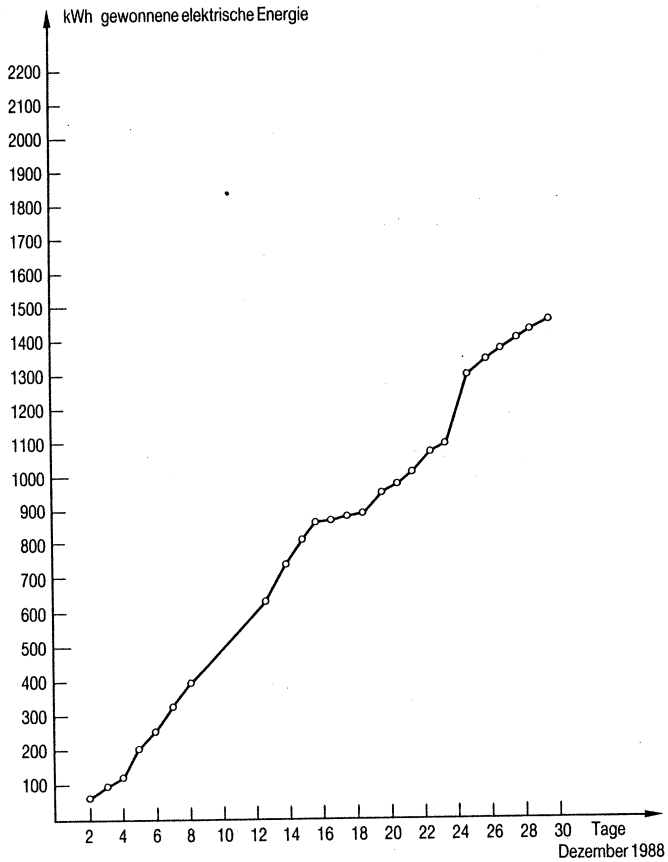


Bild 22. Energielieferung des Windrades im Monat Dezember 1988.

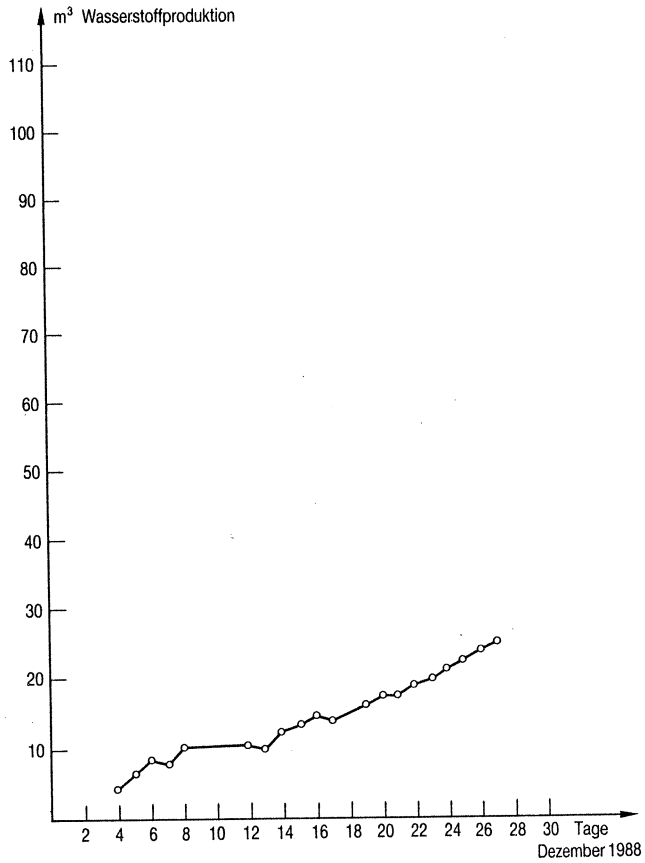


Bild 23. Wasserstofferzeugung des 2-kW-Elektrolyseurs im Dezember 1988.

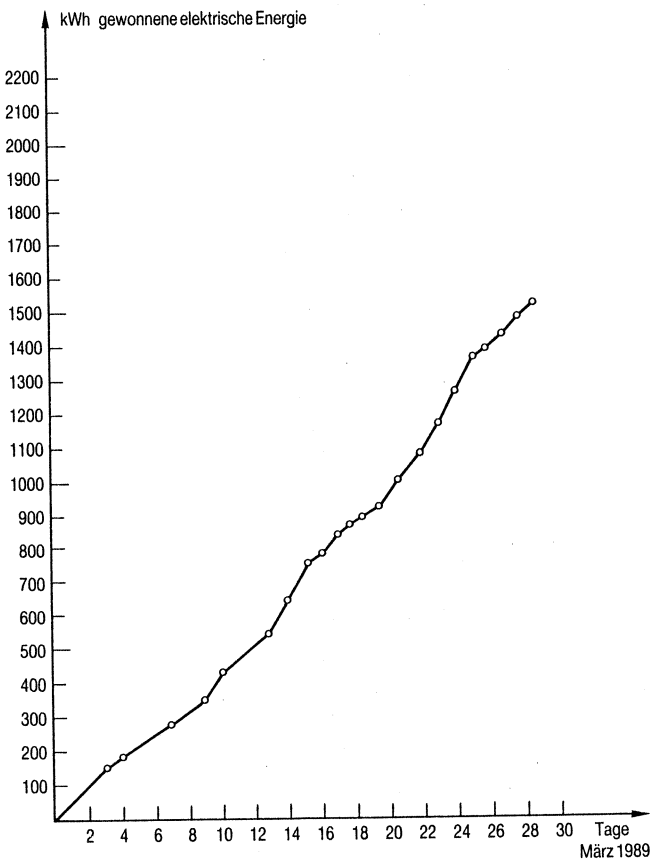


Bild 24. Elektrische Energie aus dem Windrad im März 1989.

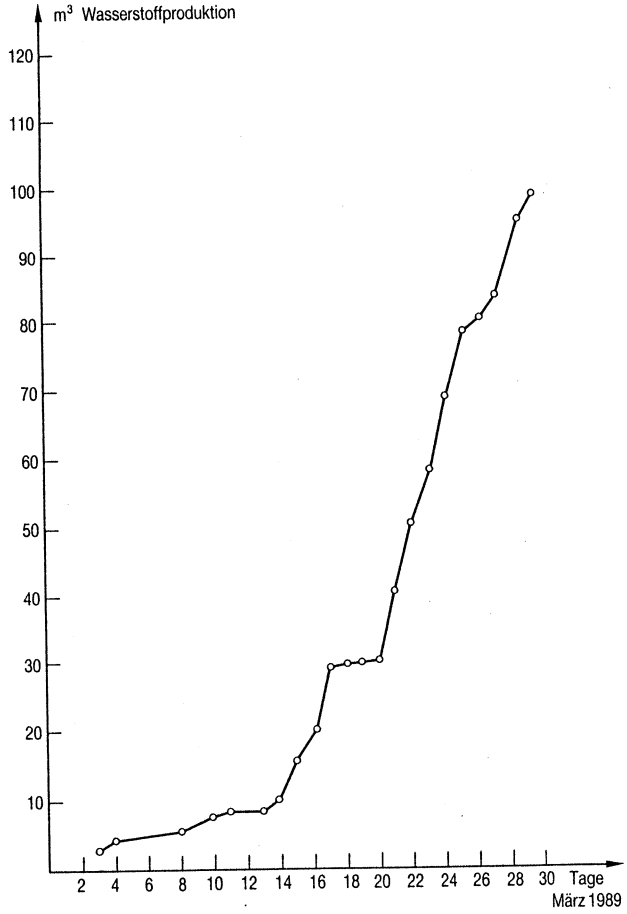


Bild 25. Wasserstoffproduktion des 8-kW-Elektrolyseurs im März 1989.

Es ist nicht unrealistisch, für die Heizung eines Einfamilienhauses etwa 4100 m³ Wasserstoff pro Jahr anzunehmen, d.h. eine tägliche Produktion von ca. 11 m³. Der Bedarf an elektrischer Energie einer Familie von vier Personen in diesem Haus kann mit etwa 9000 kWh/Jahr angenommen werden.

Das Windrad wird nach dem Umbau etwa 30000 kWh pro Jahr liefern. Der Wirkungsgrad der Elektrolyse liegt z.Z. bei 50% bis 60%, der des Notstromaggregats bei 20%.

Bei diesem Stand der Dinge ist es am sinnvollsten, die elektrische Energie des Windrades direkt zur Heizung bzw. Stromversorgung zu nutzen. Nur bei Windflauten übernimmt der Wasserstoff die Heizung bzw. treibt er ein Notstromaggregat an. Normalerweise werden Heizung und Brauchwasser durch elektrische Heizkörper erwärmt, die direkt aus dem Windrad gespeist werden. Die überschüssige Energie des Windrades dient zur Wasserzersetzung. Wasser- und Sauerstoff werden gespeichert und bei Bedarf in der Heizung bzw. im Motor verbrannt. Die Heizung wird mit einem stöchiometrischen H_2-O_2-Gemisch betrieben, um die NO_x-Produktion zu vermeiden. Es werden also Wasserstoff **und** Sauerstoff in Drucktanks gespeichert (s. *Bild 26*).

Zur Zeit laufen Langzeitversuche an dem in *Bild 1* beschriebenen System, um Probleme der Verfügbarkeit und Betriebssicherheit zu untersuchen.

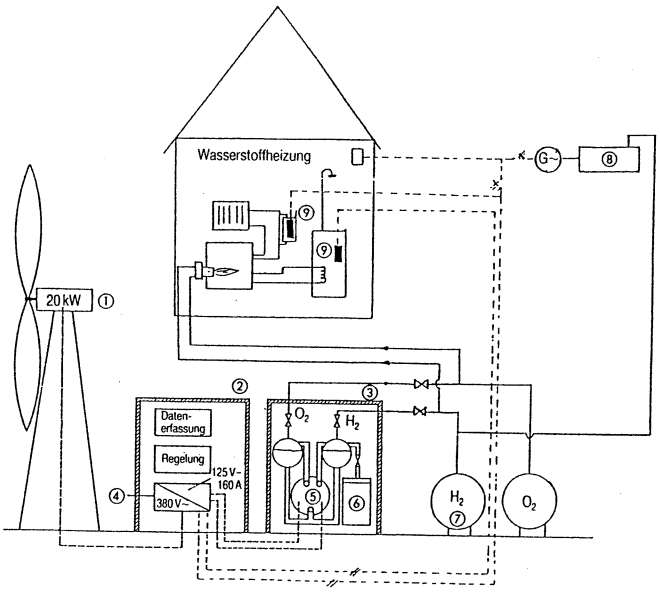


Bild 26. Dezentrales Wind-Wasserstoff-System.

1 = Windenergiekonverter
2 = Hütte für Elektronik
3 = Elektrolyseurhütte
4 = Leistungselektronik
5 = Druckelektrolyseur
6 = Wasserspeicher
7 = Wasserstoffspeicher
8 = Otto-Motor
9 = Heizwiderstand

(Manuskripteingang: 26. 7. 1989)

fhw
Fachhochschule Wiesbaden

Projekt Wasserstofftechnik,
FB Rüsselsheim

REGENERATIVE ENERGIEN MIT WASSERSTOFF ALS SPEICHERMEDIUM

1. EINLEITUNG

Die regenerativen Energien haben nur dann eine Chance, auf Dauer in größerem Maßstab zur Energieversorgung herangezogen zu werden, wenn das Problem der Energiespeicherung gelöst ist. Sonnenenergie und Windenergie werden sehr ungleichmäßig und meist in zu geringer Intensität angeboten. Der Verbraucher verlangt allerdings eine gleichmäßige Energielieferung.

Das Problem der Energiespeicherung ist also bei der Einführung regenerativer Energien von wesentlicher Bedeutung. Systemanalysen der vergangenen Jahre haben ergeben, daß Wasserstoff das geeignete Speichermedium für regenerative Energien ist, sowohl aus Gründen der Ökologie wie auch der Verfügbarkeit. Deswegen ist es von hervorragender Bedeutung, die Systeme Windenergie-Wasserstoff bzw. Sonnenenergie-Wasserstoff experimentell zu untersuchen, und zwar an kleineren dezentralen Energieversorgungsanlagen.

Die Energiewirtschaft mit Elektrizität als Energieträger führt zu großen zentralen überregionalen Energieversorgungssystemen. Denn die elektrische Energie muß im Augenblick ihrer Erzeugung verbraucht werden. Die Folge davon ist, daß die Energieversorgungsunternehmen möglichst viele Abnehmer brauchen, große Energienetze und daß der Energieverbrauch belohnt wird. Großverbraucher haben günstigere Tarife. Dezentrale Energieversorgungssysteme - z.B. mit Wasserstoff als Speicher - verlangen Energiespartechniken. Wasserstoff kann verlustfrei gespeichert und lange nach der Herstellung verbraucht werden. Er ermöglicht den Betrieb kleiner dezentraler Energiesysteme, wie sie von der FHW entwickelt worden sind.

Die Energie aus Wasserstoff ist teurer als die aus Holz, Kohle oder Erdöl. Zur Beurteilung eines Gesamtsystems gehört außer der Kenntnis des Wirkungsgrades und der Kosten auch die der Umweltverträglichkeit und der Verfügbarkeit. Um diese Parameter genauer zu analysieren und Komponenten für die Wasserstofftechnik zu entwickeln, wurde ein dezentrales Energieversorgungssystem auf der Basis von Windenergie und Wasserstoff gebaut sowie ein weiteres auf der Basis von solarem Wasserstoff. Es sind hier einzigartige Vergleichsmessungen möglich. Beide Systeme sind nachfolgend beschrieben.

2. ENERGIEVERSORGUNG AUF DER BASIS VON WINDENERGIE UND WASSERSTOFF

Die Fachhochschule Wiesbaden betreibt in Zusammenarbeit mit der Universität Frankfurt auf dem Kleinen Feldberg im Taunus eine Versuchsanlage zur Energieversorgung auf der Basis von Windenergie und Wasserstoff (s. Bild 1).

Ein 20-kW- Windrad liefert die Energie zur Zersetzung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff in einem alkalischen Druckelektrolyseur (30 bar). Der erzeugte Wasserstoff wird in Druckflaschen (2,4 m^3) bei 30 bar gespeichert und bei Bedarf zum Antrieb eines Motors verwendet, der mit einem Stromgenerator gekoppelt ist (8 bzw. 4 kW). Ziel der Entwicklung ist die Optimierung des Gesamtsystems Windrad-Elektrik-Druckelektrolyseur-Speicher-Generator sowie der Einzelkomponenten.

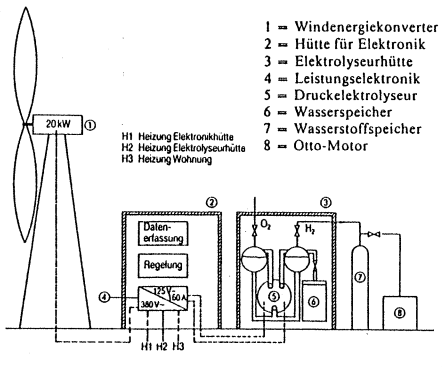


Bild 1 :
Skizze des Energieversorgungssystems

WINDRAD

Als Windrad wird ein kommerzielles Gerät der Firma Brümmer (BW 120) mit einer Leistung von 20 kW bei einer Windgeschwindigkeit von 11 m/s verwendet. Es ist für Inselbetrieb ausgelegt mit einem kondensatorerregten Asynchrongenerator. Die vom Windrad gelieferte elektrische Energie betreibt den Druchelektrolyseur. Außerdem dient sie zur Heizung der Meßhütten und von Wohnräumen (s. Bild 2). Das Windrad ist seit Juli 1988 in Betrieb.

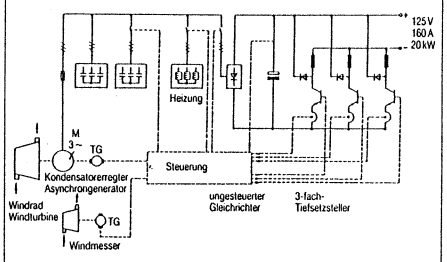


Bild 2 :
Elektrische Schaltung der Anlage

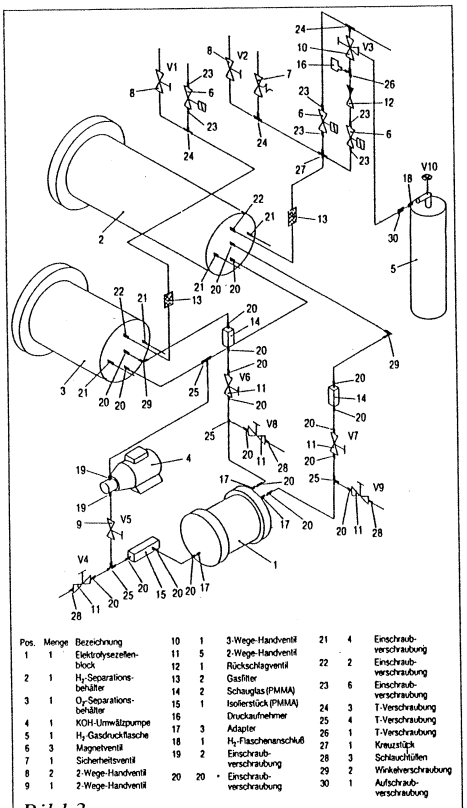
ELEKTOLYSEUR

Der Druckelektolyseur soll ca. 4 $m^3_{N/h}$ Wasserstoff und 2 $m^3_{N/h}$ Sauerstoff bei einer Leistungsaufnahme von von ca. 20 kW erzeugen. Der Gasdruck soll dabei ca. 25 - 30 bar betragen.

Elektrolyseure dieser Art sind auf dem Markt serienmäßig nicht zu erhalten. Deswegen wurde ein geeignetes Gerät in Zusammenarbeit mit der TH Darmstadt entwickelt und gebaut.

Ein Rohrleitungsplan des Elektolyseurs ist in Bild 3 dargestellt, der schematische Aufbau der Elektrolysezellen in Bild 4. Die Anlage wird über eine speicherprogrammierbare Steuerung betrieben. Ein Elektrolyseur wird mit Gleichstrom gespeist (im Labor), ein anderer arbeitet auf dem Kleinen Feldberg mit stark pulsierendem Gleichstrom. Der Elektrolyseur im Labor arbeitet im

Dauerbetrieb seit März 1988, der Elektrolyseur auf dem Feldberg erzeugt Wasserstoff



Pos.	Menge	Bezeichnung							
1	1	Elektrolysezellen-block	10	1	3-Wege-Handventil	21	4	Einschraub-verschraubung
2	1	H_2-Separations-behälter	11	5	2-Wege-Handventil	22	2	Einschraub-verschraubung
3	1	O_2-Separations-behälter	12	1	Rückschlagventil	23	6	Einschraub-verschraubung
4	1	KOH-Umwälzpumpe	13	2	Gasfilter	24	3	T-Verschraubung
5	1	H_2-Gasdruckflasche	14	2	Schauglas (PMMA)	25	4	T-Verschraubung
6	3	Magnetventil	15	1	Isolierstück (PMMA)	26	1	T-Verschraubung
7	1	Sicherheitsventil	16		Druckaufnehmer	27	1	Kreuzstück
8	2	2-Wege-Handventil	17	3	Adapter	28	3	Schlauchtüllen
9	1	2-Wege-Handventil	18	1	H_2-Flaschenanschluß	29	2	Winkelverschraubung
			19	2	Einschraub-verschraubung	30	1	Aufschraub-verschraubung
			20	20	Einschraub-verschraubung			

Bild 3 :
Rohrleitungsplan des Elektrolyseurs

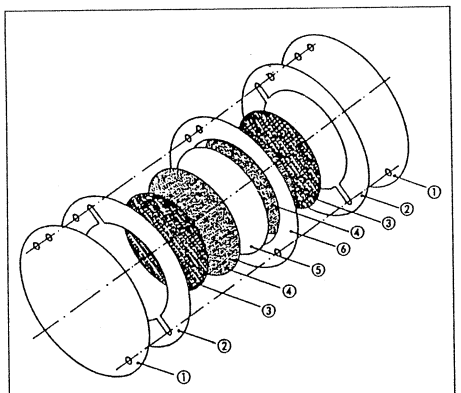


Bild 4 :
Schematische Aufbau einer Elektrolysezelle.
1 - Biplare Wand aus vernickeltem Stahl
2 - ITC- Dichtung zur Zellenbildung
3 - ABstandshalter aus gewelltem Lochblech
4 - Ni- Lochblech als Elektrode
5 - Asbest- Diaphragma
6 - ITC- Dichtung zur Aufnahme des Diaphragmas

und Sauerstoff seit Oktober 1988.

WASSERSTOFFMOTOR

Serienmäßige Otto-Motoren können so modifiziert werden, daß sie mit Wasserstoff/Luft-Gemischen statt mit Benzin/Luft-Gemischen gefahren werden können.

Für das hier besprochene Projekt wurden zwei Motoren umgebaut ein Motor der Firma Opel und ein Motor der Firma Briggs und Stratton. Beide Motoren wurden mit einem Generator zu einem Stromaggregat zusammengebaut und erhielten jeweils eine eigene Gasdosier- und -mischeinrichtungen. In beiden Fällen entschied man sich für äußere Gemischbildung, d.h. Wasserstoff und Luft werden vor dem Einströmen in dem Verbrennungsraum gemischt. Die Zündenergie von Luft/Wasserstoff-Gemischen liegt bei Luftverhältnissen (-Werten) von 1 bis 3 bei einem Zehntel derjenigen von Benzin (ca. 21 mJ), die Zündtemperatur beträgt etwa 560^{0}C. Hieraus ergibt sich, daß beim Wasserstoffbetrieb durch Frühzündungen unregelmäßige Verbrennungsabläufe auftreten können: das Wasserstoff/-Luft-Gemisch wird durch heiße Stellen im Motor gezündet und nicht durch den Zündfunken der Kerze. Um diese Frühzündungen zu verhindern, sind Änderungen am Motor und an der Zündanlage erforderlich. Die beiden Motoren sind so umgebaut worden, daß sie störungsfrei im Wasserstoffbetrieb laufen.

MESSUNGEN AN DEM SYSTEM

Die einzelnen Komponenten des Systems - Windrad, Leistungselektronik, Elektrolyseur, Speicher, Stromaggregat (s. Bild 1) - wurden im Sommer 1988 gebaut und zu einem Gesamtsystem montiert, das seit Anfang Oktober 1988 läuft.

Bei den Konstruktionen war maßgebend, daß nur marktgängige Teile - möglichst aus der Serienfertigung - verwendet wurden, die nur geringe konstruktive Änderungen für die Anpassung an das System erforderlich machten.

MESSUNGEN AN DEN ELEKTROLYSEUREN

Es wurden unterschiedliche Zellenkonstruktionen, Diaphragmen- und Elektrodenmaterialien untersucht. Um unterschiedliche Betriebszustände des Gesamtsystems untersuchen zu können, wurde zunächst ein Elektrolyseur aus neuen hintereinander geschalteten Zellen (24 V x 160 A), später einer aus 21 bipolaren Zellen (51 V x 160 A) eingebaut, danach einer mit 50 Zellen gestestet.

Die I-U-Kennlinien des 50 Zellen-Elektrolyseurs (20 kW) gehen aus Bild 5 hervor.

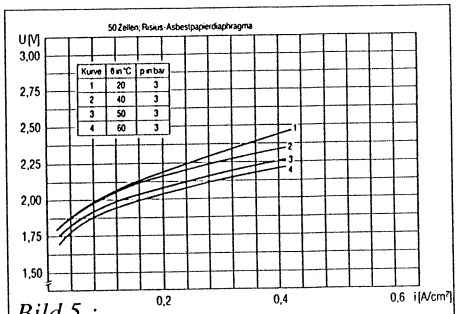


Bild 5 :
Strom- Spannungs- Kennlinie des 50- Zellen- Elektrolyseurs

Die Energie für die Produktion von 1 m^3 Wasserstoff liegt bei 4,8 kWh.

MESSUNGEN AM OPEL-MOTOR

Nachdem der Motor so umgebaut worden war, daß er störungsfrei im Wasserstoff-Betrieb lief, wurden zunächst Verbrauchsmessungen durchgeführt. Bild 6 zeigt den Wasserstoffverbrauch des Opel-Motors in Abhänigigkeit von der Belastung des Generators (ohmsche Last).

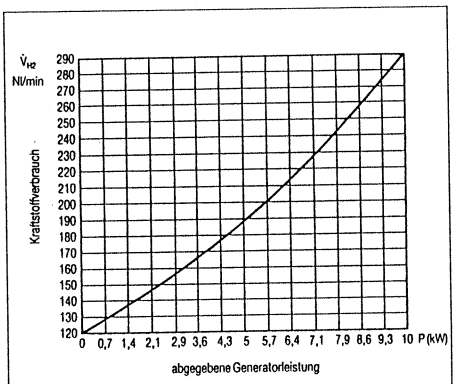


Bild 6 :
Wasserstoffverbrauch des Opel- Motors in Abhängigkeit von der Belastung des Generators

MESSUNGEN AM GESAMTSYSTEM

Das Betriebsverhalten des in Bild 1 gezeig-

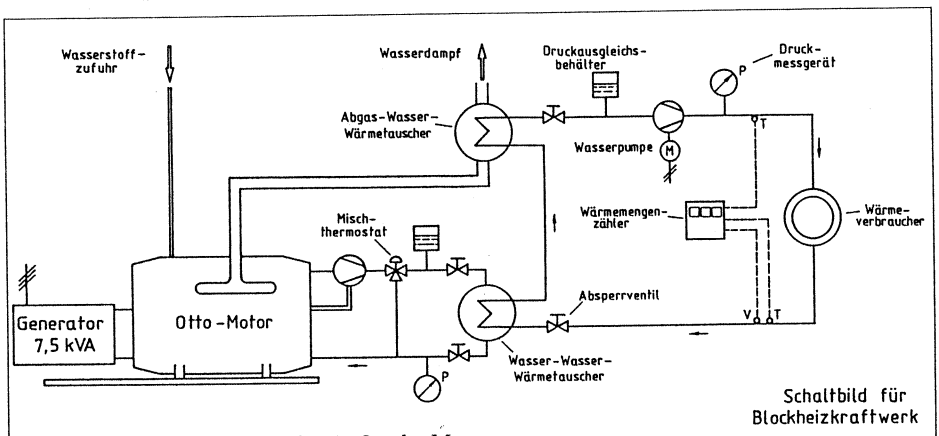


Bild 7 : Blockhezkraftwerk mit Opel - Motor

ten Energieversorgungssystems wird seit Oktober 1988 untersucht.

Im Winter 1989/90 wurden knapp 180 m^3 Wasserstoff pro Monat produziert bei einer Leistungsabgabe von ca. 10 kW des Windrades. Es war ein 25-Zellen Elektolyseur eingebaut (Leistungsaufnahme 10 kW). Durch bessere Elektroden und Diaphragmen ist der Energiebedarf für die Produktion von 1m N Wasserstoff auf unter 4,8 kWh gesunken.

Die Investitionskosten des Gesamtsystems liegen bei ca. 14.500 DM/kW. Der Energiepreis bei dem vorgestellten System liegt bei 1,59 DM/kWh, wobei zehnjähriger Betrieb angenommen wird. Die Wasserstoffproduktion 1990 lag bei über 1000 m^3.

Um den Wirkungsgrad der Gesamtanlage zu verbessern, wird der Motor zu einem Blockheizkraftwerk umgebaut (Abb 7): aus dem Kühlwasser kann man eine thermische Leistung von 18 kW entnehmen, aus dem Abgas mindestens 8 kW, wobei die elektrische Leistungsabgabe des Generators ca. 8 kW beträgt. Der Wasserstoffbedarf des Blockheizkraftwerkes liegt bei ca. 14 m^3/h bei Vollast.

Diese Wind-Wasserstoffanlage ist z.Z. die einzige, an der systematische experimentelle Untersuchungen zur Wind-Wasserstofftechnik durchgeführt werden.

3. Die Solar-Wasserstoffanlage

Die Fachhochschule Wiesbaden hat ein System zur Energieversorgung eines Haushalts auf der Basis von Sonnenenergie und Wasserstoff entwickelt.

Die Sonnenenergie wird in Solarzellen (ca. 2 kW) in elektrische Energie umgewandelt. Als Kurzzeitspeicher dient eine Batterie, die bei Bedarf die Energie für elektrische Geräte (Elektromotoren Licht, Fernseher usf) liefert.

Wasserstoff dient als Langzeitspeicher. Die bei starker Sonneneinstrahlung anfallende nicht benötigte Energie wird zur Zersetzung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff in einem sogenannten Elektrolyseur verwendet. Die Gase Wasserstoff und Sauerstoff werden bei Drucken von ca. 20 bar erzeugt und in Druckbehältern gespeichert. Sie können in einer Brennstoffzelle wieder zusammengeführt werden, wobei elektrische Energie frei wird zum Betrieb von elektrischen Geräten oder zum Laden der Batterie.

Eine speziell entwickelte Steuerung und Energieelektronik dient der Optimierung der Energieflüsse und der möglichst großen Ausnutzung der Solarenergie.

Beschreibung der einzelnen Komponenten

Solargenerator

Der Solargenerator hat eine maximale Leistung von 2 kW. Die einzelnen Zellen bestehen aus polykristallinem Silizium und werden so geschaltet, daß eine Leerlaufspannung von 60-70 V erreicht wird. Die Zellen werden auf dem Dach des Laborgebäudes, unter einer Neigung von 30^0 im Sommerhalbjahr und 60^0 im Winterhalbjahr, gegen Süden montiert.

Elektrolyseur

In einem alkalischen Druckelektrolyseur mit einer Leistung von 2 kW können bis zu 400 l Wasserstoff und 200 l Sauerstoff pro Stunde erzeugt werden. Es ist auf einen maximalen Arbeitsdruck von 20 bar ausgelegt. Als Elektrolyt wird 30 %-ige Kalilauge verwendet. Die Trennung der Gase von der Kalilauge findet in einem neuartigen, ineinander verschachtelten Separationsbehälter statt.

Brennstoffzelle

Brennstoffzellen ermöglichen die direkte Umwandlung chemischer in elektrische Energie. Da diese Reaktionen erst bei ca. öä500^0 C. beginnen, werden platinhaltige Katalysatoren verwendet um die Arbeitstemperatur auf unter 70^0 C. zu senken. Zum Aufladen der Leistungsbatterie werden zwei 6 V Blöcke mit einer Leistung von zusammen 1,3 kW eingesetzt.

Speicher

Zum Betrieb der Anlage werden drei Arten von Speicher benötigt:

- Batterien zum Speichern elektrischer Energie
- Druckgasflaschen zum Speichern von Wassersoff und Sauerstoff
- Ein Tank zum Speichern von Kalilauge

Batterie

Eine Leistungsbatterie dient als Kurzzeitspeicher um Verbraucher mit einer Betriebsspannung von 24 VDC direkt mit elektrischer Energie zu versorgen. Durch die Verwendung eines Wechselrichters können außerdem Geräte mit einer Betriebsspannung von 220 VAC angeschlossen werden.

Eine Systembatterie versorgt die zum Betrieb der Anlage erforderlichen Verbraucher mit elektischer Energie. Dies sind z.B. Pumpen, Ventile und Sensoren. Um Umwandlungsverluste zur Spannungsanpassung zu vermeiden, werden nur Geräte in 24 VDC Ausführung verwendet.

Gasspeicher

Die Speicherung von Wasserstoff und Sauerstoff ist weitgehend unproblematisch. Es können handelsübliche Druckgasflaschen mit 50 l Volumen sowie Progangastanks verwendet werden. Für die Anlage sind Druckgasflaschen mit einem Volumen von 5 m^3 für Sauerstoff vorgesehen. Energieverbrauchende Kompressoren werden in diesem Konzept nicht benötigt, da der Speicherdruck von 20 bar durch den Elektrolyseur "kostenlos" erzeugt wird.

Kalilaugenspeicher

Entwicklungsziel der Anlage ist die Realisierung eines gemeinsamen Kalilaugenkreislaufes zwischen Elektrolyseur und Brennstoffzelle. Im Elektrolyseur erhöht sich durch den Entzug von Wasser die Konzentration der Kalilauge, während sie sich in der Brennstoffzelle durch Bildung von Wasser ständig erniedrigt. Durch die Koppelung der beiden Laugenkreisläufe kann ein Großteil der Verlustenergie, die bei bisherigen Brennstoffzellen für das Entziehen des Wassers benötigt wird, eingespart wer-

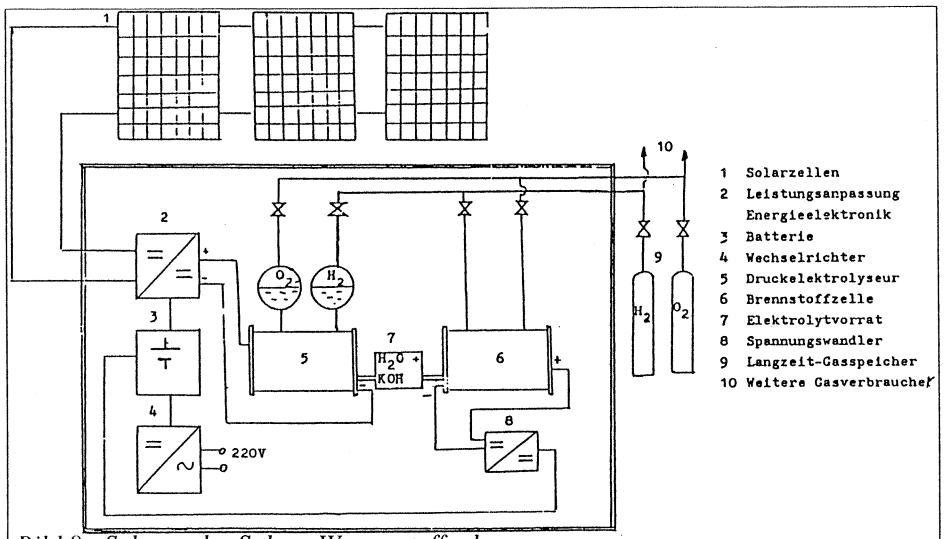


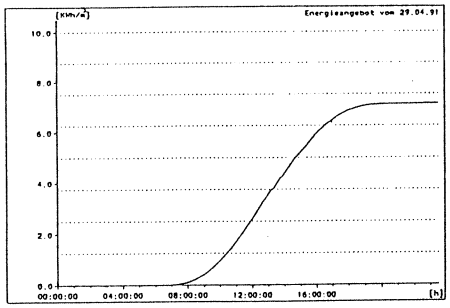
Bild 8 : Schema der Solar - Wasserstoffanlage

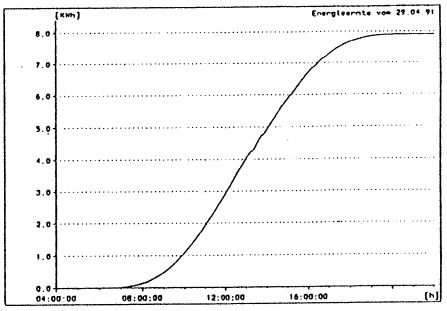
den. Dies ermöglicht einen Betrieb der Brennstoffzelle mit deutlich besserem Wirkungsgrad. Benötigt wird hierfür ein entsprechend dimensionierter Speicherbehälter für Kalilauge.

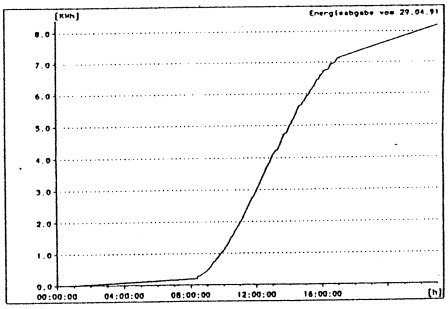
SPEZIFIKATION

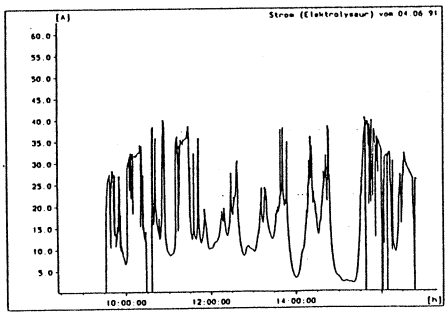
SOLARGENERATOR
Leistungsababe Solargenerator:: 2 kW
Leerlaufspannung Solargenerator: 60-70 V
ELEKTOLYSEUR
Leistungsaufnahme Elektrolyseur: 2 kW
Maximaler Arbeitsdruck: 20 bar
Betriebstemperatur:: 40-70^0 C.
Erzeugter Wasserstoff (b.2 kW): 0,4 Nm^3 /h
Erzeugter Sauerstoff: 0,2Nm^3 /h
BRENNSTOFFZELLE
Abgegebene Leistung: 1,200 kW
Leerlaufspannung: 12 V
Arbeitsdruck: 20-50 mbar
Betriebstemperatur: 40-70^0 C.
SPEICHER
Fassungsvermögen H_2- Tank: 100 Nm^3
Fassungsvermögen 0_2- Tank: 50 Nm^3
Kapazität Leistungsbatterie: 350 Ah
Spannung Leistungsbatterie: 24 V
Kapazität Systembatterie: 50 Ah
Spannung Systembatterie: 24 V
Fassungsvermögen KOH-Tank 200 l

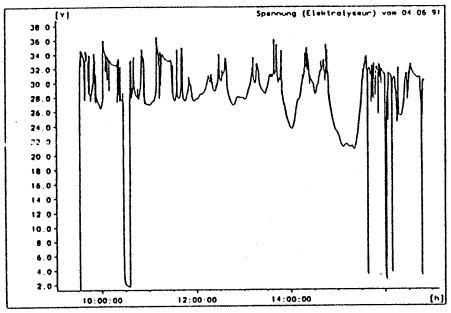
Zur Optimierung der Anlage werden kontinuierliche Messungen durchgeführt, z.B. Sonneneinstrahlung, Energieangebot (gemessen mit Solarimeter), Energieernte (gesamte Energie aus Solargenerator), Energieabgabe an Verbraucher (Licht, Heizung), Energie im Elektrolyseur, Elektrolysestrom und Elektrolysespannung, Gasverbrauch und Elektrizitätserzeugung der Brennstoffzelle.
An den beiden Systemen der Wasserstofftechnik werden folgende Parameter untersucht:
Betriebsverhalten, Zusammenspiel der einzelnen Komponenten, Langzeitbetrieb, Energiekosten.
Es stellt sich dabei heraus, daß neue Geräte entwickelt werden müssen, z.B. spezielle Heizungen für Wasserstoffbetrieb oder Blockheizkraftwerke, Stromaggregate, Sicherheitssysteme.
Die Untersuchungen werden vom Hessischen Minister für Wirtschaft und Technik gefördert.
Fachhochschule Wiesbaden

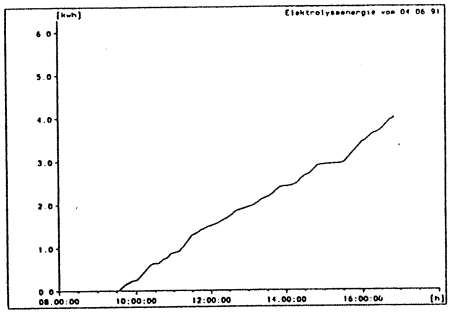


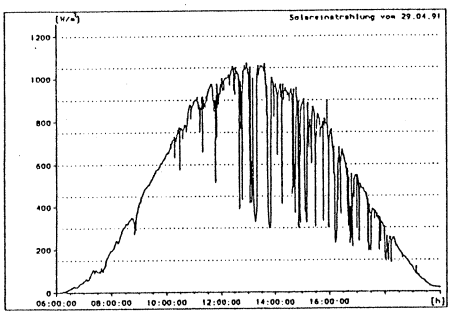


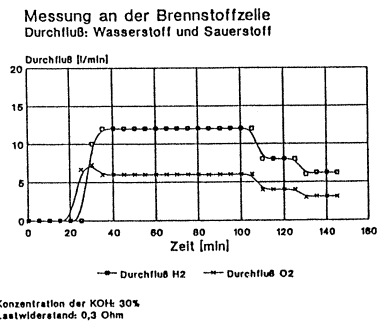


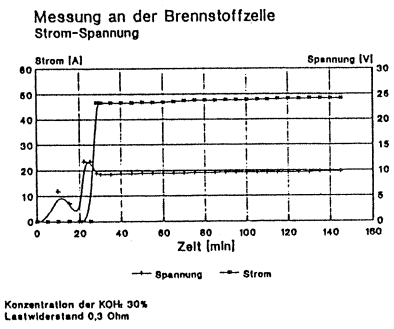












Geräte für die Wasserstofftechnik

Sigurd Schulien, Wiesbaden *)

1 Einleitung

Es ist sicher, dass die Energieversorgung der Zukunft auf regenerativen Energien und Wasserstofftechnik beruhen wird. Die Energiewandler zur Nutzung der regenerativen Energien (Solarzellen, Windräder, Brennstoffzellen, Elektrolyseure...) sind allerdings noch zu teuer für einen Einsatz im großen Maßstab. Wie ist es mit der Wasserstofftechnik? Die Wasserstofftechnik wird sich vor den regenerativen Energien durchsetzen. Denn es besteht eine enge Verwandtschaft zwischen der Wasserstofftechnik und den Techniken zur Kohleverflüssigung und – vergasung, die in Deutschland in den zwanziger und dreißiger Jahren entwickelt worden sind. Der mit regenerativen Energien oder aus fossilen Energieträgern erzeugte Wasserstoff kann z.T. zur Hydrierung von CO und CO_2 verwendet werden, wie er früher bei der Hydrierung von Kohle verwandt wurde, um so Synthesegas und flüssige Energieträger zu erzeugen /1/. Die Öffentlichkeit und die Wirtschaft müssten auf diese Zusammenhänge hingewiesen werden. Es werden im großen Maßstab wieder Kohlevergasung und Kohleverflüssigung angewandt werden müssen, um Synthesegas, Benzin und Wasserstoff zu erzeugen. Dadurch entsteht ein großer Bedarf an Wasserstoffverbrauchern, -speichern und auch kleineren Wasserstoffgeneratoren.

Wenn die immer noch leistungsfähige deutsche Industrie diese Zusammenhänge sieht, wird sie bereit sein, außer Brennstoffzellen auch Elektrolyseure, H_2-Brenner, H_2-Motoren, Speicher, Messgeräte, Sicherheitssysteme usw. zu entwickeln. Sie wird sich dann auch um verwandte Technologien kümmern wie Sauerstofftechnik, dezentrale Energiesysteme, Katalysatoren in der Gebäudetechnik usw.. Sobald die Industrie erkennt, dass es sich um große Stückzahlen handelt, die verkauft werden können und nicht um Hirngespinste von Sehern, wird sie sich engagieren.

2 Eigenschaften von Wasserstoff

Die Geräte für die Wasserstofftechnik sind in den meisten Fällen nicht völlig neu zu entwickeln. Es sind normalerweise Seriengeräte der Gastechnik, die von Erdgas- bzw. Propangas auf Wasserstoffbetrieb umkonstruiert werden müssen. Die Konstruktionsänderungen ergeben sich zwangsläufig

Tabelle 1 *Sicherheitstechnische Kenndaten von Wasserstoff [9]*

Kenngrößen	Wasserstoff H_2	Methan (Erdgas) CH_4	Propan C_3H_8
Dichte NTP[a]-Gas (kg/m³)	0,0838	0,6512	1,8700
Selbstentzündungstemperatur (K)	858	813	760
Minimale Zündenergie in Luft (mJ)	0,02	0,29	0,26
Zündgrenzen in Luft (Vol.-%)	4...75	5,3...15,0	2,1...9,5
Flammentemperatur in Luft (K)[b]	2318	2148	2385
Detonationsgrenzen in Luft (Vol.-%)	13...59	6,3...14	
Detonationsgeschwindigkeit in Luft (km/s)[b]	2,0	1,8	1,85
Detonationsüberdruck (bar)[b]	14,70	16,80	18,25
Unterer Heizwert (kJ/g)	119,93	50,02	46,35
Oberer Heizwert (kJ/g)	141,86	55,53	50,41
Spezifische Wärme c_p NTP[a]-Gas (J/gK)	14,89	2,22	1,67
Schallgeschwindigkeit NTP[a]-Gas (m/s)	1294	448	260
Stöchiometrisches Gemisch in Luft (Vol.-%)	29,53	9,48	4,03
Diffusionskoeffizient in NTP[a]-Luft (cm²/s)	0,61	0,16	0,12
Explosionsenergie (kg TNT/m³ NTP[a] Brenngas)[c]	2,02	7,03	20,5
Explosionsenergie (g TNT/g Brennstoff)[c]	24	11	10
Explosionsenergie (g TNT/kJ)[c]	0,17	0,19	0,20

[a] NTP: Normal-Temperatur und -Druck, 293,15 K, 1,013 bar.
[b] Stöchiometrisches Gemisch.
[c] Theoretisches Maximum; realistischer Wert ca. 10% vom theoretischen Maximum.

aus den Eigenschaften des Wasserstoffs, die sich teilweise erheblich von denen von Erdgas oder Propan unterscheiden. Im folgenden sind einige wichtige Eigenschaften von Wasserstoff angegeben.

Die Tabelle 1 gibt einen Überblick von den wichtigsten physikalisch - chemischen Kenndaten von Wasserstoff:

Selbstentzündungstemperatur

Die Selbstentzündungstemperatur (bei Wasserstoff 585 °C) ist die niedrigste Temperatur, bei der die Verbrennung im Gasraum eingeleitet werden kann und unter Energieabgabe weiterbesteht. Im Gasraum rekombinieren Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser, wobei die Energie von 39 kWh / kg H_2 frei wird. Auf Katalysatoren findet diese Reaktion schon bei Temperaturen von unter 20°C statt.

Zündgrenzen

Bei weniger als 4% H_2 in O_2 (untere Zündgrenze) zündet das Gasgemisch nicht, ebenso bei mehr als 75% H_2 in O_2 (obere Zündgrenze), da in beiden Fällen nicht genügend Wasserstoff- und Sauerstoffatome zu Wasser reagieren, sodass die Zündtemperatur nicht aufrecht erhalten werden kann. Die Zündgrenzen im Gasraum sind vom Gasdruck und der Temperatur abhängig und werden beeinflusst von der Anwesenheit anderer Gase (z. B. Wasserdampf).

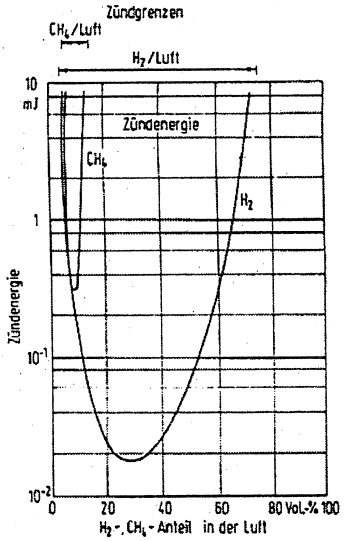


Bild 1 *Zündenergie für H_2 - Luftgemische im Vergleich zu Methan - Luftgemischen*

Mindestzündenergie

Zur Einleitung der Zündung ist die Zufuhr von Energie erforderlich. Die Energiemenge ist abhängig vom Wasserstoff – Luft - Verhältnis. Bei der Verbrennung von H_2 und O_2 zu Wasser ist die Mindestzündenergie sehr niedrig, beim stöchiometrischem Gemisch (2 Teile H_2, ein Teil O_2) liegt sie bei 0,02 mJ. Bild 1 zeigt die Abhängigkeit der Zündenergie vom Mischungsverhältnis der Gase. Es sind die Werte für Wasserstoff und Methan aufgetragen.

Deflagration – Explosion – Detonation

Der Verbrennungsvorgang kann

a) mit oder ohne Flamme und ohne starke Drucksteigerung erfolgen mit langsamen laminaren Fortschreiten der Reaktionszone (Deflagration), die Verbrennungsgeschwindigkeit beträgt einige m/s,

b) als Explosion mit starker Drucksteigerung und beschleunigter Reaktion mit Reaktionsgeschwindigkeiten bis zur Schallgeschwindigkeit stattfinden oder

c) als Detonation ablaufen, wobei die Reaktion durch eine Stoßwelle aufrechterhalten wird mit Reaktionsgeschwindigkeiten bis zu einigen km/s. Bei einer Explosion kann das Druckverhältnis p_{ex} / p_0 auf Werte von 7 - 12 steigen, bei einer Detonation kann $p_{det}/p_0>19$ werden. Diese Werte gelten für geschlossene Behälter.

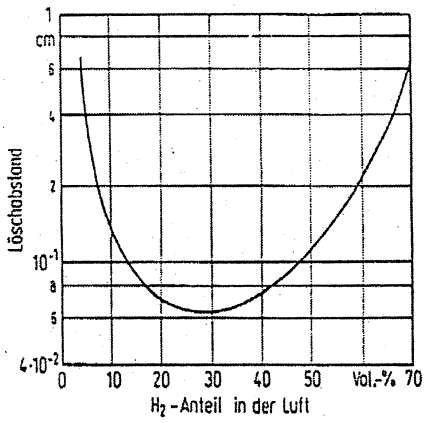


Bild 2 *Löschabstand als Funktion der Gaskonzentration*

Löschabstand

Eine Flammenfront kann durch kleine Öffnungen, die kleiner sind als der Löschabstand, eliminiert werden. Wichtig ist, dass die Energie der Flammenfront vom Gittermaterial schnell genug absorbiert werden kann, dass das Gittermaterial also eine hohe Wärmeleitung besitzt. Das nachfolgende Bild 2 zeigt den Löschabstand in Abhängigkeit von der Gaskonzentration. Eine Wasserstoff-Flamme eines stöchiometrischen H_2 - O_2 - Gemisches wird also durch einen Spalt mit einem Abstand der metallischen Wände von ca. 0,6 mm gelöscht. Meist werden Metallnetze (Grubenlampe) oder Sintermetalle als Flammensperre verwendet. Ein Flammenschutzgitter muss

genügend Masse besitzen, damit es die Wärmeenergie der Flammenfront aufnehmen kann.

Verhalten von freigesetztem Wasserstoff in Luft

Wasserstoff ist das leichteste Gas. Die Dichte ist ca. 1/14 mal kleiner als die Luft, das Gas steigt daher schnell auf. Wasserstoffgaswarngeräte befinden sich deshalb unter der Decke eines Raumes. Wasserstoff hat einen hohen Diffusionskoeffizienten. Es vermischt sich sehr rasch mit der umgebenden Luft und bildet schnell ein eventuell explosionsfähiges Gemisch. Der Wasserstoff strömt an der höchsten Stelle eines Raumes durch eine Öffnung leicht nach außen, wobei seine niedrige Viskosität diesen Vorgang erleichtert.

3 Katalytische Brenner

Die Zündtemperatur für die Verbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser liegt bei ca. 585°C, die Flammentemperatur beträgt etwa 2050°C. Bei der Reaktion

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightleftarrows H_2O + 39{,}5\,\frac{\text{kWh}}{\text{kg } H_2} \qquad (1)$$

wird die Energie 39,5 kWh pro Kilogramm Wasserstoff frei.

In Gegenwart bestimmter Substanzen (z. B. Metallen der Platin - Gruppe, aber auch Oxiden) rekombinieren die beiden Gase schon bei Temperaturen unter 100°C, wobei die dem Brennwert entsprechende Energie abgegeben wird. Die Reaktion findet aufgrund katalytischer Prozesse auf einem Festkörper, nicht im Gasraum statt.

Der molekulare Wasserstoff H_2 wird auf einem Katalysator absorbiert und anschließend auf der Katalysatoroberfläche in atomaren Wasserstoff dissoziiert aufgrund von Anziehungskräften, die von der aktiven Oberfläche des Katalysators ausgehen. Der atomare Wasserstoff ist sehr reaktionsfreudig und reagiert mit dem Sauerstoff unter Bildung von Wasser. Die Reaktionswärme wird an die Umgebung abgegeben.

An der FH - Wiesbaden sind seit 1988 einige katalytische Brenner unterschiedlicher Bauart entwickelt, gebaut und getestet worden ([2], [3], [4], [5]). Die besten Ergebnisse zeigte der Brenner, der in Bild 3 skizziert ist.

Die Heizung besteht aus drei parallel geschalteten Kammern 7, die mit Katalysatorpellets gefüllt sind und vom Brenngas (2% H_2, 98 % Luft) durchströmt werden. Die Reaktionswärme wird durch Kühlwasser abgeleitet, das durch die vier Kühlkammern 5 strömt. Katalysatorkammer 7 und Kühlkammer 5 sind durch die Wärmetauscherplatten 8 getrennt. Das Gerät ist in Filterplattenbauart aufgebaut. Es werden jeweils eine Gas- und eine Kühlwasserkammer hintereinander geschaltet.

Das Gasgemisch wird außerhalb des Brenners erzeugt und über die Öffnung 13 und Kanäle in den Dichtungen 6 in die Katalysatorkammer 7 geleitet.

Das Gasgemisch durchströmt die Katalysatorschüttung von oben nach unten, das heiße Abgas fließt durch ein Drahtnetz 14 zur Gasaustrittsöffnung 11. Es besteht aus Wasserdampf, Stickstoff und dem Restsauerstoff. Das Kühlwasser kommt durch die Bohrung 12 in die Kühlwasserräume 5, die es aufgewärmt bei dem Kühlwasseraustritt 10 verlässt. Jede Kammer produziert ein thermische Leistung von 200 W. Die Flansche 1 und 3 haben eine Größe von 150 x 150 mm², die Länge des Brenners beträgt 120 mm. Der Katalysator ist ein übliches in der chemischen

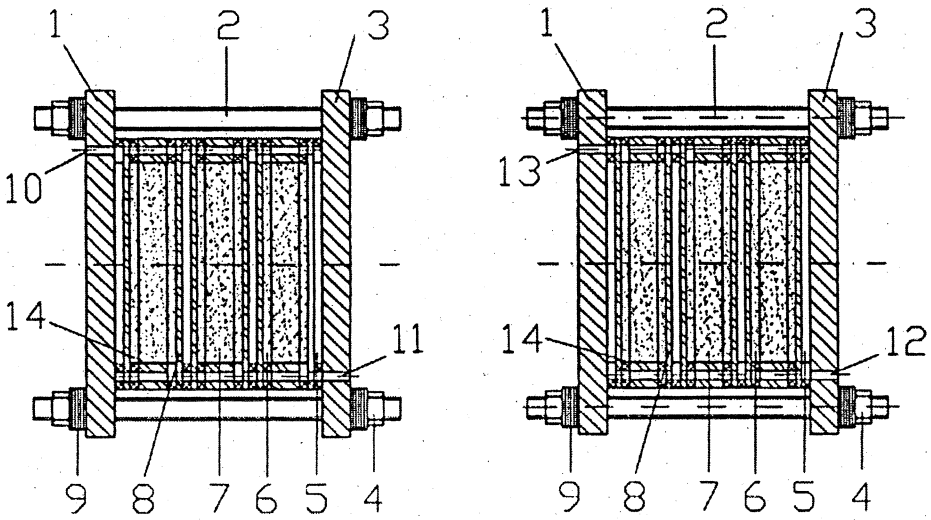


Bild 3 *Schematische Skizze eines katalytischen Brenners (Erläuterungen siehe Text)*

Industrie verwendetes Material auf Platinbasis, das auf einem

Al_2O_3- Substrat (zylindrische Pellets 3mm Durchmesser) aufgebracht ist. Der Wasserstoff ist bei etwa 180°C vollständig verbrannt. Mit Erdgas als Brenngas muss man die Temperatur auf ca. 400°C erhöhen, um vollständige Verbrennung zu erhalten. Die Katalysatortemperatur reagiert schnell auf Änderungen des Gasdurchsatzes. Die Temperatur bleibt im monatelangen Dauerbetrieb konstant. Bild 4 zeigt die Temperaturen von Kühlwasser, Katalysator und Abgas in Abhängigkeit von der Zeit nach Beginn des Gaseinlasses.

Das Gerät kann für Heizungen, Luftbefeuchter, Sicherheitssysteme usf. eingesetzt werden.

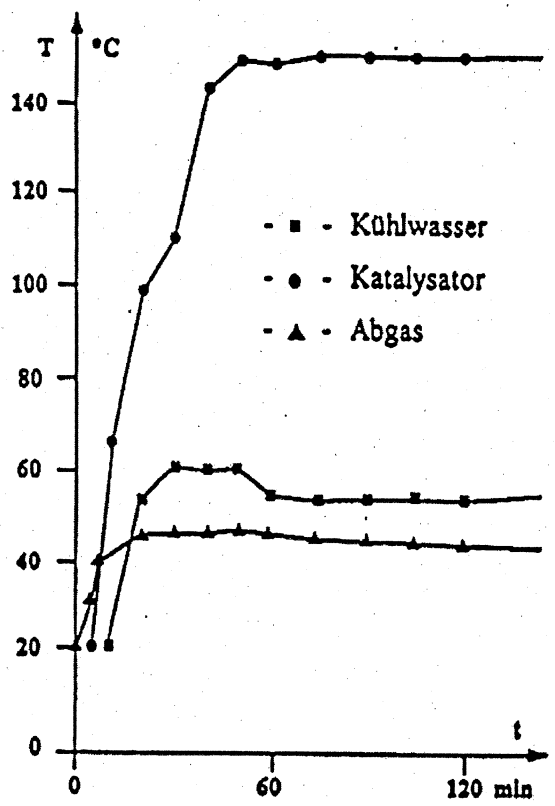


Bild 4 *Temperaturverlauf im katalytischen Brenner nach Bild 3*

4 Stationäre Wasserstoffmotoren

Serienmäßige Otto-Motoren können so modifiziert werden, dass sie mit Wasserstoff – Luft - Gemischen statt mit Benzin – Luft – Gemischen gefahren werden können.

Es wurden mehrere Motoren von Benzin – auf Wasserstoffbetrieb umgebaut, ein Motor der Firma Adam Opel AG ([6], [7], [8]) und ein Motor der Firma Briggs und Stratton. Beide Motoren wurden mit einem Generator zu einem Stromaggregat zusammengebaut und erhielten jeweils eine eigene Gasdosier- und –mischeinrichtung. In beiden Fällen entschied man sich für äußere Gemischbildung, d. h. Wasserstoff und Luft werden vor dem Einströmen in den Verbrennungsraum gemischt. Die Zündenergie von Luft/Wasserstoff-Gemischen liegt bei Luft / Wasserstoffverhältnissen von 1 bis 3 bei einem Zehntel derjenigen von Benzin (ca. 21mJ). Die Zündtemperatur beträgt etwa 580°C. Hieraus ergibt sich, dass beim Wasserstoffbetrieb durch Frühzündungen unregelmäßige Verbrennungsabläufe auftreten können: das Wasserstoff – Luft – Gemisch wird durch heiße Stellen im Motor gezündet, nicht durch den Zündfunken der Kerze (heiße Restgase, Ventile usf.). Um diese Frühzündungen zu verhindern, sind Änderungen am Motor und an der Zündanlage erforderlich. Die beiden Motoren sind unter Berücksichtigung der Eigenschaften von Wasserstoff so umgebaut worden, dass sie störungsfrei im Wasserstoffbetrieb laufen.

<u>Opel – Motor</u>

Es wurde ein serienmäßiger Vierzylinder – Viertakt – Motor 1.0 S OHV Corsa der Adam Opel AG auf Wasserstoffbetrieb umgebaut. Die Daten des Motors sind:

Hubraum: 993 cm^3

Nennleistung: 21 kW bei 3000 U/min

Max. Drehmoment: 68 Nm bei 2600 – 3800 U/min

Der an den Motor angeflanschte Drehstrom – Innenpol – Generator von A. van Kaick hat folgende Kennwerte:

Nenndrehzahl: 3000 U/min

Scheinleistung: 7,5 kVA

Nennspannung: 380 / 220 V

Eine Skizze des Notstromaggregats zeigt Bild 5. Um den Motor einwandfrei im Wasserstoffbetrieb betreiben zu können, musste eine geeignete Gemischbildungsanlage entwickelt werden. Bild 6 zeigt diese Anlage, mit der Dauerbetrieb bei einer Last von über 8 kW möglich ist.

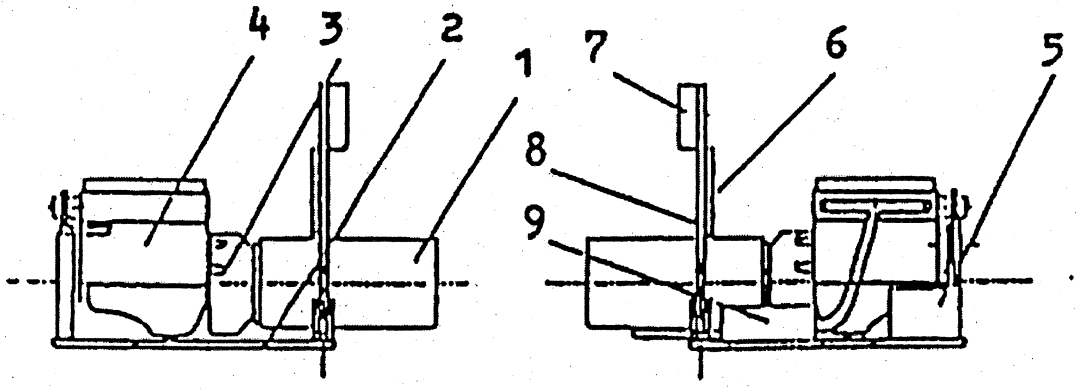


Bild 5 *Skizze des Notstromaggregates (1-Generator, 2-Rahmen, 3-Kupplung, 4-Otto-Motor, 5-Batterie, 6-Kühler, 7-Schaltkasten, 8 -Haltebrücke, 9-Auspuff)*

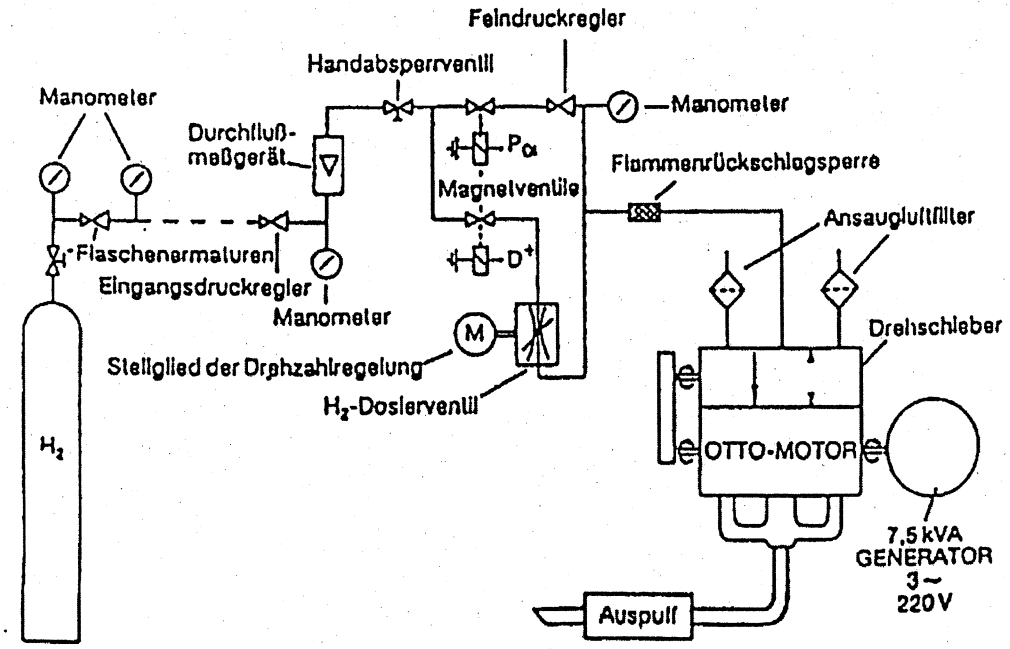


Bild 6 *Gemischbildungsanlage des Opel - Motors*

Der Motor läuft mit einer Drehzahl von 1500 U/min. Sinkt bei Belastung die Drehzahl, öffnet das Dosierventil und lässt mehr Wasserstoff in den Zylinder. Bei steigender Drehzahl schließt das Ventil.

Das Herzstück der Gemischbildungsanlage ist der Drehschieber, der statt des Vergasers das

brennbare Gasgemisch herstellt. Er ist in Bild 7 dargestellt. Der Drehschieber, der von der Kurbelwelle angetrieben wird, sorgt dafür, dass der Wasserstoff nur während der Ansaugphase in den Motorzylinder strömt. Die Luft gelangt durch die Ansaug- Luftfilter und über die Saugrohre 25 in den Motor. Die einströmende Luft kühlt die heißen Motorteile vor. Anschließend lässt der Drehschieber kurz Wasserstoff in das Saugrohr strömen, wo er sich mit der Luft vermischt und dann in den Motorzylinder gelangt. Dort wird das Gemisch durch die Zündkerze gezündet.

Der Drehschieber läßt den Wasserstoff nur stoßweise in den Zylinder gelangen. Der Wasserstoff strömt durch die Ansaugöffnung 29 in das Gehäuse 13, in dem ein Rotor 10 rotiert, angetrieben durch die Kurbelwelle. Der Rotor wird von der Welle 2 und den Haltescheiben 7 und 12 getragen. Er enthält insgesamt acht Öffnungen für den Wasserstoffaustritt zum Saugrohr 25. Jeweils zwei sind parallel geschaltet und lassen den Wasserstoff für eine Zylinderfüllung eines Viertaktmotors durch. Der Wasserstoff tritt durch das Saugrohr 25 in den jeweiligen Motorzylinder ein. Die Abdichtung zwischen Rotorgehäuse 13 und Rotor 10 erfolgt über geeignete Gleitringdichtungen 23.

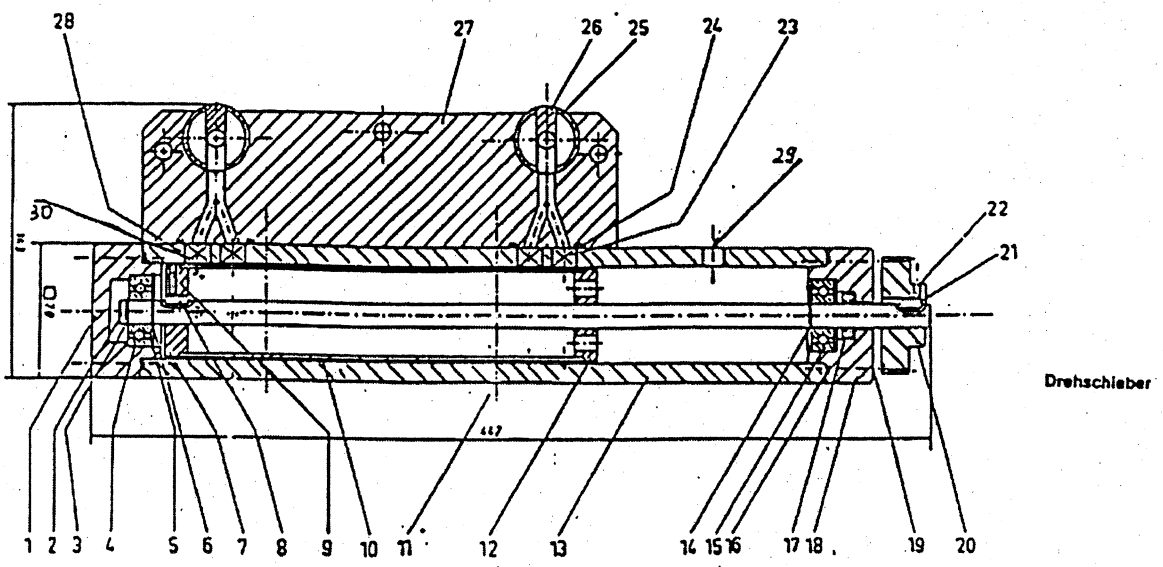


Bild 7 *Drehschieber für Gasmotor*

1 -Lagerschild	16 -U-Ring
2 -Welle	17 -Radialwellendichtring
3 -Sicherungsring	18 -Lagerschild
4 -Rillenkugellager	19 -Zylinderschraube
5 -Sicherungsring	20 -Zahnriemenscheibe
6 -Sicherungsring	21 -Paßfeder
7 -Haltescheibe	22 -Gewindestift
8 -Paßfeder	23 -Gleitringdichtung
9 -Gewindestift	24 -U-Ring
10 -Rotor	25 -Saugrohr
11 -Sechskantschraube	26 -Einblassteg
12 -Haltescheibe	27 -Grundblock
13 -Gehäuse	28 -Führungshülse
14 -Sicherungsring	29 -Wasserstoffeinlaß
15 -Rillenkugellager	30 -Wasserstoffauslaß

Durch diesen Drehschieber wird der Wasserstoff stets im richtigen Augenblick in den Zylinder eingebracht. Vor der Wasserstoff – Einbringung erfolgt eine Luftvorlagerung, die das Restgas im Motorzylinder abkühlt. Der Drehschieber bewirkt

also eine pulsierende Wasserstoff – Zufuhr zu den Zylindern. Es ist ein rückzündungsfreier Dauerbetrieb bei Nennleistung des Generators (8 - 9 kW) möglich.

Messungen an dem Motor

Nachdem der Motor so umgebaut worden war, dass er störungsfrei im Wasserstoff – Betrieb läuft, wurden zunächst Verbrauchsmessungen durchgeführt.

Bild 8 zeigt den Wasserstoffverbrauch des Opel – Motors in Abhängigkeit von der Belastung des Generators (Ohmsche Last), der spezifische Kraftstoffverbrauch ergibt sich aus Bild 9. Den Wirkungsgrad für verschiedene Leistungen kann man Bild 10 entnehmen.

Das Luftverhältnis ist bei der vorliegenden Gemischbildungsanlage veränderlich und liegt zwischen 4,3 und 2, In Bild 11 ist es als Funktion der angegebenen Generatorleistung dargestellt.

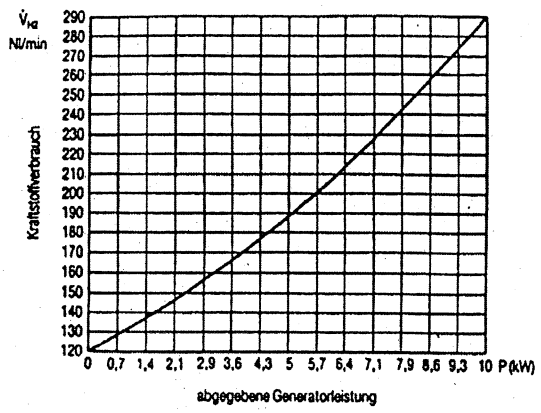


Bild 8 *Wasserstoffverbrauch des Opelmotors in Abhängigkeit von der Belastung des Generators*

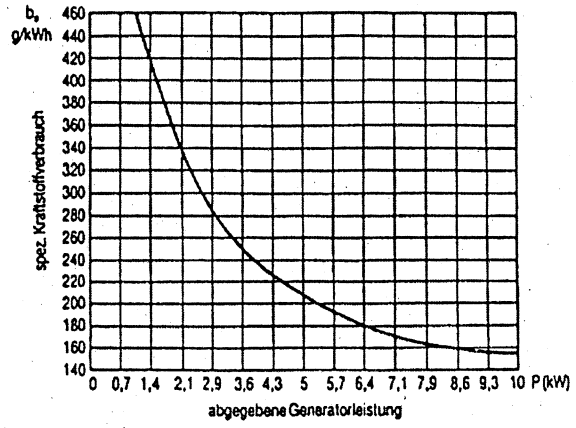


Bild 9 *Spezifischer Kraftstoffverbrauch des Opel-Motors in Abhängigkeit der Belastung*

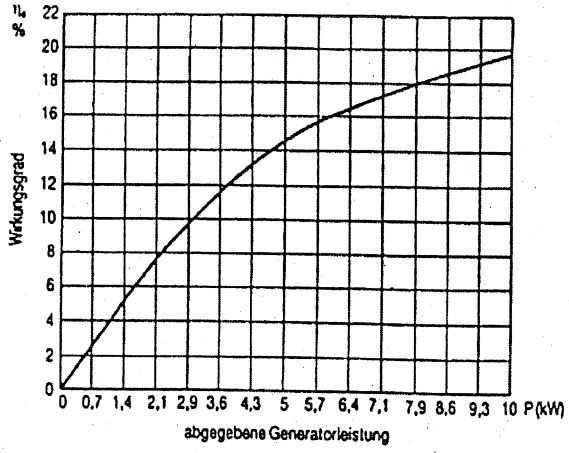


Bild 10 *Wirkungsgrad des Systems Motor-Generator als Funktion der abgegebenen Leistung*

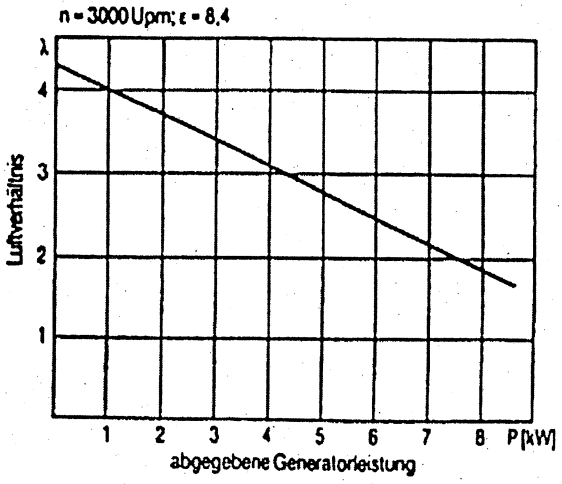


Bild 11 *Luftverhältnis als Funktion der Generatorleistung*

Der Motor läuft im Dauerbetrieb bei Belastungen bis 9 kW. Ab 15 kW Leistungsaufnahme treten Rückzündungen auf, die durch intensivere Kühlung behoben werden können.

Motor von adapt engineering

Der Wasserstoffmotor von adapt engineering ist ein mit Einspritzventilen versehener Gasmotor der Firma MAN, der auf Wasserstoffbetrieb umgebaut worden ist.

Eine Skizze dieses Motors ist in Bild 12 gegeben. In Tab 2 sind wichtige Kenndaten aufgelistet

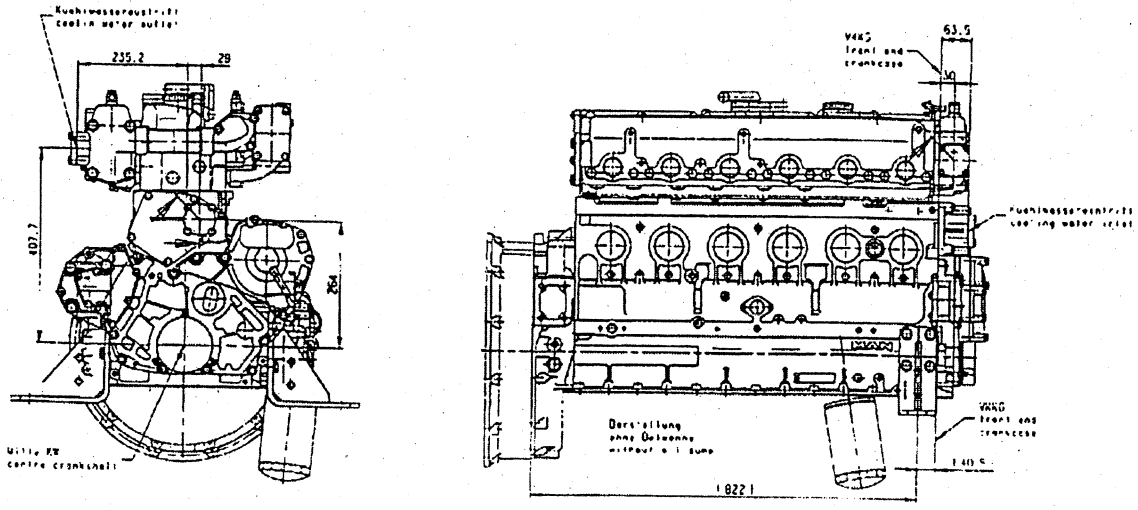


Bild 12 *Skizze des Motors von adapt engineering*

Tabelle 2 *Kenndaten des Motors von adapt engineering*

Arbeitsweise	4-Takt-Ottogasmotor	
Zylinderzahl/ Bauweise	6/ in Reihe stehend	
Bohrung/ Hub	108/125	
Drehzahl	1/min	1500
Leistung (mech.)	kW	45
Hubvolumen	Ltr.	6,87
Verdichtungsverhältnis	1	10zu1
effektiver Mitteldruck	bar	5,25
Luftzahl	1	2,3
mittlere Kolbengeschwindigkeit	m/s	6,25
Zündzeitpunkt	° voT	10 bis 12
Wirkungsgrad (mech)	1	0,35
Schmierölverbrauch	g/kWh	0,5
nutzbare Abgaswärme	kW	30
Abgastemperatur	°C	580
max. Abgasgegendruck	mbar	40
zulässiger Kühlmitteldruck	bar	2
nutzbare Kühlwasserwärme	kW	45
min. Motorkühlwasserumlauf	l/min	120
Kühlwasserfüllmenge	Ltr.	15
Breite einschl. Lagerung	mm	720
Gesamtlänge	mm	995
Höhe	mm	830
Motormasse (trocken)	kg	520

Schrifttum

[1] Schulien, S.; Sandstede, G.; Hahn, H. W.; Kohlenstoff mit Wasserstoff als Rohstoffe für eine umweltfreundliche Energietechnik Windkraftjournal 1/96 S. 16

[2] Jochim, R.; Konstruktion und Bau eines katalytischen H_2 – O_2 Brenners Diplomarbeit FH Wiesbaden 1991

[3] Isler, B.; Konstruktion und Bau eines katalytischen H_2- Luft – Brenners 10 kW Diplomarbeit FH Wiesbaden 1995

[4] Ott, D.; Konstruktion eines katalytischen Brenners für nicht explosive H_2 – Luft – Gemischen (1kW) Diplomarbeit FH Wiesbaden 1998

[5] Schad, O.; Konstruktion und Bau eines katalytischen Brenners (10kW) für nicht explosive H_2- Luft – Gemische Diplomarbeit FH Wiesbaden 1998

[6] Bäuerle, M.; Umbau eines Otto – Motors auf Wasserstoffbetrieb Diplomarbeit FH Wiesbaden 1989

[7] Gebhard, Th.; Bau von Reglereinrichtungen für einen H_2 – betriebenen Otto – Motor Diplomarbeit FH Wiesbaden 1989

[8] Hartmann, U.; Optimierungsmessungen am Notstromaggregat mit H_2 – Betrieb Diplomarbeit FH Wiesbaden 1989

[9] Winter, C.; Nitsch, A.; Wasserstoff als Energieträger

*) *Prof. Dipl.-Phys. Sigurd Schulien,*

Fachbereich Physik. Technik, Fachhochschule Wiesbaden

Dezentrale Kläranlage mit optimierter Sauerstoffversorgung

A. Boeckle, N. Späth, S. Schulien

1. Einleitung

Der Stoffkreislauf in der Biosphäre kann vereinfacht und schematisch durch die Photosynthese-Gleichung beschrieben werden

$$(1) \qquad 6\,H_2O + 6\,CO_2 + \text{Energie} \Longleftrightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2$$

Die Pflanze nimmt Wasser über die Wurzeln und CO_2 über die Blätter auf und erzeugt daraus mit Hilfe von Sonnenenergie Biomasse (hier Glucose) und Sauerstoff, der über die Blätter an die Atmosphäre abgegeben wird. Die Umkehrreaktion besteht darin, daß Sauerstoff mit der Biomasse reagiert, wobei Wasser und CO_2 entstehen sowie Energie freigesetzt wird. Dieser Vorgang spielt sich in jeder Kläranlage beim Abbau von organischen Verunreinigungen des Abwassers ab. Die Reaktion läuft mit Unterstützung von Mikroorganismen ab, die ihre Lebensenergie aus dem Prozeß (1) beziehen.

In normalen Kläranlagen wird atmosphärische Luft (78% N_2, 21% 0_2) in das verschmutzte Abwasser gepumpt, um die organischen Bestandteile abzubauen. Bei Verwendung von reinem Sauerstoff ist die Reinigungsleistung bei Normaldruck fast fünfmal größer.

Normale kommunale Kläranlagen haben das ganze Jahr hindurch gleichmäßige Schmutzfrachten zu bewältigen. Weinbaubetriebe sind Saisonbetriebe. Bei ihnen fallen während der Erntezeit und kurz danach erhebliche Abwasserbelastungen an, die nur durch ungewöhnlich große Belüftungsbecken bewältigt werden können oder durch zusätzliche Sauerstoffzufuhr. Die großen Schmutzfrachten von Weinbauabwässern ergeben sich aus den hohen hygienischen Anforderungen, die mit der Weinherstellung verknüpft sind. Dabei fallen große Mengen von, organisch verschmutztem Spülwasser an, die aus der Reinigung von Lese- und Transportgeräten, von Mühlen, Keltern, Pumpen, Flaschen, Fässern, Schläuchen, Abfüllgeräten, Filtern, Separatoren usf. stammen. Auch Trübstoffreste und Hefeanteile stellen eine starke Belastung dar /1/.

Diese Abwässer werden üblicherweise in die öffentliche Kanalisation und damit in die kommunale Kläranlage eingeleitet. Da die Abwässer saisonal stark unterschiedlich belastet sind, hat die öffentliche Kläranlage Schwierigkeiten mit der Verarbeitung. Die Belastung kann mit Hilfe einer betrieblichen Abwasservorbehandlungsanlage stark reduziert werden.

Im folgenden ist eine derartige Anlage mit neuartiger Sauerstoffversorgung beschrieben, die mit Unterstützung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt entwickelt und gebaut worden ist.

2. Dezentrale Kläranlage

Sie besteht im wesentlichen aus einem Wasserelektrolyseur zur Herstellung von Sauerstoff (250 $^{l}/_{h}$), dem Aquainjektor (s.Abb. 2), in dem das verschmutzte Wasser bis zur Sättigung mit Sauerstoff angereichert wird, sowie dem Herzstück der Anlage, dem Aquabioreaktor. Ein Schema der Anlage ist in Abb. 1 gezeigt.

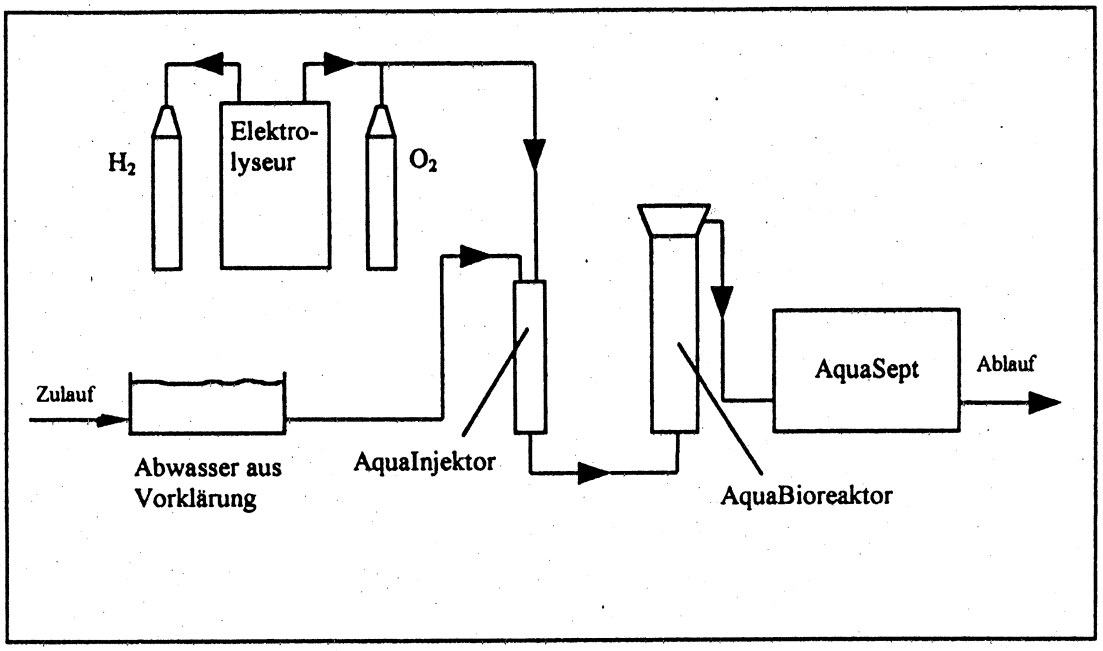


Abb. 1 Schematische Darstellung einer AquaPlan-Reinigungsstraße

/1/. Der Bioreaktor ist ein senkrecht stehendes Rohr von einem Durchmesser von 40 cm und einer Höhe von 2,30 m (s. Abb. 3). Dieses Rohr ist mit Quarzsand (Korndurchmesser ca. 0,3 mm) gefüllt. Das zu reinigende Abwasser wird von unten durch eine Düse in den Bioreaktor gepumpt und strömt an den Sandkörnern vorbei. Diese werden nach einiger Zeit von Mikroorganismen besiedelt, welche von der vorbeiströmenden Biomasse leben. Die mit Mikroorganismen besiedelte Sandoberfläche beträgt mehrere 10.000 m^2. Der Mechanismus ihrer Energieversorgung ist durch Gleichung (1) beschrieben.

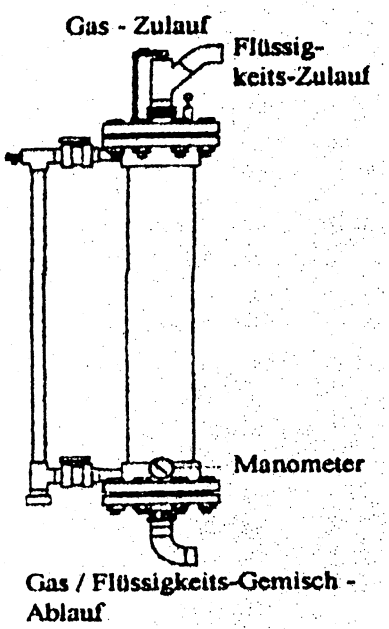


Abb. 2 Schematische Darstellung des AquaInjektors

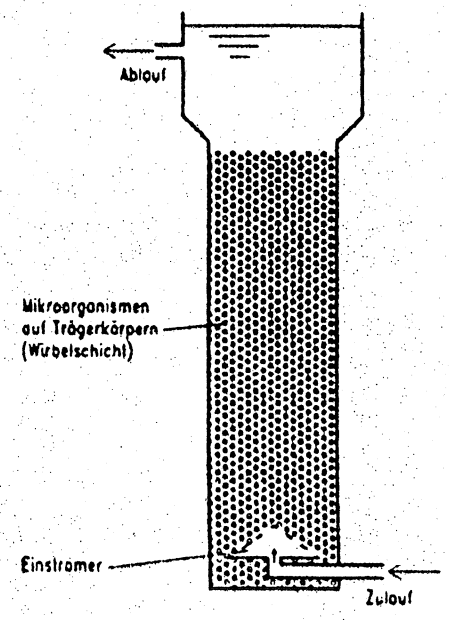


Abb. 3 Schematische Darstellung des Aquabioreaktors

Zum Wachstum benötigen sie noch Stickstoff- und Phosphorverbindungen, die z. T. im Abwasser enthalten sind /2/. Als Reaktionsprodukt des Stoffwechsels treten nach Gl. (1) Wasser und CO_2 auf sowie abgestorbene Mikroorganismen und unverbrauchte Biomassepartikel. Diese gelangen in den oberen Teil des Bioreaktors und werden von dort in den Aquaseptor (Abb. 4) gepumpt, wo sie durch Flotation abgeschieden werden /1/. Um die Flotation zu bewirken, strömt das Abwasser zwischen Bioreaktor und Aquaseptor durch einen Aquainjektor, der den Abwasserstrom mit kleinen Luftbläschen anreichert. Diese Luftbläschen lagern sich an nicht abgebaute Biomassepartikel an, so daß sie im Aquaseptor noch oben steigen und von dort durch einen Abräumer in ein Schlammbecken transportiert werden. Nicht abgeschiedene Partikel sammeln sich auf dem Boden des Reaktionsraums (Abb. 4), sie müssen dort von Zeit zu Zeit abgepumpt werden. Das so geklärte Abwasser kann in die Kanalisation gegeben werden.

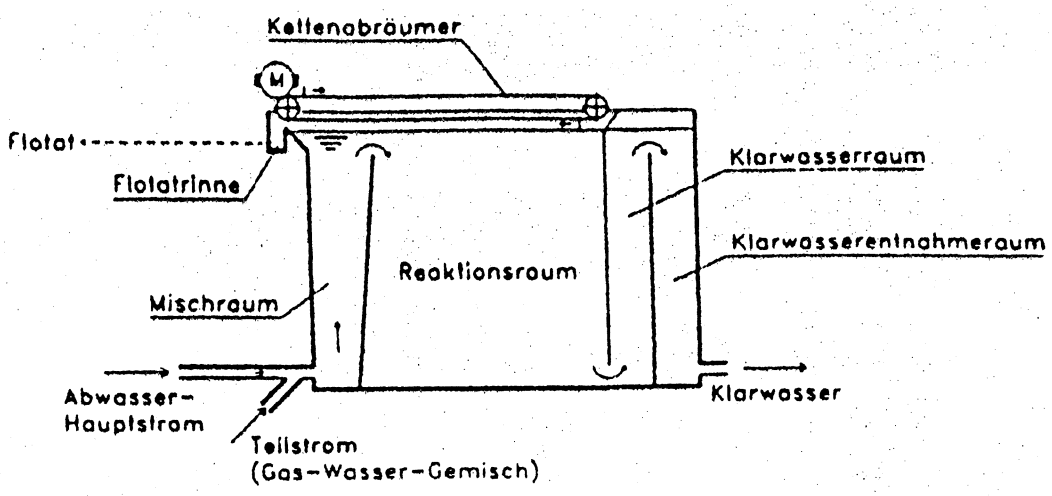


Abb. 4 Schematische Darstellung des AquaSeptors

3. Messungen an der Anlage

Die Anlage ist an der FHW gebaut und getestet worden und wird im Weinbaubetrieb „Erzeugergemeinschaft Goldenes Rheinhessen" in Bornheim bei Alzey getestet. Diese Erzeugergemeinschaft ist ein Zusammenschluß von Winzern aus dem rheinhessischen Weinbaugebiet mit einer Weinbergfläche von ca. 1350 ha und einem Lagerraum von 13 Millionen Litern. Von den Mitgliedern werden pro Jahr 10 - 12 Millionen Liter Trauben, Most oder Wein angeliefert, die dann im Betrieb weiter verarbeitet werden. Die Abwässer des Betriebs weisen je nach Jahreszeit sehr stark schwankende Belastungen auf. Da die Abwasserbehandlung in der kommunalen Kläranlage sehr hohe Kosten verursacht hätte, hat die Erzeugergemeinschaft sich für eine eigene Abwasservorbehandlung entschieden und eine Reinigungsanlage der Firma Erich Zimmer/Ludwigshafen installiert /3/.

Diese Anlage ist seit Ende 1993 in Betrieb. Sie ist schematisch in Abb. 5 skizziert.

Das Schmutzwasser sammelt sich im Pumpensumpf und wird von dort in einem Mischbehälter gepumpt. Über eine Schlauchpumpe gelangt es in den Abbau-Reaktor, dessen Sauerstoffversorgung durch eine Belüftungspumpe mit Düsenvorrichtung gewährleistet wird. Die Belüftungspumpe wird durch einen O_2-Sensor gesteuert. Vom Reaktor strömt das geklärte Abwasser in ein Nachklärbecken und von dort in die Kanalisation. Der Überschußschlamm wird in einem Schlammsilo zwischengespeichert, bevor er zur kommunalen Kläranlage gebracht wird. Im Herbst 1995 wurden in einer umfangreichen Meßreihe die wichtigsten Kenngrößen der Anlage bestimmt /4/. Abb. 6 zeigt die BSB_5-Belastung sowie die pH-Werte in Zu- und Ablauf, Abb. 7 die CSB-Belastungen

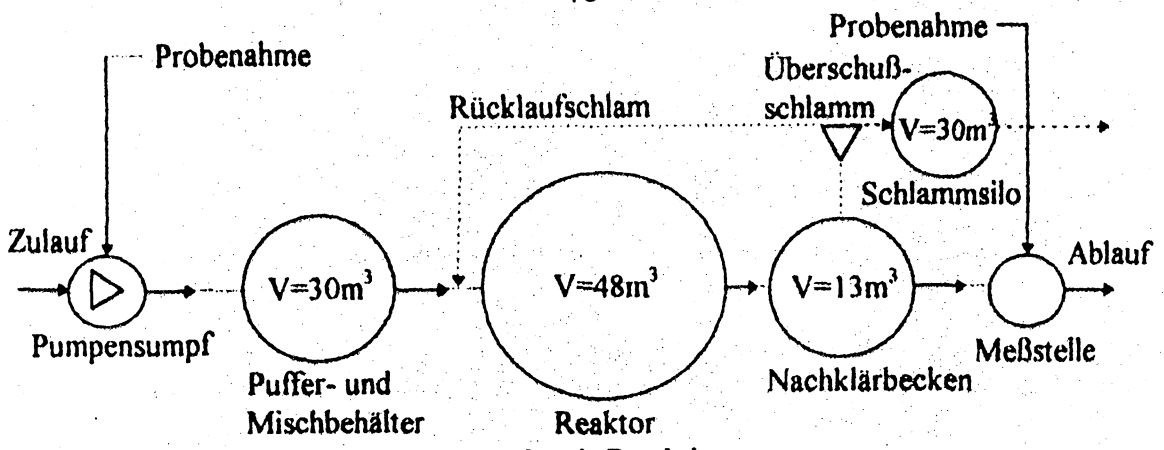


Abb. 5 Schema der Abwasservorbehandlungsanlage in Bornheim

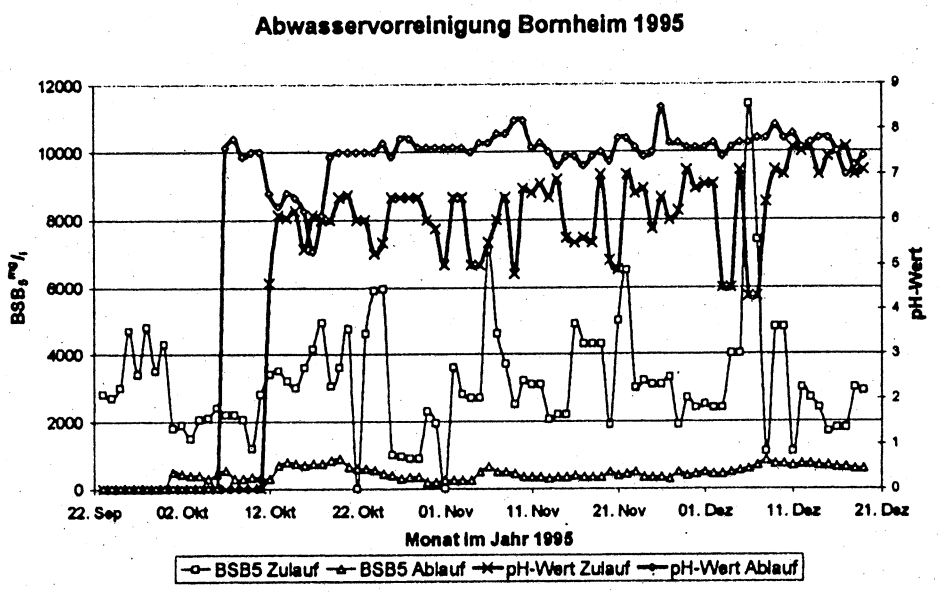


Abb. 6 zeigt die BSB_5-Belastung sowie die pH-Werte in Zu- und Ablauf

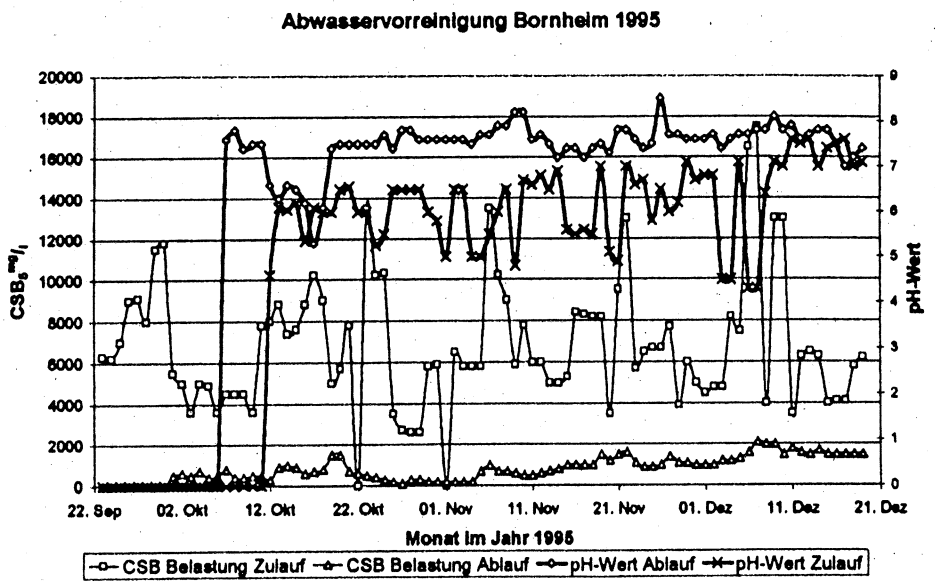


Abb. 7 zeigt die CSB_5-Belastung sowie die pH-Werte in Zu- und Ablauf

Aus den Untersuchungsergebnissen geht hervor, daß die hohe organische Belastung der Weinbauabwässer in der Anlage weitgehend abgebaut wurde.
Für die neu entwickelte Anlage wurde zunächst die Sauerstoffproduktion durch Wasserelektrolyse optimiert. Anschließend wurde das Betriebsverhalten der Anlage getestet.
Zu diesem Zweck wurde sie in dem Weinbaubetrieb „Goldenes Rheinhessen" in Bornheim bei Alzey aufgebaut. Das belastete Abwasser wurde in vorgegebenen Dosierungen (50 l/h, 100 l/h usw.) dem Pumpensumpf (s. Abb. 5) entnommen und über eine Kreiselpumpe sowie einen Durchflußmesser in die dezentrale Kläranlage eingeleitet.
Der Meßaufbau der Anlage ist in Abb. 8 dargestellt. Der prinzipielle Aufbau entspricht dem in Abb. 1. Allerdings enthält die Anlage zwei Bioreaktoren mit Vorlaufkammern, die hintereinander oder parallel geschaltet werden können. Bei den hier beschriebenen Messungen sind die Bioreaktoren hydraulisch parallel geschaltet (Abb. 8). Das im Vorratsbehälter angesammelte Abwasser wird mit einer Pumpe durch einen Durchflußmesser in die Kammer 1 befördert. Von dort wird es mit einer weiteren Pumpe in den Injektor gepumpt, wo es mit reinem Sauerstoff (Druck ca. 1 bar) angereichert wird. Die Sauerstoffinjektion erfolgt nach dem Prinzip der Wasserstrahlpumpe. Beide Bioreaktoren werden mit diesem sauerstoffhaltigen Abwasser versorgt.

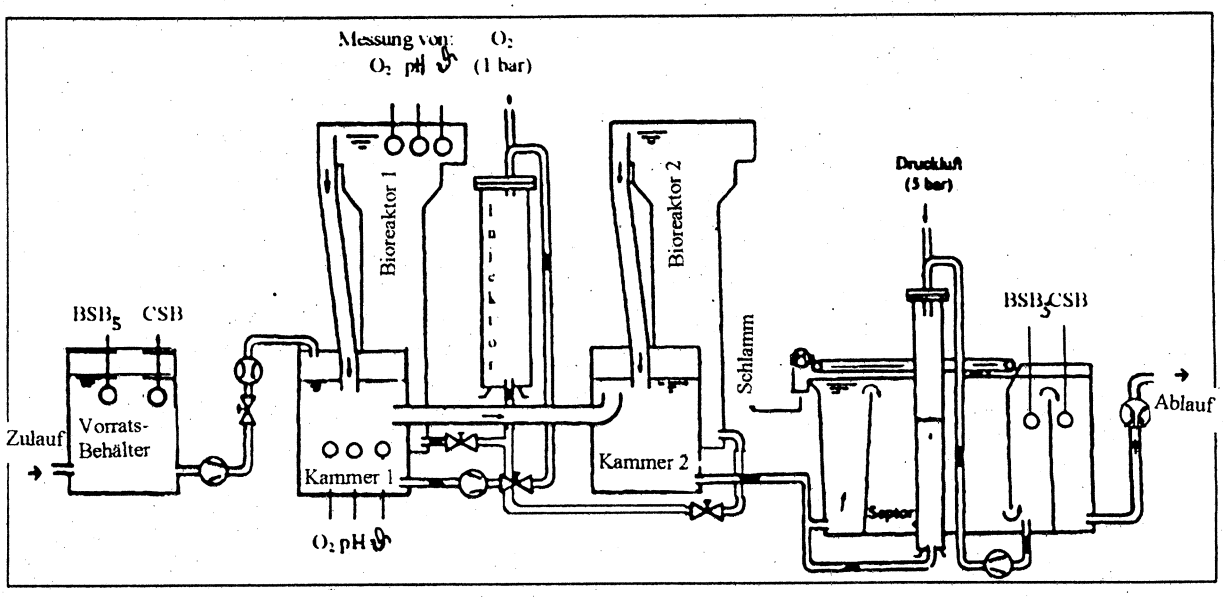


Abb. 8 Meßaufbau und Sensorikplan der dezentralen Kläranlage

Vom Bioreaktor 1 strömt das Abwasser über ein Fallrohr in die Kammer 1, vom Bioreaktor 2 in die Kammer 2. Das mit Sauerstoff versetzte Abwasser durchströmt die Bioreaktoren von unten nach oben. Es soll dort durch die Mikroorganismen, die auf dem Sand siedeln, gereinigt werden. Wenn kein weiteres Schmutzwasser aus dem Vorratsbehälter nachströmt, wird es so lange im Kreis von Kammer 1 (bzw. 2) , Injektor und Bioreaktor 1 (bzw. 2) geführt, bis der Sauerstoffgehalt am Ausgang von Bioreaktor 1 größer als 4 mg/l ist. In diesem Fall kann die Förderpumpe weiteres Schmutzwasser in die Kammer 1 pumpen. Die Wasserniveaus in Kammer 1, Kammer 2, Aquaseptor und Ablauf liegen alle auf gleicher Höhe.
Die Plazierung der Sensoren geht aus Abb. 8 hervor. Sauerstoffgehalt des Abwassers, pH-Werte, Temperaturen, Abwasserzulauf sowie Elektrolyseurdaten sind kontinuierlich über eine Datenerfassungsanlage gemessen, außerdem mehrmals täglich manuell aufgezeichnet worden. BSB_5 – und CSB-Wertewurden von der SLFA in Neustadt/W bestimmt. Die Zulaufwerte sind automatisch über einen Probennehmer als 24-Stunden-Mittelwerte gemessen, die Ablaufwerte sind jeweils um acht Uhr morgens aus der letzten Kammer des Aquainjektors ermittelt worden.

Aus Vorversuchen ergab sich, daß in der Anlage eine stabile Biologie keinen Bestand hatte. Sobald sich ein biologischer Rasen auf dem Sand der Bioreaktoren aufgebaut hatte, verklumpte dieser bald durch Verkleben der Sandkörner, wenn der Durchfluß oder die Sauerstoffzufuhr zu gering waren. Der Sauerstoffinjektor konnte höchstens 100 l/h Sauerstoff eintragen. In den ungefähr faustgroßen Sandklumpen, die im Innern frei von Sauerstoff waren, trat anaerober Abbau auf. Durch die dabei freigesetzten Reaktionsprodukte wurde die Biologie zerstört. Durch höhere Strömungsgeschwindigkeit des Abwassers konnte diese „Verblockung" unterbunden werden.
Die Messungen sind in den Abbildungen 9 bis 16 dargestellt. Es werden nur die Meßergebnisse diskutiert, bei denen BSB_5 – und CSB-Werte ermittelt wurden.
Die Anlage wurde am 19.5., am 23.5. und am 27.5.1998 mit Belebtschlamm aus dem Bioreaktor der Kläranlage des Weinbaubetriebs (Abb. 5) geimpft. Am 30.5. wurde sie entleert und mit neuem Abwasser aus dem Mischbehälter des Weinbaubetriebs gefüllt. Von diesem Zeitpunkt an sank der pH-Wert de Abwassers von ca. 8 auf 4,5 am 3.6. und blieb auf diesem Wert bis zum 13.6., als Lauge, Harnstoff und Phosphat zugesetzt wurden, so daß der pH-Wert am 16.6. bis auf 8 anstieg (Abb. 11, 12).
Mit dem sinkenden pH-Wert (saures Abwasser aus dem Weinbaubetrieb) sank einige Stunden später auch der Sauerstoff-Gehalt, d.h. die Sauerstoffzehrung nahm zu (Abb. 9, 10). Mit steigendem pH-Wert ab dem 13.6. fiel der Sauerstoffgehalt im Bioreaktor und in Kammer 1 auf Null, bei gleichbleibendem Sauerstoffeintrag in das Abwasser. Es ist wahrscheinlich, daß ab dem 13.6. 98 biologischer Abbau stattfand.
Der zeitliche Verlauf der Abwassertemperatur im Bioreaktor ist in Abb. 13 dargestellt, der Abwasserdurchfluß in Abb. 14, die BSB_5- und CSB-Werte ergeben sich aus den Abb. 15 und 16. Wie schon oben erwähnt, sind die Zulaufwerte 24-Stunden-Mittelwerte, die Ablaufwerte ergeben sich aus Messungen, die um acht Uhr des angegebenen Tages gemacht wurden.
Schlammbildung konnte nur in sehr geringem Umfang festgestellt werden.
Voraussetzung für einen nennenswerten Abbau war ein relativ niedriger pH-Wert (pH<5) und Eine Mindestkonzentration von Sauerstoff (>4 mg/l). Der Sauerstoffeintrag in das Abwasser kann dadurch verfälscht worden sein, daß in den Fallrohren zwischen Bioreaktor und Kammer ein intensiver Austausch mit der umgebenden Atmosphäre stattfand.

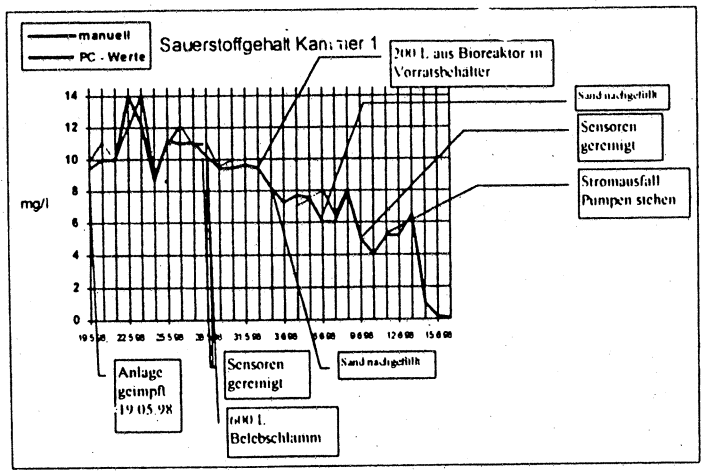


Abb. 9
Sauerstoffgehalt Kammer 1

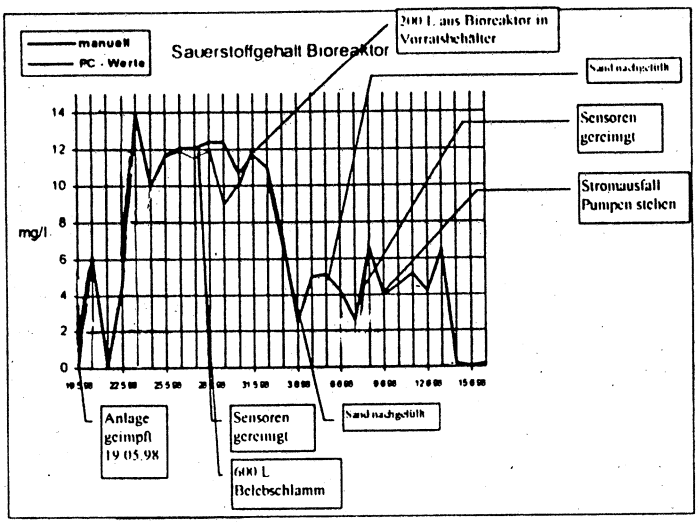


Abb. 10
Sauerstoffgehalt Bioreaktor

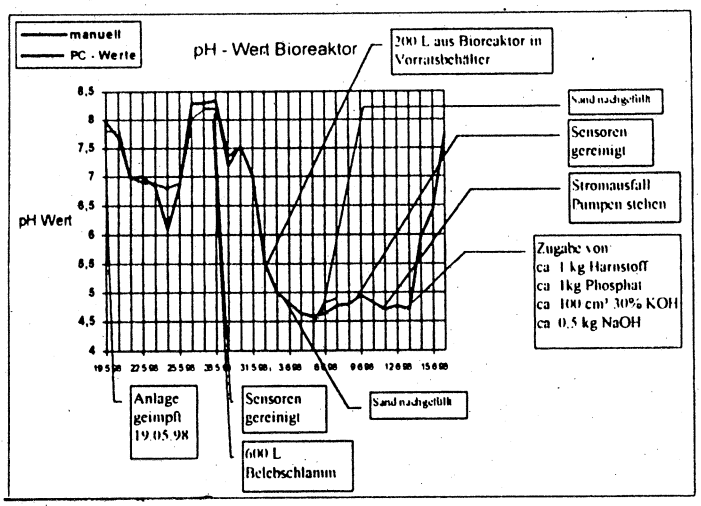


Abb. 11
pH-Wert Bioreaktor

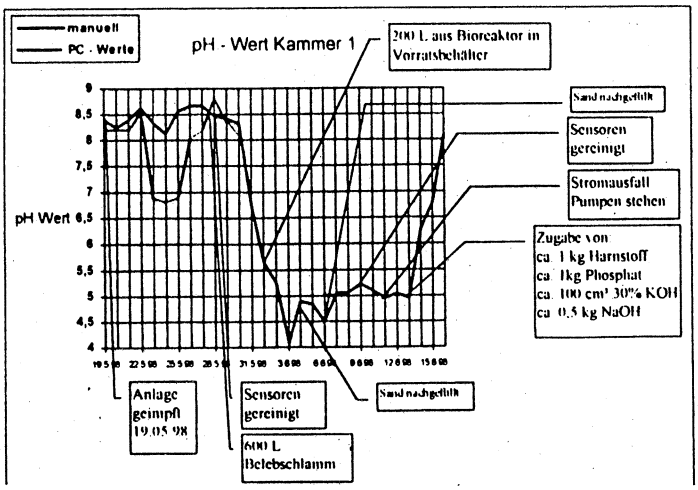


Abb. 12
pH-Wert Kammer 1

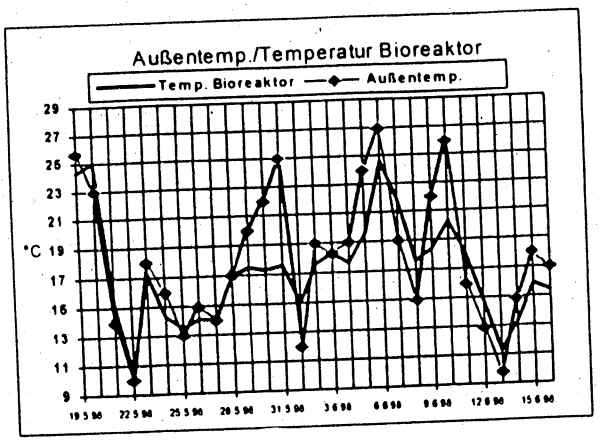


Abb. 13
Außentemperatur und Temperatur im Bioreaktor

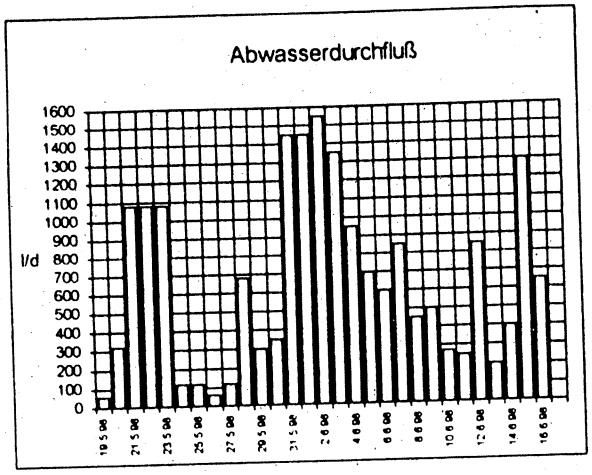


Abb. 14
Abwasserdurchfluß/Tag

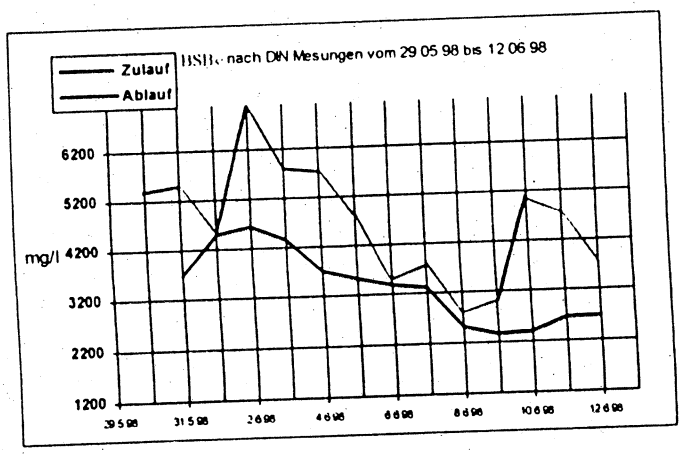


Abb. 15
BSB_5-Werte des Abwassers

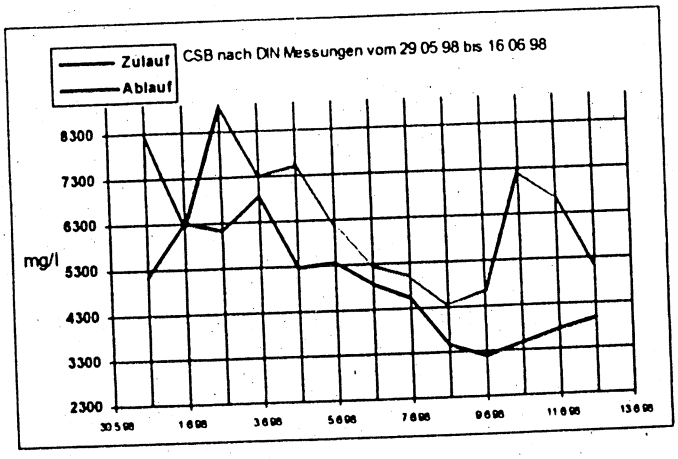


Abb. 16
CSB-Werte des Abwassers

4. Auswertung der Messungen

Aus den Messungen können nur aussagekräftige Konsequenzen für die Tage, an denen BSB_5- und CSB-Werte im Zulauf und Ablauf bestimmt worden sind, gezogen werden. Das sind die Tage vom 30.5. bis 15.6.1998. An all diesen Tagen hat ein mehr oder weniger ausgeprägter Abbau stattgefunden. Starker Abbau war am 2.6. und am 1o.6.98.Das ist die Zeit, in der der Sauerstoffgehalt in Kammer 1 wie im Bioreaktor von ca. 10 mg/l auf etwa 4 mg/l abfiel. Parallel dazu fiel der pH-Wert von ca. 8 auf 4,5 im Bioreaktor und in Kammer 1. Die festgestellte Sauerstoffzehrung spricht für einen chemischen Abbau der Biomasse bei niedrigem pH-Wert. Eine Biologie konnte im Abwasser nicht nachgewiesen werden. Der Grund dafür mag einerseits der hohe Sauerstoffgehalt sein (>4 mg/l), der die sich bildende Biologie sofort oxidierte, andererseits der niedrige pH-Wert sowie zeitweise Reaktionsprodukte aus anaerobem Abbau.

Aus den Meßergebnissen kann geschlossen werden:

- Eine stationäre Biologie bildete sich auf Grund des hohen Sauerstoffgehalts nicht aus, da die sich bildende Biologie sofort oxidiert wurde.
- Es fand kräftiger chemischer Abbau statt, welcher optimiert werden könnte. Der chemische Abbau wird vermutlich durch Enzyme katalysiert, die im Abwasser enthalten sind. Diese Enzyme stammen aus dem biologischen Rasen im Zuleitungssystem der Kläranlage.
- Der Energieverbrauch der Anlage ist sehr hoch, da die Pumpen kontinuierlich laufen müssen, um die Sandschüttung in den Bioreaktoren in der Schwebe zu halten.

Die Sauerstoffversorgung durch den Elektrolyseur funktioniert einwandfrei. Sie konnte in ihrem Wirkungsgrad und Betriebsverhalten verbessert werden.

Die verwendete Kläranlage muß für die Behandlung von Weinbauabwässern umgebaut werden. Ein geeignetes System ist in Abb. 5 skizziert. Diese Kläranlage kann in ihrer Abbauleistung dadurch verbessert werden, daß das Abwasser im Pufferbehälter stark mit Sauerstoff angereichert wird – so stark, daß sich keine Biologie und damit Schlamm bilden kann, aber ein beträchtlicher chemischer Abbau stattfindet. Eine schematische Darstellung dieses Reaktors ist in Abb. 17 gegeben (W+A-Hochleistungsreaktor).

Durch die vorgeschlagene Maßnahme wird die Abbauleistung erhöht und die Störanfälligkeit reduziert, da Belastungsspitzen, die die Biologie schädigen,schnell chemisch abgebaut werden. Der Schlammanfall verringert sich.

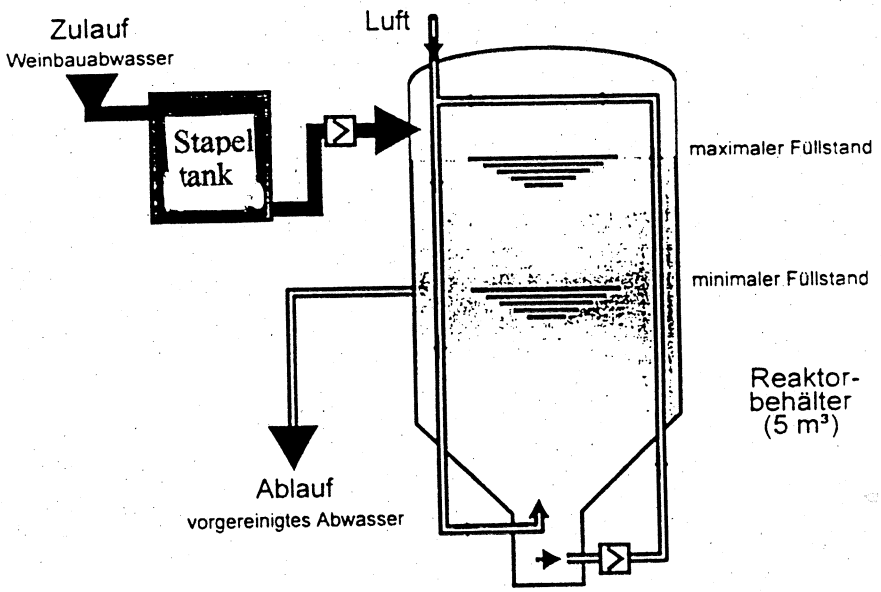


Abb. 17 Verfahrensschema Hochleistungs-Kompakt-Reaktor (W&A)

5. Verwendung des Wasserstoffs zur Heißdampferzeugug

Wie bereits beschrieben, wird zur Sauerstoffproduktion Wasserspaltung durch Elektrolyse eingesetzt. Der dabei entstandene Wasserstoff wird in die Atmosphäre abgelassen und steht somit zu keiner weiteren Verwendung zur Verfügung. Da Wasserstoff als Brenngas verwendet werden kann, bietet es sich hier an, dieses Gas zum Beheizen eines Heißdampferzeugers zu nutzen.
In Weinbaubetrieben besteht ein großer Bedarf an Heißdampf zur Reinigung und Sterilisierung von Behältern und Apparaten. Der Heißdampf wird normalerweise in speziellen Heißdampferzeugern produziert, die elektrisch oder gasbetrieben sind. Ein mit Erdgas betriebener Heißdampferzeuger kann so umgebaut werden, daß er mit Wasserstoff betrieben werden kann. Der Wasserstoff fällt als Abfallprodukt bei der Sauerstofferzeugung im Elektrolyseur an. Der Wasserstoff soll nun nicht in die Umwelt abgelassen werden, sondern zur Erzeugung des Heißdampfes verwendet werden und damit die Wirtschaftlichkeit der Anlage erhöhen (s. Abb. 18).

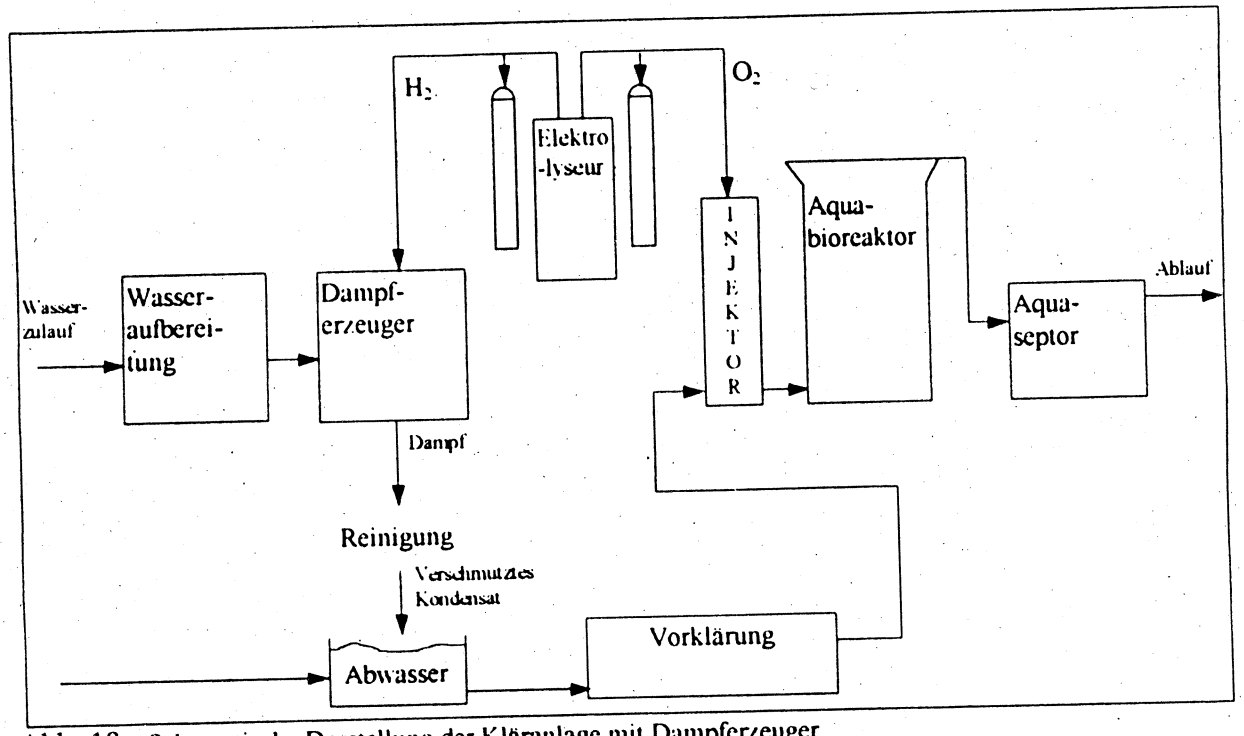


Abb. 18 Schematische Darstellung der Kläranlage mit Dampferzeuger

Da zur Reinigung nur kleine Leistungen benötigt werden, sollte der Dampferzeuger eine möglichst kleine Leistung besitzen. Der Grenzwert sollte bei P_H = 30kW liegen. Außerdem ist darauf zu achten, daß der Dampfverbrauch nicht die Wasserstoffproduktion des Elektrolyseurs überschreitet. Die Wasserstoffproduktion liegt bei ca. 400 l/h.

Literatur

1. S. Kramer — Wasserstofftechnik 2/96 S. 6-60
2. GTZ — Abwassertechnologie Springer 1988
3. E. Zimmer — Wasserstofftechnik 2/96 S. 106-111
4. L. Coppik — Staatl. Lehr- und Forschungsanstalt Neustadt/W. Weinbau-Abwässer-Symposium 30.8.1996

Diplomarbeiten Huxel (FHW 1998), Ruhe (FHW 1999), Frisch (FHW 1998)

7169 Elsevier HE Ms 813 September 1998 MFC

PERGAMON

Int. J. Hydrogen Energy 00 (1998) 000-000

International Journal of HYDROGEN ENERGY

Hydrogen and carbon dioxide as raw materials for an ecological energy—technology

S. Schulien[a,*], G. Sandstede[b], H.W. Hahn[c]

[a] AGAFE, Am Brückweg 26, D-65428 Rüsselsheim, Germany
[b] STC, Esperantostr. 5, D-60598 Frankfurt, Germany
[c] vH-S, Schloßplatz 8, D-68723, Schwetzingen, Germany

Abstract

The Fachhochschule Wiesbaden has developed and operated two decentral energy-systems of hydrogen-technology where the hydrogen serves as storage-medium for solar and wind-energy. The principal economical results are described. It is evident that the hydrogen-price is too high for energy-technology. One of the reasons is the high storage-price for pressurized hydrogen. A price-reduction is possible if also the electrolytical oxygen is used, for instance in a waste-water purification plant. The storage problem can be solved if one lets react the hydrogen with carbon dioxide. The reaction product is methanol, a liquid energy-carrier for which exists the distribution infrastructure. The principles of this energy-technology (to store energy by reaction-products of hydrogen and carbon-dioxide) are known, because nature has applied it for millions of years in plants. But a lot of details have to be developed. The introduction of this new technology requires considerable efforts in the development of procedures, catalysts, apparatus, materials. There are many possibilities to solve the problem; the optimized one has to be found. © 1998 Elsevier Science Ltd. All rights reserved.

1. Advantages and disadvantages of hydrogen as an energy carrier

Solar energy and wind energy are offered in an irregular manner with poor intensity; the energy consumer asks for continuous delivery. Furthermore, the regenerative energies ought to be used for traffic application, independent from existing energy-supply systems.

From this follows that for the practical application of regenerative energies, they need an efficient storage-medium. Hydrogen is the optimal storage-medium and energy-carrier for regenerative energies, for it can be produced easily by water-electrolysis, it can be stored and transported by well-known technologies and its combustion product is pure water if it is burned in the right manner.

Since 1985, the Fachhochschule Wiesbaden has developed, constructed and optimized a wind-hydrogen system with an installed power of 20 kW [1], and since 1990 a solar-hydrogen system of 2 kW [2]. The systems are described in Figs 1 and 2. The consumers for these systems—motors, burners, conventional and catalytic heatings, lamps, refrigerators—have also been developed, constructed and tested [3].

Figure 3 shows the energy-price of these systems as a function of the installed power. Little hydrogen-energy systems (less than 20 kW) are not efficient; wind-hydrogen systems supply cheaper energy than solar-hydrogen systems.

The experiments have shown that the technical problems of alcalic pressure electrolizers are solved and that there is a great potential of price reduction for these electrolizers. A great problem of these small decentral energy systems is the very expensive storage of hydrogen in big pressure vessels.

For the introduction of hydrogen as an energy carrier, there must be built up the complete technical and organisational infrastructure for storage, transport, distribution and use of hydrogen. Mainly in transportation systems, large technical and organisational difficulties have to be surmounted.

* Corresponding author

S0360-3199/98/$19.00+0.00 © 1998 Published by Elsevier Science Ltd. All rights reserved
PII: S0360-3199(98)00051-2

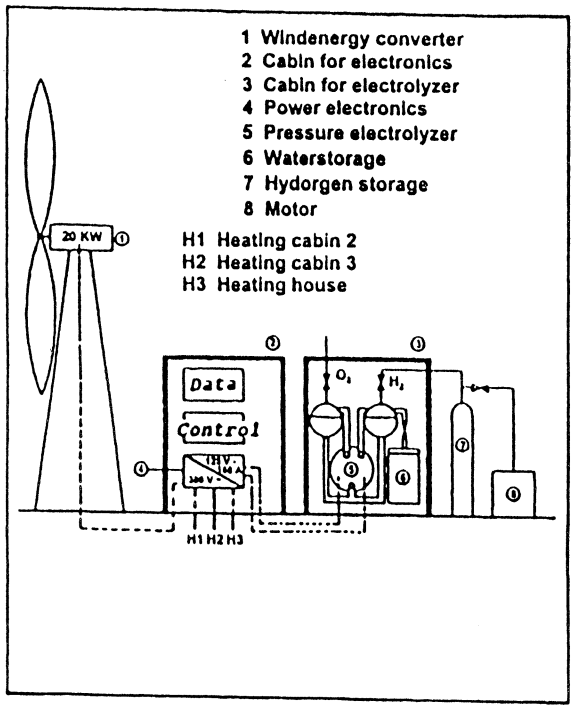


Fig. 1. Wind hydrogen system.

These problems may prevent the introduction of hydrogen technology for a long time or forever. In opposition to this, liquid energy-carriers have great advantages, for almost the complete infrastructure of traffic is based upon liquid fuels.

2. From hydrogen-technology to artificial photosynthesis

How can gaseous hydrogen, produced by regenerative energies, be transformed into a liquid energy carrier which might be stored without losses, and be easy to transport and handle? Liquid hydrogen is no solution because of the high costs and difficult technology. It is useful to know how nature solves the problem of energy storage and transportation [4].

With water, absorbed by the roots and CO_2 from the atmosphere, plants produce biomass with the help of solar radiation, for instance, sugars, oils, etc. In this process, oxygen is produced which is released to the atmosphere by the leaves. Simplified, one can formulate the process by the equation:

$$6H_2O + 6CO_2 + \text{solarenergy} \leftrightarrows C_6H_{12}O_6 + 6O_2. \quad (1)$$

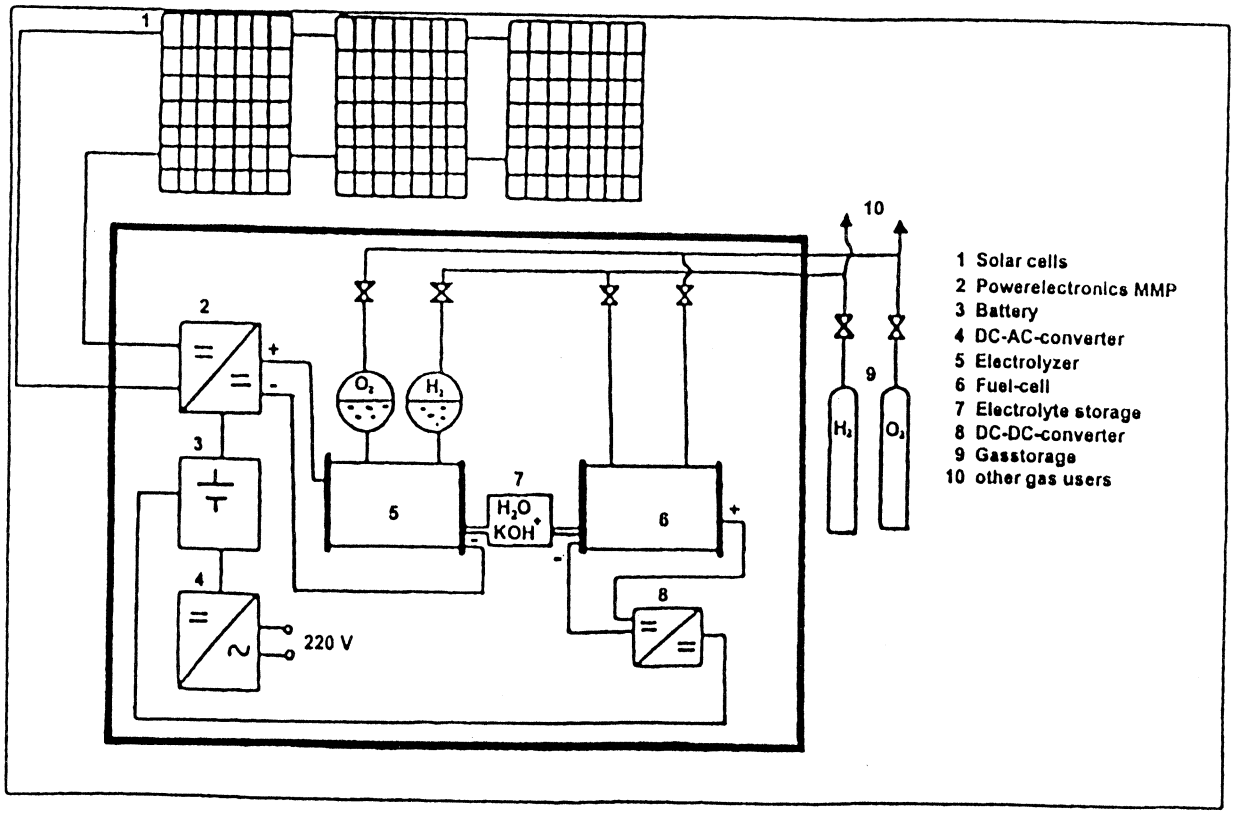


Fig. 2. Solar hydrogen system.

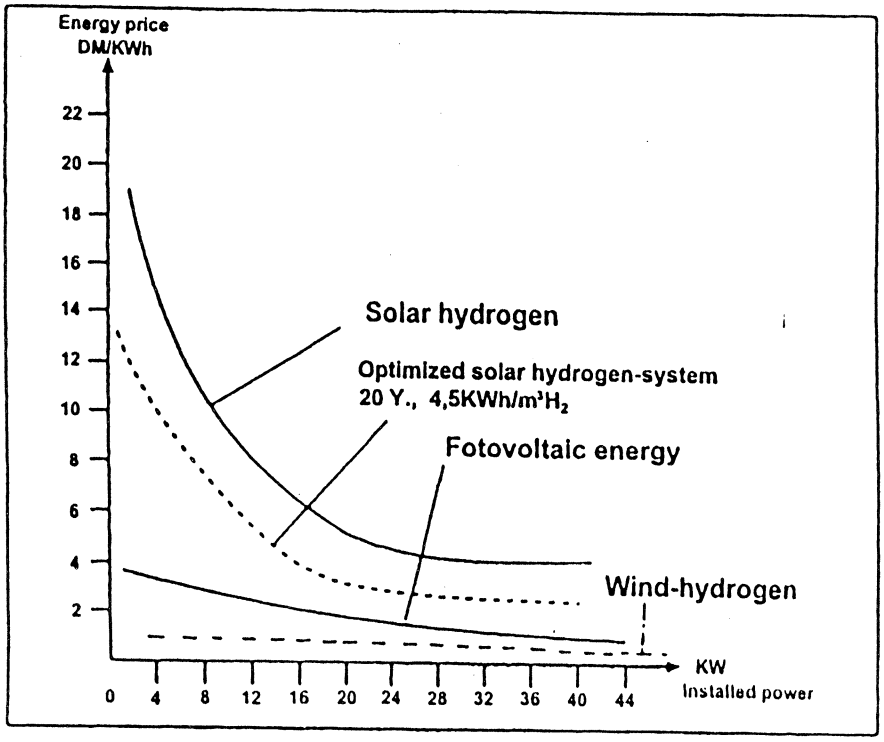


Fig. 3. Energy price as a function of installed power. Prices calculated according to annuity method, capital costs (8%), without oxygen application.

$C_6H_{12}O_2$ (glucose) serves as an energy reservoir for the plant. Solar energy is used for the dissociation of water in hydrogen and oxygen.

$$H_2O + \text{energy} \rightarrow H_2 + \tfrac{1}{2}O_2. \quad (2)$$

The hydrogen of this process reacts with the atmospheric CO_2 to build via several steps $C_6H_{12}O_6$ (glucose), oils, biomass.

Equation (1), read from left to right, describes the production of biomass (photosynthesis); read from right to left, its decomposition with oxygen to water and CO_2.

The solution of our storage problem is given by eqns (1) and (2).

If the hydrogen which is produced by water electrolysis reacts with CO_2, liquid hydrocarbons are synthesized, for instance:

$$3H_2 + CO_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O (\Delta H = -49\,\text{kJ/mol}) \quad (3)$$

The technology to produce methanol CH_3OH is well known. Methanol is an efficient energy carrier and raw material for chemical industry. In context with regenerative energies we see here a hopeful way for a new energy technology [5–7]. There are other variants to process (3) which have to be examined.

In this context CO_2 is not a pollutant but a valuable raw material for energy technology and chemical industry.

The CO_2 may be produced by biomass gasifying (eqn (1) from right to left) cement production, fermentation processes, water purification plants etc.; even atmospheric CO_2 may be used [8].

It is the task of science to develop optimized processes for the production of liquid fuels from hydrogen and CO_2. Figure 4 shows a possibility. Hydrogen and oxygen are produced in an optimized water electrolyzer; the CO_2 is a product of wood gasifying. Electrolytic oxygen is used in an advantageous manner for biomass combustion. The gases CO_2 and H_2 are mixed and injected into a catalytic vessel of appropriate temperature and pressure, where they react to methanol.

With a 50-kW electrolyzer (11 m^3/h H_2) and CO_2 from wood gasifying (eqn 3), one can produce 6.7 l/h methanol. One can use biogas for the methanol synthesis

$$CH_4 + CO_2 + 2H_2 \rightarrow 2CH_3OH \quad (4)$$

In this case, the output of the methanol-reactor is 20 l/h. The hydrogen comes from the 50-kW electrolyzer. Another way to store the electrolytical hydrogen is to hydrogenize biomass, e.g., add hydrogen to oils and fats, which is a well known technology.

Electrolytical oxygen can always be used as an oxidant in combustion or fermentation processes—eqn (1) read from right to left. It is not only the combustion of fossil energy carriers, which is described by eqn (1), but also the decomposition of biological material in water puri-

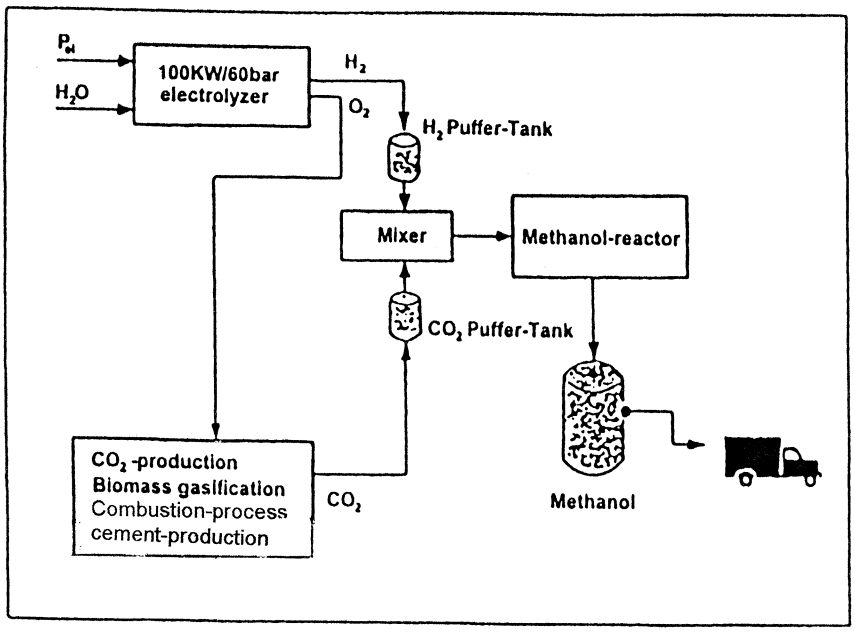


Fig. 4. Schematic description of a methanol production plant.

fication plants. This decomposition occurs by help of microorganisms which need the energy from this decomposition and which produce CO_2 and water. In nature we have a closed energy and mass circuit. In the beginning and in the end of the process is water and CO_2. Energy and waste are parts of the same circuit.

Figure 5 shows a water purification plant which has been developed and constructed in the Fachhochschule Wiesbaden for the treatment of viticulture waste water. The electrolizer produces the oxygen which is needed for the decomposition of biological material (from the cleaning of barrels, wine-presses, bottles, etc.) (eqn 1). The oxygen is mixed with the waste water in an Aquainjector. The oxygenized water flows through the Aquabioreactor, where the decomposition of biological material occurs with help of microorganisms. The purified water flows into the Aquaseptor where non digested particles are separated. The electrolytical oxygen

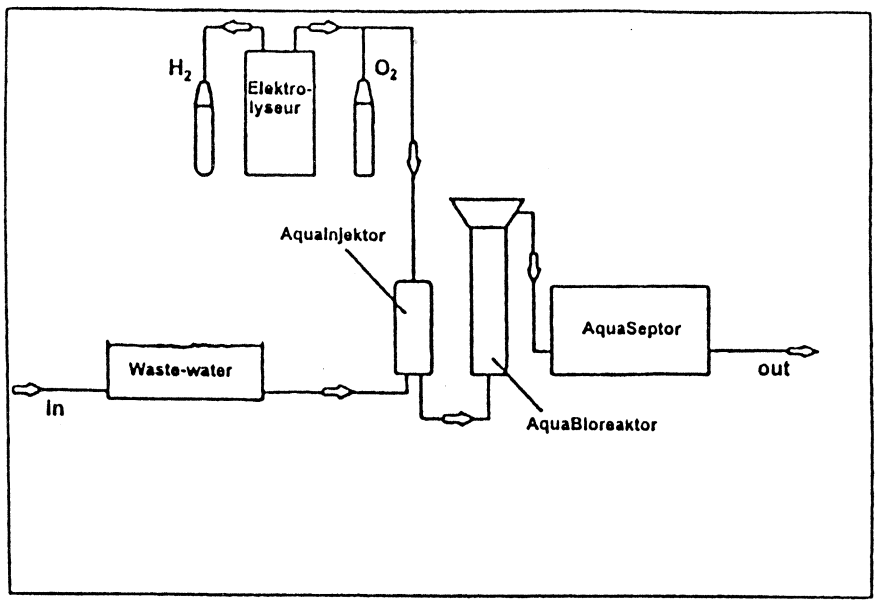


Fig. 5. Schematic description of a water purification plant.

applied in a waste-water plant—reduces the price of hydrogen (Fig. 3).

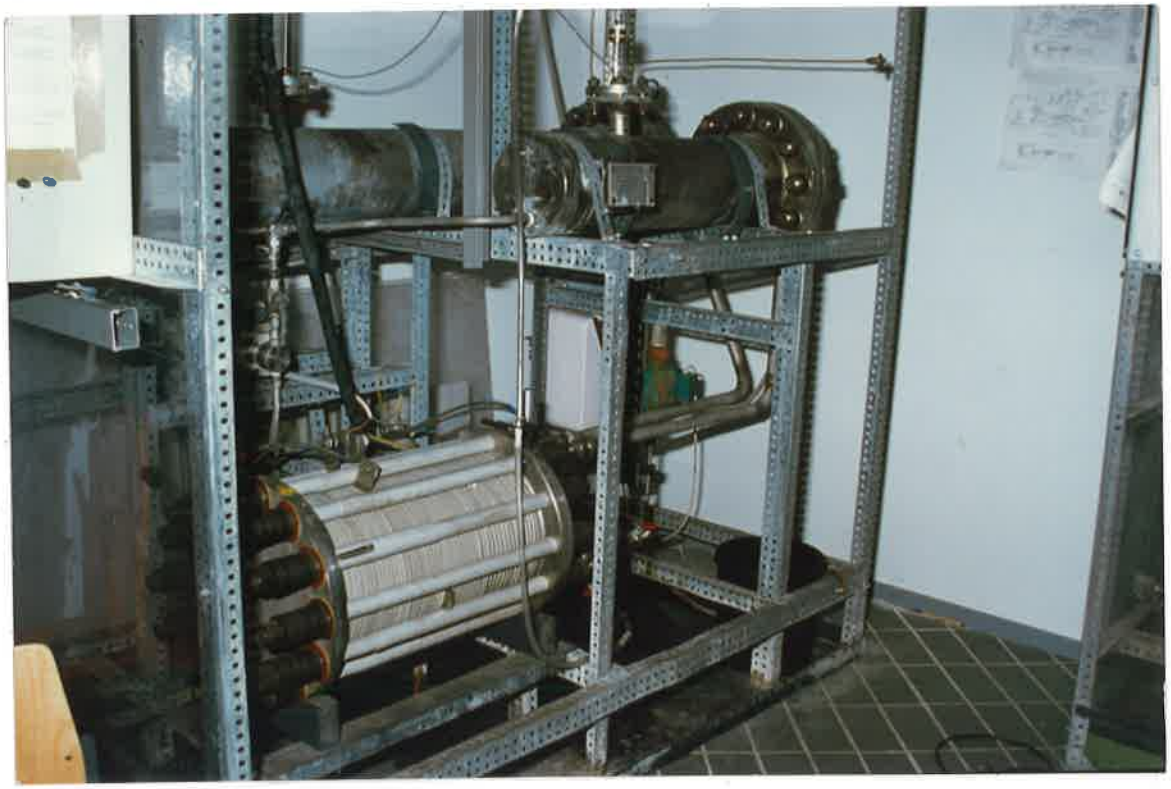
The described system of energy production and waste use is an example for circuit economy in energy-technology. In the future we have a very increasing energy demand and thus the consumption economy in energy-technology has to come to its end: petroleum is too valuable to be burned in cars and heaters—it must be used for the production of medicaments, plastics, foods, fibres, etc. It is absurd energetically to dissociate petroleum-molecules for energy production and to synthesize plastics from hydrocarbon with a big energy input. The future energy-technology will be a circuit-technology as realized by nature in the photosynthesis—and decomposition-process. The hydrogen for this technology will be produced by regenerative energies. Petroleum is a raw material for chemical industry, hydrogen and carbon dioxide for energy-technology.

References

[1] Schulien S, Steinmetz M. Gas, Erdgas 1989;130:678–86.
[2] Bernhard P, Schulien S. Gaswärme International 1994;43:550–5.
[3] Schulien S, Dahlinger D, Fender M. Wasserstofftechnik 1993;6/93:1–44.
[4] Maurer/Winkler. Biogas, C.F. Müller, 1980.
[5] Stucki S, Schuler A, Constantinescu M. Int. Hydrogen Energy 1995;20:653–63.
[6] Specht M, Bandi A. Forschungsverbund Sonnenenergie. Themen 94/95.
[7] Plzak V, Wendt H. Chem.-Ing.-Tech. 1992:64:1084–95.
[8] Specht M, et al., Electrochemical CO_2 Recovery and Reduction Methods for Fuel Generation. Proc. of The Int. Symp. on CO_2. Tokyo, Japan. 1993.

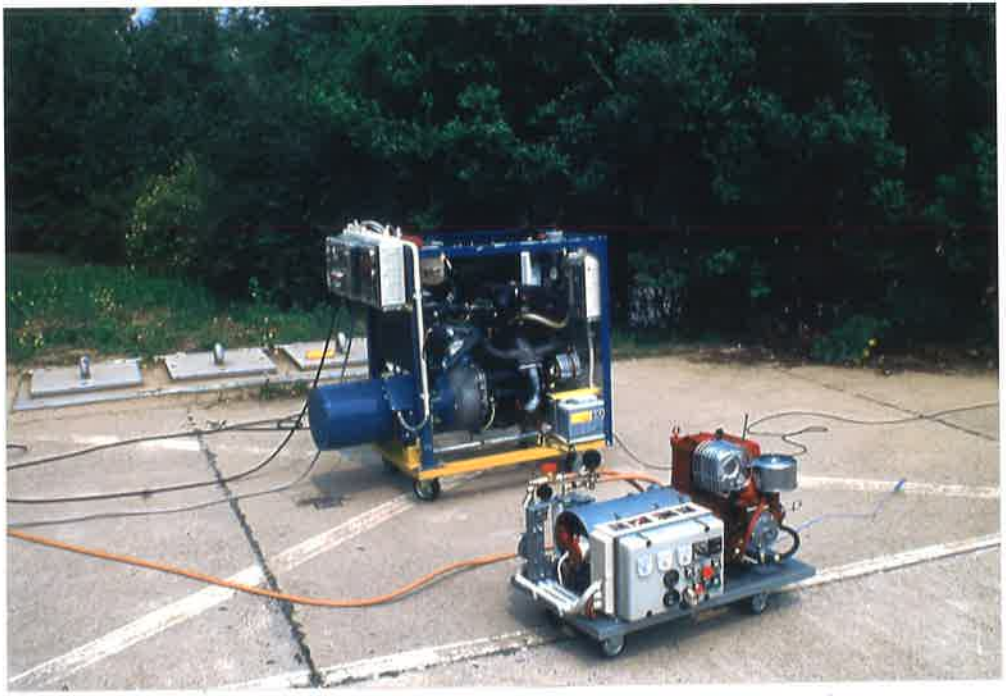
Solaranlage Fachhochschule Wiesbaden in Rüsselsheim

Brennstoffzelle und Elektrolyseur im Wasserstofflabor der FHW



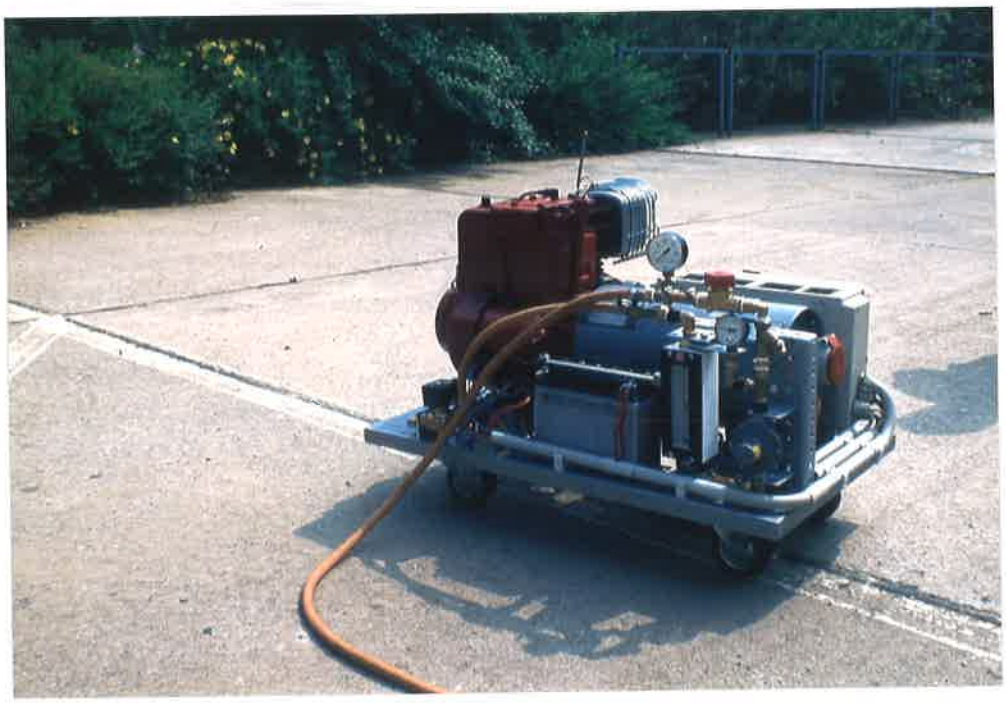
Testelektrolyseur im Wasserstofflabor der FHW

Testelektroyseur im Wasserstofflabor der FHW



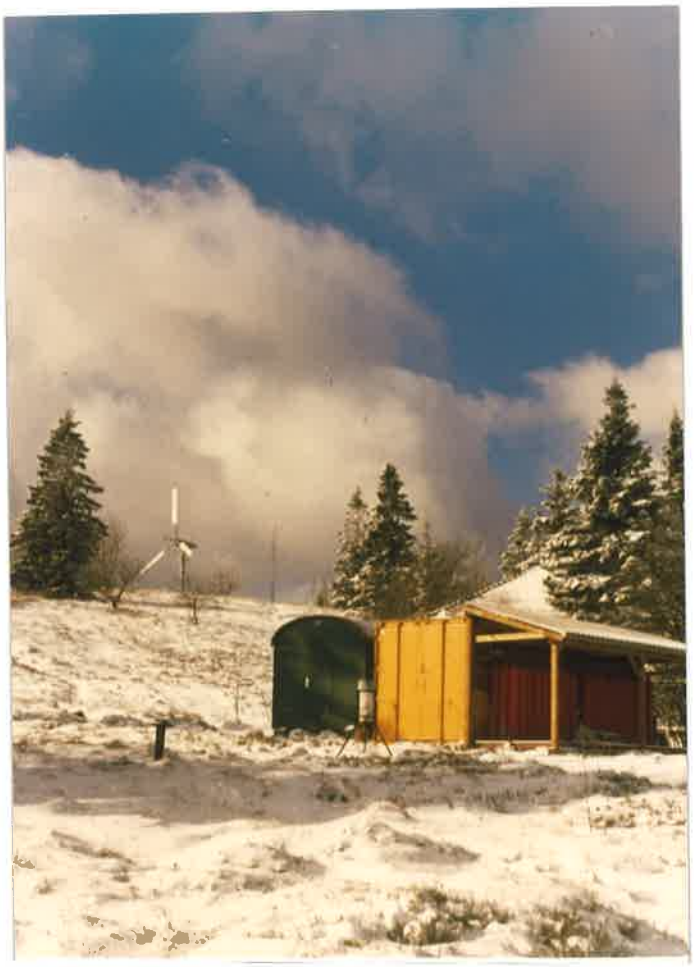
8.1988

Opelmotor und Motor von Briggs und Stratton im Wasserstofflabor der FHW



8.1988

Wind-Wasserstoff-Anlage auf dem kleinen Feldberg



Wind-Wasserstoff-Anlage auf dem kleinen Feldberg

19.11.89

Wind-Wasserstoff-Anlage auf dem kleinen Feldberg

26.2.90

12.1987

26.2.1990

6.1988

Wind-Wasserstoff-Anlage auf dem kleinen Feldberg

Dezentrale Kläranlage mit Sauerstoff aus Elektrolyseur