

P. Bernhard und S. Schulien

Optimierungsmessungen an einer Energieversorgungsanlage auf der Basis von solarem Wasserstoff

Zusammenfassung Wasserstoff als praktisch unerschöpflicher umweltfreundlicher Energieträger mit hohem Energiegehalt gilt als eine Option für die Energieversorgung der Zukunft. Unter diesem Gesichtswinkel ist es die Aufgabe von Wissenschaft und Technik, sich mit der Entwicklung eines diesbezüglichen Energiesystems zu befassen. Ein solches alternatives Energiesystem, das auf der Basis von solarem Wasserstoff basiert, wurde an der Fachhochschule Wiesbaden entwickelt, wo es seit 1991 im Dauerbetrieb arbeitet. Aufbau und Arbeitsweise des Systems sind in diesem Beitrag beschrieben. Die Untersuchungen, ihre Ergebnisse und Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit werden mitgeteilt. Abschließend werden Anwendungsmöglichkeiten behandelt.

Optimization measurements on a solar-hydrogen based energy supply system

Summary Hydrogen, being a practically inexhaustible and environmentally friendly energy source with a high energy content, is certainly one option for future energy supplies. In view of this, the task of science and technology is to take up the development of the relevant energy system. Such an alternative energy system, based on solar hydrogen, has been developed at the Technical University of Wiesbaden, where it has been in continuous operation since 1991. The structure and manner of function of this system are described in this article. The tests performed, their results and observations on economy are provided. Potential applications are then discussed.

Mesures d'optimisation effectuées sur une installation d'approvisionnement en énergie sur la base d'hydrogène solaire

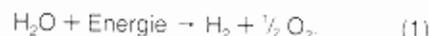
Résumé Comme source d'énergie non polluante, pratiquement inépuisable et à teneur élevée en énergie, l'hydrogène constitue une option dans l'avenir pour l'approvisionnement en énergie. Sous cet angle, c'est à la science et à la technique qu'il incombe de se consacrer au développement d'un système énergétique qui utilise cette source. Un tel système énergétique en alternative, fonctionnant à base d'hydrogène solaire, a été mis au point à l'école supérieure technique de Wiesbaden où il est en marche continue depuis 1991. Dans la présente communication, les auteurs décrivent la conception et le fonctionnement du système. Ils font part des essais effectués et des résultats obtenus ainsi que des études pour l'obtention d'une rentabilité suffisante. Pour terminer, ils mentionnent un certain nombre de possibilités d'application.

Dipl.-Ing. Peter Bernhard, Professor Sigurd Schulien, Fachhochschule Wiesbaden (FHW), Projekt Wasserstofftechnik, Rüsselsheim. Die Verfasser danken dem hessischen Ministerium für Umwelt und Energie sowie dem hessischen Wirtschaftsministerium für die Förderung dieser Arbeiten.

Einleitung

Da fossile Energieträger 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 — nicht nur in einer unbedeutenden Nische — muß das Problem der Energiespeicherung gelöst sein. Hier bietet sich Wasserstoff als Energieträger und -speicher an: Er ist ein praktisch unerschöpflicher umweltfreundlicher Energieträger mit hohem Energiegehalt (rund 39 kWh/kg). Er kann durch Zersetzung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gewonnen werden gemäß der Reaktionsgleichung



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



Sein Verbrennungsprodukt mit Sauerstoff ist reines Wasser, es tritt also keine Umweltbelastung auf. Bei einigen Verbrennungsprozessen mit Luft können Stickstoffoxide entstehen.

Beschreibung der Anlage

Die Fachhochschule Wiesbaden hat ein dezentrales Energieversorgungssystem der solaren Wasserstofftechnik aufgebaut, das seit 1991 im Dauerbetrieb arbeitet. Dieses System dient dazu, Optimierungsmessungen an Komponenten und Betriebsprogrammen durchzuführen.

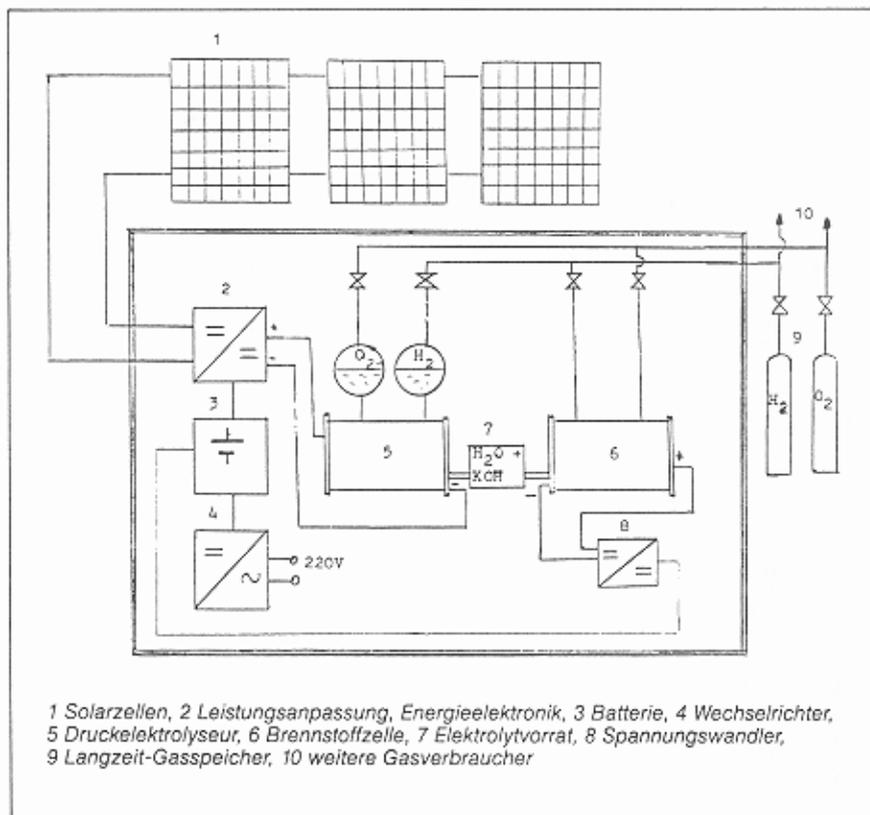
Bild 1 zeigt eine schematische Darstellung dieses dezentralen Energieversorgungssystems. Ein Solargenerator 1 mit einer installierten Leistung von etwa 1,5 kW_p lädt über den MPP-Tracker 2 eine Batterie 3 (Kapazität rund 350 Ah). Die Batterie speist über den Wechselrichter 4 ein Inselnetz (220 V, 50 Hz). Die Leistung, die die Batterie oder das Inselnetz nicht aufnimmt, wird im Druckelektrolyseur 5 zum Zersetzen von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff verwendet (Reaktion (1)). Die Gase fallen mit einem Druck von

20 bar an und werden im 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 etwa 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 Wasserbereitung für die Brennstoffzelle entfällt.

Messung der Energieflüsse

Die in Bild 1 skizzierte Energieversorgungsanlage kann in verschiedenen Betriebsmoden gefahren werden. Folgende Betriebsprogramme werden untersucht:

1. Die gesamte Solarenergie fließt in den Elektrolyseur, von dort in Gasspeicher und Brennstoffzelle. Die Brennstoffzelle lädt die Batterien von Elektroautos (Nachladung) oder gibt ihre Energie über einen Wechselrichter in ein 220-V-Inselnetz.
2. In einem Inselnetz geht nur die Überschußenergie der Solarzellen in den Elektrolyseur. Die Solarzellen speisen ihre Energie über einen Wechselrich-



1 Solarzellen, 2 Leistungsanpassung, Energieelektronik, 3 Batterie, 4 Wechselrichter, 5 Druckelektrolyseur, 6 Brennstoffzelle, 7 Elektrolytvorrat, 8 Spannungswandler, 9 Langzeit-Gasspeicher, 10 weitere Gasverbraucher

Bild 1: Schematische Darstellung des Solar-Wasserstoff-Systems

Fig. 1: Schematic view of the solar hydrogen system

Fig. 1: Schéma du système à hydrogène solaire

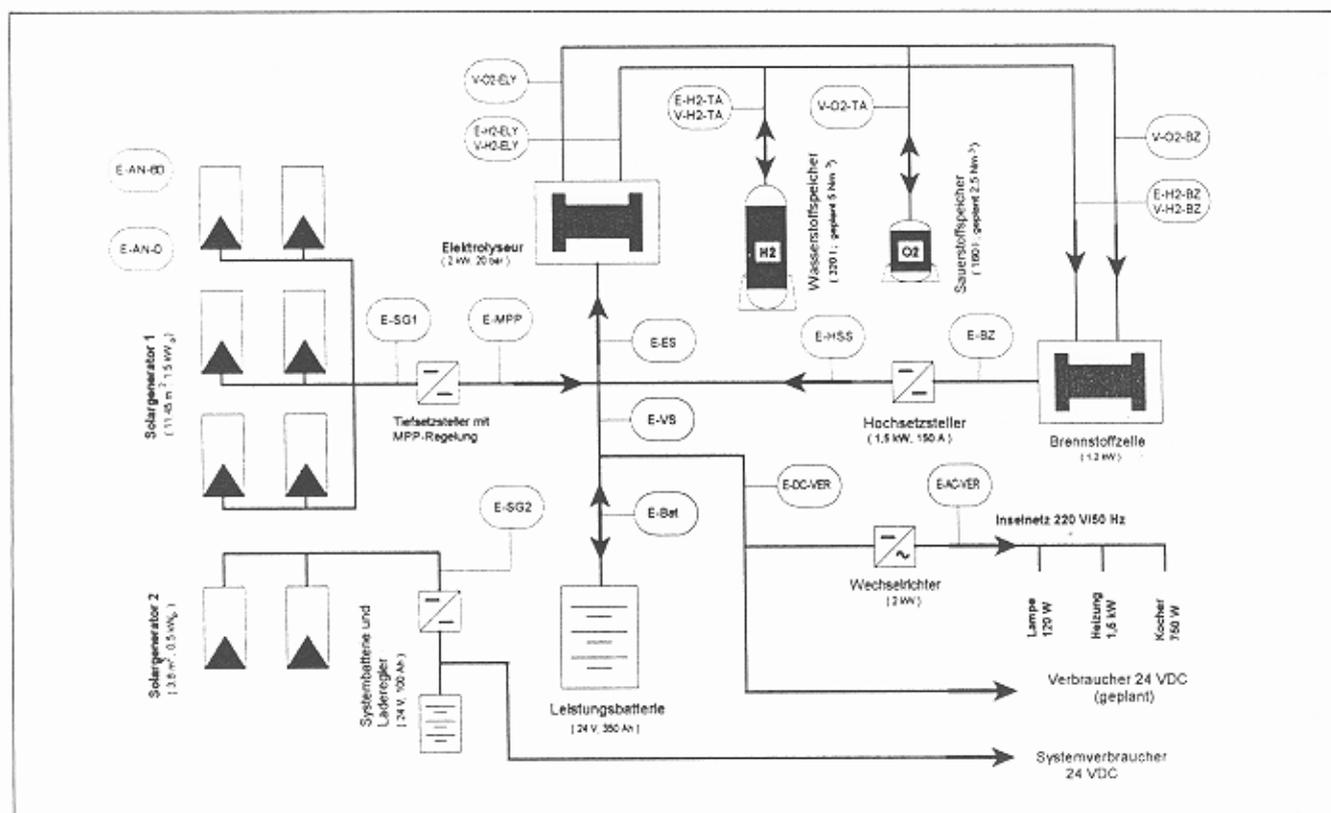


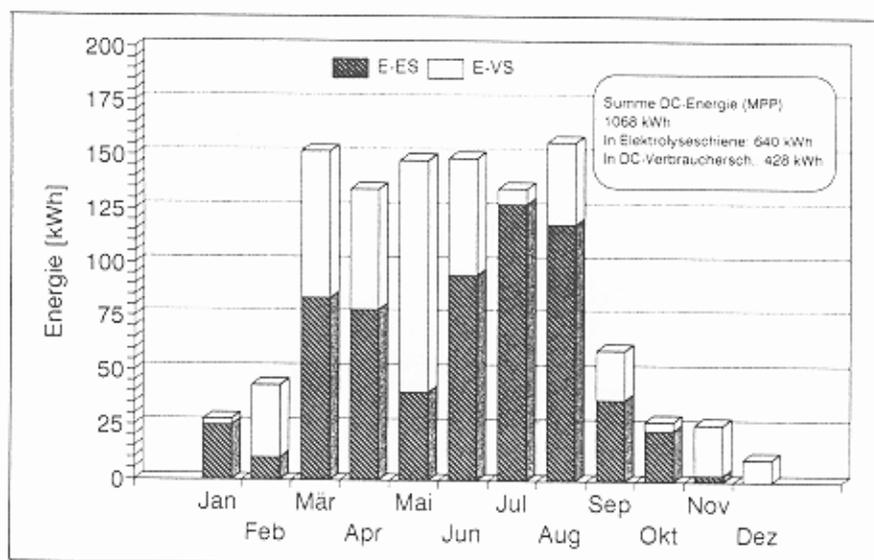
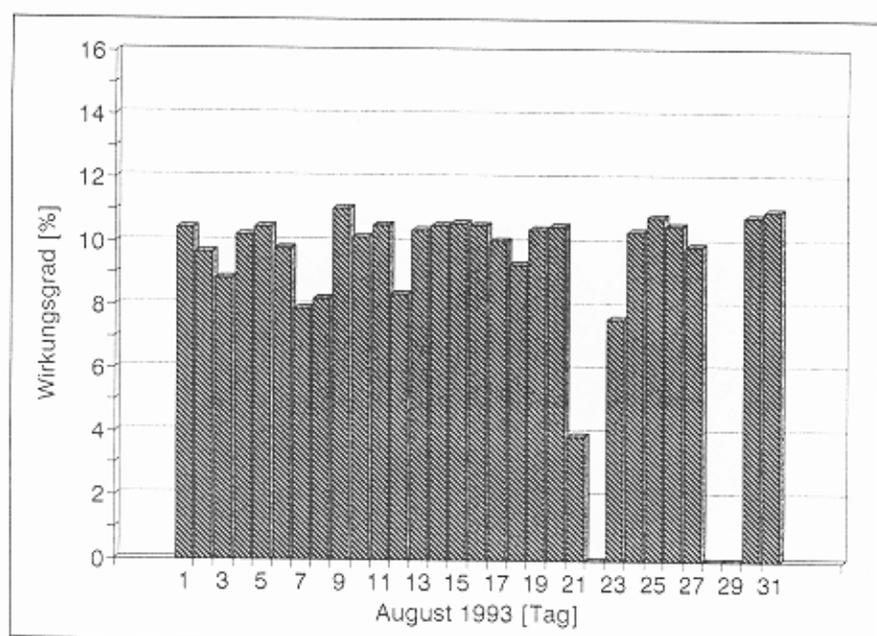
Bild 2: Meßaufbau

Fig. 2: Measuring apparatus

Fig. 2: Dispositif de mesure

Tafel 1: Bedeutung der Bezeichnungen in Bild 2**Table 1:** Explanation of terms in Figure 2**Tableau 1:** Signification des désignations de la fig. 2

Bezeichnung	Bedeutung
E-AN 60	an den 60° geneigten Sonnenpaneelen angebotene Energie
E-SG 1	Energieernte des Solargenerators SG 1
E-MPP	Énergie hinter dem MPP-Regler
E-ES	in den Elektrolyseur fließende Energie
E-DC-VER	Energie im Gleichstromnetz vor dem Wechselrichter
E-AC-VER	Energie hinter dem Wechselrichter
E-H ₂ -ELY	Energieinhalt des im Elektrolyseur erzeugten Wasserstoffs
V-H ₂ -ELY	Volumen des im Elektrolyseur erzeugten Wasserstoffs
E-H ₂ -BZ	Energieinhalt des in die Brennstoffzelle fließenden Wasserstoffs
E-BZ	elektrische Energie aus der Brennstoffzelle
E-HSS	Energie hinter dem Hochsetzsteller

**Bild 3:** Energieflüsse in Elektrolyseur und elektrischem Inselnetz**Fig. 3:** Energy flows in the electrolytic cell and the dedicated electrical system**Fig. 3:** Courants d'énergie dans l'électrolyseur et le réseau insulaire électrique**Bild 4:** Wirkungsgrad des Solargenerators**Fig. 4:** Efficiency of the solar generator**Fig. 4:** Rendement du générateur solaire

ter direkt in das Inselnetz. Die im Elektrolyseur erzeugten Gase dienen als Langzeitspeicher für Perioden ohne Solareinstrahlung.

- Es wird das gleiche System wie unter 2 betrieben; zusätzlich wird eine Batterie 3 (350 Ah) als Kurzzeitspeicher für die Solarenergie installiert. Wasserstoff und Sauerstoff dienen als saisonale Energiespeicher. Als Energieverbraucher sind elektrische Geräte vorgesehen.
- Es wird ein System wie unter 3 untersucht. Zusätzlich werden Gasverbraucher installiert, nämlich ein Kühlschrank, ein Kocher, eine Lampe und ein katalytischer Heizer, die alle mit Wasserstoff betrieben werden.
- Die gesamte Energie des Solargenerators fließt in den Wechselrichter.

Weitere Betriebsprogramme sind denkbar.

Der Meßaufbau mit den Meßstellen für die Energieflüsse geht aus Bild 2 hervor. Als elektrische Energieverbraucher wurden eine Lampe (120 W), ein Heizkörper (1,5 kW) und ein Kocher (750 W) verwendet.

Die Energiemeßstellen sind oval eingekreist. Die Bedeutung der darin verwendeten Bezeichnungen ist aus Tafel 1 zu entnehmen.

Monatswerte der Energieflüsse

Die Monatswerte der Energieflüsse 1993 sind kontinuierlich aufgenommen worden. Als Beispiel sind in Bild 3 die Energieflüsse in den Elektrolyseur E-ES und in die Verbraucherschienen E-ES dargestellt. Die Globalstrahlung betrug 1115 kWh/m²a, die Energieernte des Solargenerators 1124 kWh. Der Elektrolyseur verbrauchte 640 kWh und produzierte 93,4 m³ Wasserstoff, im Mittel benötigte er also 6,8 kWh/m³H₂. Dies entspricht einem Wirkungsgrad von 52 %. Der relativ niedrige Wert kommt dadurch zustande, daß der Elektrolyseur oft auf niedriger Temperatur läuft, vor allen Dingen morgens. Aus diesem Grunde ist der Elektrolyseur seit einiger Zeit thermisch isoliert, so daß er auch morgens noch warm ist, wenn die Wasserstoffproduktion beginnt. Bei Betriebstemperatur (70°C) und einer Stromstärke von 200 mA/cm² hat der Elektrolyseur einen Wirkungsgrad von rund 80 %. Mit einer thermischen Isolation der Anlage läßt sich also der Wirkungsgrad erheblich verbessern.

Die Reinheit der produzierten Gase hängt von der Stromstärke des Elektrolyseurs ab. Bei niedrigen Stromstärken – also bei geringer Sonneneinstrahlung, zum Bei-

spiel morgens und abends – enthält der Wasserstoff etwas Sauerstoff, der Sauerstoff geringe Anteile an Wasserstoff. Der Sauerstoffanteil des Wasserstoffs lag immer unter 1,5 %, der Wasserstoffanteil des Sauerstoffs unter 2 %. Im Gastank waren die Verunreinigungen des Wasserstoffs mit Sauerstoff immer kleiner als 1 %, die des Sauerstoffs mit Wasserstoff kleiner als 1,5 %.

Der Wirkungsgrad des Solargenerators wird als das Verhältnis der vom Solargenerator gelieferten Energie zur angebotenen Energie definiert, jeweils auf einen Quadratmeter bezogen:

$$\eta = \frac{E-SG 1}{E-AN}$$

Die Wirkungsgrade an den einzelnen Tagen liegen bei etwa 10 %, wie aus Bild 4 hervorgeht.

Die täglich gemessenen Wirkungsgrade einiger wichtiger Komponenten der Anlage sind für den Monat August 1993 in den Bildern 4 bis 6 dargestellt.

Die Betriebsprogramme an den einzelnen Tagen sind in der folgenden Aufstellung angegeben:

Programm 1: 1., 2., 6.-11., 14., 15., 18.
 Programm 2: 3.-5., 12., 13., 16., 17., 19., 23.-26., 30., 31.
 Programm 5: 20., 21.

In Bild 5 sind die Wirkungsgrade des MPP-Reglers an den einzelnen Tagen des Monats August 1993 aufgetragen. Der Wirkungsgrad ist berechnet nach der Formel

$$\eta = \frac{E-MPP}{E-SG 1}$$

und Bezeichnungen gemäß Tafel 1. Die Wirkungsgrade liegen bei 93 %.

Bild 6 zeigt den Wirkungsgrad des Elektrolyseurs an den verschiedenen Augusttagen 1993. Der Wirkungsgrad ist berechnet nach der Beziehung

$$\eta = \frac{E-H_2-Ely}{E-ES}$$

ebenfalls mit den Bezeichnungen gemäß Tafel 1. Die Wirkungsgrade des Elektrolyseurs hängen stark vom Betriebsprogramm der Anlage ab. Sie liegen an Tagen mit dem Programm 1 (die gesamte Solarenergie fließt in den Elektrolyseur) bei 50 bis 60 %, an Tagen mit Programm 2 (nur die Überschussenergie der Solarzellen fließt in den Elektrolyseur) zwischen 20 und 50 %. Der Elektrolyseur läuft an diesen Tagen nur zeitweise und bei niedriger Temperatur (etwa 30 °C).

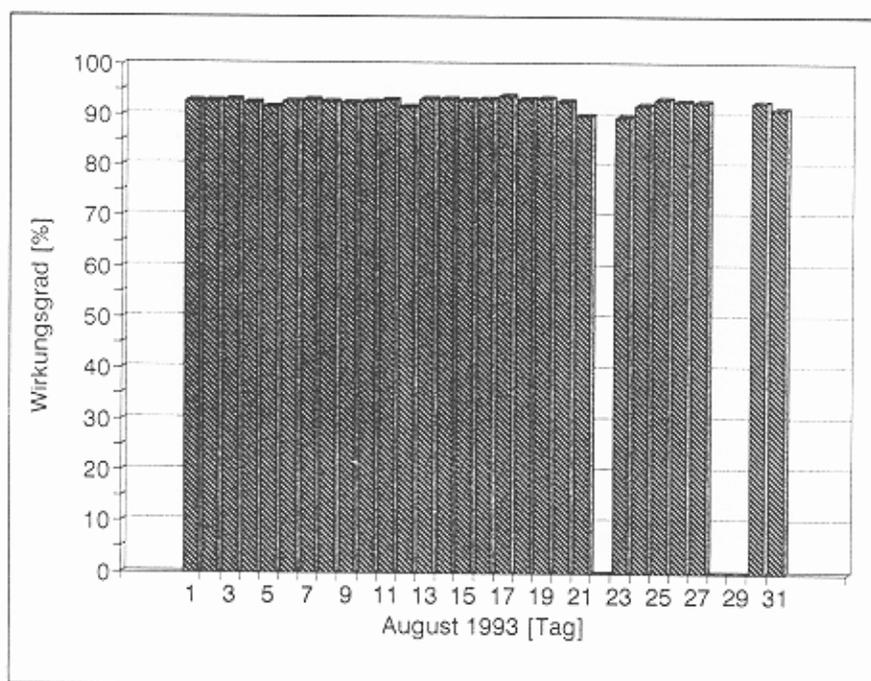


Bild 5: Wirkungsgrad des MPP-Reglers

Fig. 5: Efficiency of the MPP controller

Fig. 5: Rendement du régulateur MPP

Bild 7 zeigt die Energieaufteilung auf Elektrolyseur und Verbraucher an den einzelnen Tagen des August 1993. Die thermische Isolation des Elektrolyseurs hat eine beträchtliche Wirkungsgradsteigerung erbracht. Bei der Konzeption der Anlage sollte man darauf achten, daß der

Elektrolyseur im Tagesbetrieb zu etwa 70 % der Zeit in Betrieb ist.

Die Kosten der erzeugten Energie

Die Energieversorgungsanlage ist seit über zwei Jahren in Betrieb, so daß erste

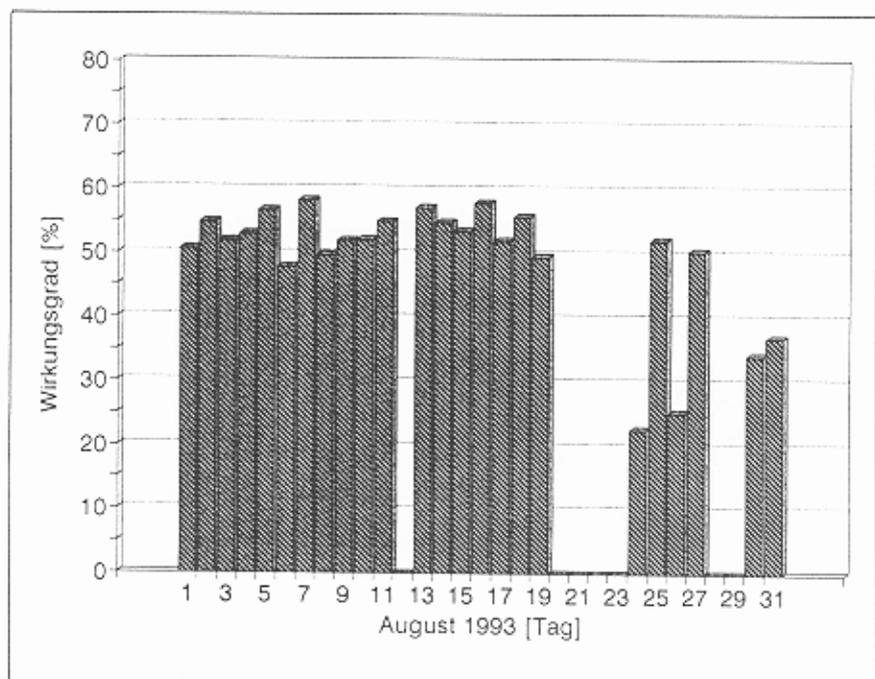


Bild 6: Wirkungsgrad des Elektrolyseurs

Fig. 6: Efficiency of the electrolytic cell

Fig. 6: Rendement de l'électrolyseur

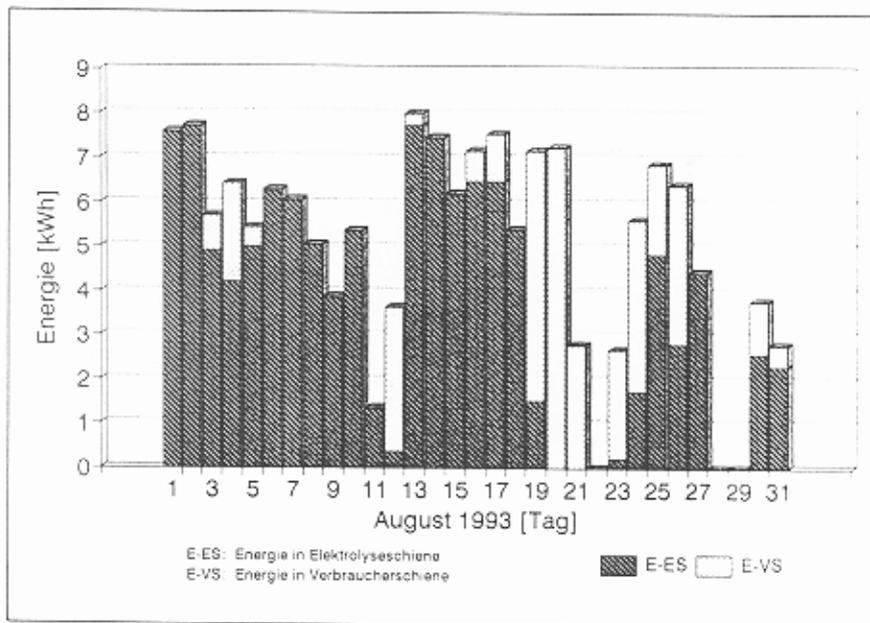


Bild 7: Energieaufteilung auf Elektrolyseur und elektrische Verbraucher an einzelnen Tagen des August 1993

Fig. 7: Energy distribution to the electrolytic cell and electrical loads on individual days in August, 1993

Fig. 7: Répartition de l'énergie sur l'électrolyseur et les consommateurs électriques en certains jours d'août 1993

Wirtschaftlichkeitsrechnungen möglich sind. Die Kosten der Anlage und des erzeugten Wasserstoffs sind nach der Annuitätsmethode berechnet worden.

Bild 8 zeigt die Energiekosten in Abhängigkeit von der installierten Leistung. Für eine kleine Anlage mit einer installierten Leistung von etwa 2 kW liegen die Ener-

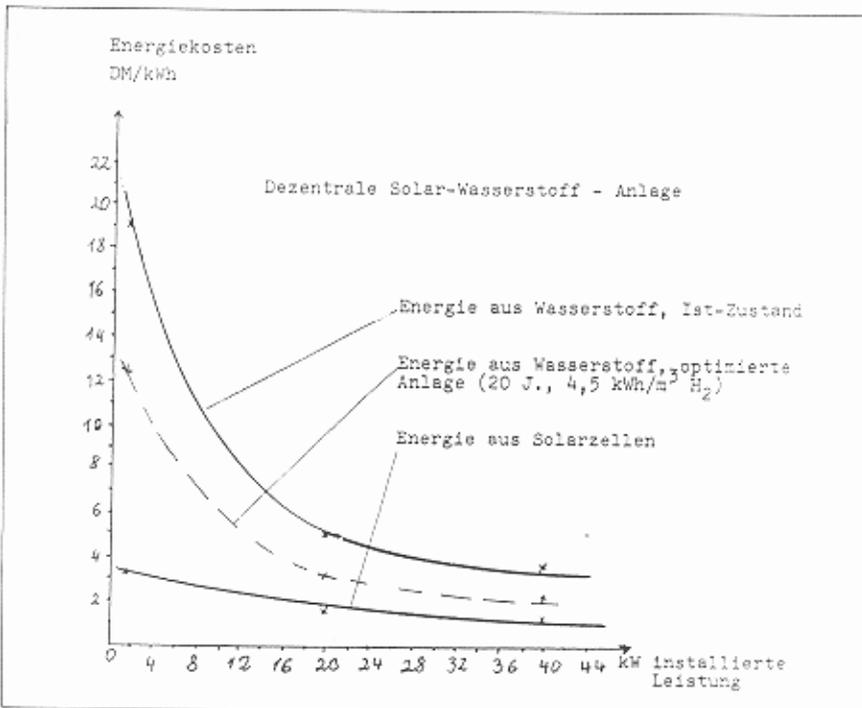


Bild 8: Energiekosten der Solarwasserstoffanlage in Abhängigkeit von der installierten Leistung

Fig. 8: The energy costs of the solar hydrogen system as a function of installed capacity

Fig. 8: Coûts de l'énergie de l'installation à hydrogène solaire en fonction de la puissance installée

giekosten sehr hoch (rund 25 DM/kWh). Bei größeren Anlagen mit ähnlichem Aufbau (ab etwa 25 kW Leistung) werden die Energiekosten interessant.

In Bild 8 sind in der oberen Kurve die Energiekosten aus der jetzigen Anlage eingetragen, die gestrichelte Kurve gibt die Energiekosten einer verbesserten Anlage an, aus der unteren Kurve ergeben sich die Energiekosten der Solaranlage allein ohne Wasserstoffspeicherung.

Das jetzt laufende Meßprogramm zeigt, daß erhebliche Möglichkeiten zur Kostenreduzierung der Energiepreise bestehen.

Wirtschaftliche Verwertbarkeit der Ergebnisse und Entwicklungspotentiale

Schon zu Beginn der Entwicklung der Energieversorgungssysteme auf der Basis von regenerativen Energien und Wasserstoff stellte sich heraus, daß keine Geräte für den Verbrauch von Wasserstoff vorhanden sind. Deswegen wurde ein Satz entsprechender Geräte entwickelt. Diese Geräte sind nun vorhanden und betriebsbereit: Motoren, Heizungen, Lampen, Herde, Kühl- und Klimaaggregate, Pumpen usw.

Das Vorhandensein und die Betriebsbereitschaft alleine genügen aber nicht. Die Wasserstoffgeräte müssen besser als die üblichen Gasgeräte sein und Vorteile aufweisen, die jene nicht haben: größeren Wirkungsgrad, hohe Betriebssicherheit, längere Lebensdauer. Mit der Entwicklung von neuen Elektrolyseuren, katalytischen Heizungen und von Motoren ist der erste Schritt in diese Richtung getan worden. Außerdem müssen Überlegungen angestellt werden für die Verwendung des Wasserstoffs und des Sauerstoffs für nichtenergetische Zwecke, also zum Beispiel für die chemische Industrie oder die Lebensmittelindustrie. Wasserstoff für die Fetthärtung, Sauerstoff für Wasser- und Abwasseraufbereitung, Wasserstoff als Schutz- und Schweißgas usw.

Die Kosten der mit der 2-kW-Anlage erzeugten Energie sind so hoch, daß diese Anlage für eine wirtschaftliche Energieerzeugung nicht einsetzbar ist. Sie kann für Test- und Forschungszwecke verwendet werden. Eine analog aufgebaute 40-kW-Anlage kommt der Wirtschaftlichkeit wesentlich näher. Als Stromerzeuger sollte man allerdings ein Blockheizkraftwerk verwenden und nicht eine Brennstoffzelle, da zur Zeit keine geeigneten robusten Brennstoffzellen auf dem Markt sind. Was das Preis-Leistungs-Verhältnis angeht, so haben Wind-Wasserstoff-Anlagen bessere Kennzahlen als Solar-Wasserstoff-Anlagen.

Ein großes, bisher nicht befriedigend gelöstes Problem ist das der Speicherung des Wasserstoffs und Sauerstoffs in Druckbehältern. Die bisher verwendeten Druckbehälter und Druckflaschen sind zu teuer für die Speicherung größerer Gas-mengen. Hier müssen neue Wege beschritten werden, zum Beispiel die Entwicklung gasdichter Betonröhren.

Wie schon oben erwähnt, kann das von der FHW entwickelte Energieversorgungs-system mit einer installierten Lei-stung von 2 kW als Forschungsanlage betrachtet werden. Ein eventueller Ver-kauf dieser Anlage ist nur an Forschungs-institute denkbar, da sie für Zwecke der Energieerzeugung zu teuer ist. Eine ver-größerte Version (ab etwa 30 kW instal-liertes Leistung) hat durchaus Markt-chancen für die Energieerzeugung in abgelegenen Gebieten.

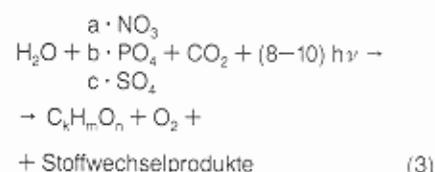
Aber nicht nur für die Energieerzeugung ist der Wasserstoff verwendbar, sondern ebenso wie der Sauerstoff auch als Che-

mierohstoff. Der Wasserstoff kann bei der Fetthärtung, bei der Wärmebehandlung von Metallen, bei Schiffsantrieben, der Sauerstoff bei der Wasseraufbereitung, die beiden Gase zusammen beim Schweißen und Löten eingesetzt werden. Der Wasserstoff kann darüber hinaus zum Strecken von Butan- oder Propan-vorräten verwendet werden. Das kann sinnvoll sein, auch wenn der Wasserstoff zur Zeit noch wesentlich teurer als die genannten Gase ist.

Es sind also sehr breit angelegte System-analysen und experimentelle Unter-suchungen durchzuführen, um das ganze Potential der Möglichkeiten kleinerer Wasserstoffanlagen (Elektrolyseurgröße etwa 40 bis 100 kW) zu erschließen.

Sicher ist, daß Wasserstoff in der Ener-gietechnik der Zukunft eine wichtige Rolle spielen wird. Auch die Natur bedient sich des Wasserstoffs als Energiespeicher und -träger, wenn auch in gebundener Form als Kohlenwasserstoff. Sehr verein-

facht und schematisch kann man nämlich die Entstehung der Biomasse durch fol-gende Reaktionsgleichung beschreiben.



H_2O und die Salze $a \cdot \text{NO}_3$, $b \cdot \text{PO}_4$, $c \cdot \text{SO}_4$ kommen aus dem Boden, CO_2 aus der Luft, die acht bis zehn Photonen aus dem Sonnenlicht. Die Zersetzung des Wassers liefert Wasserstoff für die Erzeugung der Biomasse $\text{C}_k\text{H}_m\text{O}_n$, der entstehende Sauerstoff wird von den Pflanzen an die Atmosphäre abgegeben.

Das beschriebene Energieversorgungsmodell lehnt sich in hohem Maße an die natürlichen Gegebenheiten an. Um es praktikabel zu machen, ist allerdings noch viel Ingenieurleistung erforderlich.