

Neueste Wasserstofftechnik in Lehre und Demonstration

# PEM-Brennstoffzelle

**Die Entwicklung der Wasserstofftechnologie und deren umweltfreundlicher Einsatz im Energiebereich gewinnt zunehmend an Bedeutung. Dies ist vor allem auf die Fortschritte bei der Weiterentwicklung der Brennstoffzelle zurückzuführen, in der auf elektrochemischem Wege aus Wasserstoff und Sauerstoff Strom erzeugt wird. Sie zeichnet sich im Vergleich zu klassischen Technologien durch hohe Wirkungsgrade und geringe Emissionen aus.**

Unter den bekannten Brennstoffzellentypen /1/ eignet sich vor allem die sogenannte PEM-Brennstoffzelle auf Grund ihrer hohen Leistungsdichte und niedriger Arbeitstemperaturen für mobile und stationäre Anwendungen im kleinen und mittleren Leistungsbereich. In Demonstrationsprojekten treiben PEM-Brennstoffzellen bereits Pkw's und Busse an. Außerdem wird es in naher Zukunft auch auf der PEM-Technologie basierende Blockheizkraftwerke (BHKW's) geben.

## Viel Bewegung bei und durch PEM-Brennstoffzellen

Vorangetrieben wird die rasche Entwicklung der PEM-Brennstoffzelle vor allem durch die Absichten einiger Automobilhersteller, zu Beginn des nächsten Jahrhunderts ein Brennstoffzellen-Fahrzeug in Serie zu produzieren. Einen Vorsprung auf diesem Weg hat die *Daimler-Benz AG*, die – nach der Vorstellung des NECAR I (New Electric Car I) und des NECAR II – im Mai diesen Jahres der Öffentlichkeit einen als NEBUS (New Electric Bus) bezeichneten Bus mit Elektroantrieb und Stromerzeugung mittels Brennstoffzelle präsentierte. Schließlich wurde früher als angekündigt auf der diesjährigen IAA in Frankfurt ein Erprobungsträger mit Brennstoffzellenantrieb auf Basis des A-Klasse Modells vorgestellt /2/.

Neben weiteren auf diesem Gebiet weltweit tätigen Automobilfirmen hat auch VW bekanntgegeben, einen Pkw mit PEM-Brennstoffzelle zu entwickeln. Wie bei *Daimler-Benz* soll das Elektroauto mit Methanol betankt werden. Über einen internen Reformer wird aus Methanol Wasserstoff gewonnen, der zusammen mit dem Sauerstoff aus der Luft die Brennstoffzelle versorgt.

Im Bereich des dezentralen, stationären Einsatzes von PEM-Brennstoffzellen existieren bereits einige autarke Solar-Wasserstoff-Demonstrationsanlagen im kleinen Leistungsbereich, um das Verhalten der einzelnen Komponenten sowie der Gesamtanlage zu untersuchen. In Berlin-Treptow ist die Errichtung und der Betrieb eines BHKW's mit PEM-Technik bei 250 kW elektrischer und 237 kW thermischer Leistung geplant /3/.

Führender Hersteller von PEM-Brennstoffzellen ist die Firma *Ballard*, kanadischer Partner von *Daimler-Benz*, die als weltweit tätiges Unternehmen auf dem Gebiet der Brennstoffzellentechnologie diese für kommerzielle Anwendungen im Antriebsbereich (Busse, Pkw's) und im stationären Bereich im Rahmen von Demonstrationsprojekten testet.

Der Weg zur Kommerzialisierung der Brennstoffzelle im Automobilbereich wird begleitet von einem für diese Technologie zunehmenden Interesse der Öffentlichkeit, das sich auf den Lehr- und Ausbildungsbereich überträgt. Vertreter von Schulen und Hochschulen haben erkannt, daß Brennstoffzellen aufgrund ihrer vielen Vorteile und Einsatzmöglichkeiten in Zukunft eine bedeutende Rolle in der Ausbildung spielen werden.

So sind Brennstoffzellen zum einen an einigen technischen Fachhochschulen und Universitäten bereits Teil des Vorlesungsstoffes, unterstützt durch Anwendungen in Praktikums- und Laborversuchen. Zum anderen ist die Brennstoffzellentechnologie Bestandteil des Physik- und Chemieunterrichts bei der Behandlung des Themenbereichs „Regenerative Energien“.

## Polymermembran als Elektrolyt

Die Bezeichnung PEM-Technologie bezieht sich auf die Verwendung einer Kunststoffmembran als Elektrolyt in einer elektrochemischen Zelle.

Das Akronym PEM steht für „Polymer-Electrolyte-Membrane“, oft auch als „Proton-Exchange-Membrane“ bezeichnet. Die ca. 0,1 mm dünne perfluorierte Membran (z. B. Nafion® der Firma *DuPont*) /4/ übernimmt in einem PEM-Elektrolyseur und in einer PEM-Brennstoffzelle die Funktion des Elektrolyten, wobei sie den Ionentransport durchführt und dabei nur Protonen leitet. Im Vergleich zur alkalischen Technik ersetzt sie den sonst üblichen flüssigen Elektrolyten Kalilauge.

Der Vorteil von Polymermembranen gegenüber Kalilauge als Elektrolyt ist neben einer Systemvereinfachung vor allem die damit erreichte höhere Leistungsdichte. Darüber hinaus ist eine PEM-

Brennstoffzelle im Vergleich zu einer alkalischen Einheit unempfindlich gegenüber Verunreinigungen durch Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), wodurch auf die Verwendung sehr reiner Reaktionsgase verzichtet werden kann und damit auch ein Brennstoffzellenbetrieb mit Luft möglich ist /5/.

Für den Einsatz in Modellanlagen für den Lehr- und Demonstrationsbereich bringt die Verwendung der Membrantechnik neben hoher Aktualität entscheidende Vorteile mit sich: Zum einen betrifft dies die einfache Handhabung und Wartung, da aufwendiges Auswechseln des Elektrolyten nicht mehr erforderlich ist. Zum anderen entfällt im Vergleich zu alkalischen Elektrolyseuren und Brennstoffzellen das Gefahrenpotential durch ätzende Flüssigkeiten, wodurch Demonstrationen durch ungeübtes Personal sowie Schüler- und Praktikumsversuche gefahrlos durchgeführt werden können.

## Das PEM-Wasserstoff-Modell

Das H-TEC-Modell PEMPower1-XL mit Zubehör (Abb. 1) enthält alle wichtigen Komponenten einer Solar-Wasserstoffanlage (Photovoltaik-Modul, Elektrolyseur, Speicher, Brennstoffzelle und Motor). Es stellt damit ein autarkes Stromversorgungssystem in Miniatur dar: von der Umwandlung solarer Strahlungsenergie durch Photovoltaik in elektrischen Strom über die Speicherung der elektrischen Energie durch Produktion von Wasserstoff mittels Elektrolyse und die „Wiederverstromung“ des Wasserstoffs in der Brennstoffzelle bis hin zur Nutzung des Stromes durch einen elektromechanischen Wandler in Form eines Lüfters.

Ein Solarmodul (H-TEC Solar1) liefert bei Verwendung im Freien und ausreichend solarer Bestrahlungsstärke genügend Strom zum Betrieb des Elektrolyseurs. Für den üblichen Demonstrations- und Laborbetrieb unter Scheinwerferlicht steht ein kleiner Solargenerator aus drei Einzelmodulen (H-TEC Solar2) zur Verfügung.

Nach Anlegen der vom Solarmodul gelieferten Gleichspannung an den PEM-Elektrolyseur (H-TEC PEMEL) zerlegt dieser in der Anlage enthaltene, destillierte Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff. Das Wasser erhält der Elektrolyseur vom Ausgleichsbehälter, der vor Inbetriebnahme der Anlage befüllt wird (Abb. 2).

Die Ionenleitfähigkeit der Membran ist von der Qualität des verwendeten Wassers abhängig. Verunreinigtes Wasser würde die Wirksamkeit der Membran herabsetzen und damit zu einem Leistungsverlust der Zelle führen. Um dies zu verhindern, wird das Modell mit destilliertem Wasser befüllt, das zusätzlich vor dem Eintritt in den Elektrolyseur

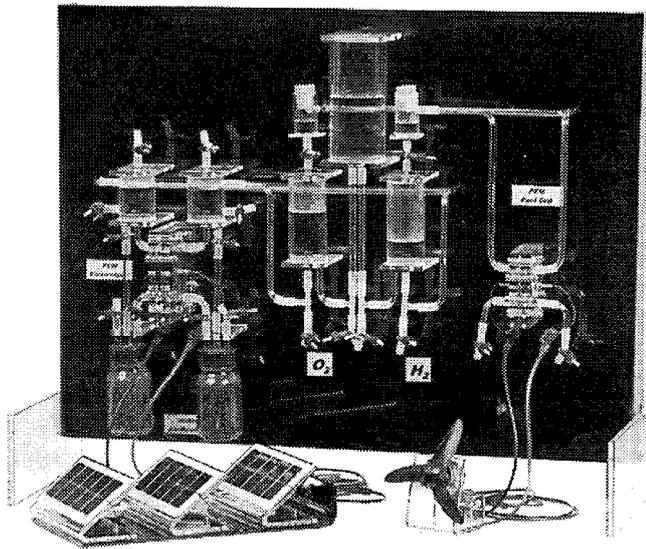


Abb. 1: Wasserstoff Lehraufbau PEMPower1-XL mit Zubehör

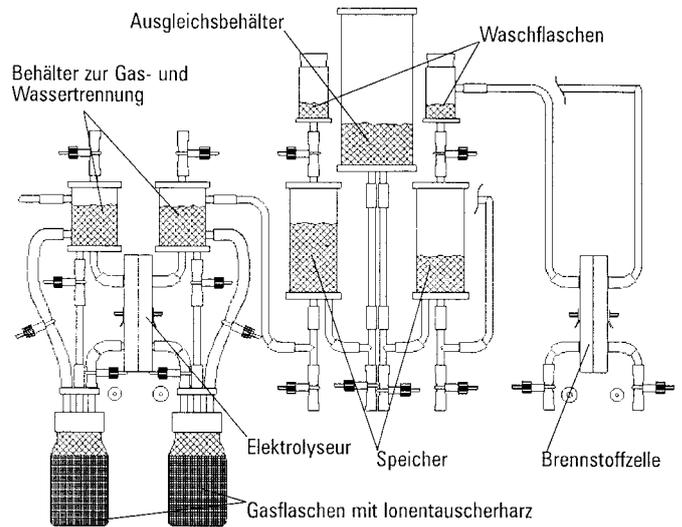


Abb. 2: Schematische Darstellung des PEMPower1-XL Modells

durch einen Behälter mit einem Ionenaustauscherharz geleitet wird. Dort werden unerwünschte Metallionen aus dem Wasser gefiltert, wodurch eine gleichbleibende Qualität des Wassers gewährleistet wird.

Der Elektrolyseur produziert an der Kathode Wasserstoff und an der Anode Sauerstoff. Die beiden Gase steigen über getrennte Rohrleitungen jeweils in einen Behälter über dem Elektrolyseur, in dem erzeugtes Gas und mitgeführtes Wasser getrennt werden. Das Strom-Spannungsverhalten der Elektrolysezelle PEMEL ist in Abb. 3 dargestellt.

Die Gase werden dann dem Speicherbereich zugeführt. Kontinuierlich perlen Gasblasen im Verhältnis 2:1 von Wasserstoff zu Sauerstoff in die Volumenspeicher. Der Volumenstrom ist durch Auszählen der Gasblasen ab-

schätzbar oder kann mit Hilfe einer Skala an den Speicherbehältern gemessen werden. Das in den Speichern gesammelte Gas stellt nun gespeicherte chemische Energie dar.

Der Ausgleichsbehälter – er dient nicht nur als Wasserreservoir, sondern auch als Sicherheitsvorkehrung – ist zum Druckausgleich stets geöffnet, damit eventuell zuviel produziertes Gas entweichen kann.

Durch das Öffnen der Ventile an den Gasspeichern können die gespeicherten Gase Sauerstoff und Wasserstoff bei Bedarf der Brennstoffzelle (H-TEC PEMFC) zugeführt werden. Die Gase treten dabei aus den Speichern über eine mit Wasser befüllte Waschflasche aus, die als Si-

cherheitsvorkehrung dient, indem sie den Gasaustritt von den Speichern trennt. Durch diese Maßnahme wird verhindert, daß Flammen – wodurch auch immer erzeugt – bis in den Speicher vordringen können.

In der Brennstoffzelle werden die beiden Gase elektrochemisch in Wasser unter Abgabe von Wärme und elektrischem Strom umgewandelt. Dabei sind Wärmeentwicklung und entstehende Wassermenge im Modell vernachlässigbar gering. Der elektrische Strom betreibt einen kleinen Demonstrationsmotor mit Lüfter. Die Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle ist abhängig von den Gasdrücken, dem Gasdurchfluß, der Feuchtigkeit der Membran und der Temperatur. Das

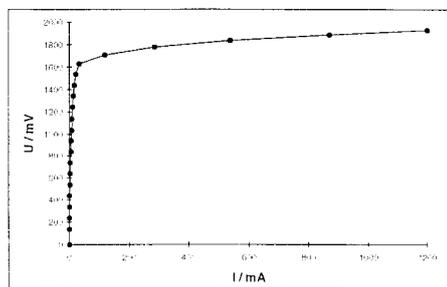


Abb. 3: Strom-Spannungskennlinie des Elektrolyseurs PEMEL

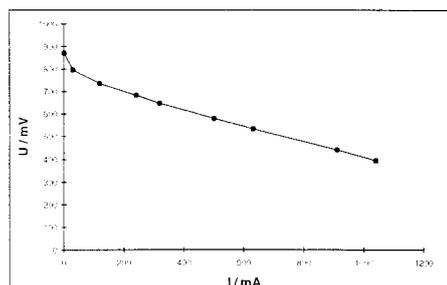
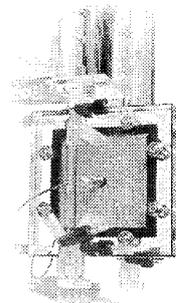
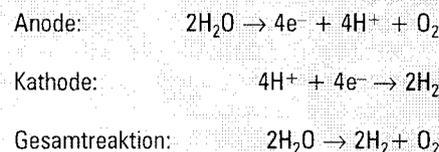


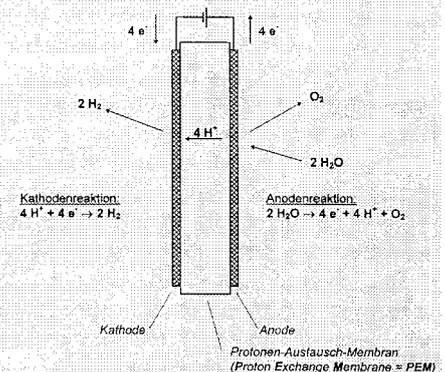
Abb. 4: Strom-Spannungskennlinie der PEMFC Brennstoffzelle

**Funktionsprinzip eines PEM-Elektrolyseurs**

Das Kernstück eines PEM-Elektrolyseurs ist wie bei der PEM-Brennstoffzelle die Membran-Elektroden-Einheit (MEA = Membrane-Electrode-Assembly). Die MEA besteht aus einer dünnen protonenleitenden Polymermembran, auf die auf beiden Seiten eine Schicht Katalysatormaterial aufgebracht ist. Diese beiden Schichten bilden Anode und Kathode der elektrochemischen Zelle. Diese Anordnung unterstützt folgende Reaktionen /6/:



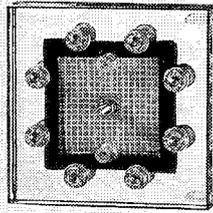
Auf der Anodenseite entstehen bei angelegter äußerer Spannung nach obiger Gleichung direkt gasförmiger Sauerstoff, Elektronen und  $H^+$ -Ionen. Die  $H^+$ -Ionen wandern durch die protonenleitende Membran zur Kathode und bilden dort mit den über den äußeren Leiterkreis fließenden Elektronen Wasserstoffgas.



Funktionsprinzip eines PEM-Elektrolyseurs

## Funktion einer PEM-Brennstoffzelle (PEMFC)

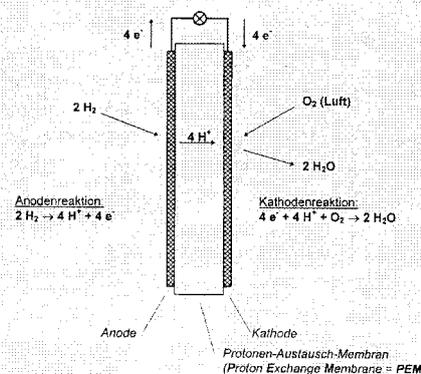
Die Funktionsweise einer Brennstoffzelle entspricht dem umgekehrten Prinzip der Elektrolysezelle.



Während mit Hilfe des Elektrolyseprozesses elektrische Energie in chemische Energie, z. B. in Form von Wasserstoff und Sauerstoff, gespeichert werden kann, wird in einer Brennstoffzelle chemische Energie in Form von Wasserstoff und Sauerstoff (oder auch Luft) direkt, d. h. ohne Verbrennungsprozeß, in elektrische Energie umgewandelt. Von außen zugeführter Wasserstoff und Sauerstoff reagieren wieder zu Wasser unter Abgabe von Strom und Wärme. Das Kernstück einer PEM-Brennstoffzelle bildet wiederum die MEA, in der folgende Reaktionen stattfinden /4/:



Das an die Anode geführte Wasserstoffgas wird oxidiert, es zerfällt durch die katalytische Wirkung der Elektrode (z. B. Platin) in Protonen und Elektronen. Die  $H^+$ -Ionen gelangen durch die protonenleitende Membran auf die Kathodenseite. Die Elektronen wandern im geschlossenen äußeren Stromkreis zur Kathode und verrichten auf diesem Weg elektrische Arbeit. Der an die Kathode geführte Sauerstoff wird reduziert, wobei zusammen mit den Protonen Wasser gebildet wird.



Funktionsprinzip einer PEM-Brennstoffzelle (PEMFC)

Strom-Spannungsverhalten ist in Abb. 4 dargestellt.

Das PEMPower1-XL Modell wurde speziell für den Lehr- und Demonstrationbetrieb entwickelt, wobei die Verwendung transparenter Materials, die übersichtliche Anordnung der einzelnen Komponenten sowie die einfache, gefahrlose Handhabung und die zuverlässige Arbeitsweise vielfältige Anwendungsmöglichkeiten bieten, zum Beispiel:

- im Rahmen von Öffentlichkeitsarbeit zur Demonstration der Solar-Wasserstoff-Technologie und der Brennstoffzellentechnik (z. B. bei Energieversorgungsunternehmen und Ingenieurbüros),
- an Hochschulen, allgemeinbildenden Schulen sowie Forschungsinstituten,
- auf Ausstellungen und Messen.

Für einen Einsatz des Modells im Schul- oder Praktikumsbetrieb bieten sich z. B. folgende Experimente an:

- Untersuchung des Verhaltens von Solarzelle, PEM-Elektrolyseur und PEM-Brennstoffzelle durch Aufnahme der jeweiligen charakteristischen Strom-Spannungskennlinie,
- Überprüfung des Faradayschen Gesetzes durch Volumenmessung der produzierten Gasmenge,
- Bestimmung der Leistungen von Solarzelle, Elektrolyseur und Brennstoffzelle,
- Berechnung der Einzelwirkungsgrade von Solarzelle, Elektrolyseur und Brennstoffzelle sowie des Systemwirkungsgrades der Modellanlage.

## Zusammenfassung

Aufgrund der geplanten Anwendungen im Automobilbereich gewinnt die PEM-Brennstoffzelle zusehends an Aktualität, wodurch diese Technologie auch in der Ausbildung an Schulen und Hochschulen an Bedeutung gewinnt. Die H-TEC Wasserstoff-Demonstrationsanlage PEMPower1-XL mit Zubehör wurde speziell für Lehr- und Demonstrationszwecke entwickelt.

Sie enthält alle Komponenten eines Solar-Wasserstoff-Systems und zeichnet sich insbesondere durch eine übersichtliche Anordnung der einzelnen Komponenten und eine einfache, gefahrlose Handhabung aus, bedingt durch die Verwendung der PEM-Technologie. Damit bieten sich bei zuverlässiger Arbeitsweise vielfältige Anwendungsmöglichkeiten.

Zusätzlich zu dem XL-Modell bietet H-TEC zwei weitere Modelle an: Mit dem PEMPower1-School wurde eine preisgünstige Variante speziell für allgemeinbildende Schulen geschaffen. Das PEMPower1-Exhibition erfüllt alle Anforderungen an ein Demonstrationssystem speziell für Ausstellungsräume.

Uwe Küter, Stefan Höller

## Literatur

- /1/ siehe SE 1/97, S. 16-19
- /2/ Internetseiten des HyWeb, Wasserstoffinformationssystem der Ludwig-Bölkow-System-Technik GmbH, Ottobrunn, <http://www.HyWeb.de>, Stand 1.8.1997

## Technische Daten

### PEMPower1-XL

Funktionssystem einer Wasserstoff-Anlage, bestehend aus Elektrolyseur (H-TEC PEMEL), separater Einrichtung zur Gas-Wasser-Trennung, Gasspeichern und Brennstoffzelle (H-TEC PEMFC) in horizontaler Anordnung.

H × B × T: 542 × 655 × 250 mm  
Gewicht: 4,6 kg

### Elektrolyseur PEMEL

Funktionsmodell eines PEM-Elektrolyseurs.  
Elektrodenfläche: 40 cm<sup>2</sup>  
Leistung: ca. 2 W  
H × B × T: 100 × 100 × 22 mm<sup>3</sup>  
Gewicht: 300 g  
zulässige Betriebsspannung: 0 bis 2 V  
zulässiger Strom: 0 bis 2 A

### Brennstoffzelle PEMFC

Funktionsmodell einer PEM-Brennstoffzelle.  
Elektrodenfläche: 16 cm<sup>2</sup>  
Leistung: ca. 400 mW  
H × B × T: 80 × 80 × 22 mm<sup>3</sup>  
Gewicht: 210 g  
Betriebsspannung: ca. 0,3 bis 0,9 V bis ca. 10 s Kurzschlußfest

### Speicher

Es können bis zu 80 cm<sup>3</sup> Wasserstoff und 80 cm<sup>3</sup> Sauerstoff gespeichert werden.

## Zubehör

### Solar 1

Solarmodul als Stromquelle für H-TEC Elektrolyseur.  
ca. 2,0 V/0,3 A

### Solar 2

3fach Solarmodul als Stromquelle für H-TEC Elektrolyseur.  
ca. 2,0 V/0,9 A

### Fan

Lüftermotor als elektrischer Verbraucher für H-TEC Brennstoffzellen.  
ca. 0,8 V/20 mA

/3/ R. Wurster: Hydrogen Projects and Conceptual Ideas in Germany, Ludwig-Bölkow-System-Technik GmbH, Ottobrunn, Status 4.6.1997

/4/ Brennstoffzellen: Entwicklung, Technologie, Anwendung: K. Ledjeff (Hrsg.), 1. Aufl., Verlag Müller, Heidelberg 1995

/5/ V. M. Schmidt, U. Stimming: Hydrogen and Methanol Proton Exchange Membrane Fuel Cells, Hydrogen Energy Progress XI, Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference, V. 2, Stuttgart 1996

/6/ N. Getoff: Wasserstoff als Energieträger, Springer Verlag, Wien 1977

Über die Autoren:

Uwe Küter und Stefan Höller sind Geschäftsführer der H-TEC Wasserstoff-Energie-Systeme GmbH in Krummesse (Tel.: 04508/1770).