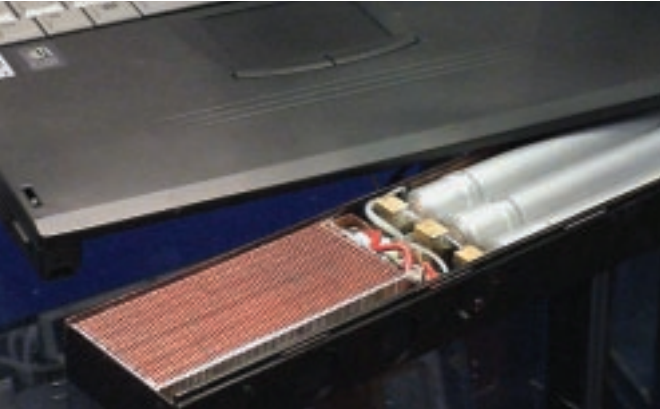


# Wasserstofftechnologie



**Fraunhofer** Institut  
Solare Energiesysteme



In einen Laptop integriertes Brennstoffzellen-System, Prototyp im Auftrag der Fa. LG Caltex, Korea.



Projekt Energieautarkes Solarhaus (1992-95) mit solarer Wärmeerzeugung, photovoltaischer Stromversorgung und elektrischem Energiespeicher aus Batterie und Wasserstoff-System inklusive Brennstoffzelle, Elektrolyseur, Wasserstoff- und Sauerstofftank, Wasserstoff-Luftvorwärmung und Wasserstoff-Herd.

## Wasserstoff – Energieträger für die Zukunft

Wasserstoff setzt bei der Reaktion mit (Luft-) Sauerstoff nutzbare Energie frei. In einer Brennstoffzelle wird Wasserstoff kontrolliert und mit hohem Wirkungsgrad verstromt, wobei auch entstehende Wärme genutzt werden kann. Da Wasserstoff in der Natur nicht in Reinform vorliegt, muss er aus seinen chemischen Verbindungen gewonnen werden – z.B. durch Elektrolyseverfahren mit regenerativ erzeugtem Strom oder durch Reformierung von biogenen und fossilen Brennstoffen. Die Vision einer schadstofffreien Energieerzeugung durch Wasserstofftechnologie spornt deshalb seit langem die Phantasie der Forscher und Technologen an.

Im Geschäftsfeld Wasserstofftechnologie erforschen wir am Fraunhofer ISE sowohl innovative Technologien zur Gewinnung wie zur Verstromung von Wasserstoff. Zusammen mit unseren Partnern aus Industrie und Wissenschaft entwickeln wir komplette Wasserstoffanlagen sowie Komponenten im Sinne einer kostengünstigen und umweltfreundlichen Energiewirtschaft.

Wir stellen Reformer zur Umwandlung flüssiger oder gasförmiger Brennstoffe her und bauen Elektrolyseure bis 2 kW zur Wasserstoffgewinnung durch Elektrolyse. Zur Verstromung von Wasserstoff favorisieren wir Brennstoffzellen auf Basis von Polymerelektrolytmembranen (PEM). Diese sind effizient, umweltfreundlich, geräusch- und wartungsarm und eignen sich insbesondere zur portablen Energieversorgung. Außerdem forschen wir an der katalytischen Umsetzung von Wasserstoff zur Wärme- oder Kältegewinnung.

Neben der Komponenten- und Anlagenentwicklung führen wir auch die Integration in übergeordnete Systeme durch. Wir konzipieren und realisieren die elektrische Auslegung inklusive Spannungsaufbereitung und Sicherheitstechnik. Damit schaffen wir die Grundlagen für eine marktfähige Wasserstoffwirtschaft mit Wasserstoff-Tankstellen, Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerken zur kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung, autonomen Stromversorgungen für netzferne Anwendungen und Kleinstsystemen zur portablen Energieversorgung.

## Wasserstoffbereitstellung durch Reformierung / Gasprozesstechnik

Am Fraunhofer ISE entwickeln und bauen wir kompakte Einheiten für die Dampfreformierung, für die autotherme Reformierung und für die partielle Oxidation von gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen. Reformer können in stationären Kraftwerken, Wohn- und Industriegebäuden, Schiffen, Automobilen und sogar Flugzeugen eingesetzt werden. Die hohe Energiedichte von Kohlenwasserstoffen kann mit Hilfe von Mikroreformern auch in portablen Anwendungen genutzt werden.

Die katalytische Umwandlung leicht verfügbarer Brennstoffe in Wasserstoff ermöglicht den Einsatz von Brennstoffzellen, auch wenn kein reiner Wasserstoff verfügbar ist. Neben der Reformierung fossiler Brennstoffe wie Erdgas, Benzin, Diesel, Kerosin oder Heizöl für den Einsatz in PEM-Brennstoffzellen-Anlagen verfolgen wir regenerative Versorgungspfade durch Nutzung von Biobrennstoffen wie Klär- oder Deponiegas, Methan, Bio-Alkoholen, Rapsöl oder Holz.

Maßgeschneidert auf die Kundenanforderungen bieten wir Komponenten und Komplettsysteme inklusive Reformer, Gasaufbereitung, Regelungssystem und Sicherheitstechnik an.



Kerosin-Reformer für eine oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC) mit einer Leistung von 25 kW und integrierter Entschwefelung.

## Wasserstoffbereitstellung durch Elektrolyse

Wasserstoff und Sauerstoff können effektiv und mit hoher Reinheit durch Elektrolyse hergestellt werden. Hierfür entwickeln wir Elektrolyseure auf Basis von Polymerelektrolytmembranen (PEM).

Regenerativer Wasserstoff kann z.B. unter Einsatz von Wasserkraft, Windenergie oder solarer Stromerzeugung hergestellt werden. Wir realisieren dafür Komplettsysteme oder bieten Beratung an. Für den zuverlässigen Betrieb konstruieren wir die Bipolarplatten zur Stromzuführung und Gasableitung. Desweiteren beschichten wir die Membranen mit optimierten Katalysatormischungen. Der Elektrolyseur wird inklusive Wasserzufuhr und -aufbereitung, Gastrennung, -trocknung und -speicherung sowie Sicherheitstechnik in eine Wasserstoffanlage integriert. Für die Zwischenspeicherung des Wasserstoffs realisieren wir Druckelektrolyseure bis 30 bar Betriebsdruck.

PEM-Elektrolyseure eignen sich für die Wasserstoff- oder Sauerstoffproduktion in Laboren, in der Medizintechnik und für den Betrieb von Brennstoffzellen. Die Leistung reicht von wenigen NI/h bis zu mehreren Nm<sup>3</sup>/h Wasserstoff.



Wasserstoffproduktion in einem Miniatur-Elektrolyseur.

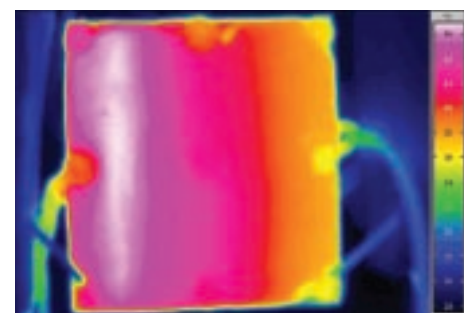
## Membranbrennstoffzellen zur Stromerzeugung

Brennstoffzellen sind aufgrund ihres hohen Wirkungsgrads, ihrer Zuverlässigkeit und nicht zuletzt ihrer Umweltfreundlichkeit optimal geeignet für dezentrale Energieversorgungen.

Wir konzentrieren unsere Forschung auf Membranbrennstoffzellen für portable und stationäre Anlagen. Je nach Anforderung realisieren wir Brennstoffzellen-Systeme für Wasserstoff- oder Methanol-Betrieb. Zur Optimierung führen wir elektrochemische, thermodynamische und strömungsmechanische Simulationen durch. Zur Verifikation der eingesetzten Modelle nutzen wir unsere umfangreichen experimentellen Einrichtungen.

Besondere Schwerpunkte bilden die Verlängerung der Lebensdauer, d. h. die Vermeidung von Degradationsverlusten und die Erhöhung der Toleranz gegenüber CO-Verunreinigungen zugunsten einer reformattauglichen Brennstoffzelle.

Zusammen mit unseren Partnern entwickeln wir anwendungsbezogene Systemlösungen oder bieten Beratungsdienstleistung an.



Temperaturverteilung in einer Miniatur-PEM-Brennstoffzelle in der Startphase.

## Mikroenergie-technik Mikro-Brennstoffzellen

Die stetig steigenden Leistungsanforderungen verteilter elektrischer Verbraucher erfordern innovative Konzepte für deren Energieversorgung. Ob Mobiltelefone, Laptops, Organiser oder energieautarke Mess- bzw. Signalsysteme – gewünscht wird immer ein zuverlässiger, miniaturisierter Stromerzeuger.

Für den Leistungsbereich bis ca. 200 W entwickeln wir Membran-Brennstoffzellen-Systeme auf Basis von Wasserstoff oder Methanol als Ergänzung oder Alternative zu Batterien und Akkus.

Aufgrund der Trennung von Stromerzeugung und Brennstoffspeicher kann die Energieversorgung ideal an die geforderte Spezifikation angepasst werden. Die Modularität der Brennstoffzelle bietet weite konstruktive Freiräume. Ausgehend von Simulationsrechnungen und experimentellen Untersuchungen entwickeln wir die Regelungselektronik für Luft- und Brennstoffzufuhr bzw. Wärmeabfuhr und Wassermanagement und stellen hocheffiziente Spannungswandler bereit (siehe Geschäftsfeld »Netz-unabhängige Stromversorgung«).



Packaging eines Miniatur-Brennstoffzellen-Systems mit einer Leistung von 10 W inklusive Systemkomponenten.

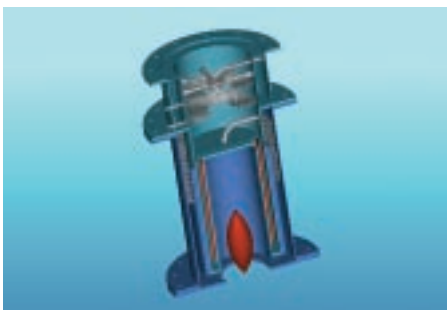
## Charakterisierung und Simulation

Die wissenschaftliche Untersuchung der physikalischen, chemischen bzw. elektrochemischen Reaktionen in mikroskopischem Maßstab ist Grundlage für eine optimierte Auslegung von Wasserstoff-Systemen.

In der Reformertechnologie führen wir abgestimmt auf die Applikation und den Brennstoff gezielte Katalysator-tests durch. Dabei bewerten wir unterschiedliche Katalysator-Formulierungen und -Träger. Bei Schüttungen variieren wir die Pellet-Dimension, bei Waben die Geometrien.

Um die Verfahrenstechnik ständig zu verbessern, setzen wir Simulationswerkzeuge ein und entwickeln detaillierte theoretische Modelle. Durch Vergleich mit den experimentellen Untersuchungen stellen wir somit unsere Verfahrensauslegung auf eine zuverlässige Grundlage.

Das Herzstück einer PEM-Brennstoffzelle bzw. eines PEM-Elektrolyseurs ist die Membran-Elektroden-Einheit (MEA). Wir beschichten Membranen mit reinen oder geträgerten Katalysatorschichten. Zur Bestimmung der MEA-Eigenschaften stehen uns Mess-



Schema eines Dampfreformers zur Erzeugung von 6 Nm<sup>3</sup>/h Wasserstoff aus Erdgas.

verfahren wie Impedanzspektroskopie für die ortsaufgelöste Charakterisierung zur Verfügung.

Die Betriebsführung von Brennstoffzellen wird durch intensive Testreihen in Dauerzuständen verbessert. Durch umfangreiche Möglichkeiten zur Charakterisierung kann das Verhalten einzelner Brennstoffzellen in unterschiedlichsten Betriebszuständen beobachtet werden. Neben den üblichen Messverfahren wurde eine Messzelle zur ortsaufgelösten Bestimmung wichtiger Kenngrößen wie Stromdichte, Widerstand und Temperatur entwickelt.

Eine sichere Auslegung und Konstruktion von Brennstoffzellen-Systemen basiert auf detaillierten Simulationsrechnungen. Mit Hilfe von CFD-Programmen modellieren wir gekoppelte Größen wie ortsabhängige Stromdichte, Sauerstoffpartialdruck, anoden- bzw. kathoden-seitige Flussraten, Temperaturen und Membranfeuchte. Des Weiteren nutzen wir dynamische Simulationsmodelle zum Entwurf von Regelungssystemen.



Testzelle zur ortsaufgelösten Messung charakteristischer Kenngrößen.

## Referenzprojekte

### *Innovative Hausenergieversorgung*

Brennstoffzellen können aus Wasserstoff umweltfreundlich und hocheffizient Strom erzeugen, die dabei anfallende Wärme kann Gebäude heizen. Wir entwickeln Reformer, die Wasserstoff aus Erdgas bereitstellen. Die Systeme konzipieren wir für einen Leistungsbereich von 1-2 kW<sub>el</sub>. Die erste Verfahrensstufe, der Reformierreaktor, erzeugt durch Umsetzung von Erdgas und Wasserdampf ein wasserstoffreiches Gasgemisch. Zwei nachgeschaltete katalytische Konverter wandeln den noch vorhandenen Kohlenmonoxid-Anteil von etwa 10 Vol % in Kohlendioxid und Wasserstoff um. Die CO-Feinreinigungsstufe entfernt schließlich das verbleibende Kohlenmonoxid bis auf einen Restanteil im ppm-Bereich. Damit hat das Gas die für Membranbrennstoffzellen erforderliche Qualität. Die Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerke werden einschließlich der Regelungssysteme realisiert, die einen Fernzugriff gestatten. Die Betriebsoptimierung erfolgt dabei unter wirtschaftlichen sowie ökologischen Gesichtspunkten.

Den weltweit erstmaligen Einsatz einer Brennstoffzelle als Kleinst-Blockheizkraftwerk realisierte das Fraunhofer ISE 1992 im Modellprojekt Energieautarkes Solarhaus. Solar erzeugter Wasserstoff diente als gemeinsamer Energiespeicher für Strom und Wärme (Foto Seite 2).

### *Regenerativer Fahrzeugantrieb*

1997 wurde vom Fraunhofer ISE erstmalig eine komplett regenerative Energieversorgung mit Hilfe von solarer Wasserstoffherzeugung für einen Autotyp aufgebaut. Das Fahrzeug stellt das erste mit einer Brennstoffzelle angetriebene und vom TÜV zugelassene Automobil dar.

### *Mikro-Brennstoffzelle für Camcorder*

In der Demonstrationsanwendung für einen modernen Camcorder hat die Fraunhofer-Initiative Mikro-Brennstoffzellen unter Leitung des Fraunhofer ISE den üblicherweise verwendeten Akku vollständig durch ein Brennstoffzellen-System ersetzt. Die Leistung von 10 W wird bei einer Spannung von 8 V realisiert. Dazu werden 15 Bipolplatten aufeinander gestapelt und miteinander verklebt. Der Wasserstoff wird geregelt aus einem Metallhydridspeicher zugeführt; für die Sauerstoffversorgung genügt die einfache Belüftung mit Umgebungsluft. In der Fraunhofer-Initiative Mikro-Brennstoffzelle entwickeln die Partner aus sieben Fraunhofer-Instituten innovative Energiesysteme auf Basis portabler Mikro-Brennstoffzellen. Wir berücksichtigen dabei die neuesten Erkenntnisse aus System-Simulation, Elektronik bzw. Regelung, Werkstoffentwicklung, Produktions- und Montagetechnologie.

### *Miniatur-Elektrolyse für schaltbare Fenster*

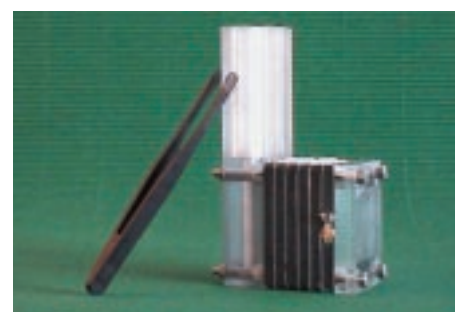
Gaschrome Fenster verringern ihre Lichtdurchlässigkeit, sobald ihre Wolframoxid-Beschichtung in Kontakt mit wasserstoffreichem Trägergas kommt. Zum Entfärben wird das Trägergas mit Sauerstoff versetzt. Der Sauerstoff reagiert mit dem Wasserstoff zu Wasser und die Scheibe wird wieder vollständig transparent. Das Wasser steht dann erneut für die Elektrolyse zur Verfügung. Hierfür wurde eine Mini-Elektrolyse-Einheit mit einer Wasserstoffproduktion von 4,2 NI/h bei einer Leistungsaufnahme von 18 W entwickelt, die in den Rahmen integriert werden kann.



Anlage mit solarer Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyse, Wasserstoffdruck-Speicherung und Automobil mit Brennstoffzellen-Antrieb.



Demonstrationsanlage für ein Brennstoffzellen-BHKW.



Miniatur-Elektrolyseur zum Einsatz in gaschromen Fenstern.



Brennstoffzellen-System mit einer Leistung von 10 W für einen digitalen Camcorder. Eine Entwicklung der Fraunhofer-Initiative Mikro-Brennstoffzelle.

# Sprechen Sie uns an!

## Adresse

Fraunhofer-Institut für  
Solare Energiesysteme ISE  
Heidenhofstraße 2  
79110 Freiburg  
Tel: +49 (0) 7 61/45 88-0  
Fax: +49 (0) 7 61/45 88-90 00  
www.ise.fhg.de

## Ansprechpartner

### Reformierung

Dr. Thomas Aicher  
Tel: +49 (0) 7 61/45 88-51 94  
Fax: +49 (0) 7 61/45 88-91 94  
E-Mail: Thomas.Aicher@ise.fhg.de

### Dr. Peter Hübner

Tel: +49 (0) 7 61/45 88-52 10  
Fax: +49 (0) 7 61/45 88-92 10  
E-Mail: Peter.Huebner@ise.fhg.de

### Elektrolyse

Dipl.-Ing. Ursula Wittstadt  
Tel: +49 (0) 7 61/45 88-52 04  
Fax: +49 (0) 7 61/45 88-92 04  
E-Mail: Ursula.Wittstadt@ise.fhg.de

### Mikroenergietechnik

Dr. Christopher Hebling  
Tel: +49 (0) 7 61/45 88-51 95  
Fax: +49 (0) 7 61/45 88-91 95  
E-Mail: Christopher.Hebling@ise.fhg.de

### Membranbrennstoffzellen

Dipl.-Ing. (FH) Mario Zedda  
Tel: +49 (0) 7 61/45 88-52 07  
Fax: +49 (0) 7 61/45 88-92 07  
E-Mail: Mario.Zedda@ise.fhg.de

### Integration von Brennstoffzellen in autonome Stromversorgungen

Dipl.-Phys. Dirk Uwe Sauer  
Tel: +49 (0) 7 61/45 88-52 19  
Fax: +49 (0) 7 61/45 88-92 19  
E-Mail: Dirk-Uwe.Sauer@ise.fhg.de

### Leistungs- und Regelungselektronik für Brennstoffzellen

Dr. Bruno Burger  
Tel: +49 (0) 7 61/45 88-52 37  
Fax: +49 (0) 7 61/45 88-92 37  
E-Mail: Bruno.Burger@ise.fhg.de

### Regelungsstrategien von Brennstoff- zellen-Blockheizkraftwerken in Gebäuden

Dr. Christof Wittwer  
Tel: +49 (0) 7 61/45 88-51 15  
Fax: +49 (0) 7 61/45 88-91 15  
E-Mail: Christof.Wittwer@ise.fhg.de

### Marketing

Dipl.-Ing. Ulf Groos  
Tel: +49 (0) 7 61/45 88-52 02  
Fax: +49 (0) 7 61/45 88-92 02  
E-Mail: Ulf.Groos@ise.fhg.de

## Übergreifende Koordination

### Wasserstofftechnologie

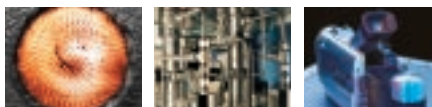
Dr. Christopher Hebling  
Tel: +49 (0) 7 61/45 88-51 95  
Fax: +49 (0) 7 61/45 88-91 95  
E-Mail: Christopher.Hebling@ise.fhg.de

### Netzunabhängige Stromversorgungen und Integration von BHKWs in Stromnetze

Dr. Tim Meyer  
Tel: +49 (0) 7 61/45 88-52 29  
Fax: +49 (0) 7 61/45 88-92 29  
E-Mail: Tim.Meyer@ise.fhg.de

### Gebäude und technische Gebäudeausrüstung

Priv. Doz. Dr. Volker Wittwer  
Tel: +49 (0) 7 61/45 88-51 40  
Fax: +49 (0) 7 61/45 88-91 40  
E-Mail: Volker.Wittwer@ise.fhg.de



Abbildungen Titelseite (von links nach rechts):  
Wabenkatalysator für die Reformierung  
flüssiger Brennstoffe.  
Trocknungseinheit eines PEM-Elektrolyseurs.  
PEM-Brennstoffzellen-System als  
Energieversorgung für einen digitalen  
Camcorder.



Planare Brennstoffzelle mit einer Leistung  
von 1,2 W. Die Serienschaltung von drei  
Brennstoffzellen wurde in Leiterplattentechnologie realisiert.



Teststand eines 3,3 kW<sub>el</sub> Brennstoffzellen-  
Stacks mit einer Brennstoffzelle der Firma  
SIEMENS.



Mikrobrennstoffzelle mit einer Leistungsdichte  
von 1 W/cm<sup>3</sup>. Entwicklung in Zusammenarbeit  
mit dem Institut für Mikrosystemtechnik IMTEK  
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Besuchen Sie uns im Internet!  
[www.ise.fhg.de](http://www.ise.fhg.de)  
[www.h2-ise.de](http://www.h2-ise.de)  
[www.mikroenergietechnik.de](http://www.mikroenergietechnik.de)