**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 91 (2000)

**Heft:** 10

**Artikel:** Option Brennstoffzelle und Wasserstoff

**Autor:** Fischer, Manfred

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-855545

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 14.12.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

## Sauberer Strom aus kaltem Feuer

# Option Brennstoffzelle und Wasserstoff

Eine Energietechnik mit hohem Wirkungsgrad und fast ohne Schadstoffe klingt verlockend. In der Brennstoffzelle reagieren Wasserstoff und Sauerstoff, vermittelt durch einen so genannten Elektrolyten, auf elektrochemischem Wege und verbinden sich zu Wasser. Dabei wird Energie frei: Strom und Wärme. Doch die Tücken liegen noch in den Kleinigkeiten. Langsam wird die Brennstoffzelle für die Energieerzeugung jedoch interessant. Zurzeit erfährt sie einen bedeutsamen Entwicklungsschub (Bild 1).

■ Manfred Fischer

### Herausforderungen an die Energie- und Antriebstechnik

Energietechnik und Energieversorgung beeinflussen weite Bereiche von Wirtschaft und Gesellschaft. Die Energiewirtschaft ist zugleich ein bedeutender Sektor der Weltwirtschaft mit hoher Wertschöpfung und grossem Innovationsbedarf. Die Verfügbarkeit ausreichender und kostengünstiger Energie und der aus ihr gewinnbaren technischen Arbeitsfähigkeit ist und bleibt eine der Grundvoraussetzungen für wirtschaftliche Entwicklung und humane Lebensbedingungen.

Die weltweite Energieversorgung erfolgt heute noch immer zu 90% der Primärenergie durch Verbrennung fossiler Energieträger (40% Mineralöl, 27% Kohle, 23% Erdgas; dazu kommen 8% Kernkraft, 2% Wasserkraft)[1]. Die Prognosen für die Entwicklung der Weltbevölkerung zeigen einen Anstieg von derzeit knapp 6 Milliarden auf 10 bis 12 Milliarden Menschen[2] in der 2. Hälfte des nächsten Jahrhunderts, der nahezu ausschliesslich in den Entwicklungs- und Schwellenländern stattfinden wird. Damit verbunden ist in diesen Ländern ein drastischer Anstieg der Nachfrage nach Energiebereitstellung.

Die derzeitige Energieversorgung ist aber bereits eine wesentliche Quelle der Belastung von Umwelt und Klima. Der jährliche Weltenergieverbrauch beträgt zurzeit rund 12 Mrd. t SKE. Für das Jahr 2020 wird mit etwa 20 Mrd. t SKE gerechnet[3]. Besonders beunruhigend ist hierbei der drohende, weltweit absolut noch stark steigende Verbrauch fossiler Primärenergieträger, der mit den damit

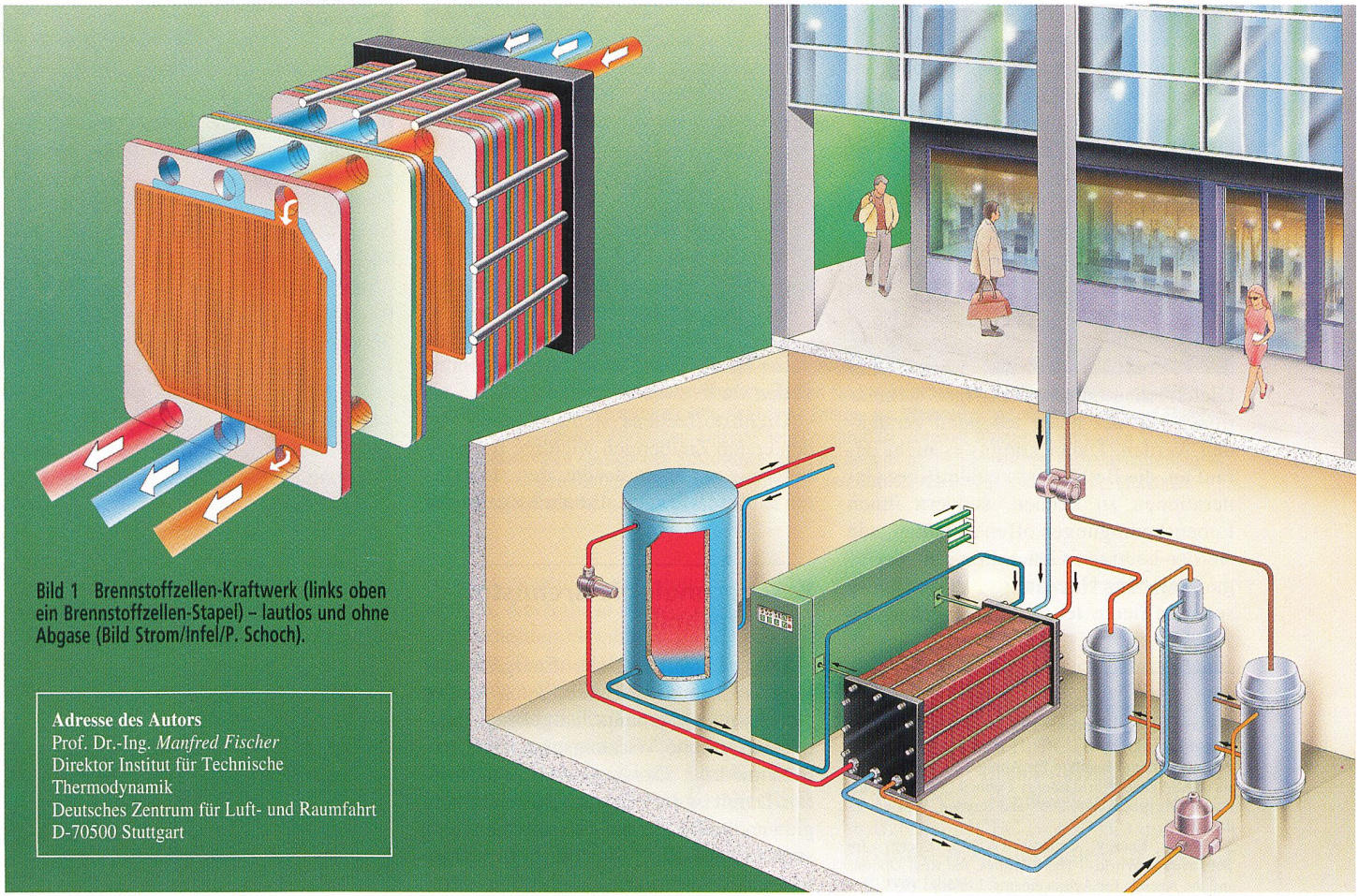

Bild 1 Brennstoffzellen-Kraftwerk (links oben ein Brennstoffzellen-Stapel) – lautlos und ohne Abgase (Bild Strom/Infel/P. Schoch).

**Adresse des Autors**
Prof. Dr.-Ing. *Manfred Fischer*
Direktor Institut für Technische Thermodynamik
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
D-70500 Stuttgart

verbundenen Emissionen von Schadstoffen nicht nur Umwelt und Klima gefährdet, sondern auch – irreversibel – wertvolle Ressourcen rasch aufzehrt. Nach derzeitigem Wissensstand stellt die mögliche Veränderung des Klimas eine vermutlich grosse Gefahr für die Lebensgrundlagen der Menschheit dar.

Damit ist das zentrale Spannungsfeld der zukünftigen Entwicklung beschrieben: Schaffung humaner Lebensbedingungen für eine weiter wachsende Weltbevölkerung bei gleichzeitiger Begrenzung der Inanspruchnahme von Natur und Umwelt, damit die Lebensqualität zukünftiger Generationen nicht beeinträchtigt wird.

Die damit verbundene Notwendigkeit schadstoffarmer und effizienter sowie kostengünstiger Energietechnologien für die Energieversorgung stellt hohe Anforderungen an zukünftige Energiesysteme.

## Nachhaltige Entwicklung

Im Mittelpunkt stehen dabei die folgenden Grundprinzipien für eine nachhaltige Entwicklung:

- Die Nutzung einer Ressource darf auf Dauer nicht grösser sein als ihre Regenerationsfähigkeit oder die Rate der Substitution all ihrer Funktionen (Ressourcenschonung).
- Die Freisetzung von Stoffen darf auf Dauer nicht grösser sein als die Tragfähigkeit der Umweltmedien bzw. als deren Assimilationsfähigkeit.
- Gefahren für die menschliche Gesundheit durch anthropogene Einwirkungen sind auszuschliessen.
- Begrenzung der verbleibenden Risiken auf ein verantwortbares Mass (Risikovorsorge).

Nachhaltigkeit soll als ethische Norm der Verantwortung im Sinne einer Gleichbehandlung zukünftiger Generationen mit der heute lebenden verstanden werden. Dabei kommt es nicht darauf an, die Bedürfnisse zukünftiger Generationen zu kennen, sondern ihnen Lebensbedingungen offen zu halten, wie sie der heutigen Generation zur Verfügung stehen. Nachhaltige Entwicklung soll den heute lebenden Menschen die Befriedigung ihrer Bedürfnisse ermöglichen, ohne dass dadurch die Befriedigung ähnlicher Bedürfnisse künftiger Generationen beeinträchtigt wird. Mit nachhaltiger Entwicklung ist nicht nur verantwortliches Handeln gegenüber zukünftigen Generationen angesprochen, sondern insbesondere auch verantwortliches Handeln der Industrieländer gegenüber den Entwicklungsländern, um die bestehenden krassen wirtschaftlichen und sozialen Gegensätze zu überwinden, zumindest zu mildern. Nachhaltige Entwicklung vereint die sich scheinbar widersprechenden Forderungen nach wirtschaftlicher Entwicklung einerseits und schonendem Umgang mit den begrenzten Ressourcen sowie der Umwelt und dem Klima andererseits. Im Hinblick auf den Anspruch einer nachhaltigen Entwicklung kommt es darauf an, Energietechnologien zu nutzen, die hinsichtlich der Freisetzung von Stoffen mit Umwelt und Klima auch langfristig verträglich sind, zur Ressourcenschonung beitragen und deren Risiken verantwortbar sind.

Eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung kann durch technische Innovationen mit folgenden Zielsetzungen gefördert werden:

- Mittelfristig der Einsatz zunehmend effizienterer und schadstoffärmerer Energietechnologien zur besseren Ausnutzung fossiler Primärenergieträger sowohl in der stationären Energieversorgung wie im Verkehrsbereich.
- Langfristig der verstärkte Einsatz aller nicht fossilen Primärenergiequellen, die geringe Schadstoffemissionen aufweisen, hinreichend langfristig verfügbar, wirtschaftlich entwickelbar und mit verantwortbaren Risiken bei potenziellen Unfallszenarien und bei der Endlagerung von Abfällen verbunden sind.

Brennstoffzellensysteme können für den ersten Zielbereich wichtige Beiträge liefern, sowohl im dezentralen stationären Einsatz wie auch als Fahrzeugantrieb.

## Basistechnologie Brennstoffzellentechnik

Die elektrochemische Energiewandlung in Brennstoffzellen, auch «kalte Verbrennung» genannt, ist gekennzeichnet durch hohe Wirkungsgrade und extrem niedrige Emission von Schadstoffen. Damit ist die elektrochemische Energiewandlung in Brennstoffzellen interessant für das Ziel einer hocheffizienten und emissionsarmen Energieversorgung und Verkehrstechnik. Die Brennstoffzellentechnik ermöglicht ausserdem die unmittelbare Erzeugung von elektrischer Energie aus gasförmigen und flüssigen Energieträgern – heute noch fossile, zukünftig mit regenerativer Energie erzeugte Brennstoffe – ohne den verlustbehafteten Umweg über Wärmekraftmaschinen (z. B. Turbinen, Motoren) gehen zu müssen. Die technisch-wissenschaftlichen Aufgaben umfassen die Entwicklung langzeitstabiler und kostengünstiger Elektroden-Elektrolyt-Verbundsysteme, Zellblöcke und Brennstoffzellen-Gesamtsysteme. Die Brennstoffzellentechnik stellt eine Basistechnologie dar, weil ihr Anwendungspotenzial vom Kleinstaggregat für Handys über Fahrzeugantriebe bis zu stationären Kraftwerken in höchsteffizienter Kraft-Wärme-Kopplung, über Bordsysteme im Flugzeug bis zu Raumstationen reicht.

Brennstoffzellen können erhebliche Beiträge zur Reduzierung lokaler Schad-

## Prinzip der Brennstoffzelle

(m) Brennstoffzellen wird chemische Energie in Form eines Brennstoffs kontinuierlich zugeführt. Dazu sind zwei flächige Elektroden durch einen Elektrolyten getrennt, einen Stoff, der nur Ionen einer bestimmten Art leitet. In der Festoxid-Brennstoffzelle dient als Elektrolyt eine Keramik aus Zirkonoxid, die ausschliesslich Sauerstoff-Ionen durchlässt: Für ihren Betrieb lässt man zur einen Elektrode, der Kathode, Luft strömen. Bei der hohen Betriebstemperatur von 900 bis 1000 °C und infolge der Katalysatorwirkung von Elektrolyt und Elektrode werden die Atome des Luftsauerstoffs ionisiert, d. h. sie nehmen je zwei (elektrisch negative) Elektronen auf. Diese Ionen wandern durch den Elektrolyt zur anderen Elektrode, der Anode. Sie geben die beiden Elektronen an die Anode ab und reagieren chemisch mit Brennstoff-Atomen. An der Anode besteht nun Elektronenüberschuss, an der Kathode Elektronenmangel, mithin dazwischen eine elektrische Spannung in der Grössenordnung von einem Volt – eine leitende äussere Verbindung lässt Gleichstrom fliessen.

1 Primärenergieanteile weltweit im Jahr 1995 nach der Wirkungsgradmethode (BP, Statistical Review of World Energy).

2 International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) and World Energy Council (WEC): Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond. WEC. London, 1995.

3 World Energy Council (WEC): Energy for Tomorrow's World – The Realities, the Real Options and the Agenda for Achievements, London, 1993.

stoffemissionen aber auch klimarelevanter Gase leisten. Zur korrekten Beurteilung dieser Potenziale sind zum einen vollständige Nutzungssysteme zu betrachten, zum anderen sind Analysen auf der Basis der gesamten Energiewandlungskette erforderlich. Auch die Entwicklungspotenziale konventioneller Nutzungssysteme in dieser Hinsicht sind zu berücksichtigen. Repräsentative Ergebnisse derartiger Analysen sowohl im stationären wie im mobilen Bereich werden vorgestellt.

## Brennstoffe, Energie- und Emissionsbilanzen

Der für den Brennstoffzellenbetrieb notwendige Wasserstoff kann direkt mit Hilfe der Wasserelektrolyse auf Basis nichtfossiler oder fossiler Energie bereitgestellt werden, oder durch externe bzw. interne Reformierung von Erdgas, Methanol und – zukünftig eventuell – Kohlegasen.

Neben den mit den verschiedenen Brennstoffen und Kraftstoffen verbundenen spezifischen Problemen der Brennstoffzellentechnik sind hierbei die Energie- und Emissionsbilanzen wichtige Kriterien.

Ein umweltrelevantes Kriterium zur Bewertung von Blockheizkraftwerken (BHKW) ist die Höhe der Brennstoffeinsparung im Vergleich zur getrennten Erzeugung von Strom und Nutzwärme. Diese hängt bei gegebener Vergleichserzeugung sowohl von der BHKW-Auslegung als auch von der Stromkennzahl bzw. dem Gesamtnutzungsgrad ab. Die erzielbaren Brennstoffeinsparungen von Referenzsystemen wurden verglichen. Je höher der Kraft-Wärme-Kopplungs-Anteil (KWK) an der Wärmedeckung ist, desto höher ist die Einsparquote.

Während BHKW mit Membran-Brennstoffzellen (PEFC) wegen des zu 75% angenommenen Gesamtnutzungsgrades hinsichtlich der Brennstoffeinsparung mit zukünftigen Motor-BHKW mit 26 bis 28% vergleichbar sind, aber über den Werten heutiger Motor-BHKW liegen, können zukünftige BHKW mit phosphorsauren Brennstoffzellen (PAFC) mit 29–32%, erst recht aber BHKW mit Hochtemperatur-Brennstoffzellen (SOFC) mit 33–38% deutlich höhere Werte erreichen. Die heutigen PAFC-BHKW sind mit heutigen Motor-BHKW vergleichbar.

Die guten elektrischen Nutzungsgrade der Brennstoffzellen-BHKW gewährleisten jedoch auch bei Stromüberschussprodukten deutliche Einspareffekte gegenüber neuen, konventionellen Kraftwerken. Auch diese Eigenschaft trägt zu einer erhöhten Flexibilität im KWK-Einsatz von Brennstoffzellen im Vergleich zum Motor-BHKW bei.

Hauptvorteil der Brennstoffzelle sind die extrem geringen lokalen Emissionen. Die Quelle von Stickoxid- und Kohlenmonoxidemissionen ist ausschliesslich der Reformer, der im Allgemeinen mit nicht in der Brennstoffzelle umgesetztem Prozessgas beheizt wird.

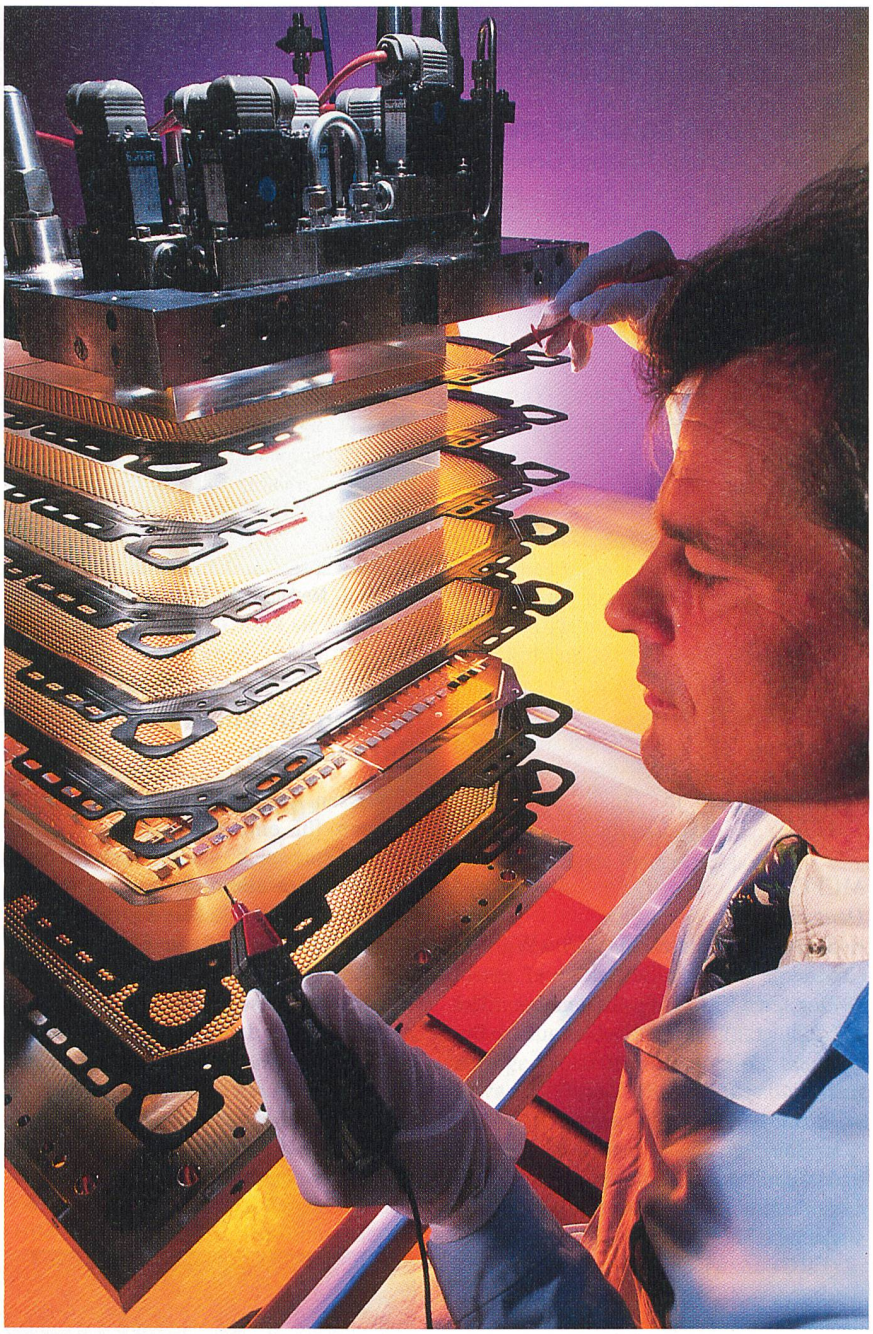

**Bild 2** Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler, die mit einem Wirkungsgrad von mehr als 60% elektrische Energie aus Wasserstoffgas als Brennstoff und Sauerstoff als Oxidationsmittel erzeugen. Einziges Reaktionsprodukt ist reines Wasser. Es entstehen also keine umweltbelastenden gasförmigen Schadstoffe, wie zum Beispiel bei herkömmlichen Verbrennungsmotoren. Dieser Brennstoffzellentyp eignet sich besonders für den Antrieb von Bussen und für kleine stationäre Anlagen (Bild Siemens).

## Pilot- und Demonstrationsprojekte (Bild 2)

Im stationären Bereich wurden und werden weltweit folgende Pilot- und Demonstrationsprojekte mit Membran-Brennstoffzellen PEFC (= 80 °C), phosphorsauren Brennstoffzellen PAFC (= 200 °C), Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen MCFC (= 650 °C) und Festelektrolyt-Brennstoffzellen (= 900 °C) durchgeführt:

**PEFC:**
- Burnaby, Kanada (BC Hydro): 250-$kW_{el}$-Demoanlage (Ballard Generation Systems), in Betrieb
- Heizkraftwerk Treptow (Bewag): 250-$kW_{el}$-Anlage (Ballard Generation Systems) und weitere Anlagen, geplant
- Erdgashaus Machern/Leipzig: 4-$kW_{el}$-Anlage (American Power Corp.), in Betrieb
- Risa-Grossenhain: 7,5-$kW_{el}$-Anlage (Energy Partners, Fraunhofer ISE), in Betrieb
- Vaillant und Plug Power: Vermarktung von Brennstoffzellen-Heizgeräten, geplant

**PAFC:**
- Kommerzielle Vermarktung der ONSI-PAFC 200 $kW_{el}$, zahlreiche Anlagen weltweit, unter anderem in Hamburg (davon eins mit $H_2$-Betrieb), Darmstadt (bis 1998), Saarbrücken, Oranienburg, Halle, Nürnberg, Köln (ab 1999 mit Klärgas)
- Fuji-Elektrik: Markteinführung einer 100-$kW_{el}$-Anlage, geplant
- Grossanlagen in Japan, vor allem 11 $MW_{el}$ (Tokyo Electric Power, Japan)

**MCFC:**
*Deutschland:*
- Stadtwerke Bielefeld: 250 $kW_{el}$ Hot Module (mtu), in Betrieb
- Dorsten: 300-$kW_{el}$-Testanlage Hot Module (mtu), inzwischen ausser Betrieb

*International:*
- Japan: 1-$MW_{el}$-Demoanlage (Hitachi), in Bau
- Mailand: 100-$kW_{el}$-Demoanlage (Ansaldo Ricerche), in Betrieb
- Santa Clara: 2,8-$MW_{el}$-Demoanlage (ERC), inzwischen ausser Betrieb

**SOFC:**
- Westervoort (Niederlande): 100-$kW_{el}$-Pilotanlage (Siemens/Westinghouse), in Betrieb
- Southern California: 250-$kW_{el}$-SOFC/GT mit Druckbetrieb und Gasturbine (Siemens-Westinghouse), in Bau, Inbetriebnahme für 2000 geplant
- Nordrhein-Westfalen RWE Energie: 300-$kW_{el}$-SOFC/GT (Siemens-Westinghouse), geplante Inbetriebnahme 2000
- Baden-Württemberg EnBW: 1-$MW_{el}$-SOFC/GT (Siemens-Westinghouse), geplant
- Sulzer-HEXIS: 2-$kW_{el}$-Kleinanlagen, vier Anlagen im Testbetrieb
- Kleinere Demostacks von Allied Signal, Ztek, SOFCo, Mitsubishi, Toto, Rolls Royce, DLR, FZ Jülich, u. a.

| Typ | Abkürzung | Hersteller |
|---|---|---|
| • Alkalische Brennstoffzelle | AFC | |
| • Polymer-Membran-Brennstoffzelle | PEMFC | Ballard, Siemens |
| • Phosphorsäure-Brennstoffzelle | PAFC | Onsi |
| • Karbonatschmelze-Brennstoffzelle | MCFC | Energy Research Corp. |
| • Oxidkeramik-Brennstoffzelle | SOFC | Westinghouse, Sulzer |

**Tabelle I** Brennstoffzellentypen.

| Typ | Arbeitstemperatur | Elektrischer Wirkungsgrad | Einsatzgebiet |
|---|---|---|---|
| AFC (Alkali) | 70–85 °C (Niedertemp.) | 63% | Verkehr, Raumfahrt |
| PEMFC (Polymer) | 80–120 °C (Niedertemp.) | 60% | Verkehr |
| PAFC (Phosphors.) | 200 °C (Niedertemp.) | 40–46% | Kraftwerk, BHKW |
| MCFC (Karbonat) | 650 °C (Hochtemp.) | 48–56% | Kraftwerk |
| SOFC (Oxidkeramik) | 900–1000 °C (Hochtemp.) | 55–65% | Kraftwerk, BHKW, Verkehr |

**Tabelle II** Merkmale der Brennstoffzellen und Einsatzgebiete.

## Beitrag für eine nachhaltige Entwicklung

Wissen ist eine der wichtigsten Ressourcen für eine nachhaltige Entwicklung. Ohne sich ständig erweiterndes Wissen – vor allem technisches Wissen und Know-how – haben wir in der weltweiten Konkurrenz keine Chance.

Wichtig dabei ist, dass Wissen und Know-how Ressourcen sind, die nicht verbraucht werden, sondern vermehrbar sind. Erweitertes technisches Wissen, zum Beispiel im Bereich der Basistechnologie Brennstoffzellentechnik ermöglicht:
- die Energieintensität unserer Wirtschaft weiter zu reduzieren,
- die verfügbare Energiebasis durch hocheffiziente Energiewandlung zu schonen und
- die Umweltbelastung durch Schadstoffe zu vermindern.

Nur wenn es gelingt, durch wissenschaftlich-technischen Fortschritt die verfügbare Energie- und Rohstoffbasis für die nachfolgenden Generationen zu erweitern und die Freisetzung von Schadstoffen zu begrenzen, ist das für eine Stabilisierung der Weltbevölkerung notwendige Wirtschaftswachstum und die Nutzung vorratsbegrenzter Energien und Rohstoffe mit einer nachhaltigen Entwicklung verträglich.

## Piles à combustibles: des installations de production d'électricité et de chaleur propres et silencieuses

La pile à combustible offre une «combustion vive» de gaz naturel et d'air produisant de manière quasi non polluante et silencieuse de l'électricité et de la chaleur à un rendement élevé. De l'énergie chimique est amenée continuellement sous la forme de combustible aux piles à combustible. Deux électrodes plates sont séparées à cette fin par un électrolyte, un corps qui ne conduit le courant électrique que par le mouvement d'ions dissociés. Le miracle de l'énergie n'est pas pour demain, mais plusieurs installations d'essai sont en exploitation après des décennies de recherche et développement. Malgré la simplicité du principe, la difficulté réside ici dans le détail. Il s'agit de surmonter les problèmes techniques et de diminuer les frais.