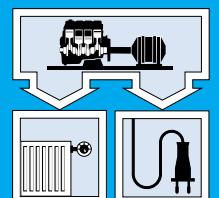
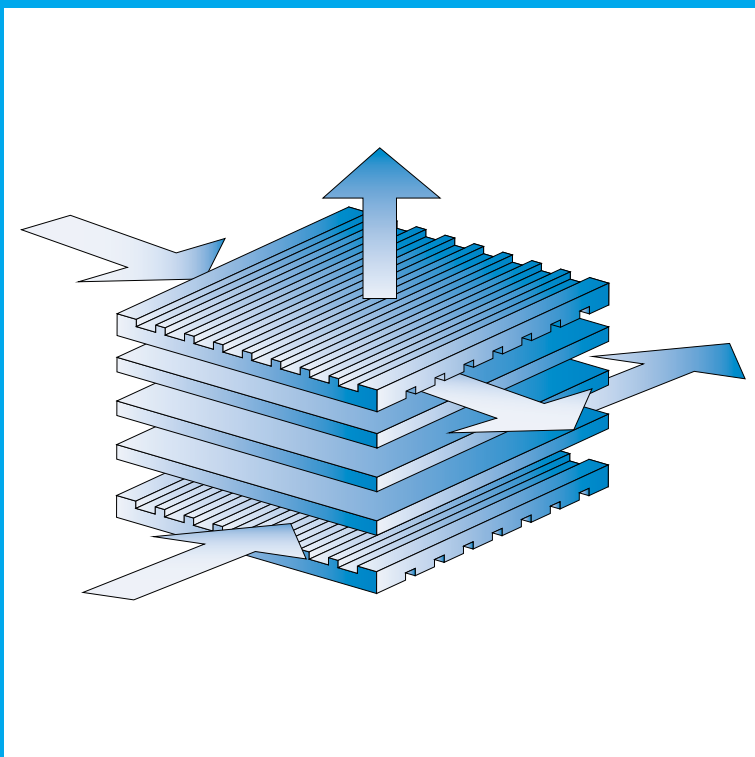


# Stationäre Brennstoffzellen

Grundlagen  
Einsatzmöglichkeiten  
Stand der Technik  
Perspektiven



Herausgeber:

ASUE  
Arbeitsgemeinschaft für  
sparsamen und umweltfreundlichen  
Energieverbrauch e.V.  
Bismarckstraße 16 · 67655 Kaiserslautern  
Telefon (06 31) 360 90 70  
e-mail [asue@compuserve.com](mailto:asue@compuserve.com)  
Internet [www.asue.de](http://www.asue.de)

Vertrieb:

Verlag  
Rationeller Erdgaseinsatz  
Postfach 2547 · 67613 Kaiserslautern  
Telefax (06 31) 360 90 71

Stationäre Brennstoffzellen  
Best.-Nr. 05 09 00  
Schutzgebühr 2,00 €

# Inhalt

<b>Einführung</b>	4
<b>Grundlagen</b>	6
Funktionsprinzip	6
Von der Zelle über den Stapel bis zur Anlage	7
Gasaufbereitung	8
Strom- und Wärmeerzeugung	9
<b>Brennstoffzellensysteme im Überblick</b>	10
Alkalische Brennstoffzelle – AFC	11
Polymermembran-Brennstoffzelle – PEMFC	11
Phosphorsaure Brennstoffzelle – PAFC	12
Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle – MCFC	13
Oxidkeramische Brennstoffzelle – SOFC	14
Realisierte Brennstoffzellenprojekte in Deutschland	16
<b>Vorteile der Brennstoffzellentechnik</b>	17
Wirkungsgrad	17
Teillastverhalten	19
Emissionen	19
<b>Perspektiven für Brennstoffzellen im Energiemarkt</b>	21

# Einführung

Bereits 1839 experimentierte Sir William Robert Grove (engl. Physiker, 1811 – 1896) mit einem heißen Platindraht als Katalysator, um Wasserdampf in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff aufzuspalten (Elektrolyse). Dann wies er nach, dass diese Reaktion als „kalte Verbrennung“ reversibel ist. Diese grundlegenden Arbeiten gelten als Geburtsstunde der Brennstoffzellentechnik. Damals haben nur Sciencefiction-Autoren wie Jules Verne an die Anwendung dieser Technik geglaubt. In seinem Buch „Die geheimnisvolle Insel“ wagt der Romaningenieur die Prognose „Wasser ist die Kohle der Zukunft“.

Nachdem 1866 Werner von Siemens das elektrodynamische Prinzip entwickelt hatte, sah es so aus, als wenn die elektrochemische Stromerzeugung nur noch in Nischen anwendbar sein sollte. Erschwerend kam hinzu, dass Materialprobleme und mangelnde Kenntnisse der elektrochemischen Prozesse die Brennstoffzellenentwicklung behinderten.

Mitte des 20. Jahrhunderts waren die Entwicklungsarbeiten so weit vorangekommen, dass Brennstoffzellenanlagen aufgrund ihres hohen elektrischen Wirkungsgrades – verbunden mit einer hohen Energiedichte und großer

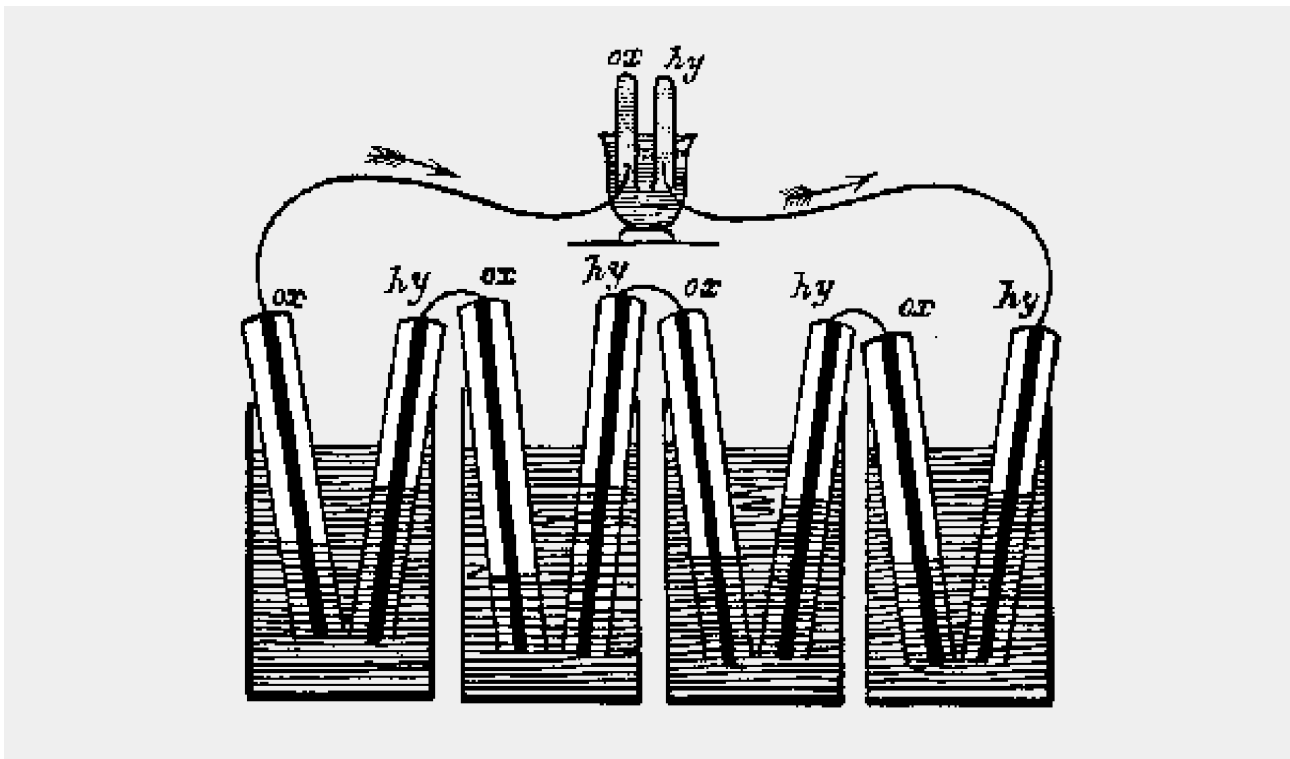


Bild 1: Schema einer Brennstoffzellen-Batterie (W. R. Grove, 1842)

Kapazität – für das Militär und die Raumfahrt interessant wurden. Die Investitionskosten für diese Anlagen waren jedoch extrem hoch und standen somit einer weiteren Verbreitung im Wege. Der erste praktische Einsatz einer Brennstoffzelle in der Raumfahrt erfolgte 1963, als eine alkalische Brennstoffzelle bei der „Gemini“-Mission einen erfolgreichen Einsatz im All absolvierte. Die Anlage wurde mit Wasserstoff und reinem Sauerstoff bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 60 % betrieben. Das als Reaktionsprodukt erhaltene Wasser wurde zur Versorgung der Besatzung verwendet. In der Zwischenzeit sind Brennstoffzellen oftmals erfolgreich in Raumfahrtmissionen wie z. B. „Apollo“ oder „Spaceshuttle“ eingesetzt worden. Auch für außenluftunabhängige Antriebssysteme von U-Booten wurden und werden Brennstoffzellen eingesetzt.

Seit Mitte der 80er Jahre wird die Brennstoffzellentechnik aufgrund des wachsenden Umweltbewusstseins auch für die stationäre Energieversorgung erprobt. Blockheizkraftwerke zur elektrischen und thermischen Versorgung größerer Verbraucher sind inzwischen kommerziell erhältlich. Darüber hinaus sind Brennstoffzellenantriebe für Pkw und Busse aktuell Gegenstand weltweiter Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Aufgrund der anvisierten Kostenziele im automobilen Sektor ist auch für die stationäre Anwendung mit einer erheblichen Kostenreduktion zu rechnen.

Da der Brennstoffzellentechnik in naher Zukunft ein großes Potenzial sowohl im Automobilbereich als auch in der stationären Strom- und Wärmeerzeugung zugestanden wird, soll in dieser Broschüre zunächst ein Überblick über die Funktionsweise einer Brennstoffzelle und die verschiedenen Brennstoffzellensysteme gegeben werden. Der Leser soll darüber hinaus über den Stand der Brennstoffzellentechnik sowie deren Anwendungsmöglichkeiten informiert werden.

# Grundlagen

## Funktionsprinzip

Die Wirkungsweise einer Brennstoffzelle unterscheidet sich grundsätzlich von der herkömmlichen Art der Energieumwandlung in thermischen Kraftwerken. Im Fall einer konventionellen Wärme-Kraft-Maschine wird die chemische Energie des Brennstoffs durch Verbrennung zunächst in thermische Energie umgewandelt. Durch den Betrieb eines Motors oder einer Turbine wird aus dieser thermischen Energie mechanische Energie gewonnen, die schließlich zum Antrieb eines Generators und somit zur Gewinnung elektrischer Energie genutzt wird. Das Funktionsprinzip der Brennstoffzelle erlaubt dagegen die direkte Umwandlung der chemisch gebundenen Energie des Brennstoffs in elektrische Energie. Da der Umweg über die thermische und mechanische Energie entfällt, ist der Carnot-Wirkungsgrad nicht der limitierende Faktor, und Brennstoffzellen können erheblich höhere elektrische Wirkungsgrade als herkömmliche Aggregate erzielen (vgl. Seite 17).

Brennstoffzelle sind der Elektrolyt, der den Ionentransport übernimmt, sowie die beiden Elektroden Anode und Kathode. Der Elektrolyt muss gasdicht ausgeführt sein, um den direkten Kontakt von Sauerstoff und Wasserstoff zu vermeiden. Die Elektroden müssen eine hohe Porosität aufweisen, damit eine große Oberfläche für die elektrochemischen Umsetzungen zur Verfügung steht. Dies ist für die Stromausbeute entscheidend, da die Umsetzungen an der Grenzfläche zwischen gasförmigem Reaktant, Elektrolyt und Elektrode (3-Phasen-Grenzfläche) stattfindet. An der Anode erfolgt die Oxidation des zugeführten Wasserstoffs zu Wasserstoff-Ionen ( $H^+$ -Ionen). Die freigesetzten Elektronen werden mit Hilfe eines externen Leiterkreises zur Kathode geleitet, wo der Sauerstoff zu Sauerstoff-Ionen ( $O^{2-}$ -Ionen) reduziert wird. Damit der Stromkreis geschlossen ist, müssen entweder  $H^+$ -Ionen von der Anode zur Kathode oder umgekehrt  $O^{2-}$ -Ionen von der Kathode zur Anode wandern. Die Art der wandernden Ionen ist vom Elektrolyten ab-

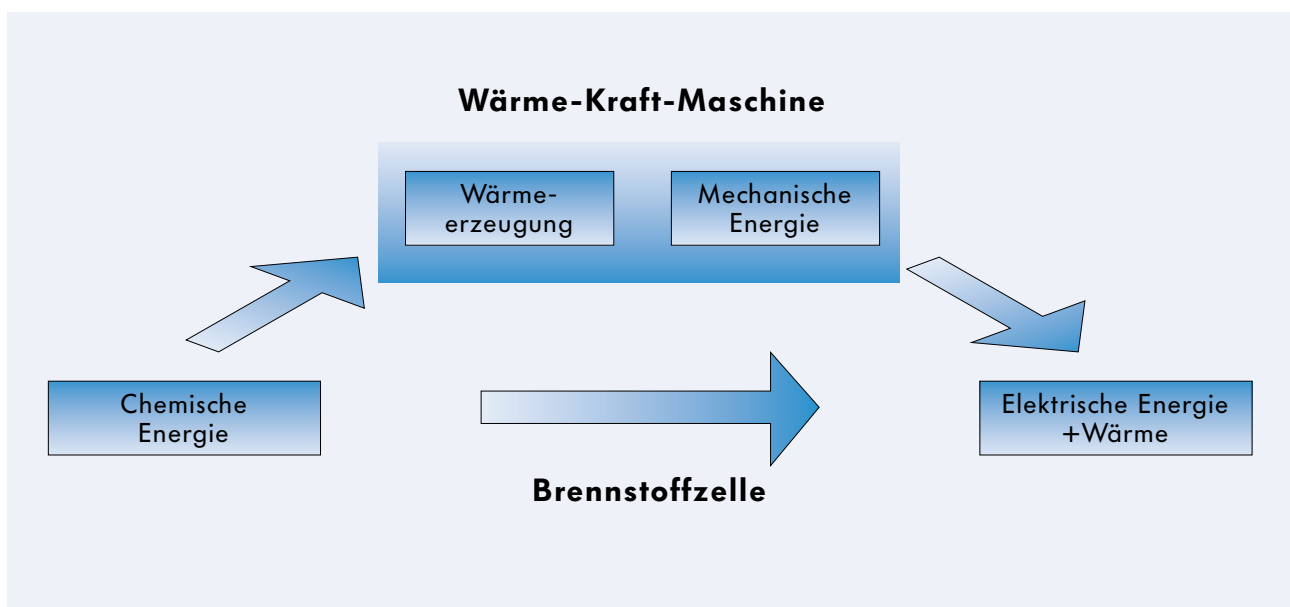


Bild 2: Umwandlungsstufen bei der Strom- und Wärmeerzeugung mit einer Wärme-Kraft-Maschine und einer Brennstoffzelle

Die Brennstoffzelle stellt die Umkehrung der Wasser-Elektrolyse dar, bei der Wasser durch Zufuhr elektrischer Energie (Gleichstrom) in die Elemente Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird. Die Hauptbestandteile einer einzelnen

hängig, der damit auch bestimmt, ob das Reaktionsprodukt Wasser an der Anoden- oder Kathodenseite entsteht. Die Wahl des Elektrolyten ist darüber hinaus für die Betriebstemperatur entscheidend (siehe Seite 10).

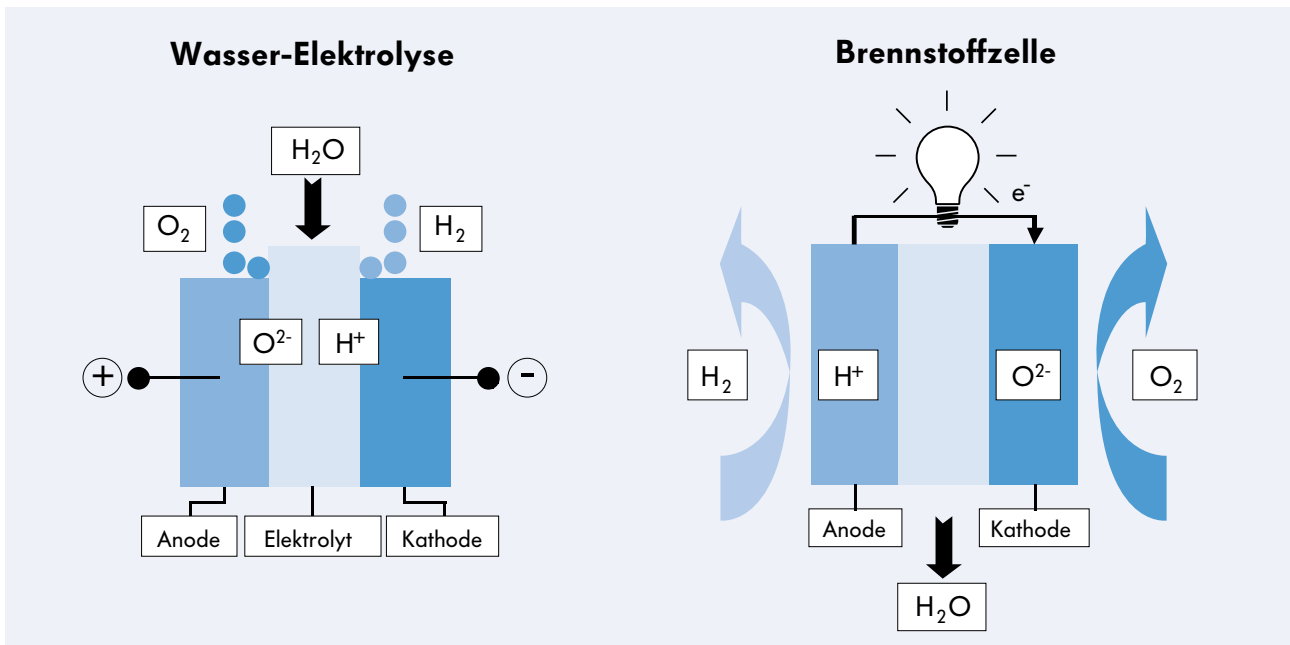


Bild 3: Funktionsprinzipien von Wasser-Elektrolyse und Brennstoffzelle

Durch Integration eines Verbrauchers in den externen Leiterkreis können die Elektronen auf dem Weg von der Anode zur Kathode Arbeit verrichten. Als Reaktionsprodukt entsteht neben Wasser auch Wärme. Da bei diesem Vorgang keine direkte Verbrennung stattfindet, sondern Oxidation und Reduktion räumlich getrennt ablaufen, spricht man auch von einer so genannten „kalten Verbrennung“.

### Von der Zelle über den Stapel bis zur Anlage

Die maximale elektrische Spannung einer einzelnen Zelle beträgt beim offenen Stromkreis in Abhängigkeit der Gaszusammensetzung ca. 0,9–1,1 V. Während des Betriebes der Zelle, d. h. bei Stromfluss, sinkt dieser Wert auf ca. 0,7 V ab. Für technische Anwendungen müssen daher mehrere solcher Einzelzellen zu Zellen-

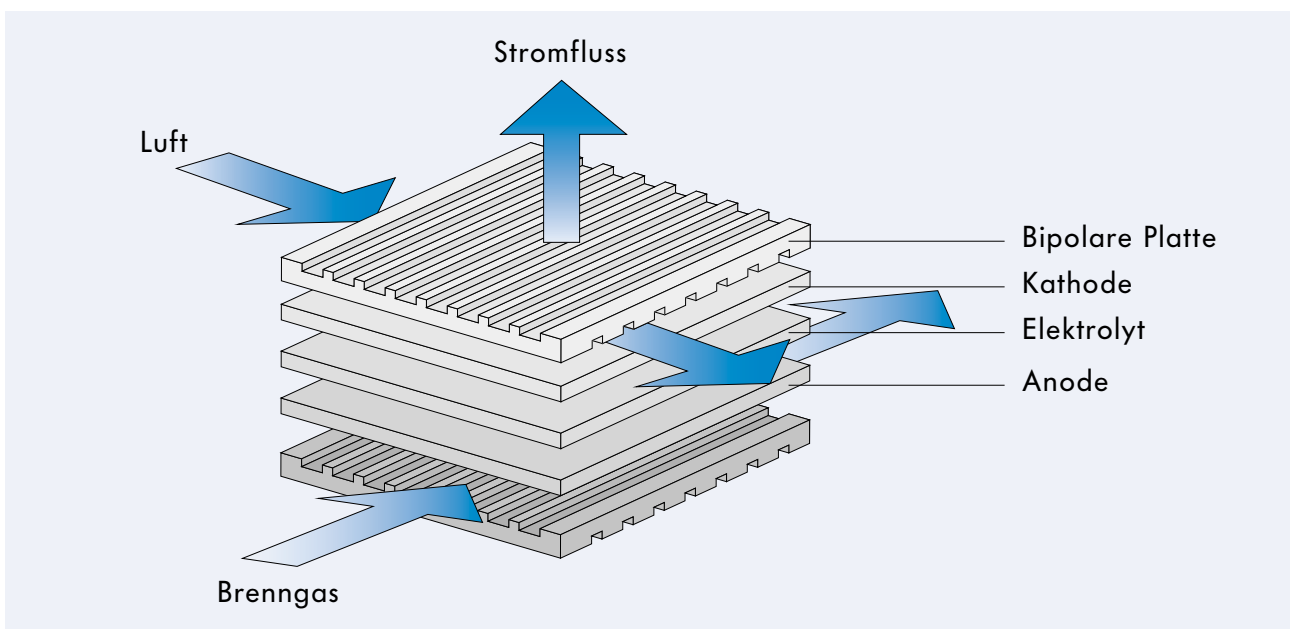


Bild 4: Aufbau eines Brennstoffzellenstapels

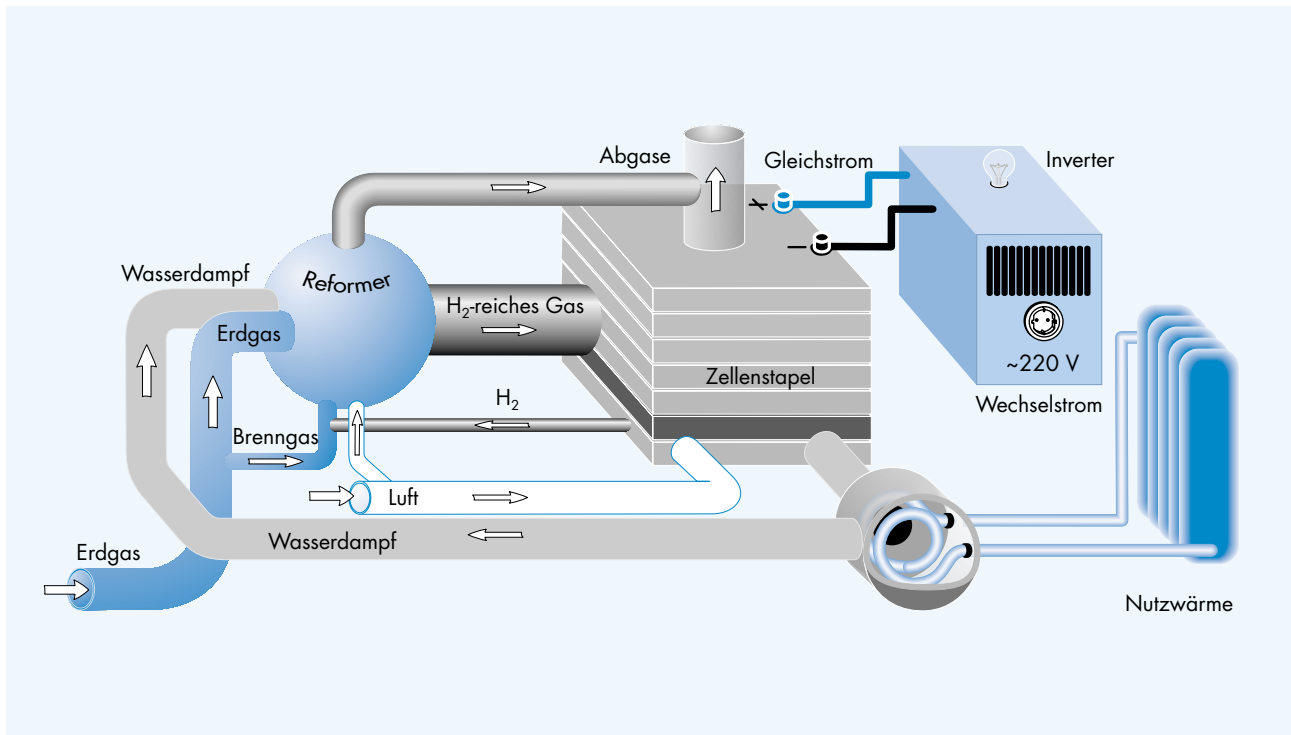


Bild 5: Block-Diagramm einer Brennstoffzellenanlage

stapeln (engl. „Stacks“) zusammengeschaltet werden, um praktikable Spannungen zu erzielen. Die Zusammenschaltung erfolgt überwiegend in Sandwich-Bauweise, d. h., die einzelnen Zellen werden aufeinander gestapelt. Zwischen die einzelnen Zellen werden sog. bipolare Platten eingefügt, die sowohl die Zufuhr der Reaktanden (Luft und Wasserstoff) zu den Elektroden als auch die Stromleitung in der Stapelachse bewerkstelligen (s. Bild 4).

Für den effizienten und sicheren Betrieb einer BZ-Anlage sind neben dem eigentlichen Zellenstapel diverse periphere Komponenten notwendig. Besondere Bedeutung hat dabei vor allem die Gasaufbereitung, bestehend aus Reformierung und Gasreinigung (Bild 5).

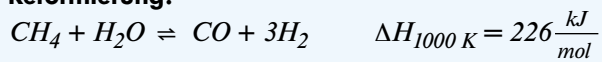
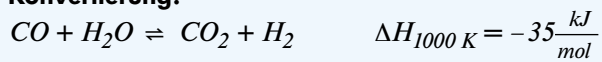
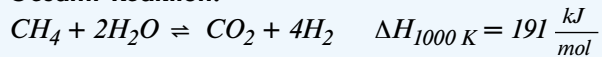
### Gasaufbereitung

Da Wasserstoff weder leitungsgebunden in ausreichendem Maße noch kostengünstig zur Verfügung steht, muss im ersten Schritt in einem so genannten Reformer aus fossilen Brennstoffen ein wasserstoffreiches Gas generiert werden. Aufgrund seiner Verfügbarkeit und der

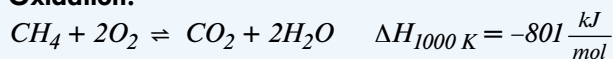
gut ausgebauten Infrastruktur bietet sich Erdgas als Energieträger an. Alternativ kommen auch Kohlegas, Klärgas, Biogas und Methanol in Betracht. Da Erdgas aus Sicherheitsgründen mit Schwefelverbindungen odorisiert wird, die den Reformer inaktivieren oder in der Brennstoffzelle zu Korrosion führen würden, sind mit Hilfe einer vorgeschalteten Entschwefelung alle schwefelhaltigen Komponenten zu entfernen.

In dem eigentlichen Reformer wird das eingesetzte Erdgas, das überwiegend aus Methan besteht, mit Wasserstoffdampf katalytisch zu Wasserstoff umgesetzt. Dieses Verfahren wird seit langer Zeit zur großtechnischen Wasserstoffproduktion eingesetzt. Anlagen mit einer Kapazität von 100.000 Nm<sup>3</sup>/h H<sub>2</sub> sind Standard. Die Reaktion erfolgt bei 700–900 °C an Nickel-Katalysatoren. Bei diesem Prozess, der auch als katalytische Dampfreformierung bezeichnet wird, entstehen Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid. Die Ausbeute an Wasserstoff wird dadurch erhöht, dass das gebildete Kohlenmonoxid mit überschüssigem Wasserstoffdampf zu Kohlendioxid und Wasserstoff umgesetzt wird („Konvertierung“ oder „Shift-Reaktion“).



**Reformierung:****Konvertierung:****Gesamt-Reaktion:**

Da die Reformierungs-Reaktion stark endotherm verläuft, muss dem Reformer Wärme zugeführt werden, um eine möglichst vollständige Umsetzung zu erreichen. Bei Lastwechseln bzw. Anfahrvorgängen kann die Wärmezufuhr für die Dynamik der gesamten BZ-Anlage entscheidend sein. Um das Lastwechselverhalten zu optimieren, kann daher ein alternatives Reformierverfahren angewendet werden, die „partielle Oxidation“. Hierbei werden dem Reformer Erdgas, Luft und Wasser zugeführt. Ein Teil des Erdgases wird im Reformer katalytisch mit Luft zu Wasser und Kohlendioxid verbrannt. Die hierbei produzierte Wärme steht somit direkt der endothermen Reformierungsreaktion des restlichen Erdgases zur Verfügung.

**Oxidation:**

Durch geschickte Dosierung der Luftmenge lässt sich die Reaktion so steuern, dass die bei der Verbrennung erzeugte Wärme genau der bei der Reformierung benötigten Wärme entspricht („autotherme Reformierung“).

Je nach BZ-Typ kann es notwendig werden, das durch Reformierung erhaltene Gasgemisch weitgehend von Kohlenmonoxid zu befreien. Diese Gasreinigung besteht gewöhnlich aus einer weiteren Konvertierungsstufe und einer anschließenden selektiven Oxidation des Kohlenmonoxids zu Kohlendioxid. Sehr reinen Wasserstoff erhält man auch durch Einsatz von Membranen, die nur für Wasserstoff durchlässig sind. Nachteilig wirkt sich hier allerdings der hohe Druckabfall an der Membran aus.

Das im Reformer generierte wasserstoffreiche Gas wird nachfolgend im Stapel mit Luft bzw. Sauerstoff elektrochemisch umgesetzt. Die Umsetzung des Wasserstoffs erfolgt nicht zu 100%. Überschüssiger Wasserstoff im Anodenabgas wird entweder katalytisch nachverbrannt oder der Anode wieder zugeführt.

**Strom- und Wärmeerzeugung**

Bei der elektrochemischen Umsetzung werden Gleichstrom und Wärme sowie Wasser produziert. Der erzeugte elektrische Gleichstrom wird mit Hilfe eines Wechselrichters in netzkonformen Wechselstrom umgerichtet. Die anfallende Wärme muss mit Hilfe eines geeigneten Kühlsystems abgeführt werden, um die Betriebstemperatur des Stapels aufrechtzuerhalten. Zur Kühlung werden entweder spezielle Kühlplatten in den Stapel integriert, die mit Wasser oder Luft als Kühlmedium arbeiten. Bei hohen Betriebstemperaturen erfolgt dagegen die Kühlung direkt durch Zufuhr überschüssiger Luft in den Kathodenraum. Die abgeführte Wärme kann teilweise systemintern z. B. zur Beheizung des Reformers verwendet werden. Überschüssige Wärme wird zur Wärmeversorgung des angeschlossenen Verbrauchers genutzt. Bei größeren Anlagen mit hohen Betriebstemperaturen kann sich das Nachschalten einer Gasturbine oder eines GuD-Prozesses anbieten, um einen höheren elektrischen Wirkungsgrad zu erzielen.

# Brennstoffzellensysteme im Überblick

In der Brennstoffzellentechnik werden im Wesentlichen fünf verschiedene Typen unterschieden. Als Unterscheidungskriterium dienen der Elektrolyt und davon abhängig die Betriebstemperatur des Zellstapels (siehe Bild 6 und Tabelle 1).

Die verschiedenen Brennstoffzellentypen weisen einen recht unterschiedlichen Entwicklungsstand auf. Im Folgenden wird für die einzelnen Typen jeweils ausführlich auf Funktionsweise, Entwicklungsstand und mögliche Einsatzgebiete eingegangen.

	$\text{H}_2$		$\text{O}_2$
<b>AFC</b>	$\text{H}_2 + 2\text{OH}^- \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\text{OH}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{OH}^-$
<b>PEMFC</b>	$\text{H}_2 \longrightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\text{H}^+$	$2\text{H}^+ + \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$
<b>PAFC</b>	$\text{H}_2 \longrightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\text{H}^+$	$2\text{H}^+ + \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$
<b>MCFC</b>	$\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{CO}_3^{2-}$
<b>SOFC</b>	$2\text{O}^{2-} + 2\text{H}_2 \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	$2\text{O}^{2-}$	$\text{O}_2 + 4\text{e}^- \longrightarrow 2\text{O}^{2-}$
	Anode	Elektrolyt	Kathode

Bild 6: Chemische Unterschiede der Brennstoffzellentypen

	Brennstoffzellentyp	Elektrolyt	Arbeits-temperatur (°C)	Brennstoff	Entwicklungs-stand	Einsatz-bereiche	Anlagen-wirkungsgrad (elektrisch)
<b>AFC</b>	Alkalisch	30 %ige Kalilauge	60 - 80	Reinstwasserstoff	kommerziell verfügbar	Raumfahrt, Sonderanwendungen	ca. 60 %
<b>PEMFC</b>	Membran	protonenleitende Membran	70 - 90	Wasserstoff, Erdgas, Methanol (mobiler Einsatz)	Labor, erste Versuchsanlagen	Kfz-Antriebe, Kleinstanwendungen, BHKW	40 - 50 %
<b>PAFC</b>	Phosphorsauer	konzentrierte Phosphorsäure	170 - 200	Wasserstoff, Erdgas, Sondergase	kommerziell verfügbar	BHKW	40 - 45 %
<b>MCFC</b>	Schmelzkarbonat	Alkalikarbonat-schmelzen	650	Wasserstoff, Erdgas, Sondergase	Labor, erste Versuchsanlage	BHKW, Kraftwerke	55 - 60 %
<b>SOFC</b>	Oxidkeramisch	Yttrium-stabilisiertes Zirkondioxid	900 - 1000	Wasserstoff, Erdgas, Sondergase	Labor, erste Versuchsanlagen	BHKW, Kraftwerke	60 - 70 %

Tabelle 1: Brennstoffzellentypen im Vergleich

## **AFC Alkalische Brennstoffzelle** (AFC, Alcaline Fuel Cell)

Die alkalische Brennstoffzelle benötigt hochreinen Wasserstoff und hochreinen Sauerstoff als Reaktionspartner. Als Elektrolyt wird Kalilauge verwendet, in der  $\text{OH}^-$ -Ionen von der Kathoden- zur Anodenseite wandern. Damit verbunden ist allerdings auch eine sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ).

Die AFC zählt mit einer Arbeitstemperatur von max.  $80^\circ\text{C}$  zu den Niedertemperaturbrennstoffzellen. Trotz des sehr hohen elektrischen Wirkungsgrades von ca. 60% ist die Anwendung bisher auf Nischen in der Raumfahrt und im U-Boot-Bereich beschränkt. AFC-Aggregate werden heute noch zur Stromproduktion im Spaceshuttle verwendet. In den o. g. Bereichen wurde zwar die Marktreife erreicht, für die Energiewirtschaft wird wegen der hohen Brennstoffkosten des reinen Wasserstoffs und Sauerstoffs aber keine Verwendung gesehen.

Führender Hersteller und Entwickler ist die International Fuel Cell Corp. (USA).

## **PEMFC Polymermembran-Brennstoffzelle** (PEMFC, Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell bzw. Proton Exchange Membrane Fuel Cell; auch SPFC, Solid Polymer Fuel Cell)

Für die Polymermembran-Brennstoffzelle gibt es in der angelsächsischen Literatur verschiedene Bezeichnungen: SPFC, PEFC oder PEMFC. Die PEMFC wird anodenseitig mit Wasserstoff und kathodenseitig mit Luft-Sauerstoff betrieben. Aufgrund der geringen  $\text{CO}$ -Akzeptanz der Zelle (maximal 10 ppm) sind die Anforderungen an die Brennstoffaufbereitung relativ hoch. Die Verwendung von reformiertem Erdgas ist durch eine zusätzliche Gasfeinreinigung (z. B. selektive  $\text{CO}$ -Oxidation) möglich. Bei der elektrochemischen Reaktion im Zellstapel wandern  $\text{H}^+$ -Ionen durch den festen Elektrolyten von der Anode zur Kathode.

Die Arbeitstemperatur der PEMFC von  $70\text{--}90^\circ\text{C}$  erlaubt die Auskopplung von Nutzwärme und damit den Einsatz als BHKW zur dezentralen Energieversorgung im kleinen und mittleren Leistungsbereich. Ideale Voraussetzungen bieten PEM-Brennstoffzellen als zukunftsweisender Antrieb in Kraft- und Nutzfahrzeugen. Eine kostengünstige Serienproduktion erscheint zukünftig möglich, und die mobile Anwendung im Kraftfahrzeugbereich würde einen großen Markt für die PEMFC darstellen. Zahlreiche führende Automobilkonzerne arbeiten mit Nachdruck und großem finanziellem Aufwand an der Weiterentwicklung in diesem Bereich.

Als Einsatzbereich für die PEMFC bietet sich aufgrund der Arbeitstemperatur von ca.  $80^\circ\text{C}$  insbesondere auch die Hausenergieversorgung an. Der Leistungsbereich liegt hier zwischen  $1\text{--}10\text{ kW}_{\text{el}}$ . Derartige Anlagen könnten beispielsweise zur thermischen und elektrischen Versorgung von Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie von kleineren Gewerbebetrieben eingesetzt werden. Sollte keine Strom- bzw. Wärmeanforderung auf der Kundenseite bestehen, kann die Anlage auf Leerlauf heruntergefahren und bei Bedarf wieder eingeschaltet werden. Zur Zeit hat noch kein Aggregat die Marktreife erzielt,

jedoch wird weltweit mit großem Forschungs- und Entwicklungsaufwand daran gearbeitet.

Im Bereich der dezentralen Energieerzeugung bietet sich neben der Hausenergieversorgung auch der Einsatz von PEMFC-BHKW zur Nahwärmeversorgung an. Speziell im elektrischen Leistungsbereich zwischen 100 kW und 500 kW wird von einigen Unternehmen ein zukünftiger Markt für PEMFC-BHKW gesehen.

Über die BHKW-Anwendung hinaus werden auch PEMFC-Kleinanlagen zur Stromerzeugung im Leistungsbereich  $<1$  kW für den Einsatz als Batterieersatz, für Beleuchtungen oder als Notstromaggregat entwickelt, die mit reinem Wasserstoff betrieben werden.

Der weltweit führende Anbieter von PEMFC-Anlagen ist die kanadische Firma Ballard Power Systems. Ballard hat wasserstoffbetriebene Fahrzeugantriebe mit 50–200 kW Leistung in der Praxis erprobt. Seit 1997 ist ein ebenfalls mit Erdgas betriebenes 250-kW-PEMFC-BHKW in Kanada in Betrieb; seit Anfang 2000 auch in Berlin.

Neben Ballard arbeitet in Deutschland Siemens an der Entwicklung von PEMFC-Systemen. Siemens konzentriert sich auf Anlagen, die mit Wasserstoff und Sauerstoff betrieben werden und für den Einsatz in U-Booten konzipiert sind.

Die stationäre Energieerzeugung mit PEMFC-Anlagen verfolgt auch das italienische Unternehmen Nuvera. Neben den o. g. Herstellern sowie diversen japanischen Unternehmen (Mitsubishi, Matsushita, Sanyo, Toshiba) existieren in den USA mehrere Anbieter von PEMFC-Stapeln im Leistungsbereich um 10 kW. Zu diesen gehören Plug Power, American Power, Energy Partners, H-Power, Allied Signal etc.

Hauptentwicklungsziele bei der PEMFC sind der Ersatz der teuren perfluorierten Elektrolytmembran durch kostengünstige nichtfluorierte Membranen auf Kohlenwasserstoffbasis. Darüber hinaus wird intensiv an der Reduzierung der Platinbelegung, an CO-resistenten Katalysatoren und der Minimierung des Betriebsdrucks gearbeitet.

## **PAFC** Phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell)

Die PAFC ist die Brennstoffzellentechnik, deren Kommerzialisierung mit Abstand am weitesten fortgeschritten ist. Mit einer Arbeitstemperatur zwischen 170–200°C ist diese Anlage für den Einsatz als BHKW in der dezentralen Energieversorgung geeignet. Neben Erdgas können auch Wasserstoff oder Sondergase für den Anlagenbetrieb eingesetzt werden.

Der Elektrolyt der phosphorsauren Brennstoffzelle besteht aus flüssiger Phosphorsäure, die in einer Matrix gebunden ist. Wie bei der PEMFC wandern auch hier  $H^+$ -Ionen von der Anode zur Kathode. An der Anode wird Wasserstoff aus reformiertem Erdgas und an der Kathode Luft-Sauerstoff zugeführt. Da die Elektroden zur Beschleunigung der Umsetzungen Edelmetall-Katalysatoren enthalten, darf der Anteil an Kohlenmonoxid 1% nicht überschreiten. Bei der Verwendung des eingesetzten Brenngases muss auch auf einen niedrigen Stickstoffanteil geachtet werden, da Stickstoff im Reformier zu Ammoniak reduziert wird. Das Ammoniak reagiert mit der Phosphorsäure und macht auf die Dauer den Elektrolyten unbrauchbar.

Das einzige bisher kommerziell erhältliche PAFC-BHKW hat eine elektrische Leistung von 200 kW und eine thermische Leistung von 220 kW. Das amerikanische Unternehmen ONSI/IFC hat bereits ca. 200 Anlagen dieses Typs verkauft. Der Anwendungsbereich liegt hierbei überwiegend in der dezentralen Energieversorgung. Nahwärmenetze mit max. 75°C Vorlauftemperatur sind optimale Versorgungsgebiete. Ein einzelnes Aggregat kann ca. 20 Wohneinheiten mit Wärme und 60 Wohneinheiten mit Strom versorgen. Wahlweise ist die Möglichkeit zur Installation einer Hochtemperatur-Auskopplung mit einer Vorlauftemperatur von maximal 120°C gegeben. Dadurch werden Anwendungen mit Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung möglich. Stromgeführt kann die Anlage als Notstromaggregat mit Insel-schaltung, z. B. in Krankenhäusern, einge-

setzt werden. Die Anlagen weisen bei Betriebsbeginn einen elektrischen Wirkungsgrad von 40% auf, der nach 40.000 Betriebsstunden auf ca. 35% sinkt. Der Gesamtwirkungsgrad dieser Anlagen beträgt ca. 85%.

Das weltweit größte Brennstoffzellen-BHKW mit einer elektrischen Leistung von 11 MW wird seit 1991 von der Tokyo Electric Power Company (TEPCO) betrieben. Diese Anlage unterstreicht das Engagement japanischer Unternehmen auf dem PAFC-Sektor. So sind in Japan ca. 90 Demonstrationsanlagen im Leistungsbereich von 50–500 kW installiert.

Führende Hersteller und Entwickler sind neben ONSI folgende japanische Firmen:  
Fuji Electric, Mitsubishi, Sanyo und Toshiba.

## **MCFC Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle**

(MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell)

Die hohe Arbeitstemperatur der MCFC von 650°C erlaubt zusätzlich zur Wärmeversorgung eine Auskopplung von Prozessdampf. Dieser kann eine nachgeschaltete Dampfturbine antreiben, um den elektrischen Wirkungsgrad zu erhöhen. Hohe Arbeitstemperaturen stellen besondere Anforderungen an die Werkstoffwahl. Dies betrifft aufgrund der aggressiven flüssigen Salzschnmelze insbesondere die Korrosionsbeständigkeit der metallischen Zellkomponenten.

Der Elektrolyt der MCFC besteht aus einer Mischung von Kaliumkarbonat  $K_2CO_3$  und Lithiumkarbonat  $Li_2CO_3$  und ist in eine Matrix eingebunden. Der Schmelzpunkt des Karbonatgemisches liegt bei ca. 480°C. Bei der Betriebstemperatur von 650°C weist die Salzschnmelze eine gute elektrolytische Leitfähigkeit auf. Um eine hohe Lebensdauer des Aggregates zu erzielen, sollte die MCFC immer auf Betriebstemperatur gehalten werden. Die MCFC kann mit Erdgas oder Sondergasen betrieben werden. Je nach Konzept wird durch eine externe oder interne Reformierung daraus Wasserstoff produziert. Die Kathodenkammer der MCFC wird mit einem Gemisch aus Luft und Kohlendioxid gespeist. Der Sauerstoff der Luft und das Kohlendioxid lösen sich im Elektrolyten und bilden dort neue Karbonat-Ionen. Der Elektrolyt fungiert als Karbonat-Ionenleiter. Während des Prozesses wandern  $CO_3^{2-}$ -Ionen durch die Karbonatschnmelze von der Kathode zur Anode und reagieren dort mit dem Wasserstoff zu Kohlendioxid und Wasser.

Die hohe Abwärmtemperatur von maximal 550°C macht MCFC-Anlagen insbesondere für die industrielle Kraft-Wärme-Kopplung, d. h. die Erzeugung von Prozessdampf und Strom, interessant. So werden MCFC-BHKW mit einer elektrischen Leistung zwischen 300 kW und 1 MW konzipiert, die einen elektrischen Wirkungsgrad von ca. 50% aufweisen sollen.

Durch Kopplung mit einer Dampfturbine erwartet man zukünftig Wirkungsgrade von bis zu 65 % bei Erdgasbetrieb.

Die bisher größte MCFC-Anlage mit einer elektrischen Leistung von 2 MW und einem elektrischen Wirkungsgrad von 44 % wurde 1996 von dem amerikanischen Unternehmen Energy Research Corporation (ERC) über einen Zeitraum von 4000 h betrieben. Neben ERC arbeitet das deutsche Unternehmen MTU an der Entwicklung von MCFC-BHKW. MTU hat in Zusammenarbeit mit Haldor Topsoe A/S, Elkraft, Ruhrgas und RWE die Arbeitsgemeinschaft MCFC gebildet und ein kompaktes MCFC-BHKW („Hot Module“) mit einer elektrischen Leistung von ca. 300 kW entwickelt. Eine Demonstrationsanlage hat Ende 1999 in Bielefeld den Betrieb aufgenommen.

Aktuelle Entwicklungsarbeiten konzentrieren sich auf die Werkstoffauswahl, da der korrosive Elektrolyt viele Materialien angreift. Darüber hinaus wird das Problem, das in der Auflösung der Kathode besteht, intensiv bearbeitet.

Führende Hersteller und Entwickler sind FuelCell Energy (USA), Fuji Electric (Japan), MTU (Deutschland), ECN (Niederlande) sowie Ansaldo (Italien).

## **SOFC** Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell)

Die oxidkeramische Brennstoffzelle wird aufgrund ihrer Arbeitstemperatur von 900–1000 °C den Hochtemperaturbrennstoffzellen zugeordnet. Ebenso wie bei der MCFC kann auch bei der SOFC Prozesswärme ausgekoppelt werden. Dadurch ist die SOFC für die Kraft-Wärme-Kopplung in der Kraftwerkstechnik und für industrielle Anwendungen geeignet.

Der Elektrolyt der SOFC besteht aus einer Zirkondioxidkeramik. Die Dotierung mit Yttriumoxid ermöglicht eine gute Leitfähigkeit für Sauerstoff-Ionen bei Temperaturen oberhalb 800 °C. Da die Arbeitstemperatur der SOFC bei 900–1000 °C liegt, lässt sich auch in diesem Fall der Reformierprozess in die Zelle integrieren. Die SOFC kann mit Erdgas oder Sondergasen betrieben werden.

Der Sauerstoff der Luft wird an der Phasengrenzfläche Kathode/Elektrolyt zu Sauerstoff-Ionen reduziert. Während des Prozesses wandern O<sup>2-</sup>-Ionen von der Kathode, die mit Luft versorgt wird, zur Anode und reagieren dort mit dem Wasserstoff zu Wasser.

Bei der SOFC werden zwei verschiedene Konzepte für den Zellstapel-Aufbau verfolgt:

1. *Planarer Aufbau*, bei dem der Verbund aus Anode, Elektrolyt und Kathode als dünne, flache Scheibe ausgeführt ist. Zum Aufbau eines Stapels wird eine große Anzahl dieser Scheiben – durch metallische oder keramische bipolare Platten getrennt – in Reihe geschaltet. Dieser Aufbau ist auch bei allen anderen Brennstoffzellentypen zu finden.
2. *Tubularer Aufbau*. Hierbei sind die elektrochemisch aktiven Elemente als lange, einseitig geschlossene Röhren ausgeführt. Dieses System erlaubt unterschiedliche Materialausdehnungskoeffizienten von Elektroden und Elektrolyt, ohne dass es zum Spannungsbruch im Brennstoffzellenstapel kommt.

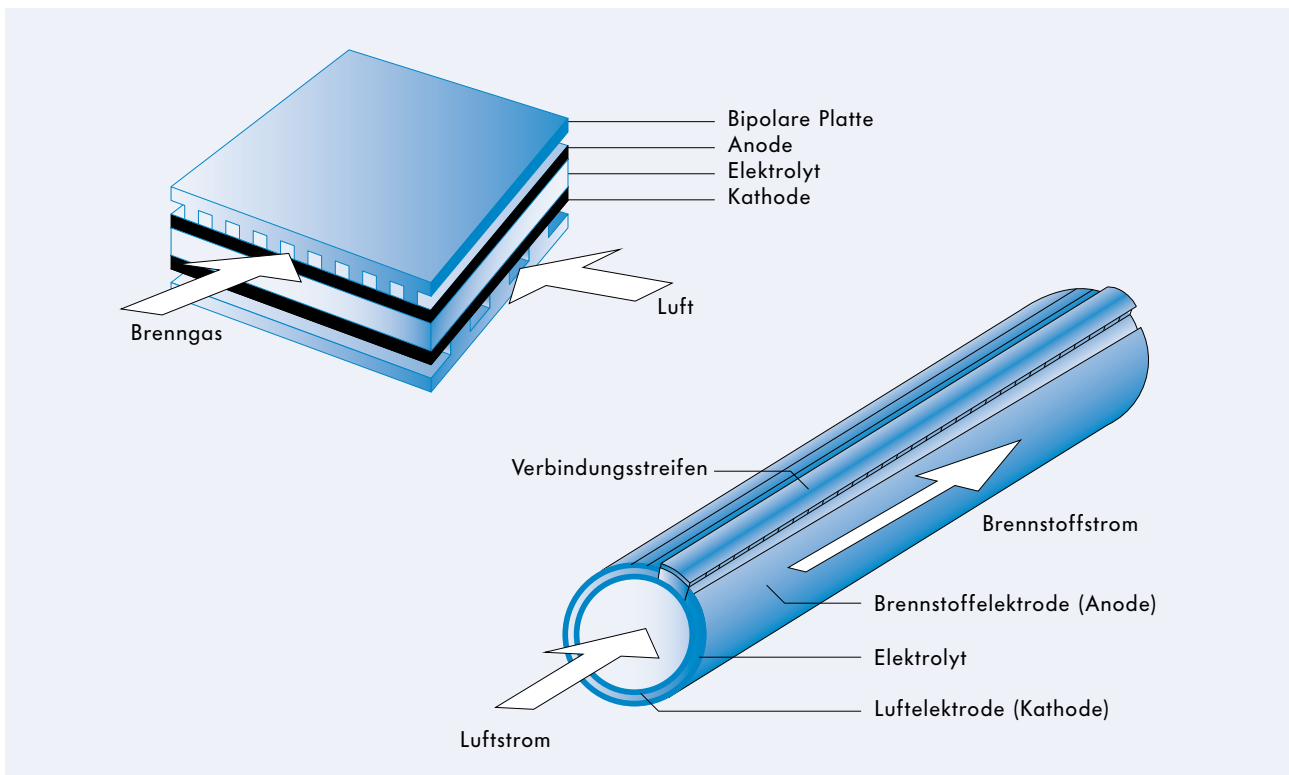


Bild 7: SOFC – planare Technologie und Röhrentechnologie

Die hohe Abgastemperatur macht die SOFC vor allem für die Kraft-Wärme-Kopplung interessant. Die Gebäudeversorgung mit SOFC-Mini-BHKW als auch die industrielle Kraft-Wärme-Kopplung sind viel versprechende Einsatzgebiete.

Bei druckbetriebenen größeren Anlagen ist neben der Erzeugung von Prozessdampf die Kopplung mit einer Gasturbine möglich. Auf diese Weise könnten elektrische Wirkungsgrade von bis zu 70% erreicht werden.

Der weltweit führende Entwickler von SOFC-Anlagen Siemens/Westinghouse hat bereits mehrere tubulare SOFC-Anlagen in der Leistungsklasse 25 kW ausgeliefert und z. T. mehr als 13.000 h betrieben. Seit 1998 betreibt Westinghouse eine 100-kW-Anlage in den Niederlanden. Bei Nennleistung erreicht diese Anlage einen elektrischen Wirkungsgrad von 42% und einen Gesamtwirkungsgrad von 76%. Darüber hinaus ist die Errichtung von gekoppelten SOFC-Gasturbinen-Anlagen mit ca. 300 kW bzw. 1 MW Leistung, die einen

elektrischen Wirkungsgrad von bis zu 63% aufweisen sollen („SureCell“-Konzept), geplant.

Die einzige thermisch autarke SOFC-Anlage in Flachzellenbauweise demonstriert seit 1997 das Schweizer Unternehmen Sulzer Hexis. Die netzgekoppelte Demonstrationsanlage liefert eine elektrische Leistung von 1 kW und ist in Kombination mit einem Spitzenkessel zur Versorgung von Einfamilienhäusern konzipiert.

Sowohl im Hinblick auf eine Erhöhung der Lebensdauer der SOFC als auch zur Kostenminimierung der gesamten Anlage wird generell eine Absenkung der Betriebstemperatur von derzeit ca. 1000°C auf ca. 800°C angestrebt. Zur Erreichung dieses Ziels werden z. Z. zwei Konzepte verfolgt, zum einen die Verringerung der Elektrolytdicke und zum anderen der Einsatz eines alternativen Festelektrolyten.

Führende Hersteller und Entwickler der SOFC sind Siemens/Westinghouse (Deutschland), Mitsubishi und Fuji Electric (beide Japan), Sulzer Hexis (Schweiz) und ECN (Niederlande).

## Realisierte Brennstoffzellenprojekte in Deutschland

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die bis Mitte 2000 in Deutschland realisierten

Brennstoffzellenprojekte. Dabei sind keine Versuchsanlagen aufgelistet, die nur innerhalb von Gasversorgungsunternehmen oder Instituten installiert wurden, sondern nur anwendungsbezogene Projekte aus der Praxis.

	Brennstoffzellentyp	Elektrische Leistung (kW)	Betreiber	Standort der Anlage	Besonderheiten/Anmerkungen
<b>PAFC</b>	PC 25 A	200	Ruhrgas, Stadtwerke Bochum	Bochum Betriebshof	abgeschaltet
<b>PAFC</b>	PC 25 A	200	HEAG	Darmstadt Betriebshof	abgeschaltet
<b>PAFC</b>	PC 25 A	200	Thyssengas, Stadtwerke Düren	Düren Hallenbad	abgeschaltet
<b>PAFC</b>	PC 25 A	200	HEW, HGW	Hamburg Nahwärmeversorgung	
<b>PAFC</b>	PC 25 C	200	HEW, HGW	Hamburg Nahwärmeversorgung	wasserstoffbetrieben
<b>PAFC</b>	PC 25 C	200	EWS, GSA	Gröbers Verwaltungsgebäude	Hochtemperaturauskopplung
<b>PAFC</b>	PC 25 C	200	EVH	Halle Hallen- und Freibad	
<b>PAFC</b>	PC 25 C	200	Stadtwerke Oranienburg	Oranienburg Nahwärmeversorgung	
<b>PAFC</b>	PC 25 C	200	VVS	Saarbrücken Nahwärmeversorgung	
<b>PAFFC</b>	PC 25 C	200	Brennstoffzellen-BHKW in Nürnberg GbR	Nürnberg Nahwärmeversorgung	
<b>PAFC</b>	PC 25 C	200	HEIN GAS	Bargteheide Hallenbad	
<b>PAFC</b>	PC 25 C	200	PreussenElektra, Mainova	Bergen-Enkheim Hallen- und Freibad	
<b>PAFC</b>	PC 25 C	200	GEW	Köln Klärwerk	Betrieb mit Klärgas
<b>PAFC</b>	PC 25 C	200	Deutsche Malteser gGmbH	Kamenz Krankenhaus	Kombination mit Adsorptionskältemaschine
<b>MCFC</b>		250	Stadtwerke Bielefeld	Bielefeld Universität	
<b>PEMFC</b>		250	Bewag	Berlin Heizkraftwerk	
<b>PEMFC</b>		3	VNG	Machern Einfamilienhaus	
<b>PEMFC</b>		3	HEIN GAS	Hamburg Mehrfamilienhaus	
<b>PEMFC</b>		3	medl, rhenag	Mülheim Hotel	
<b>PEMFC</b>		3	Wingas, Technische Werke Ludwigshafen	Ludwigshafen Mehrfamilienhaus	

Tabelle 2: Realisierte Brennstoffzellenanlagen in Deutschland (Stand: Mitte 2000)



# Vorteile der Brennstoffzellentechnik

## Wirkungsgrad

Im Gegensatz zu Wärme-Kraft-Maschinen ist der maximal erreichbare elektrische Wirkungsgrad von Brennstoffzellen nicht durch den Carnot-Faktor begrenzt. Daher können Brennstoffzellen erheblich höhere elektrische Wirkungsgrade als konventionelle Aggregate erzielen (vgl. Bild 8). Der theoretische elektrische Wirkungsgrad ist folgendermaßen definiert:

### Wärme-Kraft-Maschine:

$$\eta_{el} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} ; \text{ mit } T_2 = \text{Betriebstemperatur der Maschine}$$
$$T_1 = \text{Aufnahmetemperatur des „Wärmebehälters“ für die erzeugte Abwärme}$$

### Brennstoffzelle:

$$\eta_{el} = \frac{\Delta G}{\Delta H} ; \text{ mit } \Delta H = \text{Reaktionsenthalpie}$$
$$\Delta G = \text{freie Reaktionsenthalpie}$$

Stofftransporthemmungen und Verlusten aufgrund des Ladungsdurchgangs an der Grenzfläche Elektrolyt/Elektrode niedriger. Der elektrische Gesamtwirkungsgrad einer BZ-Anlage wird neben dem Stapel-Wirkungsgrad auch vom Eigenbedarf der peripheren Komponenten und deren Wirkungsgrad bestimmt. In der Praxis liegen die Systemwirkungsgrade daher immer unterhalb der theoretischen Werte.

Da BZ-Anlagen modular aufgebaut sind, ist der Wirkungsgrad nahezu unabhängig von der Anlagengröße. Diese Tatsache ist die Motivation für die Entwicklung kleiner BZ-Systeme im Leistungsbereich 1–10 kW<sub>el</sub> zur Hausenergieversorgung. Obwohl noch keine großen BZ-Kraftwerke realisiert wurden, sind insbesondere für SOFC-Kraftwerke mit nachgeschaltetem GuD-Prozess extrem hohe elektrische Wirkungsgrade zu erwarten. Der

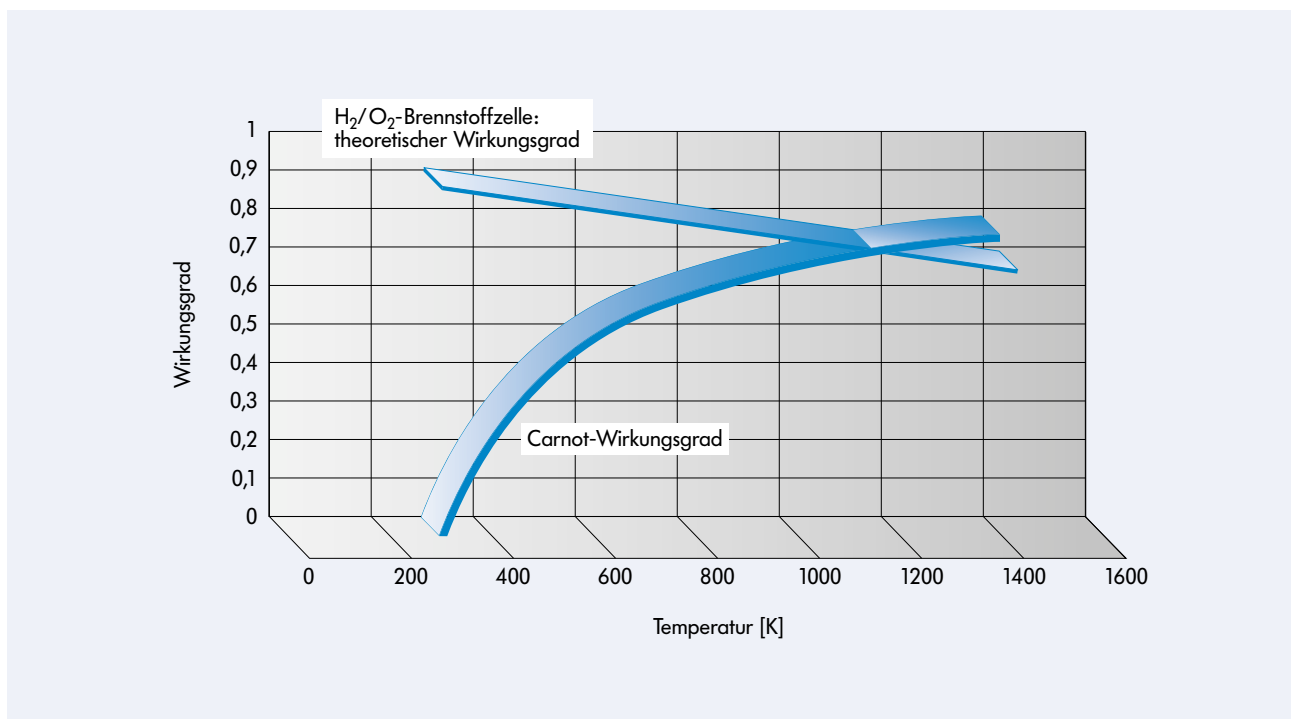


Bild 8: Maximaler theoretischer Wirkungsgrad von Brennstoffzelle und Wärme-Kraft-Maschine

Je nach Betriebstemperatur können theoretische Wirkungsgrade von 70–80% erzielt werden, bei der direkten Methan-Oxidation sogar nahezu 100%. Im Betrieb ist der Wirkungsgrad aufgrund ohmscher Verluste am Elektrolyten,

Wirkungsgrad derartiger SOFC-GuD-Kraftwerke dürfte nach Berechnungen weit oberhalb von herkömmlichen GuD-Kraftwerken liegen. Bild 9 zeigt die erwarteten elektrischen Wirkungsgrade verschiedener BZ-Systeme.

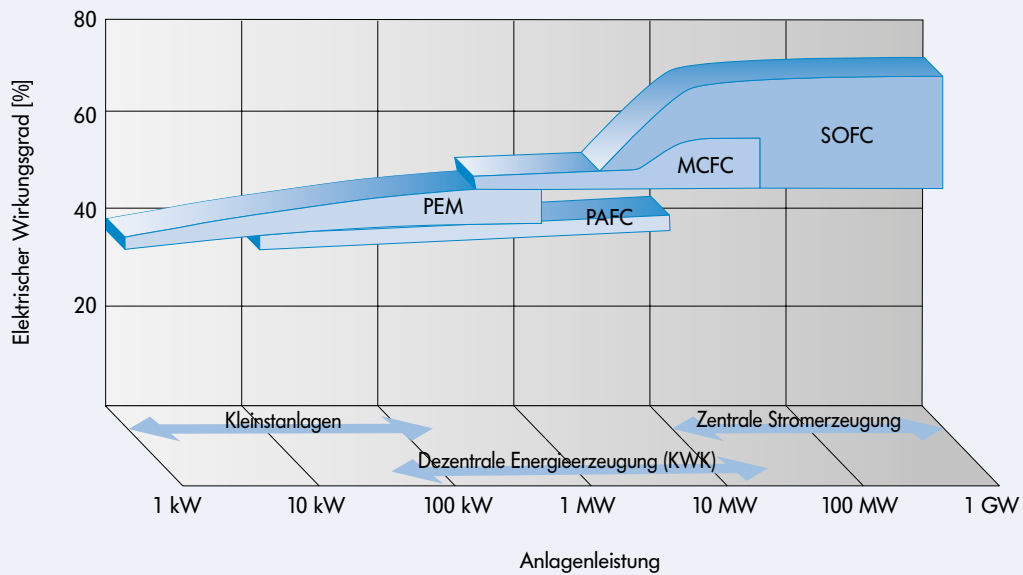


Bild 9: Wirkungsgrad von BZ-Kraftwerken – Ausblick 2005, Brennstoff Erdgas

Quelle: Alstom

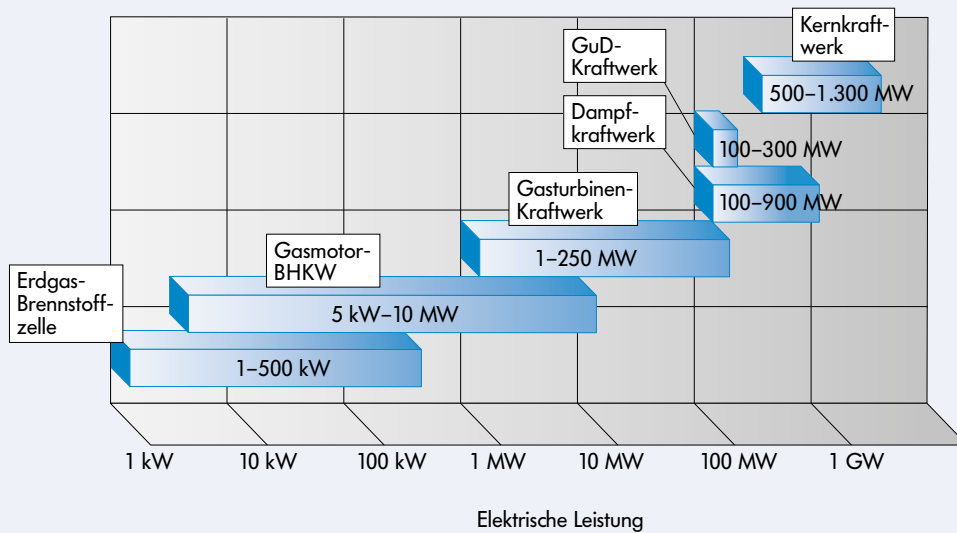


Bild 9a: Typische Werte heutiger Blockleistungen verschiedener Kraftwerksarten

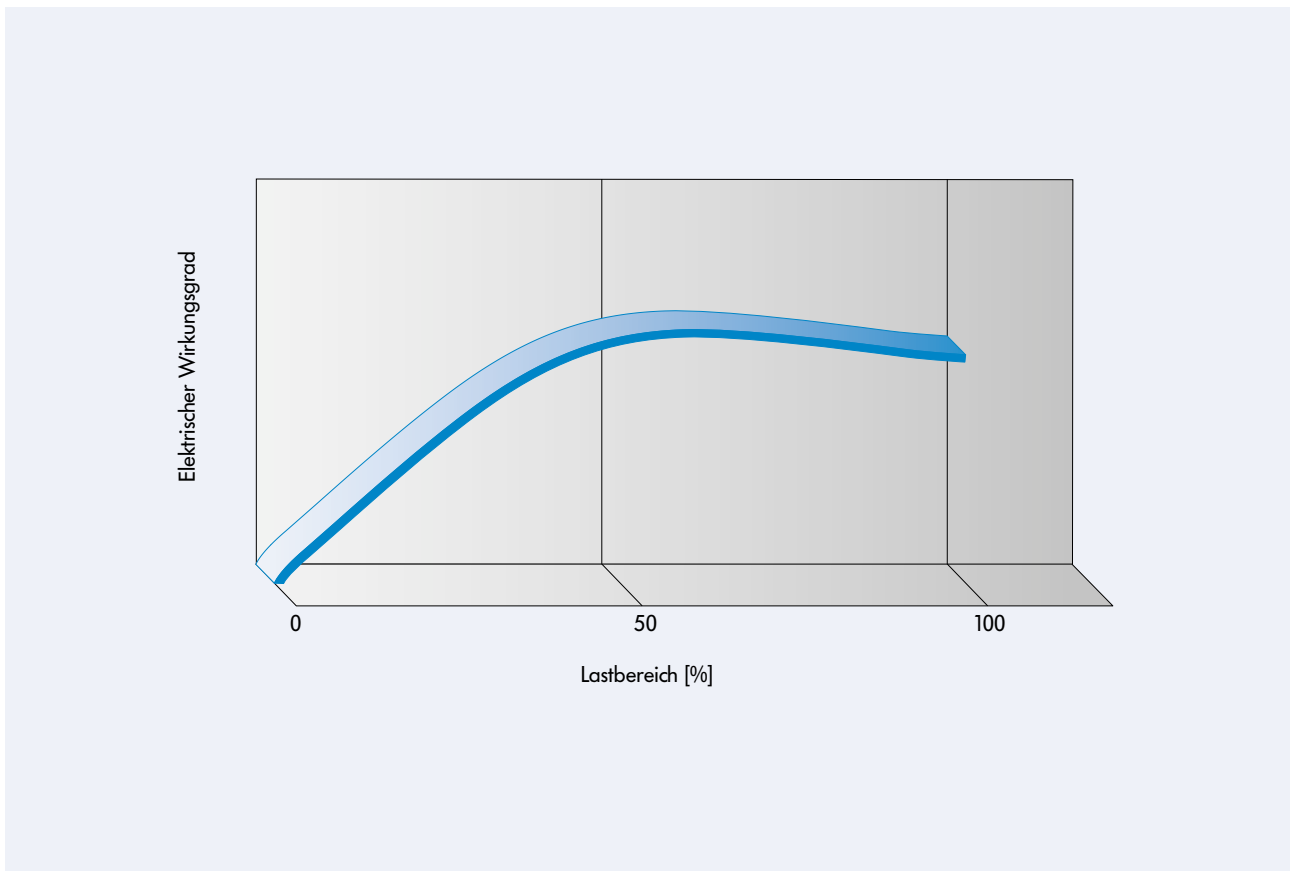


Bild 10: Schematische Darstellung des Teillastverhaltens einer BZ-Anlage

## Teillastverhalten

In der Praxis sollen elektrische Systemwirkungsgrade von 55 bis 65% erreicht werden. Äußerst vorteilhaft ist die Konstanz dieser hohen Effizienz über einen weiten Lastbereich. Der maximale elektrische Wirkungsgrad wird – je nach Brennstoffzellentyp – in der Regel im Bereich zwischen 30% und 50% der Vollast erreicht. In Richtung niedrigerer Leistungen fällt von diesem Punkt aus der elektrische Wirkungsgrad steil ab, in Richtung höherer Leistungen dagegen kaum (vgl. Bild 10), so dass in einem weiten Teillastbereich nur geringfügige Leistungsänderungen auftreten. In Verbindung mit ihrem guten dynamischen Verhalten sind BZ-Anlagen daher für die Versorgung von Verbrauchern mit wechselndem Lastverhalten sehr gut geeignet.

## Emissionen

Ein weiterer entscheidender Vorteil von BZ-Anlagen sind die äußerst geringen Schadstoff-Emissionen (Bild 11). Diese werden im Wesentlichen durch die Beheizung des Reformers verursacht. Aufgrund des hohen elektrischen Wirkungsgrades von BZ verringern sich naturgemäß die spezifischen Kohlendioxid-Emissionen. Im Vergleich zu konventionellen Energieumwandlungsaggregaten auf Basis fossiler Brennstoffe sind auch die Emissionswerte für Kohlenwasserstoffe und Schwefeldioxid ebenso wie die Ruß- und Staubemissionen deutlich niedriger. Darüber hinaus wird durch die Vermeidung einer offenen Verbrennung die Bildung von Stickoxiden nahezu vollständig unterdrückt. Auch der Betrieb oxidkeramischer BZ bei ca. 1000°C führt nur zu einer vernachlässigbaren  $\text{NO}_x$ -Produktion.

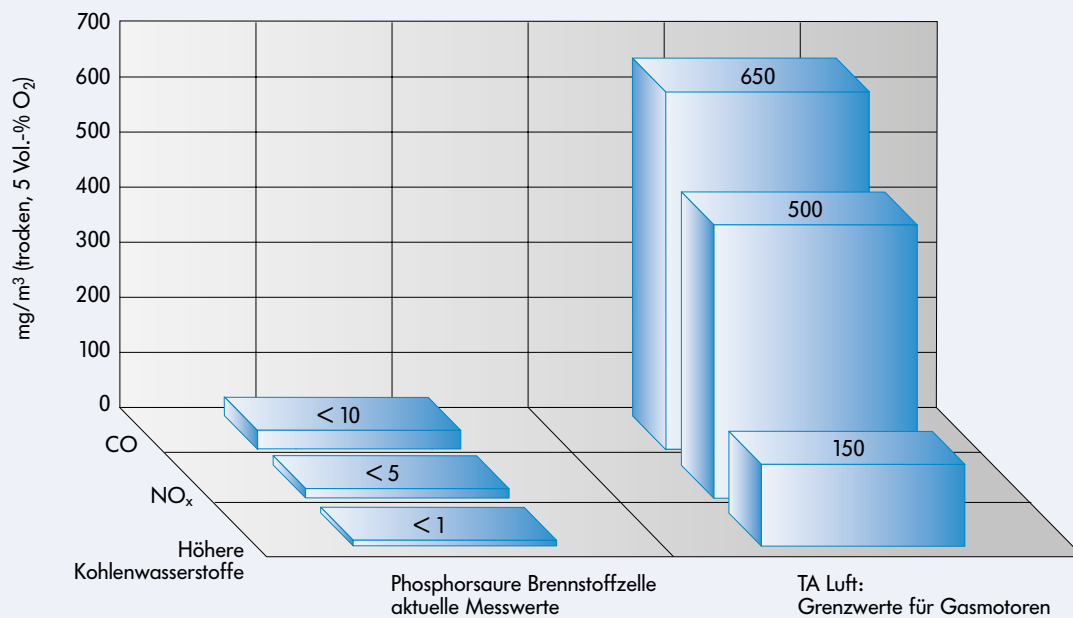


Bild 11: Schadstoff-Emissionen (Grenzwerte nach TA Luft und Messwerte)

Neben einem niedrigen Schadstoffausstoß zeichnen sich BZ durch einen geringen Lärmpegel aus, so dass derartige Anlagen auch verbrauchernah in Ballungsräumen installiert werden können. Die Geräuscharmheit ist auf das Fehlen beweglicher Teile, die sich auf Pumpen und Gebläse beschränken, zurückzuführen. Dies hat zur Folge, dass der Wartungsaufwand niedrig gehalten werden kann.

Der modulare Aufbau von BZ-Anlagen gewährleistet eine optimale Anpassung der erzeugten Leistung an die Verbrauchernforderungen, was speziell im Hinblick auf den dezentralen Einsatz von großer Bedeutung ist. Zusätzlich kann das Verhältnis von Wärme zu elektrischer Leistung problemlos der Nachfrage angepasst werden.

# Perspektiven für Brennstoffzellen im Energiemarkt

Die nähere Zukunft der Brennstoffzellentechnik wird einerseits bestimmt von der technischen Weiterentwicklung, vor allem aber durch die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Da sich vor allem kleine und kompakte Erdgasreformer heute noch im Stadium von Forschung und Entwicklung befinden, sind Aussagen zu Kosten und Zuverlässigkeit überwiegend Zielvorgaben und keineswegs abgesicherte Erkenntnisse. Die Wirtschaftlichkeit wird zudem entscheidend beeinflusst durch das Umfeld eines sich liberalisierenden Marktes mit tendenziell sinkenden Energiepreisen. Ob der Markt ein solches Produkt akzeptiert, wird von den Spielregeln abhängen, die in einigen Jahren in einem weitgehend liberalisierten Energiemarkt herrschen. Wird längerfristig Strom aus abgeschriebenen Altkraftwerken zu Grenzkosten angeboten, so wird es für Eigenerzeugungsanlagen schwer werden zu konkurrieren, nicht nur für Brennstoffzellen. Andererseits könnten politische Eingriffe (Ökosteuer, Klimaschutzvorgaben etc.) diese Nachteile auch wieder kompensieren. Letztlich gibt es hier wenig verlässliche Größen für sichere Vorhersagen, und viel bleibt im Bereich der Spekulation. Optimistisch stimmt jedoch eindeutig der weltweit mit großem Nachdruck vorangetriebene Forschungs- und Entwicklungsaufwand. Triebkraft ist die Automobilindustrie, die für den mobilen Bereich in wenigen Jahren serienfähige mit Brennstoffzellen betriebene Pkw auf den Markt bringen will.

Die Konkurrenzsituation für BZ-Anlagen ist vom Einsatzgebiet abhängig. Im Bereich der Hausenergieversorgung müssen die BZ als Mini-BHKW mit einer elektrischen Leistung  $< 10$  kW mit der Stromversorgung aus dem öffentlichen Netz und der Wärmeversorgung durch einen Gas- bzw. Ölkessel konkurrieren. Niedrige Gas- und hohe Strompreise würden die Marktposition von BZ-Anlagen stärken. Als zusätzliche Wettbewerber befinden sich seit einiger Zeit motorische Mini-BHKW auf dem Markt, die einen elektrischen Wirkungsgrad von ca. 25% besitzen und spezifische Investitionskosten von ca. 5000 DM/kW aufweisen.

Im Leistungsbereich bis 1 MW sind als Hauptkonkurrenten Gas- bzw. Dieselmotor-BHKW mit elektrischen Wirkungsgraden von 35–40% und niedrigen spezifischen Investitionskosten sowie zukünftig auch kleine Gasturbinen zu nennen. In diesem Marktsegment werden zur Zeit komplette Brennstoffzellen-BHKW im elektrischen Leistungsbereich von 200 kW kommerziell angeboten. Der Preis für diese Anlagen mit einem elektrischen Wirkungsgrad von ca. 40% beläuft sich auf ca. 8000 DM/kW. Bei den derzeit gültigen Energiepreisen wären für einen wirtschaftlichen Betrieb spezifische Investitionskosten unter 2000 DM/kW notwendig. Allerdings ist bei den konventionellen BHKW zukünftig mit weiter sinkenden Investitionskosten und verbesserten Abgaswerten zu rechnen, so dass die Konkurrenzsituation in diesem Marktsegment für die Brennstoffzellen noch schwieriger werden wird.

In höheren Leistungsklassen bis 100 MW sind Gasturbinen als Hauptkonkurrenten anzusehen. Im oberen Leistungsbereich werden elektrische Wirkungsgrade von über 40% erzielt und die spezifischen Investitionskosten liegen mit ca. 1000 DM/kW äußerst günstig. Sehr starke Konkurrenz ist auch im Kraftwerksbereich bis 1 GW elektrischer Leistung zu erwarten. Moderne GuD-Kraftwerke erreichen heute schon Wirkungsgrade von nahezu 60%. Hochtemperatur-BZ-Anlagen können nur mit erheblich höheren elektrischen Wirkungsgraden, durch Einsatz eines nachgeschalteten Gasturbinen- oder GuD-Prozesses, konkurrenzfähig sein. Allerdings müssen sich die Investitionskosten an denen konventioneller Kraftwerke orientieren, so dass die Konkurrenzfähigkeit für Brennstoffzellenanlagen im Kraftwerksbereich kurz- bis mittelfristig nur schwer zu erreichen sein wird.

Der erfolgreichen Markteinführung von BZ-Anlagen stehen die aktuell z. T. noch erheblichen Investitionskosten entgegen. Heute ist noch nicht abzusehen, wann Brennstoffzellenanlagen zu konkurrenzfähigen Preisen auf dem Markt angeboten werden können, aber für alle Brennstoffzellentypen sind große Potenziale zur

Kostenreduktion vorhanden. Auf jeden Fall sind zukünftig intensive Arbeiten in den Bereichen BZ-Stapel, Reformier und Gasreinigung zu leisten. Grund zu Optimismus ist vor allem deshalb angebracht, weil im Zuge der automobilen Brennstoffzellenentwicklung die Kosten erheblich reduziert werden müssen, damit BZ-Antriebe gegen Otto- bzw. Dieselmotoren bestehen können. Selbst wenn die angestrebten spezifischen Investitionskosten von 100 bis 200 DM/kW nicht vollständig erreicht werden sollten, dürfte die Weiterentwicklung im Automobilbereich doch dazu beitragen, dass die Kostenentwicklung für stationäre Anlagen positiv beeinflusst wird.

Wenn es gelingt, Know-how (und auch die Produktion) vor Ort aufzubauen, stehen die Chancen für das Erschließen von Kostensenkungspotenzialen sehr gut. Für die Gaswirtschaft bietet sich durch diese Technik die einmalige Chance mit neuen Perspektiven – auch bei reduziertem Heizenergiebedarf –, weiter die dominierende Rolle bei der Hauswärmeversorgung zu spielen.

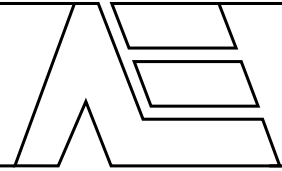
Gerade für diesen kleinen Leistungsbereich werden bereits viel versprechende Konsortien gebildet und erdgasbetriebene Produktentwicklungen vorangetrieben:

- So sind bereits mehrere PEMFC-Pilotanlagen mit einer elektrischen Leistung von 3 kW in Betrieb, die auf Brennstoffzellenentwicklungen der amerikanischen Firma Dais-Analytic beruhen, die von der Hamburg Gas Consult GmbH aufgenommen und an die deutschen Bedingungen angepasst wurden. Dais-Analytic will diese Anlagen in den USA als so genannte Residential-Power-Generator mit reiner Stromerzeugungsfunktion in den Markt einführen. HGC hat die Anlagen um die Wärmeauskopplung erweitert.
- Ebenfalls im PEMFC-Bereich mit einer elektrischen Leistung von ca. 5 kW liegen die Entwicklungsanstrengungen des Heizgeräteherstellers Vaillant. Hierfür wurde eine enge Zusammenarbeit mit dem US-Brennstoffzellenhersteller Plug Power und der Firma GE Fuel Cell

Systems bezüglich der europaweiten Vermarktung beschlossen. Plug Power hat inzwischen die Lizenz für eine Reformierentwicklung von der niederländischen Gastec erworben und die Zusammenarbeit mit der Axiva GmbH in Frankfurt zur Entwicklung einer Hochtemperatur-Elektroden-Einheit vereinbart. Vaillant will erste Pilotanlagen, die aus der Zusammenarbeit dieser Gruppen hervorgehen, 2001 in Deutschland testen. Der breite Verkaufsstart ist für 2003 vorgesehen. Bis 2010 ist eine Absatzsteigerung auf 100.000 Geräte pro Jahr geplant.

- Die Schweizer Firma Sulzer Hexis AG konzentriert sich dagegen auf eine SOFC-Entwicklung mit einer elektrischen Leistung von 1 kW. Mit mehreren Prototypen, die bei verschiedenen Energieversorgungsunternehmen installiert wurden, konnten bereits mehrjährige Erfahrungen gesammelt werden. Das erste kommerziell erhältliche Gerät soll bereits 2001 verfügbar sein. Vertriebspartner in der Einführungsphase werden jedoch ausschließlich Energieversorgungsunternehmen sein. Es ist geplant, dass diese die Hexis-Anlagen erwerben und den Kunden im Contracting zur Verfügung stellen.

Aber auch für Nahwärmenetze, die dezentrale Stromerzeugung und die industrielle Anwendung bieten sich exzellente Perspektiven. Einziges Manko ist, dass die große Erwartungshaltung von potenziellen Anwendern oder Betreibern heute noch nicht ad hoc befriedigt werden kann. Aber in den nächsten Jahren wird die Brennstoffzellentechnik große Fortschritte machen. Die Entwickler benötigen etwas Zeit, ihre Arbeiten voranzutreiben und die Anlagen im Pilotstadium und in Feldtests zu untersuchen und zu verbessern. Werden sie durch Fördermittel von der Politik und durch die konstruktive Zusammenarbeit mit potenziellen Marktpartnern und Anwendern dabei unterstützt, dann wird die Brennstoffzelle in wenigen Jahren ein Spitzenprodukt für die dezentrale Strom- und Wärmeerzeugung. Wegen seines Wasserstoffreichtums, der vorhandenen Infrastruktur und seiner hohen Verfügbarkeit zu günstigen Konditionen ist Erdgas hierfür die ideale Einsatzenergie. Es wird bei der Versorgung stationärer Brennstoffzellen die dominierende Rolle spielen.



Die 1977 gegründete ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., ein Zusammenschluss von 40 Gasversorgungsunternehmen, fördert die Weiterentwicklung und weitere Verbreitung sparsamer und umweltschonender Technologien auf Erdgasbasis.

Solchen Techniken den Weg in die praktische Anwendung zu ebnen ist das vorrangige Ziel der ASUE.

### **Aktivitäten**

Fachtagungen

Veröffentlichungen

Preis der deutschen Gaswirtschaft

### **Arbeitskreise**

Blockheizkraftwerke

Erdgas und Umwelt

Gasturbinentechnik

Gaswärmepumpen und Kältetechnik

Haustechnik

Energiedienstleistungen

### **Mitgliedsunternehmen**

Badische Gas- und Elektrizitätsversorgung AG, Lörrach

Bayerngas GmbH, München

BEB Erdgas und Erdöl GmbH, Hannover

egm Erdgas Mitteldeutschland GmbH, Kassel

EMB Erdgas Mark Brandenburg GmbH, Potsdam

Erdgas Mittelsachsen GmbH, Schönebeck

Erdgas Schwaben GmbH, Augsburg

Erdgas Südbayern GmbH, München

Erdgas Südsachsen GmbH, Chemnitz

Erdgas-Verkaufs-Gesellschaft mbH, Münster

Erdgasversorgungsgesellschaft Thüringen-Sachsen mbH (EVG), Erfurt

Ferngas Nordbayern GmbH, Bamberg

Ferngas Salzgitter GmbH

GASAG Berliner Gaswerke AG

Gasanstalt Kaiserslautern AG

Gasfernversorgung Mittelbaden GmbH, Offenburg

Gas-Union GmbH, Frankfurt

Gasversorgung Main-Kinzig GmbH, Gelnhausen

Gasversorgung Osthessen GmbH, Fulda

Gasversorgung Sachsen-Anhalt GmbH, Halle

Gasversorgung Süddeutschland GmbH, Stuttgart

Gasversorgung Westerwald GmbH, Höhr-Grenzhausen

Gasversorgung Westfalica GmbH, Bad Oeynhausen

Gas-Versorgungsgesellschaft Filstal mbH, Göppingen

Gaswerksverband Rheingau AG, Wiesbaden

HEIN GAS Hamburger Gaswerke GmbH

Niederrheinische Gas- und Wasserwerke GmbH, Duisburg

Oberhessische Gasversorgung GmbH, Friedberg

RGW Rechtsrheinische Gas- und Wasserversorgung AG, Köln

Ruhrgas AG, Essen

Saar Ferngas AG, Saarbrücken

SpreeGas GmbH, Cottbus

Stadtwerke Essen AG

Stadtwerke Neuss Energie und Wasser GmbH

Stadtwerke Paderborn GmbH

Südhessische Gas und Wasser AG, Darmstadt

Thyssengas GmbH, Duisburg

VNG – Verbundnetz Gas AG, Leipzig

Westfälische Ferngas-AG, Dortmund

Wingas GmbH, Kassel

