

**Monitoring**  
**"Zum Entwicklungsstand der  
Brennstoffzellen-Technologie"**

Sachstandsbericht

# Inhalt

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>Vorwort</b> .....	<b>7</b>
<b>I. Einleitung</b> .....	<b>9</b>
<b>II. Zur Technologie der Brennstoffzelle</b> .....	<b>13</b>
1. Zum Begriff Brennstoffzellen .....	13
2. Historische Entwicklung der Brennstoffzellen-Forschung .....	14
3. Funktionsweise von Brennstoffzellen .....	16
4. Brennstoffzellen-Typen.....	19
4.1 Niedrigtemperatur-Brennstoffzellen.....	21
4.2 Mitteltemperatur-Brennstoffzellen .....	24
4.3 Hochtemperatur-Brennstoffzellen .....	25
5. Brennstoffe und Brennstoffaufbereitung .....	29
<b>III. Anwendungsspektrum</b> .....	<b>37</b>
1. Stationäre Anwendungen (Energieumwandlung).....	40
1.1 Großkraftwerke.....	41
1.2 Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen.....	45
1.3 Kleinstanwendungen .....	48
2. Mobile Anwendungen (Antriebe).....	49
3. Ökonomische Aspekte.....	57
4. Ökologische Aspekte .....	62
<b>IV. Zum Stand der internationalen Brennstoffzellen-Forschung</b> .....	<b>67</b>
1. Nordamerika .....	68
2. Japan.....	74

## *Inhalt*

3. Europa.....	78
3.1 Länderübergreifende Aktivitäten .....	79
3.2 Nationale Aktivitäten.....	82
3.3 Weitere Länder .....	86
<b>V.    Schlußbetrachtung .....</b>	<b>91</b>
<b>Literatur.....</b>	<b>97</b>
1. Vom TAB in Auftrag gegebene Gutachten.....	97
2. Weitere Literatur.....	97
<b>Anhang .....</b>	<b>105</b>
1. Tabellenverzeichnis .....	105
2. Abbildungsverzeichnis .....	105
3. Reaktionen an Anode und Kathode .....	107
4. Brennstoffzellen-Anlagen .....	108
5. Abkürzungen.....	110
<b>Glossar.....</b>	<b>113</b>

## Zusammenfassung

Die Brennstoffzellen-Technologie weist eine **attraktive Kombination** von **hoher Effizienz** in der Brennstoffausnutzung und **umweltfreundlicher Betriebsweise** auf. Einige Brennstoffzellen-Systeme können in naher Zukunft eine greifbare und attraktive Alternative zur konventionellen Erzeugung elektrischer Energie und bei Fahrzeugantrieben darstellen. Die insbesondere in letzter Zeit intensivierten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an der Brennstoffzellen-Technologie liefern Ansatzpunkte für vorliegenden Sachstandsbericht. Dieser geht der Frage nach, inwieweit derzeit verfügbare Brennstoffzellen-Systeme aus technischer und ökonomischer Sicht für mobile und stationäre Anwendungen einsetzbar sind.

### *Warum Brennstoffzellen?*

Das Prinzip der Brennstoffzelle ist seit dem 19. Jahrhundert bekannt und somit auch ihr Potential, höhere Wirkungsgrade als Dampfkraftwerke erreichen zu können. Schematisiert kann eine Brennstoffzelle als ein geschlossener Behälter beschrieben werden, dem Brennstoff, wie Wasser- und Sauerstoff, zugeführt wird und der elektrische Energie, Wärme und Wasser abgibt. In dem Behälter befinden sich zwei Elektroden sowie ein Elektrolyt, nach dem zumeist der Brennstoffzellen-Typ bezeichnet wird. Der Elektrolyt unterteilt die Zelle in Teilräume, so daß die elektrochemische Energieumwandlung in Teilreaktionen stattfindet und die bekannte "Knallgasreaktion" unterbleibt.

Vorteile der Brennstoffzelle liegen neben vergleichsweise hohen elektrischen Wirkungsgraden u.a. in lokaler Emissionsarmut bzw. -freiheit, hoher Flexibilität in der Betriebsweise, modularem Aufbau sowie Geräuscharmheit. Trotz erheblicher wissenschaftlicher Fortschritte (z.B. Materialeinsatz) und deutlich veränderten energiepolitischen Rahmenbedingungen (z.B. Kohlendioxidproblematik) ist bisher keine Umsetzung in ein wettbewerbsfähiges Serienprodukt und somit kein großflächiger Einsatz von Brennstoffzellen erfolgt.

### *Welche Brennstoffzellen-Systeme sind interessant?*

Von einer Reihe möglicher **Brennstoffzellen-Typen**, haben sich im wesentlichen **fünf** durchgesetzt. Das sind, nach ihrer Betriebstemperatur geordnet, die alkalische Brennstoffzelle (AFC, ca. 80°C), die Membran-Brennstoffzelle

## Zusammenfassung

(PEMFC, ca. 80°C), die phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC, ca. 200°C), die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC, ca. 650°C) und die oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC, ca. 1.000°C). Daneben wird oft eine weitere, die Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC), genannt, welche als eine Variante der Membran-Brennstoffzelle angesehen werden kann.

Die genannten Brennstoffzellen-Systeme weisen einen **sehr unterschiedlichen Entwicklungsstand** auf. Die phosphorsaure Brennstoffzelle wurde als einziger Brennstoffzellen-Typ bisher in den zivilen Markt eingeführt. Die am längsten für spezielle Anwendungen technisch optimierte, jedoch extrem teure alkalische Brennstoffzelle wird zunehmend von der Membran-Brennstoffzelle verdrängt, welche in den letzten Jahren relativ marktnah entwickelt wurde; Direktmethanol-Brennstoffzellen stehen derzeit noch am Anfang ihrer Entwicklung. Auch Hochtemperatur-Brennstoffzellen befinden sich momentan noch weitestgehend im Entwicklungsstadium, wobei die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle aus historischen Gründen einen Entwicklungsvorsprung vor oxidkeramischen Brennstoffzellen aufweist. Insbesondere letztere bieten jedoch ein flexibles Einsatzpotential mit höchsten Wirkungsgraden.

### *Wozu sind Brennstoffzellen einsetzbar?*

Einsatzgebiete von Brennstoffzellen sind primär die **gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung** und der **Verkehrsbereich**, wobei sich folgende wesentliche Anwendungen herauskristallisieren: Die marktreife PAFC wird zur Kraft-Wärme-Kopplung, etwa in Blockheizkraftwerken zur dezentralen Energieversorgung von Gebäuden, eingesetzt und fungiert als sog. Marktöffner; die PEMFC ist insbesondere für die Fahrzeugtechnik in ihrer Entwicklung forciert worden, so daß verschiedene Prototypen für Busse und Pkw verfügbar sind; im Hochtemperaturbereich (MCFC, SOFC) laufen derzeit intensive Entwicklungsanstrengungen für Einsatzzwecke im Kraftwerksbereich; der jedoch vermutlich keinen Einstiegsmarkt für Brennstoffzellen darstellen wird.

Das jeweilige Einsatzpotential von Brennstoffzellen wird durch die Kostenfrage und das noch nicht ausgeschöpfte Optimierungspotential konventioneller Energieerzeugungstechniken bzw. Fahrzeugantriebe bestimmt. Darüber hinaus ist bei einer entsprechenden vergleichenden Gegenüberstellung, etwa von Treibhausgasemissionen, das gesamte Brennstoffzellen-System mit sämtlichen vorgelagerten Prozessen, wie der Brennstoffaufbereitung zur Erzeugung von Wasserstoff, zu berücksichtigen.

*Wo steht die internationale Brennstoffzellen-Forschung?*

International wird im wesentlichen in Nordamerika, Japan und Westeuropa an der Entwicklung der Brennstoffzellen-Technologie geforscht, wobei die Intensität dieser Forschungsarbeiten - primär bedingt durch verschiedene energie- und umweltpolitische Rahmenbedingungen - sehr unterschiedlich ausgeprägt ist. **Japan** ist außerordentlich bemüht, die Brennstoffzellen-Technologie so bald wie möglich, hauptsächlich zur Strom- und Wärmeerzeugung (PAFC, MCFC, SOFC), verfügbar zu haben. In **Nordamerika** hat es eine relativ kontinuierliche Entwicklung der Brennstoffzellen-Technologie gegeben, so daß jetzt versucht wird, den in einigen Bereichen gewonnenen Entwicklungsvorsprung zu halten und auszubauen (z.B. USA: Produktions-Know-how bei PAFC, eigenes Konzept bei SOFC; Kanada: PEMFC). In **Westeuropa** gab es eine weniger kontinuierliche Entwicklung. Die in den letzten Jahren festzustellende Renaissance in der Brennstoffzellen-Forschung ist insbesondere bei der PEMFC im Fahrzeugbereich sowie den Hochtemperatur-Brennstoffzellen (MCFC, SOFC) augenfällig, wobei hier oft Kooperationen mit nichteuropäischen Firmen festzustellen sind. Eine Gegenüberstellung von zur Entwicklung der Brennstoffzellen-Technologie eingesetzten öffentlichen Mitteln ergibt, daß diese in **Deutschland**, bezogen auf Einwohner bzw. Bruttoinlandsprodukt, im Vergleich zu den USA und Japan signifikant geringer ausfallen.

*Wo liegen Entwicklungsfelder und Schlüsselprobleme der Brennstoffzellen-Technik?*

Mit Bezug auf internationale Forschungsarbeiten hat die Brennstoffzellen-Technologie einen Entwicklungsstand erreicht, der für einige Brennstoffzellen-Typen eine breitere Einführung mittelfristig (etwa 2005 bis 2010) möglich erscheinen läßt. Die technische Reife der Brennstoffzellen selbst ist relativ weit fortgeschritten; verfahrenstechnisch problematisch sind hier eher periphere Anlagen, etwa zur Brennstoffaufbereitung und Steuerung, sowie die Optimierung des Gesamtsystems.

Ein **wesentlicher Nachteil** derzeit verfügbarer Brennstoffzellen-Systeme sind ihre, im Vergleich zu konventionellen Technologien zur Stromerzeugung bzw. zum Fahrzeugantrieb, **hohen Herstellungskosten**. Diese resultieren zum einen daraus, daß Brennstoffzellen zumeist noch in Einzelfertigung hergestellt werden, zum anderen daher, daß teure Materialien eingesetzt werden müssen (z.B. Platin bzw. Gold als Katalysatoren bei Niedrigtemperatur-Brennstoff-

## Zusammenfassung

zellen). Für eine **Kostenreduzierung** muß auch weiterhin an den Brennstoffzellen selbst gearbeitet werden, werkstoffseitig etwa an verwendeten Katalysatoren und Membranzusammensetzungen bei Niedrigtemperatur-Brennstoffzellen oder an temperatur- und korrosionsbeständigen Materialien bei Mittel- und Hochtemperatur-Brennstoffzellen. Zusammen mit der Peripherie sind Systemvereinfachungen notwendig. Um mit den Kosten in Größenordnungen konventioneller Energieerzeugungsanlagen zu kommen, müßten diese derzeit um einen Faktor von bis zu zehn reduziert werden; bei Fahrzeugantrieben sind noch deutlich höhere Kostendegressionen erforderlich.

Ein wesentliches Charakteristikum von Brennstoffzellen-Systemen ist das begrenzte Spektrum **einsetzbarer Brennstoffe**, welches jedoch mit zunehmender Betriebstemperatur breiter wird. Im unteren Temperaturbereich ist beispielsweise die alkalische Brennstoffzelle nur mit reinstem Wasserstoff und Sauerstoff zu betreiben, was die teuerste Variante der Brennstoffversorgung darstellt. Für Membran-Brennstoffzellen ist bereits brennstoffzellenextern aus Methanol reformierter Wasserstoff mit Luft (PEMFC) bzw. Methanol direkt (DMFC) einsetzbar; der Einsatz von reformiertem Benzin wird diskutiert. Im Hochtemperaturbereich ist bei der Schmelzkarbonat- und bei der oxidkeramischen Brennstoffzelle (durch brennstoffzelleninterne Reformierung) der Einsatz verschiedener Gase, wie Erd- oder Kohlegas mit Luft, praktikabel, was etwa bei Erdgas einen Anschluß an bestehende Versorgungssysteme ermöglicht. Im Fahrzeugbereich werden grundlegend verschiedene Konzepte für die Brennstoffversorgung verfolgt: der Einsatz von Wasserstoff, von komprimiertem Erdgas oder von Flüssigbrennstoff (Methanol, Benzin), was jeweils verschiedene **Versorgungsstrukturen** bedingt. So müßte bei einer Wasserstoffversorgung eine völlig neue Infrastruktur geschaffen werden; dies ist einerseits teuer, andererseits sind beim Einsatz von Wasserstoff höhere Wirkungsgrade erreichbar als etwa mit Erdgas. Wasserstoff kann auch durch den Einsatz regenerativer Energien erzeugt werden. Bei einem Methanoleinsatz könnte wiederum das vorhandene Tankstellensystem genutzt werden.

**Zusammenfassend** kann festgehalten werden, daß die Brennstoffzellen-Technologie eine hohe **forschungs-, energie- und umweltpolitische Attraktivität** besitzt, technisch jedoch noch nicht ausgereift und augenblicklich noch zu kostenintensiv ist. Zur Beurteilung eines zukünftigen breiten Einsatzpotentials der emissionsarmen Brennstoffzellen-Technologie besteht noch weiterer Untersuchungsbedarf.

## Vorwort

Im Rahmen des Arbeitsprogramms des TAB kommt dem Bereich **Monitoring** eine besondere Bedeutung zu. Seine Zielsetzung besteht in

- der Beobachtung wichtiger wissenschaftlich-technischer Trends und damit zusammenhängender gesellschaftlicher Entwicklungen und
- der Verfolgung und Auswertung wichtiger TA-Projekte innerhalb und außerhalb der Bundesrepublik Deutschland.

Angestrebt wird u.a. die frühzeitige Unterrichtung des Ausschusses für Bildung, Wissenschaft, Forschung, Technologie und Technikfolgenabschätzung über potentiell bedeutsame TA-Themen und ihre parlamentarische Relevanz. Im Arbeitsbereich Monitoring werden vor allem vertiefende Untersuchungen zu einzelnen Technikfeldern und Analysen zu gesellschaftlichen Problemfeldern mit technologiepolitischen Implikationen durchgeführt. Dazu gehören Themen wie Technikakzeptanz und Kontroversen über Technik, Nachwachsende Rohstoffe und Gentherapie.

Das Monitoring-Vorhaben "Brennstoffzellen-Technologie" wurde auf Beschluß der Berichterstatterinnen und Berichterstatter des Ausschusses für Bildung, Wissenschaft, Forschung, Technologie und Technikfolgenabschätzung bearbeitet. Der vorliegende Sachstandsbericht basiert zum Teil, insbesondere im Kapitel III zum Anwendungs- und Einsatzspektrum von Brennstoffzellen, auf einem vom TAB in Auftrag gegebenen Gutachten des Institutes für Technische Thermodynamik der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR-ITT 1997).



# I. Einleitung

Brennstoffzellen wandeln die chemische Energie des zugeführten Brennstoffs auf elektrochemischem Wege unmittelbar in Elektrizität um. Im Vergleich hierzu sind bei der konventionellen Stromerzeugung mehrere Zwischenschritte, über Dampfkessel, Dampfturbine und Generator, notwendig, wodurch Umwandlungsverluste deutlich höher sind. Als Brennstoffe für Brennstoffzellen kommen etwa Wasserstoff, Erd-, Kohle- und Biogas sowie Methanol in Betracht.

Ein forciertes Einsatz von Brennstoffzellen erfolgte, aufgrund technischer Probleme, erst Mitte dieses Jahrhunderts für Spezialzwecke wie Stromversorgung in der Raketen- und Raumfahrttechnik sowie bei Antrieben in der Militärtechnik. So stellte das hierfür eingesetzte Brennstoffzellen-System aufgrund seines basischen Elektrolyten sehr hohe Anforderungen an die eingesetzten Materialien seitens ihrer Beständigkeit sowie an die Brennstoffreinheit. Die in der Raumfahrttechnik geeigneten technischen Lösungen ließen sich jedoch aus Kostengründen nicht auf terrestrische Anwendungen übertragen. Nachfolgende Entwicklungen verschiedener Brennstoffzellen-Systeme, die international insbesondere in Nordamerika und Japan mit sehr unterschiedlicher Intensität durchgeführt wurden, haben bisher zu keinem großflächigen Einsatz geführt.

Die derzeit erkennbare erhebliche Intensivierung von Bemühungen zur Entwicklung und Markteinführung von Brennstoffzellen, sowohl für mobile als auch stationäre Anwendungen, hat verschiedene Gründe: Zum einen sind seit den 80er Jahren wesentliche Erkenntnisfortschritte bezüglich Materialeinsatz, Brennstoffaufbereitung, Verständnis der elektrochemischen Vorgänge etc. erzielt worden. Zum anderen haben sich, infolge der CO<sub>2</sub>-Problematik oder von Tendenzen zur Dezentralisierung der Stromerzeugung, umwelt- und energiepolitische Rahmenbedingungen verändert. Vor diesem Hintergrund treten die Stärken der Brennstoffzelle (hohe elektrische Wirkungsgrade, lokale Emissionsfreiheit, flexibler, modularer Aufbau etc.), die sie für verschiedenste Anwendungen interessant erscheinen lassen, noch deutlicher hervor.

Als ein wesentliches Einsatzgebiet der Brennstoffzellen-Technologie wird die dezentrale Energieversorgung, etwa von Wohn- und öffentlichen Gebäuden (Krankenhäuser etc.) oder von kleineren, leitungsfernen Versorgungsgebieten in ländlichen Regionen, angesehen. Darüber hinaus stellt die Brennstoffzelle im Fahrzeugbereich eine ökologisch attraktive Alternative zum herkömmlichen Verbrennungsmotor dar, da die Reduzierung von Verkehrsemissionen, etwa in

## I. Einleitung

Ballungsräumen, nach wie vor ein ungelöstes Problem darstellt. In einer Reihe von Demonstrationsprojekten, wie brennstoffzellengetriebenen Transportern oder Stromerzeugungsanlagen für Gebäude, werden bereits Brennstoffzellen-Gesamtsysteme unter praxisrelevanten Bedingungen getestet. Dadurch vorliegende Betriebserfahrungen weisen für die einzelnen Brennstoffzellen-Systeme einen unterschiedlichen technischen Entwicklungsstand aus. Langzeitbetriebs-erfahrungen stehen für alle Brennstoffzellen-Typen noch aus.

Derzeit wird in der Literatur für Brennstoffzellen oft von Nischenanwendungen in eher überschaubaren Marktsegmenten ausgegangen, für die sich momentan verhältnismäßig viele Anbieter interessieren. Aus Erfahrungen mit anderen, als alternativ anzusehenden Energiekonzepten, wie die Nutzung von Solar- und Windenergieanlagen, ist bekannt, daß selbst bei Technologien, die an der Grenze zur Wirtschaftlichkeit stehen, eine Markteinführung unerwartet langsam verlaufen kann.

### *Zielsetzung und Vorgehensweise*

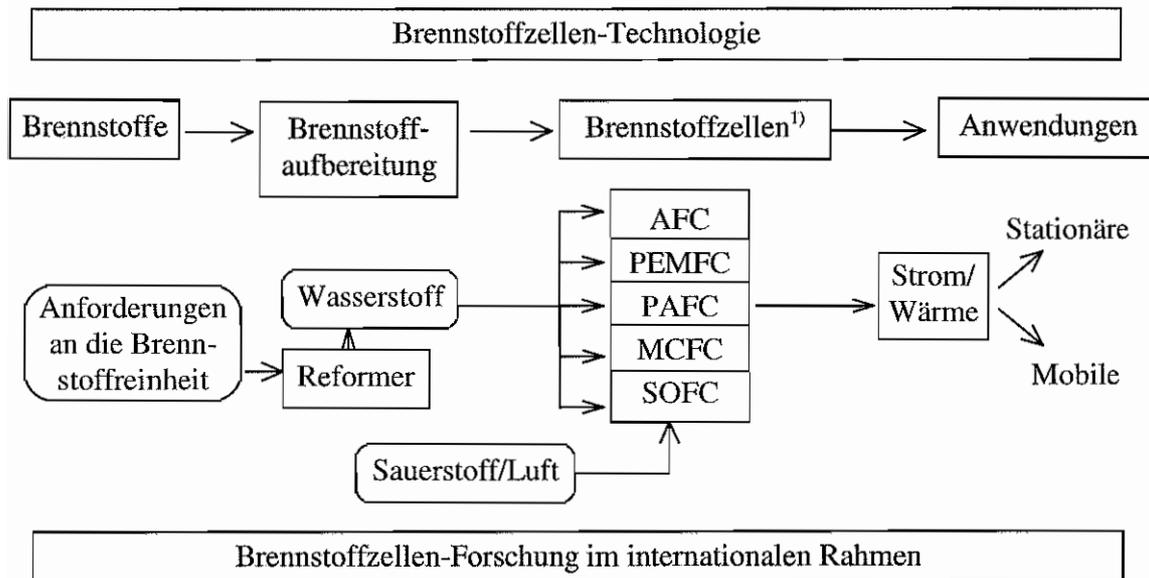
Ziel des vorliegenden Sachstandsberichtes ist es, einen komprimierten Überblick über den derzeitigen Entwicklungsstand sowie zu aktuellen Trends und Perspektiven der Brennstoffzellen-Technologie zu geben. Dabei werden wesentliche Einsatzgebiete für Brennstoffzellen aufgezeigt sowie weiterer Informationsbedarf identifiziert.

Das Thema wird entlang dreier übergeordneter Bereiche behandelt: **Technologie, Einsatzspektrum und internationaler Forschungsstand von Brennstoffzellen**. Im einzelnen ist der vorliegende Sachstandsbericht folgendermaßen aufgebaut: Einer Erläuterung des Brennstoffzellen-Begriffs folgen Ausführungen zur Dynamik in der Brennstoffzellen-Forschung. Anschließend werden wesentliche technische Aspekte von Brennstoffzellen-Systemen analysiert, unterteilt nach Niedrig-, Mittel- und Hochtemperatur-Brennstoffzellen. Dargestellt werden Anforderungen an einsetzbare Brennstoffe sowie deren Aufbereitung und eine Kurzcharakteristik gängiger Brennstoffzellen-Systeme. Dies bildet die Grundlage für eine Diskussion des Anwendungsspektrums im stationären wie im mobilen Bereich. Thematisiert werden weiterhin ökonomische und ökologische Aspekte von Brennstoffzellen-Systemen. Darüber hinaus wird ein Überblick über wesentliche Forschungsaktivitäten anderer Länder gegeben. Abschließend werden in einer Schlußbetrachtung Ansatzpunkte und Fragen einer weitergehenden Abschätzung und Bewertung der zukünftigen Rolle der Brennstoffzellen-Technologie benannt.

## I. Einleitung

Die im folgenden behandelten Bereiche sind in Abbildung 1 zusammenfassend dargestellt.

Abb. 1: Behandelte Bereiche im vorliegenden Sachstandsbericht



1) AFC, PEMFC, PAFC, MCFC, SOFC = Brennstoffzellen-Typen entsprechend Kapitel II.4

Abschließend sei all denjenigen gedankt, die zur Bearbeitung des Monitoring-Vorhabens, sei es durch ausführliche Gespräche oder durch die Kommentierung der Entwurfsversion, unterstützend bei der Erstellung des vorliegenden Sachstandsberichtes beigetragen haben, insbesondere Dr. Peter Biedermann, Dr. Wolfgang Drenckhahn, Torsten Fleischer, Dr. Thomas Hoffmann, Prof. Dr. Bernd Höhle, Dr. Christoph Hünnekes, Christina Hutter, Herrmann Kabs, Dr. László Kacsóh, Dr. Heinz Nabielek, Dr. Joachim Nitsch, Dr. Thomas Petermann, Dr. Christine Rösch, Marc Rumpel, Dr. Arnold Sauter, Dr. Werner Schnurnberger und Dr. Detlev Wintzer.

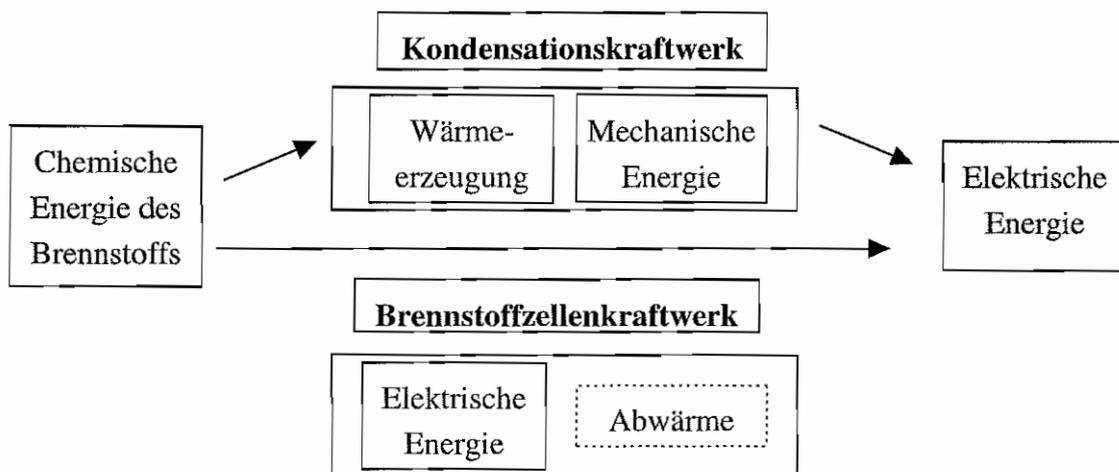


## II. Zur Technologie der Brennstoffzelle

### 1. Zum Begriff Brennstoffzellen

Eine Brennstoffzelle ist eine elektrochemische Stromquelle, die bei kontinuierlicher Zuführung der Reaktionskomponenten **kontinuierlich** elektrische Energie erzeugen kann. Theoretisch könnte eine elektrochemische Zelle unbegrenzt, praktisch jedoch nur bis zum Materialversagen der Bauteile, die chemische Energie der Reaktionskomponenten direkt in elektrische Energie umwandeln. Die Bezeichnung "Brennstoffzelle" ist darauf zurückzuführen, daß diese Systeme prinzipiell geeignet sind, den Verbrennungsprozeß traditioneller Brennstoffe, wie Kohle, Erdöl oder Erdgas, unter Zufuhr von Luftsauerstoff zur **unmittelbaren** Erzeugung von elektrischer Energie zu nutzen (Jakubke 1987). Abbildung 2 vergleicht die Arbeitsweise einer Brennstoffzelle mit konventioneller Stromerzeugung:

Abb. 2: Arbeitsweise einer Brennstoffzelle im Vergleich zur konventionellen Stromerzeugung



Quelle: Ledjeff 1995a, S. 25 (geändert)

Der Wirkungsgrad konventioneller Stromerzeugung in einem Kondensationskraftwerk - über Dampfkessel, Dampfturbine und Generator - ist aufgrund auftretender Umwandlungsverluste in den Zwischenstufen, entsprechend dem Carnotschen Kreisprozeß, begrenzt. Wirkungsgrade heutiger Kondensationskraft-

werke liegen bei max. 45 % (el) (z.B. modernes Steinkohlekraftwerk "Staudinger" 43 % (el)); mit konventioneller Kohleverstromungstechnologie ist dieser ausbaubar bis ca. 50 %. Bei gekoppelten Gas- und Dampfturbinen (GuD-Anlagen) lassen sich Wirkungsgrade bis über 60 % erzielen (Hoffmann 1997). Bei einem Brennstoffzellen-Kraftwerk wird die chemische Energie des Brennstoffs direkt in elektrische Energie umgewandelt; Umwandlungsverluste sind deshalb deutlich geringer und elektrische Wirkungsgrade von bis zu 70 % können erreicht werden. Auch bei Brennstoffzellen ist eine Nutzung der Abwärme möglich, wobei der Stromanteil bei Brennstoffzellen höher als bei Kondensationskraftwerken und GuD-Anlagen liegt.

## 2. Historische Entwicklung der Brennstoffzellen-Forschung

Folgende Ausführungen zur Dynamik in der Historie der Brennstoffzellen-Forschung wurden auf der Basis von DLR-ITT (1997, S. 1 f.), Kordesch/Simader (1996, S. 2 f.) und Nölscher (1996, S. 53) erstellt. Der Wunsch, chemische Energie direkt in Elektrizität umzuwandeln, existierte bereits in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts. In diese Zeit fallen auch erste dokumentierte Experimente, Kohle bzw. Kohlegas elektrochemisch bei niedrigen Temperaturen zu oxidieren. So berichtete 1802 Sir Davy von einer einfachen Zelle, die aus zwei Kohleelektroden und Salpetersäure bestand. Im Jahre 1839 demonstrierte W.R. Grove durch die Umkehrung der Elektrolyse eine Wasserstoff/Sauerstoff-Brennstoffzelle mit Schwefelsäure und Platin-Elektroden. W. Oswald zeigte 1894 mit Hilfe der Thermodynamik, daß die "kalte elektrochemische Verbrennung" Vorteile gegenüber der "Hochtemperaturverbrennung" von Brennstoffen haben kann. Das Prinzip der Brennstoffzelle wurde somit bereits vor über 150 Jahren erfunden, doch konnte diese Idee der Stromerzeugung über einen langen Zeitraum nicht zu einem technisch ausgereiften Verfahren entwickelt werden. Gründe hierfür waren neben unzureichenden Kenntnissen der ablaufenden elektrochemischen Vorgänge hauptsächlich Materialprobleme. Daneben wurden um die Jahrhundertwende der elektrodynamische Generator (Siemens 1866), Verbrennungsmotoren (Otto 1863, Diesel 1892) und die Gasturbine (Stolze 1900) erfolgreich am Markt eingeführt, so daß das Interesse der Wirtschaft an der Entwicklung eines elektrochemischen Stromgenerators - trotz der schon früh erkannten potentiellen Vorteile - gering war.

## 2. Historische Entwicklung der Brennstoffzellen-Forschung

Einen Entwicklungsschub für Niedrigtemperaturreaktionen, wie sie auch in Brennstoffzellen ablaufen, erfolgte erst durch eine technische Weiterentwicklung der Elektroden mit der Erfindung der Gasdiffusionselektrode um 1920.

Erst 30 Jahre später, um 1950, wurde in England und dann in Deutschland und den USA damit begonnen, die Grundlagen der Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle intensiver zu erarbeiten. Diese Forschungsergebnisse waren Basis eines beachtlichen Entwicklungsprogramms der NASA, welches mit der Ausrüstung der Apollo-Mondmission 1968 seinen Höhepunkt fand. Das eingesetzte Brennstoffzellen-System mit einem alkalischen Elektrolyten wurde mit reinem Wasser- und Sauerstoff betrieben. Weiterentwickelt wurde diese Art von Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzellen auch für terrestrische Anwendungen. Zu nennen sind hier brennstoffzellenangetriebene Elektrofahrzeuge, von denen Anfang der 70er Jahre verschiedene Prototypen verfügbar waren.

Mitte der 70er Jahre kam es dann zu einem bemerkenswerten Wechsel in der Brennstoffzellen-Entwicklung. Forschungen an alkalischen Systemen, die in Raumfahrtprogrammen einen hohen Entwicklungsstand erreicht hatten, wurden im internationalen Maßstab durch phosphorsaure Systeme abgelöst. Diese Systeme schienen für stationäre Kraftwerksanwendungen besser geeignet zu sein. Parallel wurde die Entwicklung von Reformern zum Einsatz von Kohlenwasserstoffen vorangetrieben. Ein Trend hin zur Entwicklung von Kraftwerkseinheiten von 100 kW bis zu 1 MW war insbesondere in Japan zu verzeichnen.

Aufgrund ihres höheren Wirkungsgrades sowie der Möglichkeit, Abwärme zu nutzen, wurde in der Folge die Entwicklung von Hochtemperatur-Brennstoffzellen forciert. Dazu gehörte in den 80er Jahren die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle sowie in den 90er Jahren die oxidkeramische Brennstoffzelle. Hauptprobleme bei beiden Systemen liegen im Erreichen akzeptabler Standzeiten.

Daneben hinaus avancierte in den 90er Jahren die Membran-Brennstoffzelle zu einem attraktiven Forschungsobjekt. Dieses System existierte bereits in den 60er Jahren; seine damals erreichbare Zuverlässigkeit lag jedoch hinter der alkalischen Brennstoffzelle und war somit für Raumfahrtzwecke uninteressant. Impulse für das erneute Interesse an der Membran-Brennstoffzelle ergaben sich auf der Basis neu entwickelter Membrantypen sowie aus der Katalysatorforschung. Neben den Stromdichten ließen sich auch Standzeiten signifikant erhöhen. Eine Besonderheit der Membran-Brennstoffzelle besteht in Einsatzmöglichkeiten im stationären sowie im mobilen Bereich. Nachteilig sind jedoch ihre hohen Herstellungs- und Materialkosten.

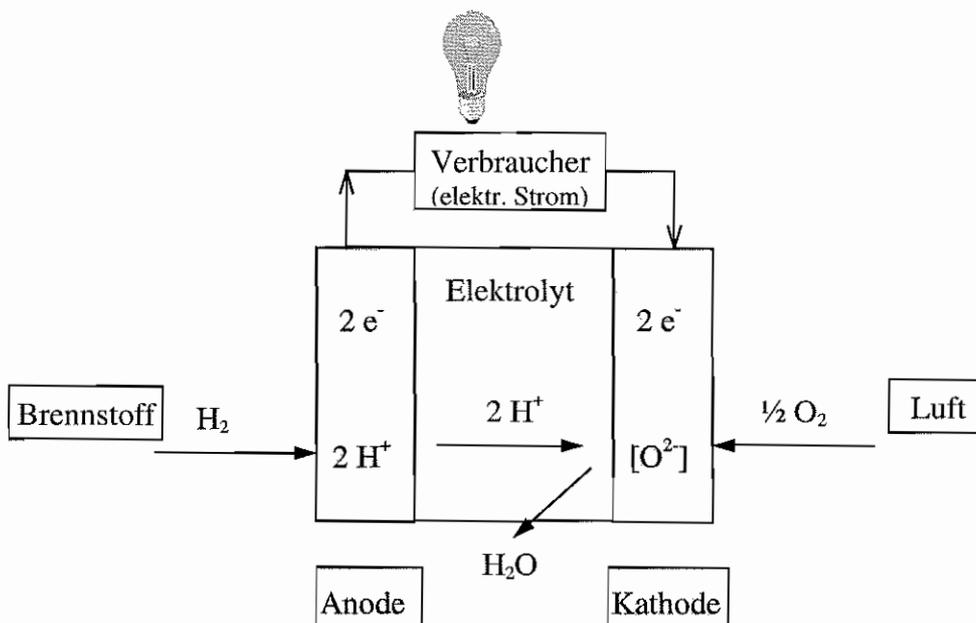
## II. Zur Technologie der Brennstoffzelle

**Zusammenfassend** kann festgehalten werden, daß die Brennstoffzellen-Technologie seit über 150 Jahren vom Prinzip her bekannt ist, jedoch erst Mitte dieses Jahrhunderts für bemannte Raumfahrtzwecke intensiv entwickelt wurde. In der Folge mit sehr unterschiedlicher Intensität untersucht, hat sie in den letzten Jahren eine Renaissance erlebt. Gründe hierfür sind in veränderten energie- und umweltpolitischen Rahmenbedingungen als auch im wissenschaftlichen Fortschritt zu sehen.

### 3. Funktionsweise von Brennstoffzellen

Brennstoffzellen bestehen aus zwei Elektroden, die kontinuierlich etwa mit Wasser- und Sauerstoff versorgt werden, und einem Elektrolyten, der die beiden Elektroden miteinander verbindet. Der Elektrolyt muß die beiden Elektroden gasdicht voneinander trennen. Schematisch kann der Aufbau einer Brennstoffzelle wie in Abbildung 3 dargestellt werden.

Abb. 3: Funktionaler Aufbau einer Brennstoffzelle mit saurem Elektrolyten



Brennstoffzellen funktionieren auf der Basis **elektrochemischer Reaktionen**, die eine Umkehrung der Wasserelektrolyse darstellen. Unter normalen Reaktionsbedingungen reagieren Wasserstoff und Sauerstoff nach thermischer Initiie-

### 3. Funktionsweise von Brennstoffzellen

rung explosionsartig miteinander unter starker Wärmeentwicklung zu Wasser (bekannt als Knallgasreaktion). In einer Brennstoffzelle verläuft diese Reaktion kontrolliert ab, so daß Strom und frei werdende Wärme genutzt werden können. An der Anode findet die "Brennstoff-Reaktion" statt und an der Kathode die "Sauerstoffreaktion". Als Brennstoff (Kap. II.5) wird im einfachsten Fall der Anode Wasserstoff zugeführt. Dieser wird an einer katalytisch aktivierten Anodenoberfläche adsorbiert. Anschließend tritt er unter Elektronenabgabe ionisiert in den Elektrolyten ein, was auch als sog. Durchtrittsreaktion bezeichnet wird. An der Kathode findet dann eine Reaktion von Wasserstoffionen mit einem an der Kathodenoberfläche adsorbierten Oxidationsmittel, etwa Sauerstoff, statt. Die ablaufenden Reaktionen sind exemplarisch für einen sauren Elektrolyten in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Tab. 1: Reaktionen in einer Brennstoffzelle bei saurem Elektrolyten

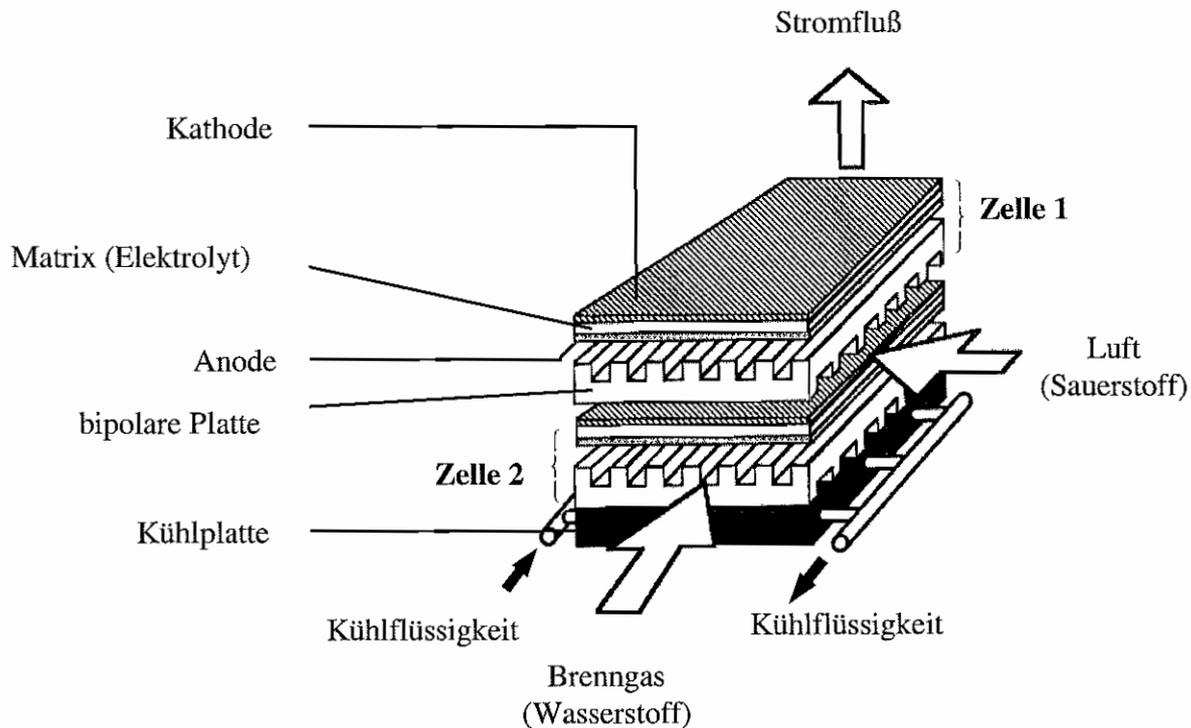
<i>Ort</i>	<i>Vorgang</i>	<i>Reaktionsgleichung</i>	
Anode	Freisetzung von Wasserstoffionen unter Elektronenabgabe	$2 \text{H}_2$	$\rightarrow 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^-$
Elektrolyt	Transport der $\text{H}^+$ Ionen zur Kathode	-	
Kathode	Reaktion der Wasserstoffionen mit Sauerstoff unter Elektronenaufnahme	$\text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$
Gesamtreaktion		$2 \text{H}_2 + \text{O}_2$	$\rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$

Eine Brennstoffzelle trennt somit die Gesamtreaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser in zwei Einzelreaktionen auf. Die Elektronen fließen über einen äußeren Stromkreis und können dort Arbeit leisten, während der Ladungstransport in der Zelle durch die Bewegung von Ionen im Elektrolyten erfolgt. Für die Bruttoreaktion zu Wasser errechnet sich theoretisch unter Standardbedingungen eine Zellspannung von 1,23 V. Da in technischen Zellen Verluste zu berücksichtigen sind, ergeben sich praktisch Zellspannungen im Bereich von 0,6 - 0,9 V (Ledjeff 1995a). Die begrenzte Zellspannung einer Brennstoffzelle hat zur Konsequenz, daß in der Praxis mehrere Brennstoffzellen in Reihe zu sog. "Stacks" zusammengeschaltet werden müssen (Abb. 4), um eine höhere Spannung zu erreichen. In den Stacks sind die einzelnen Brennstoffzellen über bipolare Platten elektrisch kontaktiert. Gasleitschichten über der Oberfläche der

## II. Zur Technologie der Brennstoffzelle

bipolaren Platten sichern die Versorgung mit Brennstoff und führen das entstehende Reaktionsprodukt Wasser nach außen ab.

Abb. 4: Prinzipieller Aufbau eines Stacks (Beispiel mit phosphorsauren Brennstoffzellen)



Quelle: Drenckhahn/Hassmann 1993, S. 385; Wagner/König 1997

Die Brennstoffzellen-Stacks sind sowohl für mobile als auch für stationäre Anwendungen in eine entsprechende **Peripherie** eingebunden, die sich in drei Gruppen bzw. technische Module einteilen lassen (DLR-ITT 1996, S. 9):

- Brenngasmodul:
  - Erzeugung und Aufbereitung der Brenngase (Reformierung, Gasreinigung etc.)
- Elektrisches Modul:
  - Wechselrichter mit Leistungselektronik, Regelung und Steuerung
- Wärmemodul:
  - im Kraft-Wärme-Kopplungs-Betrieb: Wärmetauscher zur Auskopplung von Wärme
  - in Fahrzeugen: Ventilatoren und Kühler

#### 4. Brennstoffzellen-Typen

Der Ablauf elektrochemischer Reaktionen in einer Brennstoffzelle ist geräuschlos. Ein Geräuschpegel kann sich jedoch aufgrund von peripheren Bauteilen einstellen. Da elektrochemische Vorgänge in einer Brennstoffzelle ohne Flamme und teilweise bereits bei Raumtemperatur ablaufen, sind diese auch unter der Bezeichnung "**kalte Verbrennung**" bekannt.

Brennstoffzellen sind hinsichtlich des Arbeitsprinzips der Stromerzeugung durchaus vergleichbar mit **Batterien**, wobei die chemische Energie der Brennstoffe direkt in der Batterie selbst gespeichert wird. Brennstoffzellen hingegen sind lediglich Energiewandler; die Brennstoffe werden außerhalb der Zelle gespeichert. Im Unterschied zu Primärbatterien und Akkumulatoren, welche nur einmal entladbare Stromproduzenten oder wiederaufladbare Energiespeicher begrenzter Kapazität darstellen, ist bei den Brennstoffzellen der Speicher der chemischen Energie nicht im elektrochemischen Energiewandler integriert. Im Unterschied zur Batterie kann somit die Brennstoffzelle auch bei kleiner Leistung kontinuierlich Strom erzeugen, sofern kontinuierlich Brenngase zugeführt werden (DLR-ITT 1997, S. 3, 7).

#### 4. Brennstoffzellen-Typen

Aus funktionstechnischer Sicht sind auf der Basis verschiedenster elektrochemischer Reaktionen und ihrer Randbedingungen eine Reihe von Brennstoffzellen-Typen denkbar und partiell auch im Labormaßstab untersucht worden. Von der möglichen Palette sind jedoch im wesentlichen **fünf Brennstoffzellen-Typen** unter kommerziellen Gesichtspunkten weiterentwickelt worden, welche in Tabelle 2 aufgelistet sind. Eine Unterscheidung der verschiedenen Brennstoffzellen-Typen kann nach Betriebstemperatur, dem Betriebsdruck, den eingesetzten Brennstoffen oder auch den verwendeten Elektrolyten durchgeführt werden. International durchgesetzt hat sich eine **Bezeichnung nach dem eingesetzten Elektrolyten**, wobei die aus den englischsprachigen Bezeichnungen abgeleiteten Akronyme auch im vorliegenden Text verwendet werden.

Technische Besonderheiten von Brennstoffzellen, wie die das Material des Elektrolyten und die somit festgelegte Betriebstemperatur, sind für deren Einsatzspektrum ausschlaggebend. Um einen nachvollziehbaren Zusammenhang zwischen technischen Gegebenheiten und Anwendungsspektrum herstellen zu können, werden vorgenannte Brennstoffzellen-Typen im folgenden näher charakterisiert, unterteilt nach Niedrigtemperatur-Brennstoffzellen (AFC, PEMFC,

## II. Zur Technologie der Brennstoffzelle

DMFC), Mitteltemperatur-Brennstoffzellen (PAFC) und Hochtemperatur-Brennstoffzellen (MCFC und SOFC). Eine **ausklappbare Seite** mit einer Auflistung der hier betrachteten Brennstoffzellen-Typen befindet sich am Berichtsende. Begonnen wird mit einer Brennstoffzellen-Übersicht, die Betriebstemperaturen, Elektrolyte und Wirkungsgrade zusammenfaßt (Tab. 3). In folgenden Abschnitten dieses Berichtes wird auf diese Einteilung Bezug genommen.

Tab. 2: Gängige Brennstoffzellen-Typen und ihre Bezeichnung

<i>Deutsche Bezeichnung</i>	<i>Englische Bezeichnung</i>	<i>Verwendete Abkürzung</i>
Alkalische Brennstoffzelle	Alkaline Fuel Cell	AFC
(Polymerelektrolyt)-Membran-Brennstoffzelle	Proton Exchange Membrane Fuel Cell	PEMFC <sup>1)2)</sup>
Phosphorsaure Brennstoffzelle	Phosphoric Acid Fuel Cell	PAFC
Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle	Molten Carbonate Fuel Cell	MCFC
Oxidkeramische Brennstoffzelle	Solid Oxide Fuel Cell	SOFC

1) In der Literatur oft auch als PEFC oder PEM zitiert; teilweise ist auch die Bezeichnung SPFC (Solid Polymer Fuel Cell) zu finden.

2) Zur Kategorie der PEMFC gehört noch ein Brennstoffzellen-Typ, der unter der Bezeichnung Direktmethanol-Brennstoffzelle (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC) bekannt ist. Er wird im folgenden immer im Zusammenhang mit der PEMFC behandelt.

Tab. 3: Brennstoffzellen-Einteilung nach Temperatur und Elektrolyt

<i>Typ</i>	<i>Temperatur [°C]</i>		<i>Elektrolyt Bezeichnung</i>	<i>Aggregatzustand</i>
	<i>typ. Wert</i>	<i>Bereich</i>		
<i>Niedrigtemperatur-Brennstoffzellen</i>				
AFC	80	60 - 120	Kalilauge	flüssig
PEMFC	80	50 - 120	polymere Membran	fest
<i>Mitteltemperatur-Brennstoffzelle</i>				
PAFC	200	160 - 220	Phosphorsäure	flüssig
<i>Hochtemperatur-Brennstoffzellen</i>				
MCFC	650	620 - 660	Karbonatschmelze	flüssig
SOFC	950	800 - 1.000	oxidkeramischer Elektrolyt	fest

Quelle: Eigene Zusammenstellung aus Wagner/König 1997, S. 16; Kordesch/Simader 1996, S. 52

#### 4. Brennstoffzellen-Typen

Eine **Kurzcharakteristik** dieser Brennstoffzellen-Typen erfolgt hinsichtlich **Elektrolyt**, nutzbarer **Brennstoffe**, eingesetzten **Materialien**, erreichbarer **Wirkungsgrade**, potentieller **Anwendungen** sowie der **Systemkomponenten**. Auf Besonderheiten der in Frage kommenden Brennstoffpalette und Anwendungen im mobilen und stationären Bereich sowie auf den derzeitigen Stand internationaler Forschungsarbeiten wird an anderer Stelle detaillierter eingegangen (Kap. IV). Die folgenden Ausführungen sind zusammengestellt auf der Basis von DLR-ITT (1997), Drenckhahn/Hassmann (1993), Kordes/Simader (1996) und Ledjeff (1995a).

### 4.1 Niedrigtemperatur-Brennstoffzellen

Niedrigtemperatur-Brennstoffzellen arbeiten bei Betriebstemperaturen unter 100°C. Bei niedrigen Betriebstemperaturen sind Katalysatoren notwendig, um eine ausreichende Reaktionsgeschwindigkeit der elektrochemischen Reaktionen sicherzustellen. Verwendete Katalysatoren sowie Elektrolyte erfordern eine vergleichsweise hohe Brenngasreinheit. Betrachtet werden die alkalische Brennstoffzelle (AFC), die Membran-Brennstoffzelle (PEMFC) sowie die Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC).

#### *Alkalische Brennstoffzelle (AFC)*

Alkalische Brennstoffzellen sind mit wäßriger Kalilauge als **Elektrolyt** (30 - 45 Gew.-% KOH) ausgestattet, die durch die Zelle gepumpt wird. Ein entscheidender Nachteil dieses Elektrolyten ist seine Unverträglichkeit gegenüber Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), welches bei Kalilauge zur Zersetzung (durch Reaktion zu unlöslichem Karbonat) führt, so daß das CO<sub>2</sub> aus den zugeführten Gasen entfernt werden muß. Somit beschränkt sich der Einsatz der AFC auf die Verfügbarkeit hochreiner **Brennstoffe**, zumeist reinstem Wasserstoff und Sauerstoff. Auch Luft kann wegen o.g. CO<sub>2</sub>-Unverträglichkeit nicht eingesetzt werden. Aufgrund der niedrigen Betriebstemperaturen und der vergleichsweise geringen Korrosivität der Kalilauge bestehen keine signifikanten **Materialprobleme**. Als Elektrodenmaterialien werden Raney-Nickel für die Wasserstoffseite bzw. Raney-Silber für die Reduktion des Sauerstoffs oder auch mit Edelmetallen aktivierter Kohlenstoff eingesetzt. Für die Stromableitung wird reines Nickel verwendet, während die Zellenrahmen aus Kunststoff bestehen. Ein Vorteil der AFC ist die Verwendung von eher preiswerten Katalysatoren.

## II. Zur Technologie der Brennstoffzelle

Die AFC zeichnet sich darüber hinaus durch recht hohe **Wirkungsgrade** aus (Kap. III), was seit den 60er Jahren u.a. für die Raumfahrt und Militärtechnik interessant ist. Hierfür wurde sie auch bis zur technischen Reife entwickelt, wobei die **Kostenseite** dabei eher vernachlässigt wurde. Für terrestrische, zivile **Anwendungen**, etwa im Verkehrsbereich oder bei stationärer Energieversorgung, ist u.a. eine Kostenreduktion notwendig und die Zelle müsste für zivile Anwendungen mit Luft betrieben werden (s.o. CO<sub>2</sub>-Problem). Realisierte Leistungen für AFC liegen im kW-Bereich (1 - 120 kW). Wesentliche **Systemkomponenten** sind die Brennstoffzelle, die Reaktionswasserausschleusung und der Inverter zur Ankopplung an ein elektrisches System.

### *Membran-Brennstoffzelle (PEMFC)*

Bei der Membran-Brennstoffzelle wird als **Elektrolyt** eine dünne, gasdichte, protonenleitende Kunststoffmembran eingesetzt. Der für die Ionenleitung notwendige Wassergehalt heute verfügbarer perfluorierter Polymermembranen<sup>1</sup> begrenzt die mögliche Betriebstemperatur der PEMFC auf max. 100°C. Höhere Betriebstemperaturen sind nur bei Druckbetrieb möglich. Das **Brennstoffspektrum** ist auf Wasserstoff und Sauerstoff beschränkt, wobei im Unterschied zur AFC auch ein Luftbetrieb möglich ist; dies erweitert die Einsatzmöglichkeiten der PEMFC deutlich. Kohlenmonoxid (CO) wird jedoch nur in sehr geringen Mengen toleriert, da es als Katalysatorgift fungiert. Aus **materialtechnischer** Sicht erfordert der stark saure Charakter der Membran (vergleichbar mit Schwefelsäure) den Einsatz von Edelmetallkatalysatoren wie Platin oder Platinlegierungen. Aus herstellungstechnischer Sicht werden die Membranen mit dem edelmetallhaltigen Katalysator beschichtet, wobei der polymere Elektrolyt teilweise in die porösen Elektrodenstrukturen hineinreicht. Der elektrische Kontakt von den Elektroden zu den bipolaren Platten erfolgt über metallische oder Kohlenstoff enthaltende Stromableiter. Diese Stromableiter müssen gas- und flüssigkeitsdurchlässig sein, um den Antransport der Reaktionsgase und den Abtransport des Reaktionswassers zu ermöglichen.

Der **Wirkungsgrad** der PEMFC ist vergleichbar mit dem der AFC (Kap. III). Die PEMFC wurde bereits in den 60er Jahren analog der AFC untersucht, jedoch aufgrund ihrer damals vergleichsweise geringen Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität nur versuchsweise für Raumfahrtzwecke eingesetzt. Zwi-

---

<sup>1</sup> Handelsnamen für Polymermembranen sind u.a. Nafion (Fa. DuPont, D) oder Dow-XOS (Fa. Dow Chemical, USA).

#### 4. Brennstoffzellen-Typen

schenzeitliche Fortschritte in der Membrantechnik etc. führten in den 90er Jahren zu einem Entwicklungsschub. Die PEMFC wird nun aufgrund höherer Stromdichten im Vergleich zur AFC insbesondere für mobile **terrestrische Anwendungen** intensiv untersucht. Daneben ist die PEMFC auch für die dezentrale Energieversorgung (Hausenergieversorgung) einsetzbar. Die Leistung derzeit verfügbarer PEMFC-Anlagen liegt im kW-Bereich (bis ca. 250 kW) Für einen breiten Einsatz der PEMFC sind u.a. kostengünstige Herstellungsverfahren für Elektroden und Elektroden-Membran-Verbundstrukturen sowie eine geringere Dotierung mit Edelmetallkatalysator notwendig. Die technologische Reife von  $H_2/O_2$ -Systemen ist mittlerweile vergleichbar mit der der AFC;  $H_2$ /Luft-Systeme werden entwickelt. Wesentliche **Systemkomponenten** sind die Brennstoffzelle, die Reaktionswasserausschleusung, die Kühlung der Zelleinheit sowie der Inverter zur elektrischen Anpassung.

##### *Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC)*

Als eine Weiterentwicklung der PEMFC ist die Direktmethanol-Brennstoffzelle<sup>2</sup> (DMFC) anzusehen; entsprechend ist der **Elektrolyt** auch eine Kunststoffmembran. Die Besonderheit der DMFC besteht im verwendeten **Brennstoff**; sie kann an der Anode direkt mit flüssigem Methanol (80 - 90°C) oder mit Methanoldampf (120 - 130°C) und an der Kathode mit Luft beaufschlagt werden. Die DMFC stellt deshalb eine für den Antrieb von Fahrzeugen sehr interessante Alternative, etwa zum Batteriebetrieb bzw. zur Wasserstofffahrweise einer PEMFC, dar. Als Katalysatormaterial wird zumeist eine Mischung aus Platin und Ruthenium eingesetzt, die sich besonders zur Oxidation von Methanol sowie entstehender Intermediate eignet. Forschungsbedarf besteht noch zur Stabilität der Edelmetallkatalysatoren (Vergiftung durch CO und anderer Zwischenprodukte) sowie zur Zuverlässigkeit derzeit verfügbarer Membranen (Verhinderung der Querdiffusion von Methanol zur Sauerstoffelektrode).<sup>3</sup>

Der **Wirkungsgrad** der DMFC liegt derzeit noch weit unter dem der PEMFC (Kap. III). Ein Vergleich kann jedoch nur qualitativ erfolgen, da unterschiedli-

---

2 Ein Zwischenschritt bei der Entwicklung der DMFC ist auch unter der Bezeichnung Indirekt-Methanol-Brennstoffzelle (IMFC) bekannt (s. Fn. 10). Die IMFC stellt eine Membran-Brennstoffzelle dar, welche mit Methanol betrieben wird, das vorreformiert wird. Die IMFC kann somit mit "CO-reicherem" Reformergas (etwa  $\leq 100$  ppm) ohne Zwischenreinigungsstufe betrieben werden, ohne daß eine Katalysatorvergiftung zu verzeichnen ist.

3 Dieser Effekt wird auch als "cross-over" bezeichnet; er bewirkt eine Erniedrigung des Wirkungsgrades der DMFC.

che Brennstoffbezüge zugrunde liegen; die DMFC wird mit Methanol und die PEMFC mit Wasserstoff betrieben.

## 4.2 Mitteltemperatur-Brennstoffzellen

Die einzige hier betrachtete Mitteltemperatur-Brennstoffzelle, die phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC), arbeitet bei einer Betriebstemperatur von ca. 200°C mit einem sauren Elektrolyten. Sie ist bezüglich eingesetzter Brennstoffe deutlich flexibler.

### *Phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC)*

Die phosphorsaure Brennstoffzelle wird mit konzentrierter, nahezu wasserfreier Phosphorsäure (als **Elektrolyt**) betrieben. Die Verwendung einer Säure als Elektrolyt erlaubt auf der **Brennstoffseite** den Einsatz von CO<sub>2</sub>-haltigen Gasen, da CO<sub>2</sub> nicht mit der Säure reagiert. Dadurch eignet sich die PAFC auch zur Stromerzeugung aus Kohlenwasserstoffen, da das bei der Reformierung anfallende CO<sub>2</sub> nicht extra abgetrennt werden muß. Auch ist aufgrund der Betriebstemperatur von 200°C die Toleranz gegenüber CO höher.<sup>4</sup> Die PAFC wird zu meist mit Wasserstoff aus reformiertem Erdgas als Brennstoff und Luftsauerstoff als Oxidationsmittel betrieben. Auch der Einsatz von flüssigen Kohlenwasserstoffen wie etwa Naphtha ist möglich. Die Elektroden bestehen aus kunststoffgebundenen **Kohlematerialien**, die mit katalytisch aktiven Edelmetallpartikeln belegt sind. Edelmetallkatalysatoren, wie Platin oder Gold, müssen aufgrund der starken Säure eingesetzt werden. Die Phosphorsäure wird nicht wie bei der AFC als Flüssigkeit durch die Brennstoffzelle gepumpt, sondern sie wird in einem porösen Kunststoffvlies aufgesaugt und so zwischen die Elektroden gebracht. Die übrigen Bauelemente bestehen entweder aus Graphit oder Kunststoffmaterialien.

Der **Wirkungsgrad** der PAFC ist im Vergleich zu anderen Brennstoffzellen nicht unbedingt herausragend (Kap. III). Bei der PAFC ist zur Wirkungsgradverbesserung neben dem atmosphärischen ein druckaufgeladener Betrieb möglich. Atmosphärische PAFC sind aus technischer wie auch kommerzieller Sicht

---

4 Die CO-Verträglichkeit der PAFC beträgt bis zu 2 Vol.-%. Eine solche Gasqualität kann technisch relativ einfach durch Reformierung und nachfolgende Shift-Reaktionen erzielt werden (Ledjeff 1995a, S. 34).

#### 4. Brennstoffzellen-Typen

für stationäre **Anwendungen** zur Strom- und Wärmeerzeugung der am weitesten entwickelte Brennstoffzellen-Typ. Ihre Entwicklung begann bereits in den 70er Jahren; die PAFC befindet sich heute in der Markteinführung. Es werden Anlagen im kW- (zumeist 200 kW) sowie im MW-Bereich (bis zu 11 MW) angeboten. Auch wenn die PAFC einen vergleichsweise hohen Entwicklungsstand erreicht hat, muß an ihrer Wirtschaftlichkeit weiter gearbeitet werden. Wesentliche **Systemkomponenten** für einen Betrieb etwa mit Erdgas sind eine Entschwefelung, ein Reformer, die Wasserstoffaufbereitung (z.B. CO-Shift), die Brennstoffzelle selbst, ein Wärmeaustauscherverbund sowie ein Inverter zur Umwandlung des erzeugten Gleichstroms in Wechselstrom.

PAFC-Anlagen (200 kW) werden als einziger Brennstoffzellen-Typ derzeit in nennenswerten Stückzahlen produziert und installiert, so daß erste Praxiserfahrungen vorliegen. So wiesen PAFC-Anlagen der Fa. ONSI Ende Februar 1997 weltweit eine kumulierte Betriebsdauer von rund 1,3 Millionen Stunden auf; davon ca. 280.000 Stunden in Europa. Für die **Verfügbarkeit** dieser weltweit installierten PAFC-Anlagen wird ein Wert von 95 % benannt (Herstellerangabe). Als ein Praxiswert ist exemplarisch die Verfügbarkeit der "Hessischen Brennstoffzelle"<sup>5</sup> mit 87 % zu nennen, welcher sämtliche Stillstandszeiten, etwa aufgrund von Umbauten, Ersatzteillieferungen und Instandhaltung, berücksichtigt (Brammer et al. 1997). Diese Angabe bezieht sich auf den bisher gefahrenen Zeitraum der Anlage von Juni 1993 bis Februar 1997 mit ca. 30.000 Laststunden; bei einer Gesamtauslegung der Anlage vom Hersteller auf ca. 40.000 Laststunden. Die Verfügbarkeit der "Hessischen Brennstoffzelle" liegt somit unterhalb der Herstellerangabe, wobei als eine mögliche Ursache hierfür u.a. differierende Auslegungen des Begriffs Verfügbarkeit nicht auszuschließen sind.

### 4.3 Hochtemperatur-Brennstoffzellen

Zu den Hochtemperatur-Brennstoffzellen gehören die MCFC und die SOFC. Die MCFC arbeitet in einem noch eher moderaten Temperaturbereich bei ca. 650°C, die SOFC mit ca. 1.000°C bei deutlich höheren Temperaturen. Die

---

5 Die "Hessische Brennstoffzelle" der HEAG ist eine von derzeit sieben 200-kW-PAFC-Anlagen der Fa. ONSI, die in Deutschland bei verschiedenen Energieversorgungsunternehmen installiert und betrieben werden.

## II. Zur Technologie der Brennstoffzelle

einsetzbare Brennstoffbandbreite erweitert sich dabei nochmals deutlich gegenüber der Mitteltemperatur-Brennstoffzelle.

### *Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC)*

Die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle zeichnet sich durch einen **Elektrolyten** in Form geschmolzener Karbonate, zumeist Alkalikarbonate wie Lithiumkarbonat ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) und Kaliumkarbonat ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ), aus. Die Ionenleitung erfolgt über Karbonationen. Sie erlaubt die elektrochemische Umsetzung von  $\text{H}_2/\text{CO}$ -Gemischen. Der Sauerstofftransport von der Kathode zur Brenngasanode erfolgt durch Wanderung von Karbonationen im Elektrolyten. Die Kathode muß daher mit einem Gemisch aus Luft und  $\text{CO}_2$  versorgt werden. Somit muß das Anodenabgas dem Luftstrom beigemischt werden, um einen Kreislauf an Karbonationen zu erhalten. Dieses sog. Heiß- oder Anoden(ab)gas ist die eigentliche Besonderheit des MCFC-Konzepts. Da Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) in die Zellreaktionen der MCFC integriert wird, ist diese sehr gut zur Verstromung kohlenstoffhaltiger **Brenngase** geeignet, welche unter Ausnutzung der Abwärme des Brennstoffzellen-Stacks zu Wasserstoff und  $\text{CO}_2$  reformiert werden (sog. interne Reformierung)<sup>6</sup>. Die MCFC ist dadurch prinzipiell in der Lage, unterschiedliche Brenngase (z.B. Erdgas, Kohlegas, Biogas)<sup>7</sup> direkt zu verarbeiten. Jedoch ist aufgrund dieses  $\text{CO}_2$ -Kreislaufes die gesamte verfahrenstechnische Auslegung von MCFC-Anlagen etwas komplizierter. Die MCFC ist aus relativ preiswerten **Materialien** wie Nickel, Nickeloxid, Keramik und Stahl aufgebaut. Aufgrund der hohen Betriebstemperaturen sind keine Platinkatalysatoren notwendig; Nickel und Nickeloxid sind ausreichend aktive Elektrodenmaterialien. Aufgrund der hochkorrosiven Karbonatschmelzen, die viele Materialien angreifen, liegt ein Hauptproblem in der Werkstoffauswahl. Hierdurch wird die Lebensdauer der MCFC entscheidend beeinflusst.

Der relativ hohe **Wirkungsgrad** der MCFC im Vergleich zur PAFC ergibt sich aus dem höheren Temperaturniveau. Andererseits liegt der erwartete Systemwirkungsgrad etwas unter dem der SOFC; dafür ermöglicht die niedrigere Betriebstemperatur der MCFC eine einfachere Gestaltung der Peripherie. **Hauptanwendungen** der MCFC liegen im Kraftwerksbereich bei Blockheiz-

---

6 Die Betriebstemperatur der MCFC entspricht gerade dem Temperaturniveau der Reformierung von Erdgas. Jedoch ist bei dieser Temperatur auch die Gefahr einer Kohlenstoff-Abscheidung relativ hoch.

7 Mit der MCFC sind in Amerika Versuche mit gereinigtem Biogas durchgeführt worden.

#### 4. Brennstoffzellen-Typen

und später evtl. auch in Großkraftwerken, die mit Erd- und/oder Kohlegas betrieben werden. Die Leistung derzeit verfügbarer MCFC-Demonstrationsanlagen liegt im kW- bis MW-Bereich (bis ca. 2 MW). Hauptproblem sind die immer noch zu geringen Standzeiten. Wesentliche **Systemkomponenten** sind ein Reformier (eventuell in die Brennstoffzelle integriert), die Brennstoffzelle selbst, eine Gas- und Dampfturbinenanlage (zur Wärme- und Restenthalpienutzung) sowie ein Inverter (zur Anpassung an vorhandene elektrische Versorgungssysteme).

##### *Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)*

In oxidkeramischen Brennstoffzellen wird ein keramischer **Festelektrolyt**, yttriumstabilisiertes Zirkondioxid ( $ZrO_2/Y_2O_3$ ), verwendet. Betriebstemperaturen von ca. 1.000°C sind für eine ausreichend hohe Leitfähigkeit des Elektrolyten notwendig. Es gibt verschiedene Zellkonzepte, wobei insbesondere zwischen einem Röhrenkonzept<sup>8</sup> und planaren Anordnungen<sup>9</sup> (Flachzellenkonzept) unterschieden wird. Aufgrund der sehr hohen Betriebstemperaturen können auch CO-haltige Gasgemische aus der internen Reformierung unmittelbar umgesetzt werden. Durch interne Reformierung können prinzipiell verschiedene **Brenngase** (z.B. Erdgas, Kohlegas, Biogas) eingesetzt werden. Als Elektroden**materialien** werden Nickel und leitende Oxide eingesetzt. Auf den keramischen Festelektrolyten - eine gasdichte, sauerstoffionenleitende oxidkeramische Folie - werden poröse Gasdiffusionselektroden aufgebracht. Die Verarbeitungseigenschaften der keramischen Materialien erfordern spezifische Technologien. Im Hinblick auf Kostenreduzierungen auf materialtechnischer Seite wird an einer Verringerung der Betriebstemperatur der SOFC (auf ca. 800°C, teilweise auch

---

8 Beim Röhren-Konzept, welches auch oft nach der marktführenden Firma Westinghouse-Konzept (USA) bezeichnet wird, werden auf eine tragende Struktur von ca. 0,5 bis 1,5 m langen und ca. 22 mm dicken Rohren aus poröser Keramik Schichten (Anode, Elektrolyt, Kathode) aufgebracht. Die Rohre, zu Bündeln zusammengeschaltet, werden von innen mit Luft und von außen mit Brennstoff beströmt (Jaerschky/Weinzierl 1997; Singhal 1997).

9 Das planare Konzept lehnt sich an den Stack-Aufbau der anderen Brennstoffzellen-Typen an (Bsp. Fa. Siemens; Beie et al. 1997). Daneben gibt es eine Modifizierung des planaren Konzeptes, welches zumeist nach der anbietenden Firma Sulzer (Schweiz) benannt wird. Eine Besonderheit ist hier ein in den Brennstoffzellen-Stack integriertes Wärmetauscherkonzept (Diethelm et al. 1997), wobei die freigesetzte Reaktionswärme für die interne Reformierung in die Brennstoffzelle eingespeist wird.

## II. Zur Technologie der Brennstoffzelle

bis 600°C) gearbeitet, wobei bei diesen Temperaturen der Festelektrolyt schlechtere Leitfähigkeiten aufweist.

SOFC-Anlagen haben ein hohes **Wirkungsgrad**potential, insbesondere bei Kombination mit Gas- und Dampfturbinen. Zur weiteren Wirkungsgraderhöhung ist neben dem atmosphärischen ein druckaufgeladener Betrieb möglich, was verfahrenstechnisch gesehen komplizierter ist. Momentan ist die SOFC von allen vorgestellten Brennstoffzellen-Typen am wenigsten weit entwickelt. **Hauptanwendungen** für SOFC sind in der Energieerzeugung in Kraftwerken sowie in der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zu sehen. Die Leistung von derzeit verfügbaren SOFC-Demonstrationsanlagen liegt im kW-Bereich (1 - ca. 100 kW). Die **Systemkomponenten** entsprechen denen des MCFC-Systems.

### *Betrachtete Brennstoffzellen-Systeme insgesamt*

Eine Übersicht ablaufender Reaktionen in einzelnen Brennstoffzellen-Systemen gibt Anhang 3. Das als Reaktionsprodukt entstehende Wasser muß regelmäßig aus der Brennstoffzelle entfernt werden. Zum **Wassermanagement** werden zu meist Verdampfer eingesetzt. Die genannten Brennstoffzellen zeichnen sich weiterhin durch verschiedene **Stromdichten** aus, welche in Tabelle 4 exemplarisch zusammengestellt sind; diese beeinflussen signifikant die Herstellungskosten. Weiterhin ist, insbesondere für einen Vergleich mit konventionellen Technologien, die erreichbare **Verfügbarkeit** der Brennstoffzellen-Stacks von Interesse, wobei hier noch keine Langzeituntersuchungen vorliegen (Kap. II.4.2 zur PAFC).

**Anfahrzeiten** von Brennstoffzellen sind entsprechend ihrer Betriebstemperaturen deutlich unterschiedlich. So benötigen die Niedrigtemperatur-Brennstoffzellen AFC/PEMFC für einen Kaltstart einige Minuten, die Mitteltemperatur-Brennstoffzelle PAFC bis zu 4 Stunden und die beiden Hochtemperatur-Brennstoffzellen MCFC/SOFC bis zu 10 Stunden. Dies ist eine Ursache für das Einsatzspektrum von Niedrigtemperatur-Brennstoffzellen eher im mobilen Bereich mit schnellem und häufigem Anfahren gegenüber Hochtemperatur-Brennstoffzellen eher im Grundlastbetrieb von Kraftwerken mit längerem und seltenem Anfahren.

## 5. Brennstoffe und Brennstoffaufbereitung

Tab. 4: Stromdichten verschiedener Brennstoffzellen (Größenordnungen)

<i>Typ</i>	<i>Stromdichte [A/cm<sup>2</sup>]</i>	<i>Brennstoffbezug</i>	<i>Quelle</i>
AFC	1 - 2	Wasserstoff/Sauerstoff	(1)
PEMFC	1 - 2 <sup>1)</sup>	Wasserstoff/Luft bzw. Wasserstoff/Sauerstoff	(1), (2)
DMFC	0,4	Methanol	(1)
PAFC	0,25	Erdgas/Luft	(2)
MCFC	0,15	Erdgas/Luft	(1), (2)
	0,2	Wasserstoff/Luft	(2)
SOFC	0,3	Erdgas/Luft	(1)
	bis 1 <sup>2)</sup>	Wasserstoff/Luft	(2)

1) höhere Werte bei Wasserstoff/Sauerstoff; 2) Laborwerte

Quellen: (1) European Commission 1995, (2) Kabs 1997

## 5. Brennstoffe und Brennstoffaufbereitung

Mit Brennstoffzellen werden die höchsten Wirkungsgrade beim Einsatz von reinem Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und reinem Sauerstoff (O<sub>2</sub>) erzielt. **Wasserstoff** kann als der eigentliche Brennstoff für die elektrochemische Umsetzung in Brennstoffzellen angesehen werden. Grund hierfür ist seine sehr **hohe elektrochemische Reaktivität** im Vergleich zu anderen chemischen Energieträgern wie Erdgas (wesentlicher Bestandteil Methan), Methanol oder langkettigen Kohlenwasserstoffen aus Erdöl oder Kohle. Beim Einsatz von Wasserstoff in Reinstform entstehen zudem **keine Neben- oder Zwischenprodukte**, die etwa zu einer Vergiftung der Anode führen könnten (DLR-ITT 1997, S. 13).

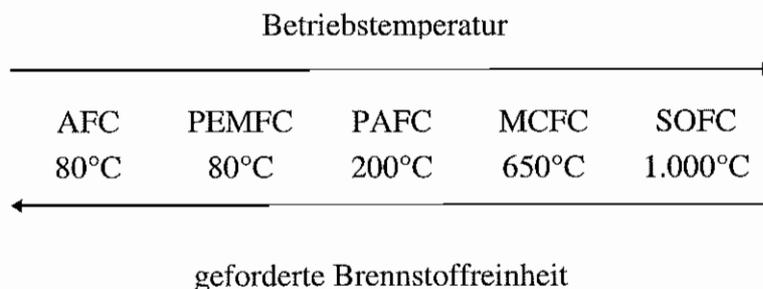
Da **Wasserstoff** kein primärer Energieträger ist, muß dieser entsprechend für die jeweilige Anwendung zur Verfügung gestellt und z.T. gespeichert werden. Wasserstoff kann aus Wasser oder kohlenwasserstoffhaltigen Brennstoffen, wie Erdöl, Erdgas oder Kohle, hergestellt werden bzw. fällt als wasserstoffreiches Synthesegas großtechnisch in der chemischen Industrie an. Darüber hinaus ist in Brennstoffzellen prinzipiell auch chemisch gebundener Wasserstoff, etwa in Form von Erdgas, Biogas, Kohlegas oder Methanol, umsetzbar. Chemisch gebundener Wasserstoff ist durch Reformierungsreaktionen in molekularen Wasserstoff überführbar, was brennstoffzellenintern oder -extern erfolgen kann und mit einem entsprechenden verfahrenstechnischen und energetischen Aufwand

## II. Zur Technologie der Brennstoffzelle

verbunden ist. Die Reformierung von Primärenergieträgern, wie Erdgas, oder von bereits veredelten Kohlenwasserstoffen, wie Methanol, ist außerdem mit einem teilweisen Verbrauch des eingesetzten Kohlenwasserstoffs verbunden. Dadurch resultieren partiell Schadstoffemissionen wie Kohlendioxid. Auch sind Anforderungen an den Reinheitsgrad der Brennstoffe zu beachten, um Wirkungsgradverluste durch unerwünschte Nebenreaktionen so gering wie möglich zu halten.

Die erforderliche **Reinheit der Brennstoffe** ist je nach Brennstoffzellen-Typ sehr unterschiedlich. Reinheitsanforderungen an die eingesetzten Brennstoffe sind u.a. eine Funktion der verwendeten Elektrodenmaterialien. Diese wiederum sind in Abhängigkeit der Betriebstemperatur des Brennstoffzellen-Systems mit chemisch sensiblen Katalysatoren ausgestattet. Höchste Reinheitsanforderungen an die Brennstoffe stellen somit Brennstoffzellen, die Elektrodenbeschichtungen aus Edelmetallkatalysatoren, wie Platin oder Gold, aufweisen. Daraus ergibt sich eine Staffelung der geforderten Brennstoffreinheit in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur derart, daß mit zunehmender Betriebstemperatur die geforderte Brenngasreinheit abnimmt (Abb. 5).

Abb. 5: Zusammenhang zwischen Betriebstemperatur der Brennstoffzelle und geforderter Brennstoffreinheit



Die Niedrigtemperatur-Brennstoffzellen AFC und PEMFC stellen die höchsten Anforderungen an den Reinheitsgrad der eingesetzten Brenngase. Insbesondere die **AFC** ist nur mit reinstem (99,99 %igem) Wasser- und Sauerstoff betreibbar, da bereits geringste Verunreinigungen an  $\text{CO}_2$  zu einer Zersetzung des Elektrolyten führen;  $\text{CO}$  fungiert als Katalysatorgift (bei Platin). Die **PEMFC**<sup>10</sup> ist

<sup>10</sup> Die DMFC, als Sonderform der PEMFC, kann direkt mit Methanol beaufschlagt werden. Da hier noch wesentliche technische Probleme ungelöst sind, wird die DMFC nur im Zusammenhang mit Reformierungsmöglichkeiten (vgl. Abschnitt: Wasserstoff aus Methanol) betrachtet.

## 5. Brennstoffe und Brennstoffaufbereitung

brennstoffseitig auch nur mit reinem Wasserstoff zu beaufschlagen, wobei im Unterschied zur AFC auch ein Luftbetrieb möglich ist; dies erweitert das Einsatzspektrum der PEMFC erheblich. Jedoch wird auch hier CO nur in sehr geringen Mengen toleriert (Katalysatorgift). Die Mitteltemperatur-Brennstoffzelle **PAFC** erlaubt aufgrund ihres sauren Elektrolyten brennstoffseitig den Einsatz CO<sub>2</sub>-haltiger Gase (höhere Toleranz als PEMFC) und eignet sich somit für den Einsatz von Kohlenwasserstoffen, da das bei der Reformierung anfallende CO<sub>2</sub> nicht extra abgetrennt werden muß. Daneben ist aufgrund der Betriebstemperatur die Toleranz gegenüber CO höher als bei der PEMFC. Die PAFC wird zumeist mit Wasserstoff aus reformiertem Erdgas als Brennstoff und Luftsauerstoff als Oxidationsmittel betrieben. Auch der Einsatz von flüssigen Kohlenwasserstoffen wie etwa Naphtha ist möglich. Bei den beiden Hochtemperatur-Brennstoffzellen, der MCFC und der SOFC, erweitert sich das Brennstoffspektrum nochmals. Bei der **MCFC** wird CO in die Zellreaktionen integriert (interne Reformierung). Auch bei der **SOFC** können aufgrund der hohen Betriebstemperaturen CO-haltige Gasmischungen unmittelbar umgesetzt werden (interne Reformierung). Dadurch sind verschiedene Brenngase, wie Erd-, Kohle- oder Biogas, einsetzbar. Insgesamt toleriert die SOFC größere Mengen an Verunreinigungen als die MCFC. Schwefelverbindungen müssen bei allen Brennstoffzellen-Typen aus dem Brennstoff weitestgehend entfernt werden; eine Zusammenstellung von Anforderungen an die Brenngaszusammensetzung findet sich in Tabelle 5. Aufgeführt sind Anforderungen an die Gasreinheit sowie von Brennstoffzellen weitgehend tolerierte inerte sowie intern reformierbare Verbindungen.

Der Einsatz von kohlenwasserstoffreichen Brenngasen bzw. flüssigen oder festen Brennstoffen auf **Primärenergiebasis** setzt bei den meisten Brennstoffzellen eine - zumindest aus energetischer Sicht relativ aufwendige - Aufbereitung voraus, welche schematisch in Abbildung 6 dargestellt ist. Hervorgehoben wird, durch die Anzahl an aufgeführten Zwischenstufen, der zu betreibende Aufwand, um etwa aus Erdgas oder Methanol "brennstoffzellentauglichen" Wasserstoff zu erzeugen. Beispielsweise wird Erdgas, welches hauptsächlich Methan enthält, reformiert, d.h. zusammen mit Wasserdampf in Wasserstoff und Kohlenmonoxid umgewandelt. Für Nieder- und Mitteltemperatur-Brennstoffzellen, die Kohlenoxide aus vorgenannten Gründen nicht vertragen, muß zusätzlich in nachfolgenden Reaktionen das Kohlenmonoxid mit Wasserdampf zu Kohlendioxid aufoxidiert werden und dieses insgesamt ausgewaschen werden. Ziel ist dabei ein hoher Reinheitsgrad des verbleibenden Wasserstoffs. Aus verfahrenstechnischer Sicht sind diese Reaktionsschritte relativ problemlos re-

## II. Zur Technologie der Brennstoffzelle

alisierbar. Diese zusätzlichen technischen Einrichtungen, zur Peripherie gehörend, benötigen jedoch Platz, verursachen zusätzliche Investitionen und Betriebskosten und verändern den Systemwirkungsgrad negativ. Da alle Brennstoffzellen schwefelempfindlich sind (negativer Einfluß auf die Elektrodenalterung etc.), müssen vorhandene Schwefelkomponenten entfernt werden.

Tab. 5: Anforderungen verschiedener Brennstoffzellen-Typen an die Brenngaszusammensetzung

<i>Brennstoffzelle</i>	<i>Anforderungen an die Gasreinheit<sup>1)</sup></i>	<i>Tolerierte inerte Verbindungen</i>	<i>Intern reformierbare Verbindungen</i>
AFC	kein CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S	-	-
PEMFC	CO < 10 - 100 ppm	N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	-
PAFC	CO < 1 - 2 Vol.-% S < 50 ppm	N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	-
MCFC	S < 1 ppm Cl < 1 ppm	N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> , höhere HC
SOFC	S < 1 ppm Cl < 1 ppm	N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> , höhere HC

1) Zusammenstellung aus Heek 1995; Ledjeff 1995a; Rensfelt/Hallgren 1997; Wagner/König 1997

Quelle: TAB 1997, S. 54 (geändert)

Zur **Erzeugung von Wasserstoff** bestehen verschiedene Möglichkeiten, wobei im folgenden einige Varianten aufgeführt sind. Dazu gehören die Erzeugung von Wasserstoff aus Kohlenwasserstoff- und Synthesegasen, aus Flüssigbrennstoffen (Methanol und Benzin), aus Biogas und mit Hilfe der Elektrolyse von Wasser.

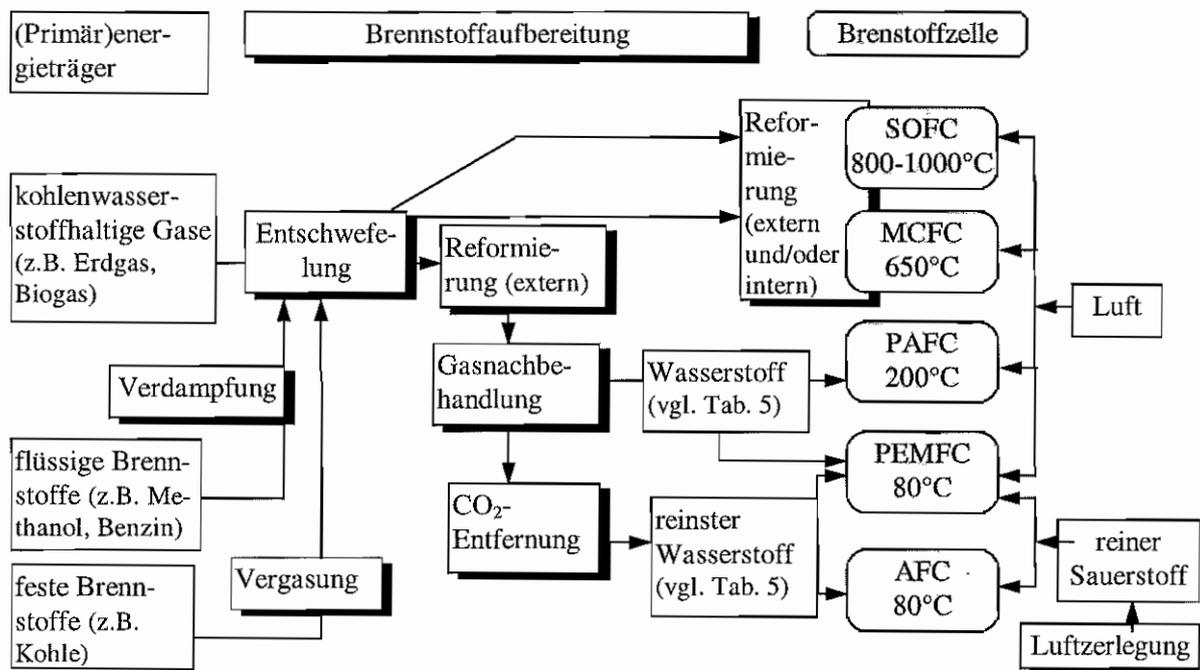
### *Wasserstoff aus Kohlenwasserstoff- (Erdgas, Spaltgase) und Synthesegasen*

Wasserstoff wird großtechnisch in erheblichem Umfang (Jahresproduktion weltweit etwa 500 Mrd. Nm<sup>3</sup>/a (TAB 1992)) hergestellt. Ein im technischen Maßstab wichtiges Verfahren zur Wasserstoffgewinnung ist die Umwandlung von Kohlenwasserstoffgemischen von Erdgasen oder bei Crackprozessen anfallenden Spaltprodukten (steam reforming). Daneben entsteht auch bei der Sauerstoff-Druckvergasung (partielle Oxidation) wasserstoffhaltiges Synthese-

## 5. Brennstoffe und Brennstoffaufbereitung

gas. Technisch bedeutsam ist auch die Wasserstoffgewinnung durch Einwirkung von Wasserdampf auf Kohle (Produkt ist sog. Wassergas) sowie die Abtrennung des bei Crackprozessen von Kohlenwasserstoffen anfallenden Wasserstoffes (DLR-ITT 1997, S. 13).

Abb. 6: Brennstoffaufbereitung für verschiedene Brennstoffzellen-Typen beim Einsatz kohlenwasserstoffhaltiger Brenngase, flüssiger sowie fester Brennstoffe



Quelle: eigene Zusammenstellung

Je nach Herstellungsverfahren werden **Synthesegasgemische** gebildet, die als einen Hauptbestandteil Wasserstoff enthalten, daneben jedoch auch eine Reihe anderer Verbindungen (Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Stickstoff, Methan etc.). Beim heutigen Entwicklungsstand müßten wasserstoffreiche Synthesegase für die Verwendung in Mittel- und Niedertemperatur-Brennstoffzellen sorgfältig gereinigt werden (s.o.), so daß ein Einsatz von Synthesegas verfahrenstechnisch und energetisch sehr aufwendig ist. Außerdem werden Synthesegase zu meist gezielt etwa für die Herstellung von Ammoniak oder Methanol in bestimmten Zusammensetzungen erzeugt.

Der Einsatz von wasserstoffhaltigem Synthesegas ist bisher eher selten praktiziert worden. Versuche in dieser Richtung sind etwa im Zusammenhang mit der Verstromung von **Kohlegas**, wie Braunkohlegas als einheimischem E-

## II. Zur Technologie der Brennstoffzelle

nergieträger, in MCFC- und SOFC-Anlagen durchgeführt worden (z.B. Moll et al. 1995). Hochtemperatur-Brennstoffzellen arbeiten bei einem Temperaturniveau, welches aufgrund der internen Reformierung etwa mit **Erdgas** direkt beaufschlagt werden kann. Von den gängigen Reformierungsverfahren wird die Dampfreformierung von Erdgas gemeinhin am häufigsten eingesetzt. Eine Vergiftung der Elektroden durch Verunreinigungen der Brenngase tritt bei Hochtemperatur-Brennstoffzellen aufgrund der hohen Betriebstemperaturen seltener ein. Eine sorgfältige Entschwefelung der eingesetzten Brenngase ist jedoch auch hier notwendig. Bei der Mitteltemperatur-Brennstoffzelle PAFC haben Betriebserfahrungen beim Einsatz von reformiertem Erdgas gezeigt, daß sich der Stickstoffgehalt im Brennstoff negativ auf Zellspannung und Wirkungsgrad auswirkt, da sich Ammoniak bilden kann, der wiederum mit dem Elektrolyten (Phosphorsäure) reagiert und damit die elektrochemischen Vorgänge an der Kathode behindert (Wismann 1996).

### *Wasserstoff aus Flüssigbrennstoffen (Methanol, Benzin)*

In ähnlicher Weise wie Erdgas kann auch **Methanol** mit Wasserdampf zu Wasserstoff und Kohlendioxid umgesetzt werden. Die Reaktion verläuft mit geeigneten Katalysatoren schon bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen (200 bis 300°C) ab, was eine Vereinfachung der Auslegung von dynamischen Kompaktreformern für Kraftfahrzeug-Anwendungen darstellt. Die Zusammensetzung des Reaktionsgases wird wie bei allen Reformierungsreaktionen durch das zugeführte Methanol/Wasserverhältnis bestimmt (Höhlein et al. 1996b, nach DLR-ITT 1997). Auch bei der Reformierung von Methanol tritt Kohlenmonoxid als Nebenprodukt auf. Eine Feingasreinigung ist daher auch hier notwendig, wenn der Wasserstoff in Niedertemperatur-Brennstoffzellen verstromt wird (DLR-ITT 1997, S. 15 f.). Der Einsatz von Methanol in Brennstoffzellen im Verkehrsbereich wäre im Hinblick auf seine Beziehbarkeit etwa an bestehenden Tankstellen vorteilhaft. Durch die Herstellung von Methanol, z.B. aus Synthesegasen, stellt dieses jedoch einen relativ hoch veredelten Brennstoff dar, was im Hinblick auf erzielbare Gesamtwirkungsgrade von Brennstoffzellen-Systemen berücksichtigt werden muß.

Als ein weiterer Flüssigbrennstoff, welcher alternativ zu Methanol einsetzbar ist, kommt **Benzin** in Betracht. Diese, insbesondere für mobile Anwendungen interessante Benzinreformierung, hat den Vorteil, daß eine bereits vorhandene Infrastruktur genutzt werden könnte. Nachteilig ist u.a., daß die Reformierung von Benzin (als komplexes Kohlenwasserstoffgemisch) im Vergleich zu

## 5. Brennstoffe und Brennstoffaufbereitung

Methanol (als relativ reine Flüssigkeit) mit höheren Arbeitstemperaturen, geringerer Effizienz des Reformers (derzeit im Labormaßstab) und einem vermutlich höheren Schadstoffausstoß verbunden ist.

### *Wasserstoff aus Biogas*

Biogase sind das Ergebnis bakterieller Zersetzung zellulosereicher organischer Substanzen in einem Gärprozeß (Klärschlamm etc.) bzw. bilden sich bei Vergasungsprozessen von Biomasse (Holz, Abfall etc.). Der Begriff Biogas umfaßt hier neben Faul- oder Klärgas auch Deponiegas sowie bei der Vergasung von Biomasse anfallende Abgase. Entsprechend heterogen ist ihre Zusammensetzung: Hauptbestandteile der Biogase aus Gärprozessen sind Methan (50 - 75 %) sowie Kohlendioxid (25 - 50 %), bis zu 1 % sind Wasserstoff und Schwefelwasserstoff enthalten (Jakubke/Jeschke 1987); Hauptbestandteil der Biogase aus der Vergasung, etwa von Holz, sind in Abhängigkeit von technischen Vergasungsbedingungen Kohlenmonoxid, Wasserstoff, Methan und höhere Kohlenwasserstoffe sowie Stickstoff und Kohlendioxid.<sup>11</sup>

Die chemische Zusammensetzung von Biogas variiert in Abhängigkeit von Ausgangsstoffen sowie Reaktionsbedingungen erheblich, so daß für den Einsatz von Biogas in Brennstoffzellen eine Gasaufbereitung erforderlich ist, die auch auf deutliche Schwankungen in der Rohgaszusammensetzung ausgelegt sein sollte. Verunreinigungen, insbesondere Schwefelverbindungen wie H<sub>2</sub>S, können sowohl die katalytische Reformierung des Hauptbestandteils Methan zu Wasserstoff, als auch die Umsetzung des verunreinigten Wasserstoffs durch Katalysatorvergiftung stark beeinträchtigen. Obwohl die meisten Biomassearten deutlich geringere Schwefelgehalte (0,05 - 0,4 %) als die meisten Kohlearten (bis zu 6 %) aufweisen, kann eine Entschwefelung der Rohgase erforderlich sein. Der im Gegensatz zur Kohle deutlich höhere Kalium- und Natriumgehalt von Agrobrennstoffen kann einen zusätzlichen Reinigungsaufwand erforderlich machen. In dieser Hinsicht bietet die MCFC Vorteile, da diese Zelle ohnehin Al-

---

11 Bei der Vergasung von Biomasse fallen neben den genannten Bestandteilen feste (Aschen und Ruße) und flüssige (Teere und Phenole) Rückstände an. Im Generatorgas selbst können in Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial und Prozeßführung organische und metallorganische Spurenverunreinigungen sehr unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung auftreten (DLR-ITT 1997, S. 17). Zielprodukt z.B. der Vergasung von Holz ist Holzgas, welches mit unterschiedlichen Methananteilen erzeugt werden kann. Holzgas kann als Generator- oder auch Synthesegas eingesetzt werden. Eine aktuelle Darstellung verschiedener Vergasungsprozesse für feste Biomasse findet sich in Steinbrecher (1996, nach DLR-ITT 1997) und TAB (1997).

## *II. Zur Technologie der Brennstoffzelle*

kalisalze als Elektrolyt enthält. Im allgemeinen werden bei der Dampfreformierung von Biogasen zu wasserstoffreichen Brenngasen die Verunreinigungen in einer ersten Stufe des Vorreformers an einem robusten Katalysatorsystem umgesetzt (ähnlich der Dampfreformierung von Methan). Rohgase aus der Biomassevergasung müßten somit für den Einsatz in Brennstoffzellen entstaubt (Zyklon und Keramikfilter) sowie gasseitig vorgereinigt werden (Halogenabscheidung sowie Entschwefelung) (DLR-ITT 1997, S. 17; TAB 1997, S. 53), wobei eine Heißgasreinigung energetisch aufwendig ist.

### *Elektrolysewasserstoff*

Wasserstoff läßt sich des weiteren durch elektrolytische Wasserspaltung herstellen. Ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist diese Möglichkeit insbesondere dann, wenn preiswert erzeugte elektrische Energie zu Verfügung steht oder ein hoher Reinheitsgrad des Wasserstoffs benötigt wird. Bei regenerativer Erzeugung der für die Elektrolyse notwendigen elektrischen Energie ist hiermit eine CO<sub>2</sub>-freie Wasserstofferzeugung möglich (Schnurnberger 1993). Daneben wird auch bei der Elektrolyse wässriger Salzlösungen Wasserstoff gewonnen, etwa als Nebenprodukt der Chloralkalielektrolyse.

### III. Anwendungsspektrum

Die Entwicklung von Brennstoffzellen wurde und wird zumeist gezielt für bestimmte Verwendungszwecke vorangetrieben, wobei sich die hier vorgestellten Brennstoffzellen-Systeme durch einen eher heterogenen Stand hinsichtlich technologischer Reife und Kommerzialisierung auszeichnen. Auf entwicklungs-technische und historische Gründe hierfür wurde bereits eingegangen; das hieraus resultierende derzeit absehbare Anwendungsspektrum wird nachfolgend jeweils für den mobilen und den stationären Bereich charakterisiert. Einige übergeordnete Zusammenhänge und Trends sind den Ausführungen vorangestellt.

Tab. 6: Wirkungsgradspektrum von Brennstoffzellen (Größenordnungen)

<i>Typ</i>	<i>Brennstoffe</i>	<i>Oxidant</i>	<i>elektr. Wirkungsgrad<sup>1)</sup> [%]</i>		<i>Anmerkung</i>
			<i>Brennstoffzelle</i>	<i>System</i>	
AFC	H <sub>2</sub> reinst	O <sub>2</sub> reinst	60 - 70	62	
PEMFC	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> Luft	50 - 68	43 - 58	Energiebedarf des Luftverdichters
DMFC	Methanol	Luft O <sub>2</sub>	20 - 30		
PAFC	Erdgas Biogas H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> Luft	Erdgas: 55	Erdgas: 40 - 42	
MCFC	Erdgas Kohlegas Biogas H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> Luft	Erdgas: 65	Erdgas: 55 - 60 <sup>2)</sup>	interne Reformierung
SOFC	Erdgas Kohlegas Biogas H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> Luft	Erdgas: 60 - 65	Erdgas: 55 - 60 <sup>2)</sup>	interne Reformierung

1) Laborwerte bzw. Angaben von Neuanlagen

2) Bei Berücksichtigung eines Nachschaltprozesses (z.B. GuD-Anlagen) bei MCFC bis 65 % bzw. bei SOFC bis 70 % Gesamtwirkungsgrad möglich (Drenckhahn 1997)

Quelle: Ledjeff 1995a, S. 30 (geändert); Hoffmann/Rumpel 1997 (ergänzt)

### III. Anwendungsspektrum

Ein wesentliches Charakteristikum von Brennstoffzellen ist deren vergleichsweise hoher **Wirkungsgrad**, wobei zwischen dem Wirkungsgrad der eigentlichen Brennstoffzelle und dem des gesamten Systems, welches vor- und nachgelagerte Prozesse mit berücksichtigt, zu unterscheiden ist. Eine Übersicht über das elektrische Wirkungsgradspektrum, welches in Abhängigkeit vom Brennstoffzellen-System und vom gefahrenen Brennstoff deutlich variiert, gibt Tabelle 6.

Unter **Praxisbedingungen** nimmt der Wirkungsgrad über einen längeren Betriebszeitraum ab. Exemplarisch kann für PAFC-Anlagen, die "Hessische Brennstoffzelle", aufgeführt werden, die zur Inbetriebnahme im Jahre 1993 mit einem elektrischen Wirkungsgrad für das Gesamtsystem von 41 % gefahren werden konnte und nach ca. 30.000 Laststunden bei ca. 34 % lag (jeweils gemessen für eine elektrische Ausgangsleistung von 100 kW (el)). Ausgelegt ist diese PAFC-Anlage auf ca. 40.000 Laststunden, was einer Standzeit von ca. 5 Jahren entspricht.<sup>12</sup> Der Abfall des Wirkungsgrades wird wesentlich durch Alterungserscheinungen am Brennstoffzellen-Stapel verursacht, u.a. durch Austrag des Elektrolyten Phosphorsäure sowie Vergiftungserscheinungen an den Elektroden etwa durch Rekristallisationsvorgänge des Platinkatalysators (Brammer et al. 1997).

Tab. 7: Übergeordnete Charakteristika und Trends von Brennstoffzellen

	<i>AFC/PEMFC</i>	<i>PAFC</i>	<i>MCFC</i>	<i>SOFC</i>
Temperatur	niedrig	→		steigend
Materialien	edel	→		weniger edel
Gase	Reinstgase	→		weniger rein
Kosten	hoch	→		sinkend
Technische Reife	hoch	→		abnehmend
generell: Brennstoffzellen-Wirkungsgrad mit abnehmender Last ansteigend				

Quelle: Drenckhahn/Hassmann 1993, S. 384

<sup>12</sup> Zum Vergleich: Motorgetriebene BHKW werden auf ca. 40.000 - 70.000 Vollastbetriebsstunden ausgelegt. Größere Anlagen müßten etwa mit konventionellen Kraftwerken konkurrieren, welche auf ca. 100.000 - 150.000 Vollastbetriebsstunden ausgelegt werden.

### III. Anwendungsspektrum

Bei einer Betrachtung aller Brennstoffzellen-Typen, geordnet nach zunehmender Betriebstemperatur von AFC bis SOFC, lassen sich gewisse **Trendaussagen** vornehmen (Tab. 7). Wesentlich erscheint hierbei die Aussage, daß mit zunehmender Temperatur Anforderungen an die Qualität der verwendeten Materialien abnehmen. Damit werden die Brennstoffzellen-Systeme tendenziell preiswerter. Darüber hinaus vertragen die Elektrodenstrukturen mit zunehmender Temperatur mehr Verunreinigungen beim verwendeten Brennstoff bzw. Oxidationsmittel. Die technische Reife der Brennstoffzellen-Systeme nimmt jedoch mit ansteigender Betriebstemperatur ab (Drenckhahn/Hassmann 1993).

Aus den bisher aufgeführten technischen Besonderheiten ergibt sich eine Reihe von Anwendungs-/Einsatzmöglichkeiten für Brennstoffzellen im stationären und im mobilen Bereich, wobei typische Anlagengrößen und wichtige Parameter/Probleme in Tabelle 8 zusammengefaßt sind.

Tab. 8: Anwendungsmöglichkeiten für Brennstoffzellen mit Zuordnung zu typischen Anlagengrößen

<i>Anwendung</i>	<i>Typische Größe</i>	<i>Wichtige Parameter</i>
Kraftwerke		Lebenszykluskosten
- Spitzenlast	5 - 250 MW	Emissionen
- Mittellast	50 - 250 MW	
- Grundlast	100 - 1.000 MW	
Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)		Systemwirkungsgrad
		Wärmequalität
- Industrie	1 - 50 MW	Verfügbarkeit/Lebensdauer/Volumen
- Gewerbe	20 - 1.000 kW	Kosten
- Haushalte	3 - 20 kW	Emissionen
andere Anwendungen		Gewicht
- Verkehr	15 - 60 kW	Volumen
- transportabel	ca. 2 kW	Kosten
- Raumfahrt	25 - 100 kW	Robustheit

Quelle: Drenckhahn 1990

Da nicht jeder Brennstoffzellen-Typ für jede der aufgeführten Anwendungen geeignet ist, ist eine exemplarische Zuordnung zu konkreten Anwendungen mit Angabe der derzeitigen Status in Tabelle 9 angegeben.

### III. Anwendungsspektrum

Tab. 9: Zuordnung derzeit verfügbarer Brennstoffzellen-Typen zu konkreten Anwendungen

Typ	Betrieb <sup>1)</sup>	Anwendungen	Status <sup>2)</sup>	Bemerkung
AFC	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	Apollo, Space-Shuttle	K	
		Kleinbusantrieb	P	
		U-Boot-Antrieb	P	
	H <sub>2</sub> /Luft	Linienbus	P	mit CO <sub>2</sub> -Wäsche
PEMFC	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	Stromquelle	P	
		Gemini-Raumerschiff	K	Hochdruckzelle
	H <sub>2</sub> /Luft	Pkw, Stromquelle, Bus	P	vorkommerziell
		Portable Stromversorgung	P	vorkommerziell
		Erdgas/Luft	kleines BHKW	L
	Methanol/Luft	Pkw	L	
PAFC	Erdgas/Luft	BHKW	K	
		Kleinkraftwerk	P	
	Methanol/Luft	Busantrieb	P	
MCFC	Erdgas/Luft	Kleinkraftwerk	P	
	Naphtha/Luft		L	
SOFC	Erdgas/Luft	Kleinkraftwerk	L, (P)	Röhrendesign
	Erdgas/Luft	kleines BHKW	L, (P)	planares Design (HEXIS)
	H <sub>2</sub> /Luft	Labordemonstrationen	L	planares Design

1) Bei Brennstoffen anders als H<sub>2</sub> wird von externer oder interner Reformierung ausgegangen.

2) L = Labor-, P = Pilot-, K = kommerzieller Maßstab

Quelle: Zusammenstellung aus Nölscher (1996), ergänzt

Die folgenden Ausführungen zu mobilen und stationären Anwendungen stützen sich wesentlich auf DLR-ITT (1997).

## 1. Stationäre Anwendungen (Energieumwandlung)

Brennstoffzellen im Anwendungsfeld der Kraft-Wärme-Kopplung haben die Entwicklungsstufe der beginnenden Kommerzialisierung erreicht. Weltweit werden derzeit über 80 Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerke im Leistungsbe-  
reich 200 kW (elektrisch) betrieben. Weitere stationäre Anwendungsbereiche sind Großkraftwerke und Kleinstanwendungen. Im folgenden werden mögliche Einsatzgebiete von Brennstoffzellen in Großkraftwerken, Kraft-Wärme-

## 1. Stationäre Anwendungen (Energieumwandlung)

Kopplungsanlagen und Kleinstanwendungen im Hinblick auf potentielle Einsatzgebiete und Marktchancen diskutiert.

### 1.1 Großkraftwerke

Unter Großkraftwerken werden Anlagen zur **ausschließlichen** Stromerzeugung etwa im Leistungsbereich ab **mehreren MW bis ca. 2.000 MW** zusammengefaßt. Im folgenden wird die Eignung von Brennstoffzellen für diesen Anwendungsbereich diskutiert, danach wird auf Entwicklungen in der konventionellen Kraftwerkstechnik und anschließend auf Marktchancen von Brennstoffzellen eingegangen.

#### *Ausgangslage und Entwicklungstendenzen einsetzbarer Brennstoffzellen in Großkraftwerken*

**Anforderungen**, die speziell im Bereich Kraftwerkstechnik an Brennstoffzellen-Aggregate gestellt werden, sind neben Wirtschaftlichkeit und Emissionsarmut ein hoher Wirkungsgrad, ein möglichst breites nutzbares Brennstoffband mit geringen Anforderungen an die Brennstoffreinheit, ein möglichst geeignetes Anfahrverhalten (zur Deckung der Spitzenlast), lange Standzeiten im Dauerbetrieb (zur Deckung der Grundlast), ein günstiges Teillastverhalten (im Brennstoffverbrauch) sowie ein einfacher, modularer Aufbau. Daneben spielt die Verfügbarkeit der Anlagen (im Sinne einer bestimmbarer Zuverlässigkeit in der Versorgungssicherheit mit Energie), die gewährleistet werden muß, eine erhebliche Rolle.

Da Brennstoffzellen nicht den thermodynamischen Wirkungsgradgrenzen konventioneller Kraftwerke unterliegen, können elektrische **Wirkungsgrade** von bis zu 65 %<sup>13</sup> erzielt werden. **Hochtemperatur-Brennstoffzellen** (MCFC, SOFC) erreichen dieses hohe Wirkungsgradniveau und sind somit vor allem für den Einsatz in Großkraftwerken interessant. Zudem ermöglichen ihre hohen Betriebstemperaturen eine interne Reformierung, was verfahrenstechnische Vereinfachungen im Aufbau und einen höheren Gesamtwirkungsgrad mit sich bringt und sich zudem positiv auf die Anlagenkosten auswirkt. Aufgrund der

---

13 In der Literatur wird (oft) nicht präzisiert, ob sich Angaben auf den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle oder den Systemwirkungsgrad (mit oder ohne Berücksichtigung der Brennstoffaufbereitung etc.) beziehen.

### III. Anwendungsspektrum

Temperaturen ist auch der direkte Einsatz weniger reiner **Brennstoffe** wie etwa Erdgas und Kohlegas möglich. Eine Besonderheit von Hochtemperatur-Brennstoffzellen ist, daß sie wegen des hohen Temperaturniveaus eine lange Anfahrzeit benötigen und somit nicht für eine Spitzenlastfahrweise geeignet sind. Aus diesem Grund erscheint ein Einsatz im **Grundlastbetrieb** mit seltenem Anfahren relevanter.

Auch die **Mitteltemperatur-Brennstoffzelle** PAFC kann in Kraftwerken eingesetzt werden; relativ große Pilotanlagen (u.a. mit 11 MW) wurden bereits in Japan gebaut. Anlagen im MW-Leistungsbereich sind aufgrund ihres erreichbaren Wirkungsgrades sowie der notwendigen externen Brennstoffaufbereitung jedoch tendenziell weniger interessant. Die 11-MW-Anlage ist bereits wieder außer Betrieb.

#### *Entwicklungslinien konventioneller Energieerzeugung bei Großkraftwerken*

Für Energiewandlungsprozesse in konventionellen Kraftwerken, etwa unterteilt in Kondensations- und Gasturbinenkraftwerke sowie Gas- und Dampfturbinen-Prozesse (GuD-Prozesse), werden als Brennstoffe fossile Energieträger, vor allem Stein- und Braunkohle sowie Erdgas eingesetzt.

Die Technik fossil befeuerter Kraftwerke befindet sich im Hinblick auf die Reduzierung von Brennstoffverlusten und die Senkung von Emissionen wie Kohlendioxid in einem anhaltenden Entwicklungsprozeß. Durch Komponentenoptimierung und Integration von wirkungsgradverbessernden Verfahrensschritten, wie etwa Zwischenüberhitzung bzw. -kühlung, wird der Verbrennungsprozeß effizienter gestaltet. Bei Gasturbinen und GuD-Anlagen ist die Erhöhung der Gaseintrittstemperatur die wirkungsvollste Maßnahme zur Effizienzsteigerung. Hierzu wird an hochtemperaturfesten Legierungen geforscht und werden effektive Kühlmethoden entwickelt. Weitere Optionen zur Wirkungsgradverbesserung von Gasturbinen sind die Abwärmerekuperation (Abwärmennutzung zur Vorwärmung des verdichteten Arbeitsmittels), der Humid Air Turbine Cycle (Gasturbinenabwärme wird zur Vorwärmung von Wasser für die Aufsättigung der verdichteten Luft verwendet) oder der Cheng-Cycle (Dampfinjektion in die Brennkammer der Gasturbine) (Pruschek 1997).

Ein Nachteil für den Betrieb von Gasturbinen war bisher, daß vor allem teure und begrenzt verfügbare "Edelbrennstoffe", wie Erdgas und Mitteldestillate (leichtes Heizöl etc.), eingesetzt werden mußten. Weiterentwicklungen ermöglichen mittlerweile den Betrieb von Gasturbinen auch mit Kohlegas, welches in vorgeschalteten Kohlevergasungsanlagen (IGCC) erzeugt wird. Gasturbinen

## 1. Stationäre Anwendungen (Energieumwandlung)

zeichnen sich heute durch Wirkungsgrade bis zu 38 % (el), installierte Leistungen bis zu 200 MW (el), hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit sowie, aufgrund des zumeist eingesetzten Brennstoffes Erdgas und emissionsarmer Brenner, durch eine hohe Umweltfreundlichkeit aus. Gasturbinen werden heute auch deshalb zunehmend in Kraftwerksprozesse integriert, da sie unter Kostenaspekten (kurze Bauzeiten, hohe Flexibilität etc.) Dampfkraftwerken Konkurrenz bieten (Veaux 1994).

Mit Erdgas befeuerte GuD-Anlagen haben das höchste elektrische Wirkungsgradpotential, welches derzeit bei 58 % liegt und sich durch fortschreitende technische Entwicklungen der 60 %-Wirkungsgradgrenze nähert. Das Wirkungsgradniveau moderner kohlebefeuerter Kondensationskraftwerke liegt zwischen 42 % (Braunkohle) und 45 % (Steinkohle); das Wirkungsgradpotential liegt bei ca. 50 % (s. Kap. II.1). Die Stromgestehungskosten dieser Kraftwerke sind relativ gering; sie betragen bei Grundlast derzeit zwischen 7 und 9 Pf/kWh, bei Mittellast zwischen 8,5 und 13 Pf/kWh. Auf dem Kraftwerksmarkt ist ein zunehmender Einsatz von Gasturbinen und GuD-Anlagen erkennbar (DLR-ITT 1997, S. 88; Hoffmann/Rumpel 1997) (Kap. III.3).

### *Marktchancen und Demonstrationsanlagen von Brennstoffzellen in Großkraftwerken*

Da konventionelle Anlagen mit hoher Stromerzeugungseffizienz bei vergleichsweise geringen Kosten zur Verfügung stehen, sind Brennstoffzellen "harten" Marktbedingungen ausgesetzt. Die Einbindung in den konventionellen Kraftwerksbau wird eher als zukünftige Option für den Einsatz von Brennstoffzellen gesehen. Aufgrund des Temperaturniveaus der beiden Hochtemperatur-Brennstoffzellen-Typen kann die MCFC (650 °C) mit einer Dampfturbine und die SOFC (800 - 1.000 °C) mit einer Gasturbine bzw. GuD-Anlage kombiniert werden (DLR-ITT 1997, S. 91). Insbesondere ist die Kombination von SOFC und GuD-Anlagen interessant, die bei Erdgasfeuerung und interner Reformierung ein Wirkungsgradpotential bis zu 65 %<sup>14</sup> aufweist (Standpunkt 1996, nach DLR-ITT 1997). Kombinierte Kraftwerkskonzepte, bestehend aus Brennstoffzelle und konventioneller Kraftwerkstechnik, sind hinsichtlich des technischen Entwicklungsstandes und der erforderlichen Kostenreduktion eher als langfristige Option (> 2010) zu sehen (DLR-ITT 1997, S. 96). Hochtemperatur-Brennstoffzellen befinden sich im Stadium von Labor- und Prototypen, wobei

---

14 bis zu 70 % (Drenckhahn 1997); s. Fußnote 13

### III. Anwendungsspektrum

die MCFC-Brennstoffzelle am Übergang zur Demonstrationsphase steht (Wagner/König 1997).

Ein MCFC-Kraftwerk mit einer elektrischen Leistung von 280 kW soll im Herbst 1997 in Dorsten (Deutschland) in Betrieb genommen werden. Eine MCFC-Testanlage mit 1 MW elektrischer Leistung soll 1998 in Japan anlaufen. Die Testanlage in Santa Clara (USA) mit 2 MW wurde im Mai 1997 endgültig abgeschaltet; sie ist insgesamt nur kurzzeitig gelaufen. Betrieben werden SOFC-Anlagen z.B. in Dortmund (7 kW; Flachzellenkonzept) und in Japan (25 kW; Röhrenkonzept). Ein SOFC-Brennstoffzellen-Kraftwerk (Röhrenkonzept) mit einer Leistung von 100 kW soll noch im Jahr 1997 in den Niederlanden den Betrieb aufnehmen (Schmitz 1997). Die hier exemplarisch angeführten Demonstrationsanlagen befinden sich weitestgehend in Leistungsbereichen, die noch weit unter Kraftwerksdimensionen liegen; hier ist eine Überschneidung zu den im folgenden diskutierten Blockheizkraftwerken möglich. In Anhang 4 findet sich eine Liste ausgewählter Demonstrationsanlagen.

#### Fazit

In **Großkraftwerken** sind aufgrund ihres hohen Wirkungsgradniveaus, geringen Anforderungen an die Brennstoffreinheit und der Möglichkeit der internen Reformierung vor allem die Hochtemperatur-Brennstoffzellen **MCFC** und **SOFC** einsetzbar. Die konventionelle Kraftwerkstechnik nähert sich durch ständige Innovationen und Erfolge hinsichtlich einer immer effizienter werdenden Brennstoffnutzung der in thermodynamischen Prozessen erreichbaren Wirkungsgradgrenze an. Um weitere Verbesserungen realisieren zu können, müßten neue Konzepte der Energieumwandlung in die Kraftwerkstechnik eingebunden werden. Die elektrochemische Umwandlung mittels Brennstoffzelle zeigt in diesem Zusammenhang beste Voraussetzungen, jedoch ist die technische Entwicklung von Hochtemperatur-Brennstoffzellen für den Einsatz im MW-Leistungsbereich und eine Kostenreduktion um Größenordnungen, als Voraussetzung für die Marktreife, derzeit **eher als langfristige Option zu sehen**. Die beiden Hochtemperatur-Brennstoffzellen befinden sich noch in der technischen Entwicklung, wobei die MCFC am Übergang zur Demonstrationsphase steht.

## 1.2 Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen

Unter Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) werden Energieerzeugungsanlagen zusammengefaßt, die durch die **gleichzeitige** Bereitstellung von Strom und nutzbarer Wärme eine energetisch hohe Ausnutzung des eingesetzten Brennstoffs erreichen. Die erzeugte Wärme wird bei Großanlagen oft mittels Fernwärmenetzen an die Verbraucher weitergeleitet. Bei kleineren Anlagen, die nur einzelne Gebäude versorgen, ist dies nicht notwendig. Durch KWK sind Gesamtnutzungsgrade von bis zu 90 % möglich. Der Betrieb von KWK-Anlagen ist somit effizienter als die getrennte Bereitstellung der beiden Energiearten. Im Vergleich zu heute üblichen Großkraftwerken und Einzelheizungen liegt die erzielbare Brennstoffeinsparung gegenwärtiger KWK-Anlagen etwa zwischen 15 und 30 % (DLR-ITT 1997, S. 50 f.).

### *Ausgangslage und Entwicklungstendenzen einsetzbarer Brennstoffzellen für KWK-Anlagen*

Im Vergleich zu konventionellen KWK-Anlagen zeichnen sich Brennstoffzellen-Heizkraftwerke durch einen hohen elektrischen **Wirkungsgrad**, eine variable Stromkennzahl und ein gutes **Teillastverhalten** aus. Die Brennstoffzelleneinheit ersetzt die Kraftwärmemaschine und den Generator einer konventionellen KWK-Anlage. Als **Brennstoff** dient Wasserstoff, der in vorhergehender externer oder interner Reformierung aus Erdgas erzeugt wurde.

Für den Einsatz in KWK-Anlagen eignen sich verschiedene Brennstoffzellen, wobei mit ansteigendem Temperaturniveau größere Wärmemengen (im Verhältnis zur elektrischen Leistung) verwirklicht werden können, wenngleich sich mit zunehmendem elektrischem Wirkungsgrad die tatsächlich nutzbare Wärmemenge relativ verringert. Somit ist die Niedrigtemperatur-Brennstoffzelle **PEMFC** zwar prinzipiell für KWK geeignet, jedoch (aufgrund ihres geringen Temperaturniveaus) eher für Kleinstanwendungen (z.B. bei Direktinstallation im betreffenden Gebäude). Mittel- und Hochtemperatur-Brennstoffzellen **PAFC**, **MCFC** und **SOFC** eignen sich für Anwendungen in kleinen und größeren Heizkraftwerken (HKW) im kW- und MW-Bereich. Langfristig gesehen haben im HKW-Bereich, insbesondere bei industrieller Energieerzeugung, Hochtemperatur-Brennstoffzellen die besten Voraussetzungen, da sie Abwärme auf einem hohen Temperaturniveau erzeugen und einen elektrischen Wirkungsgrad von mehr als 50 % aufweisen (Nurdin 1997).

### III. Anwendungsspektrum

Derzeit hat nur die phosphorsaure Brennstoffzelle in Blockheizkraftwerken (BHKW) den **Entwicklungsstand** eines praxisnahen Demonstrationseinsatzes erreicht. Ihre Stromgestehungskosten liegen etwa beim Zweifachen derjenigen vergleichbarer Motor-BHKW. Für Schmelzkarbonat- oder oxidkeramische Brennstoffzellen sind noch keine vergleichbaren KWK-Demonstrationsanlagen verfügbar.

#### *Entwicklungslinien konventioneller Energieerzeugung bei KWK-Anlagen*

Herkömmliche (thermodynamische) KWK-Anlagen sind technisch relativ weit entwickelt und stehen in einem breiten Leistungsbereich von etwa 5 kW bis mehreren 100 MW (el) mit Stromkennzahlen zwischen 0,2 und 1,0 bzw. elektrischen Wirkungsgraden zwischen 20 bis über 45 % zur Verfügung (DLR-ITT 1997; Hoffmann/Rumpel 1997). Haupteinsatzbereiche sind bei motorbetriebenen BHKW-Anlagen Industrie und Gewerbe (Raum- und Niedertemperatur-Prozeßwärme), öffentliche Einrichtungen und Krankenhäuser und bei größeren KWK-Anlagen auf Gas- und Dampfturbinen-Basis der Fernwärmesektor und die Hochtemperatur-Prozeßwärmebereitstellung in der Industrie.

Als Hauptkomponenten bestehen KWK-Anlagen aus einer Kraftwärmemaschine, geeignet sind ein Verbrennungsmotor oder eine Gasturbine, einem Generator und einem Wärmetauschersystem. KWK-Anlagen können aus mehreren gleichartigen Modulen aufgebaut sein, um durch An- bzw. Abschalten einzelner Module eine flexible Fahrweise zu ermöglichen. Eine Voraussetzung für den Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung ist die für die Wärmeabnahme notwendige Verbrauchernähe. Bei alleiniger Wärmebereitstellung für Wohngebiete erweist sich der Wärmeabsatz während der Sommermonate häufig als schwierig.

Als Brennstoffe werden zumeist Kohle, Erdgas und Heizöl, z.T. auch biogene Brennstoffe, eingesetzt. Der BHKW-Markt zeigte in einigen europäischen Ländern, darunter auch Deutschland, in den letzten Jahren eine relativ dynamische Entwicklung, während der Einsatz größerer KWK-Anlagen in der Fernwärmeversorgung in Westdeutschland aufgrund anhaltend niedriger Heizöl- und Erdgaspreise seit ungefähr 10 Jahren stagniert (Hoffmann/Rumpel 1997). Durch sinkende Strompreise und Auswirkungen von Liberalisierungsmaßnahmen am Strommarkt ist die zukünftige Marktentwicklung der KWK schwer abzuschätzen. Energiepolitische Rahmenbedingungen haben, wie beim Vergleich zu Ländern mit einem hohen Anteil an KWK-Anlagen deutlich wird, einen großen Einfluß auf den Ausbaugrad der KWK. Dänemark hat beispielsweise einen KWK-Anteil an der Stromerzeugung von 44 %, die Niederlande von 35 %. Dies

## 1. Stationäre Anwendungen (Energieumwandlung)

läßt Rückschlüsse auf das KWK-Potential in Deutschland zu. Nach einer Abschätzung in DLR-ITT (1997, S. 55 ff.) auf Basis des zu erwartenden Wärmeverbrauchs könnten insgesamt rund 35 % der Bruttostromerzeugung in Deutschland mittels KWK bereitgestellt werden (derzeit 9 %).

### *Marktchancen und Demonstrationsanlagen von Brennstoffzellen bei KWK-Anlagen*

Mittel- und Hochtemperatur-Brennstoffzellen sind für den KWK-Einsatz insbesondere deshalb geeignet, da auch im niedrigen Leistungsbereich hohe Wirkungsgrade bei geringen Emissionen erreicht werden, wobei die Kosten je Kilowattstunde installierter Leistung nahezu konstant bleiben. Brennstoffzellen-KWK-Anlagen konkurrieren am Energieerzeugungsmarkt aufgrund ihres derzeit realisierten Leistungsniveau vor allem mit Motor-BHKW, insbesondere mit Gasmotoren. Brennstoffzellen können in diesen **BHKW-Markt** eingeführt werden, wenn ihre Kosten soweit gesenkt worden sind, daß weitere erforderliche Kostensenkungen weitgehend über die Ausweitung der Produktion möglich sind und dieser Markteinstieg für eine begrenzte Zeitspanne, z.B. aufgrund umwelt-spezifischer Vorteile von Brennstoffzellen, gefördert wird. In dieser Phase befindet sich derzeit die PAFC, deren Investitionen etwa auf 35 bis 40 % des heutigen Wertes zu senken sind, wenn Konkurrenzfähigkeit mit weiterentwickelten Motor-BHKW erreicht werden soll (DLR-ITT 1997, S. 77). MCFC- und SOFC-BHKW (auch PEMFC-BHKW) haben noch labor- bzw. prototypischen Charakter mit den entsprechend hohen spezifischen Kosten von Einzelstücken.

Der Entwicklungsstand von Membran-Brennstoffzellen (**PEMFC**) im stationären Einsatz ist derzeit auf einzelne Versuchsanlagen beschränkt. Insgesamt ist der KWK-Einsatzbereich für PEMFC aufgrund der hohen Anforderungen an die Brennstoffreinheit sowie des sehr niedrigen Temperaturniveau stark eingeschränkt.

Phosphorsaure Brennstoffzellen (**PAFC**) in KWK-Anlagen in der Leistungsklasse 200 kW sind technisch konkurrenzfähig mit konventionellen BHKW und werden im praxisnahen Demonstrationseinsatz betrieben. In Deutschland werden derzeit sieben solcher 200-kW-PAFC-BHKW betrieben. Als Beispiel sei die "Hessische Brennstoffzelle" angeführt, welche im Juni 1993 in Betrieb gegangen und seitdem über 30.000 Betriebsstunden gelaufen ist (Auslegung auf ca. 40.000 Laststunden) (Brammer et al. 1997).

Demonstrationsanlagen mit **MCFC**-Brennstoffzellen im MW-Leistungsbereich haben gezeigt, daß noch weiterer technischer Entwicklungsbedarf besteht.

### III. Anwendungsspektrum

Hauptprobleme sind zu kurze Standzeiten, Abfall des elektrischen Wirkungsgrades und Korrosionsschäden. Eine MCFC-Anlage mit einer Leistung von 280 kW soll im laufenden Jahr 1997 als Prototyp getestet werden (in Dorsten). Bei SOFC-Brennstoffzellen-Anlagen sind Prototypen im kW-Leistungsbereich (7 kW und 25 kW) vorhanden. Die derzeitige SOFC-Forschung zielt auf die Beseitigung von Stabilitätsproblemen, die Vergrößerung des Brennstoffzellen-Stapels und auf die Absenkung der Betriebstemperatur. Letzteres würde eine erhebliche Kostenreduktion aufgrund geringerer Materialanforderungen ermöglichen (zu Demonstrationsanlagen vgl. auch Anhang 4).

#### Fazit

Ein zentrales Einsatzfeld von Brennstoffzellen ist die Stromerzeugung bei gleichzeitiger Wärmenutzung. Die technischen Eigenschaften wie hoher elektrischer Wirkungsgrad, Modularität, flexible Betriebsweise und gutes Teillastverhalten sowie gute Emissionseigenschaften und Geräuscharmheit geben Anreiz für einen Einsatz in **Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen** (DLR-ITT 1997, S. 48).

Insgesamt wird in DLR-ITT (1997, S. 76) das Marktpotential von Brennstoffzellen insbesondere im **kurz- bis mittelfristigen Zeitraum positiv** eingeschätzt, sofern sich die Mehrkosten im Vergleich zu den konventionellen Anlagen senken lassen und der Trend zu dezentraler Energiebereitstellung anhält. Die für eine nennenswerte Markteinführung erforderlichen Kostensenkungen von Brennstoffzellen-BHKW müssen sowohl durch weitere technologische und materialspezifische Fortschritte als auch durch rationelle Serienfertigung mit möglichst großen Stückzahlen erreicht werden.

Bei den derzeit dominierenden PAFC-KWK-Anlagen sind Entwicklungsziele eine Wirkungsgradsteigerung, die Optimierung des Gesamtsystems und eine Erhöhung der Lebensdauer des Brennstoffzellen-Stapels (Drenckhahn/Lezuo 1996).

### 1.3 Kleinstanwendungen

Kleinstanwendungen von Brennstoffzellen (Leistungsbereich bis ca. 10 kW) beschränken sich derzeit auf vereinzelte Nischenanwendungen, wobei verschiedene Konzepte diskutiert werden. Eine Reihe von Demonstrationsprojekten basieren auf dem Prinzip, mit überschüssigem Strom, etwa preiswert erzeugtem Nachtstrom, mittels Elektrolyse aus Wasser Wasserstoff und Sauerstoff zu erzeugen und zu speichern, um während Strom- und Wärmebedarfszeiten aus die-

## 2. Mobile Anwendungen (Antriebe)

sem über eine Brennstoffzelle elektrische bzw. thermische Energie zu erzeugen (z.B. Gerking 1997). Im Mittelpunkt dieser Konzepte steht hierbei oft die Membran-Brennstoffzelle PEMFC. In diesen Ansatz, einem **Elektrolyseur-Brennstoffzellen-System**, können weitere Beispiel eingeordnet werden, wie etwa das "Energieautarke Haus" in Freiburg, in dem photovoltaisch erzeugter Überschußstrom genutzt wird, um durch Elektrolyse Wasserstoff herzustellen, aus welchem bei Bedarf mittels Brennstoffzellen wiederum Strom erzeugt wird. Oder auch die Anlage PHOEBUS in Jülich, welche eine solare Inselversorgung eines größeren Gebäudes (Zentralbibliothek) mit Energiespeichersystem, bestehend aus Elektrolyseur, Produktgasspeicherung für Wasserstoff und Sauerstoff und einer Brennstoffzelle, darstellt (Barthels 1997).

Ein weiterer Ansatz besteht darin, in Haushalten, welche eine 1 - 3 kW Brennstoffzelle zur Stromerzeugung einsetzen, für Geräte, wie Computer oder Klimaanlage, den von der Brennstoffzelle erzeugten **Gleichstrom direkt einzusetzen**, so daß keine Verluste durch den Wechselrichter entstehen. Zu untersuchen bleibt dabei, ob die Spannungsniveaus von Zelle und Verbraucher übereinstimmen und inwieweit sich die hierfür aufzubauende Gleichspannungsverteilung wirtschaftlich lohnt (Wagner/König 1997).

Daneben werden Ansätze verfolgt, Brennstoffzellen als **transportable Stromquellen**, etwa im Haus- oder Bürobereich, einzusetzen. Auch hier steht die PEMFC im Vordergrund.

## 2. Mobile Anwendungen (Antriebe)

**Verkehrsemissionen** machen insbesondere in Ballungsgebieten oft den Hauptteil anthropogener Emissionen<sup>15</sup> aus. Sie stellen somit noch immer ein umweltpolitisch ungelöstes Problem dar. Eine Option in Verkehrskonzepten bildet die Umstellung des öffentlichen Personennahverkehrs, des Wirtschaftsverkehrs sowie des Individualverkehrs auf Fahrzeuge mit **alternativen Antrieben**. Eine weitgehende lokale Schadstofffreiheit läßt sich prinzipiell durch Elektrotraktion

---

15 Beispielsweise entfielen in der Bundesrepublik Deutschland 1994 58,7 % der CO-, 47,3 % der NO<sub>x</sub>-, 17,5 % der CO<sub>2</sub>- und 1,7 % der SO<sub>2</sub>-Emissionen aller Emittentengruppen auf den Straßenverkehr (UBA 1996).

### III. Anwendungsspektrum

erzielen. Neben Batterien<sup>16</sup> sind insbesondere Brennstoffzellen als Energiequelle für Elektromotoren geeignet.

#### *Ausgangslage und Entwicklungstendenzen einsetzbarer Brennstoffzellen für Fahrzeugantriebe*

Für Fahrzeuganwendungen sind vor allem **Niedrig- und Mitteltemperatur-Brennstoffzellen** geeignet. Aufgrund ihres recht hohen Masse/Leistungsverhältnisses im Bereich von ca. 12 - 15 kg/kW wurden alkalische und phosphorsaure Brennstoffzellen (AFC, PAFC) bislang eher in Bussen, Lastkraftwagen und Gabelstaplern eingesetzt. Für den Antrieb von Personenkraftwagen und Kleintransportern werden hohe Erwartungen in die Membran-Brennstoffzelle (PEMFC) gesetzt, da diese mit einem Masse/Leistungsverhältnis von bis zu 2 kg/kW (Brennstoffzelle) dem herkömmlichen Verbrennungsmotor recht nahe kommt; hier liegt derzeit eindeutig der Forschungsschwerpunkt (Ledjeff 1993; van den Broeck 1993). Wird ein Gesamtsystem (Wasserstoff, Brennstoffzelle, Elektromotor) betrachtet, liegt der Wert bei etwa 4 kg/kW (Weule 1995). Darüber hinaus gibt es auch Ansätze, Hochtemperatur-Brennstoffzellen, speziell die SOFC, beispielsweise in Schienenfahrzeugen einzusetzen. Dies ist jedoch nur sinnvoll, wenn zum einen die Betriebstemperatur der SOFC weiter gesenkt wird und zum anderen längere Strecken (aufgrund der Anfahrzeiten etc.) gefahren werden.

**Brennstoffseitig** werden **zwei Konzepte** verfolgt: zum einen der Einsatz von gasförmigen Brennstoffen (Wasserstoff, Erdgas) und zum anderen von Flüssigbrennstoffen (Methanol, Benzin). FuE-Entscheidungen etwa einzelner Automobilfirmen seitens der Brennstoffversorgung<sup>17</sup> haben u.a. infrastrukturelle Gründe. So sind Speichermöglichkeiten für Wasserstoff oder Erdgas - flüssig oder gasförmig - industriell Stand der Technik, jedoch bisher kaum für den Individualverkehr ausgelegt bzw. geeignet. Ein Problem gasbetriebener Fahrzeuge besteht daher in der Bereitstellung von ausreichender Speicherkapazität für akzeptable Reichweiten. Bei einer flächendeckenden Einführung solcher Fahrzeuge müßte eine entsprechende Infrastruktur verfügbar sein. Dies wäre technisch

---

16 Wie u.a. der vierjährige Flottenversuch auf der Insel Rügen (Wagner 1997; VDI 1997b) aufzeigt, weisen batteriegetriebene Fahrzeuge nach wie vor Potentiale hinsichtlich Reichweiten, Ladewirkungsgrad etc. auf.

17 Beispielsweise setzte die Daimler-Benz AG bisher auf Wasserstoff, wird in Zukunft jedoch auf Methanol setzen; die BMW AG arbeitet mit Wasserstoff, die VW AG setzt auf Methanol etc.

## 2. Mobile Anwendungen (Antriebe)

realisierbar, jedoch mit hohen Kosten verbunden. Methanol- bzw. benzinbetriebene Brennstoffzellen-Fahrzeuge hingegen könnten das bereits vorhandene Tankstellensystem nutzen. Zu berücksichtigen bleibt auch hier die vergleichsweise hohe Abhängigkeit der Niedrigtemperatur-Brennstoffzellen von der Brennstoffreinheit (Kap. II.4.1).

Der eigentliche Brennstoff für die Brennstoffzelle ist bisher in jedem Fall Wasserstoff; auch bei Methanolbetankung von Fahrzeugen mit PEMFC ist ein externer Reformer installiert. Da ein externer Reformer immer ein "Mehr" an Platz sowie Energie benötigt, wird intensiv an **Direktmethanol-Brennstoffzellen** (DMFC) gearbeitet. Die DMFC befindet sich im Vergleich zu wasserstoffgetriebenen Brennstoffzellen-Systemen noch weitestgehend im Laborstadium, da noch eine Reihe technischer Probleme, etwa hinsichtlich des geringen Wirkungsgrades der Direktumwandlung von Methanol oder der Vergiftung der Elektroden durch Zwischenprodukte der Reaktionskette, ungelöst sind.

Ähnlich wie heute bereits Erdgas verdichtet oder flüssig auch in Kraftfahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschinen eingesetzt wird, kann auch unter Druck oder flüssig **gespeicherter Wasserstoff** als Kraftstoff eingesetzt werden. Heute verfügbare prototypische Brennstoffzellen-Fahrzeuge nutzen überwiegend diese Variante, welche gegenwärtig vor allem für Flotten (Busse oder Fuhrparks) mit eigener Infrastruktur von Interesse ist. Brennstoffzellen-Fahrzeuge existieren heute als Demonstrationsfahrzeuge der 2. und 3. Generation. Nachdem in früheren Demonstrationsträgern die prinzipielle Funktionsfähigkeit von Brennstoffzellen-Fahrzeugantrieben nachgewiesen wurde, konzentriert sich jetzt die Entwicklung auf eine deutliche Reduktion des Masse/Leistungs-Verhältnisses und auf die Optimierung des Gesamtsystems, um Brennstoffzellen für Pkw einsatzfähig zu machen (DLR-ITT 1997, S. 13, 79).

### *Entwicklungstendenzen bei konventionellen Fahrzeugantrieben*

Otto- wie auch Dieselmotoren weisen aus technischer Sicht Potentiale zur Emissionsminderung – sowohl durch **Reduktion des spezifischen Kraftstoffverbrauchs** als auch durch den Einsatz von **Kraftstoffen mit veränderter chemischer Zusammensetzung** – auf. Emissionsminderungen im Straßenverkehr sind wesentlich durch die Setzung von **Normen** bewirkt worden. So werden u.a. seit einiger Zeit Schadstoffemissionen von neu zugelassenen Kraftfahrzeugen durch Rechtsvorschriften der Europäischen Union geregelt.

### III. Anwendungsspektrum

Kernstück ist die Richtlinie 70/220/EWG<sup>18</sup> über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Kraftfahrzeuge. Diese Richtlinie wurde in den vergangenen Jahren mehrfach geändert, insbesondere wurden Grenzwerte schrittweise herabgesetzt sowie weitere Schadstoffe aufgenommen. Gegenwärtig gelten für Pkw die "**EURO-2-Normen**" (s.a. Tab. 11), die jedoch weiter verschärft werden sollen. Dazu beschloß die EU-Kommission im Juni 1996 eine Strategie zur Beschränkung der Schadstoffemissionen im Straßenverkehr (KOM(96)248). Diese soll das Erreichen bestimmter Luftqualitätsziele<sup>19</sup> ermöglichen, was eine erhebliche Verringerung der Emissionen im Straßenverkehr gegenüber dem heutigen Stand voraussetzt. Gleichzeitig verabschiedete die EU-Kommission zwei zur Verwirklichung dieser Strategie erforderliche **Legislativvorschläge**: einen Vorschlag für Qualitätsnormen für Otto- und Dieselmotoren (Kraftstoffqualitätsrichtlinie) und einen Vorschlag für strengere Emissionsnormen für Pkw. Hierbei sind Ergebnisse des Auto-Öl-Programms eingeflossen. Im Entwurf der Kraftstoffqualitätsrichtlinie schlägt die Kommission u.a. harmonisierte Grenzwerte für Benzol-, Aromaten- oder Schwefelgehalte unverbleiter Otto- und Dieselmotoren vor. Die Grenzwerte sollen ab dem Jahr 2000 gelten. Der Kommissionsvorschlag gestattet den Mitgliedstaaten in bestimmten Gebieten mit schlechter Luftqualität im Zuge einer Sonderregelung außerdem den Vertrieb spezieller Kraftstoffe vorzuschreiben. Der Entwurf der Richtlinie bzgl. Schadstoffemissionen von Kraftfahrzeugen sieht eine Herabsetzung der Grenzwerte für emittierte Schadstoffe und eine Änderung des Prüfverfahrens (Fahrzyklen)<sup>20</sup> vor. Beispielsweise entsprechen die Grenzwerte ("EURO-3") einer Verringerung der Emissionen betroffener Schadstoffe (CO, HC, NO<sub>x</sub>, Feststoffteilchen) um 20 bis 40 %. Daneben enthält der Entwurf Richtgrenzwerte für eine weitere Stufe zur Verringerung von Fahrzeugemissionen im Jahr 2005 ("EURO-4"), die bis spätestens zum 31. Dezember 1998 zu bestätigen sind. Die hierbei angedachten Grenzwerte entsprächen einer Emissionsminderung um 50 bis 70 % (gegenüber dem Stand von 1996). Mit der Festlegung von Werten für "EURO-4" soll der Automobilindustrie die voraussichtlich ab o.g. Zeitpunkt geltenden Maßnahmen frühzeitig bekanntgegeben und den Mitgliedstaaten, die

---

18 Die Richtlinie 70/220/EWG stellt eine Einzelrichtlinie des Typgenehmigungs- oder Betriebserlaubnisverfahrens dar.

19 Betrachtete Schadstoffe sind Kohlenmonoxid, Benzol, Stickstoffdioxid, Feststoffteilchen und troposphärisches Ozon.

20 Diese Maßnahmen gelten ab dem Jahr 2000 für neue Fahrzeugtypen und ab 2001 für alle Neufahrzeuge.

## 2. Mobile Anwendungen (Antriebe)

durch die Gewährung steuerlicher Anreize die Weiterentwicklung von Umwelttechnologien fördern möchten,<sup>21</sup> einheitliche Ziele vorgegeben werden.

Im Bereich der **Antriebstechnik, der Kraftübertragung und der Verringerung von Roll- und Luftwiderstand** sind durch Maßnahmen, wie Direkteinspritzung, Ventilsteuerung, Magerkonzept, Aufladung, elektronisches Management sowie verbesserte Nebenaggregate, noch beträchtliche Reduktionspotentiale vorhanden (Enquete-Kommission 1994; Fiedler et al. 1994; Helling 1992; nach DLR-ITT 1997). Diese liegen im Bereich des Motors bei 20 - 30 %, wobei der untere Wert für Dieselmotoren und der obere Wert für Ottomotoren repräsentativ ist. Im Bereich der Kraftübertragung sind - beispielsweise mittels automatisierter Schaltgetriebe, Start/Stopanlagen und Schwung-Nutzautomatik - Reduktionen zwischen 15 und 20 % erreichbar. Durch Verringerung von Roll- und Luftwiderständen (z.B. durch veränderte Reifentechnik oder Niveauregulierung) läßt sich eine Reduktion von etwa 10 % erzielen. Insgesamt kann beim Pkw herkömmlicher Bauart von technisch möglichen Reduktionspotentialen zwischen 30 und 40 % gegenüber dem Ist-Zustand ausgegangen werden. 1995 lag der mittlere Flottenverbrauch an Treibstoff in Deutschland für Pkw mit Ottomotor bei 9,2 l/100 km und für Pkw mit Dieselmotor bei 7,6 l/100 km (DIW 1996). Durch die genannten Maßnahmen sind spezifische Verbräuche (bezogen auf den Mittelwert aller Klassen,<sup>22</sup> Drittmix) von 4,9 l/100 km bei Ottomotoren und von 4,1 l/100 km bei Dieselmotoren erreichbar, die entsprechenden spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen könnten auf etwa 120 g/km sinken. Diese technischen Möglichkeiten sind mit Mehrkosten im Vergleich zu heutigen Fahrzeugen verbunden, die je Liter Kraftstoffeinsparung auf 2.000 - 4.000 DM geschätzt werden (Enquete-Kommission 1994, nach DLR-ITT 1997, S. 80).

Durch **Gewichts- und Leistungsreduzierungen ("Down-Sizing")** lassen sich technisch weitere signifikante Kraftstoffeinsparungen erzielen. So könnten bei einem Mittelklassewagen durch Kombination von Verringerung der Leistung und des Gewichtes mit o.g. technischen Reduktionsmöglichkeiten beim Motor und bei der Kraftübertragung spezifische Verbrauchsverringerungen um 50 % erzielt werden, was Verbräuchen von 3,6 l/100 km (Ottomotor) bzw. 3,2 l/100 km (Dieselmotor) entspräche (DLR-ITT 1997, S. 81). Anzumerken ist hierbei, daß der Effekt von Gewichtseinsparungen durch den Trend zu verbes-

---

21 Beispielsweise ist dies u.a. in Deutschland durch das Kraftfahrzeugsteueränderungsgesetz (KraftStÄndG 1997) geschehen.

22 Klassen: < 1,5 l; 1,5 - 2,0 l; > 2,0 l Hubraum

### III. Anwendungsspektrum

sertem Komfort (Sitze, Sicherheitstechnik etc.) teilweise wieder kompensiert wird.

Ausgehend von rein technischen Verbesserungen an Motor und Kraftübertragung (bei unverändertem Leergewicht und Leistung), lassen sich für Otto- und Dieselfahrzeuge Primärenergieverbräuche und CO<sub>2</sub>-Emissionswerte von ca. 65 - 70 % gegenwärtiger Fahrzeuge bis zum Jahr 2005 erwarten. Diese Werte stellen die "Meßplatte" zukünftiger neuartiger Antriebe dieser Pkw-Klasse dar (DLR-ITT 1997, S. 82). Weitere Emissionsminderungen wären durch eine **Veränderung bisheriger Kraftstoffqualitäten** durchführbar. Auch sind **weitere Energieträger** wie Erdgas, LPG, Methanol, Biokraftstoffe oder Wasserstoff bei Verbrennungsmotoren einsetzbar (Höhlein et al. 1996a) und bieten entsprechende Emissionsminderungspotentiale.

#### *Marktchancen und Demonstrationsanlagen von Brennstoffzellen für Fahrzeugantriebe*

Wichtige Vergleichsfaktoren für den Energieverbrauch gleichartiger Fahrzeuge sind Masse und Gesamtnutzungsgrad des Antriebssystems, wozu sich eine Auswertung aktueller Literaturangaben zu Brennstoffzellen-Antrieben in DLR-ITT (1997) findet. Brennstoffzellen-Antriebe sind dadurch gekennzeichnet, daß sie beim heutigen Entwicklungsstand eine um den Faktor 2,5 bis 3 höhere Masse als vergleichbare Verbrennungsmotoren besitzen, aber gleichzeitig höhere Gesamtnutzungsgrade (etwa Faktor 2 gegenüber heutigen und Faktor 1,5 gegenüber verbesserten Verbrennungsmotoren) erreichen können (DLR-ITT 1997, S. 83). Für eine Gesamtbeurteilung müssen noch die unterschiedlichen Nutzungsgrade der Bereitstellung des Treibstoffs aus Primärenergieträgern und die damit verbundenen Emissionen berücksichtigt werden. Bei einer entsprechenden Gegenüberstellung von Antrieben auf fossiler Primärenergiebasis, ergibt sich u.a., daß Brennstoffzellen-Antriebe auf der Basis von Wasserstoff und Erdgas die spezifischen Verbräuche weiterentwickelter konventioneller Antriebe unterschreiten können (bei Berechnungen in DLR-ITT (1997) etwa um 10 bis 15 %). CO<sub>2</sub>-Emissionsvorteile fallen deutlicher aus beim Wechsel der Primärenergiebasis von Mineralöl zu Erdgas. Wechselt die Primärenergiebasis zu Biomasse, so reduzieren sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem verbleibenden fossilen Energieeinsatz für die Energieträgerherstellung (Methanol, Wasserstoff) weiter. Literaturangaben hierzu schwanken jedoch deutlich.

Als ein wesentliches Argument für den Einsatz von Brennstoffzellen-Antrieben sind ihre äußerst geringen lokalen CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen

## 2. Mobile Anwendungen (Antriebe)

(Kap. III.4) anzusehen, was insbesondere im Zusammenhang mit der Sommermogproblematik von Interesse ist. Dies hat beispielsweise in einem stark ozongefährdeten Ballungsgebiet, in Los Angeles (Kalifornien, USA), zu politischen Vorgaben für die Verbreitung von emissionsarmen bzw. -freien Fahrzeugen, wie Elektroautos, geführt ("California Clean Air Act"). Dort wurden gesetzliche Anforderungen an Fahrzeuge dahingehend verschärft, daß ein definierter Anteil an Neuzulassungen wenig bzw. keine Emissionen freisetzen dürfen. So ist geplant, daß ab 1998 etwa 2 % aller neu in Kalifornien angebotenen Fahrzeuge (ca. 40.000 Stück/Jahr) sog. "Zero-Emission-Vehicles" (ZEV) sein müssen; dieser Anteil soll im Jahre 2003 bereits 10 % betragen (Ledjeff 1993; van Vorst 1997). Voraussetzung hierfür ist allerdings die rechtzeitige Verfügbarkeit technisch ausgereifter und finanziell erschwinglicher Fahrzeuge, wobei hier neben Batterie- auch Brennstoffzellen-Ausstattungen<sup>23</sup> eine Option darstellen.

Ein günstiges Marktsegment für Brennstoffzellen in Fahrzeugen stellt wohl der öffentliche **Busverkehr** dar, für den momentan auch die meisten Demonstrationsfahrzeuge existieren. Hauptsächlich werden PEMFC, aber auch AFC<sup>24</sup> und PAFC - wenngleich deutlich untergeordnet - eingesetzt. Beispiele für den PEMFC-Einsatz in Bus-Prototypen gibt es in Chicago und Vancouver (Fa. Ballard, CDN) bzw. in Deutschland (NEBUS; Fa. Daimler-Benz). Im Euro-Quebec-Projekt wurden u.a. zwei Busse (35 kW) und ein Boot mit einer PEMFC bzw. PAFC (30 bis 50 kW) betrieben (Höhlein et al. 1996a, S. 86 f). Im Projekt EUREKA wurden u.a. Busse für den öffentlichen Nahverkehr in Brüssel und Amsterdam entwickelt, welche mit alkalischen Brennstoffzellen, einer Ni/Cd-Batterie sowie einem Speicher für flüssigen Wasserstoff ausgerüstet sind (van den Broeck 1993). Im **Pkw-Bereich** werden als Prototypen weitestgehend Membran-Brennstoffzellen eingesetzt; u.a. sind in Japan ein VW-

---

23 Die Bezeichnung ZEV bezog sich im "Air Resources Board (ARB)" für Kalifornien bisher ausschließlich auf Elektrofahrzeuge. In einem Erweiterungsvorschlag des ARB ist es angedacht, auch sog. EZEV (Equivalent-Zero-Emission-Vehicles) zuzulassen (ARB 1997, Höhlein/Biederermann 1996), wobei bei den anvisierten Emissionswerten dann auch Hybridfahrzeuge (u.a. Methanol-Brennstoffzellen-Fahrzeuge mit Batterie) als auch konventionelle Fahrzeuge in Betracht kommen.

24 Alkalische Brennstoffzellen (AFC) wurden in der Vergangenheit in verschiedenen Anwendungen getestet und demonstriert, so in Gabelstaplern, in Kleintransportern oder in U-Booten.

### III. Anwendungsspektrum

Golf (8 kW, Fa. Matsuba/Ballard) oder auch in Deutschland Necar II und III<sup>25</sup> (Fa. Daimler-Benz) zu nennen (s. Anhang 4).

Aus technischer Sicht werden alternativ zu konventionellen Antrieben neben Brennstoffzellen auch Gasmotoren weiterentwickelt. Derzeit laufende Arbeiten hierzu müßten in eine weitergehende Betrachtung mit einbezogen werden.

#### Fazit

Geänderte gesetzliche Rahmenbedingungen (s. Kalifornien, Umgestaltung von Kfz- und Mineralölsteuern) und ein gestiegenes Umweltbewußtsein bei zunehmendem Verkehrsaufkommen mit nach wie vor signifikant hohen Schadstoffemissionen verstärken den "Druck", alternative, emissionsarme Antriebskonzepte (Elektroauto etc.) auf breiter Basis einzuführen. Damit wachsen die Chancen für einen Einsatz von Brennstoffzellen in Fahrzeugen, als **mittelfristige Option**; unter geeigneten Umständen auch als **kurzfristige Option**. Eine partielle Umstellung des öffentlichen wie auch des Individualverkehrs auf emissionsarme Antriebe könnte eine Grundlage für eine umweltfreundliche Fahrweise schaffen. Dabei müssen jedoch noch eine Reihe technischer und ökonomischer Probleme sowie der Akzeptanz beseitigt werden. Aus **infrastruktureller** Sicht ist es derzeit offen, ob sich ein Versorgungssystem mit gasförmigem oder flüssigem Brennstoff durchsetzen wird. Derzeit stehen bereits - zumeist mit Membran-Brennstoffzellen ausgerüstete - prototypische Fahrzeuge (Busse, Transporter, Pkw) zur Verfügung, die sich allerdings unter Praxisbedingungen noch bewähren müssen. Haupthindernisse sind noch zu hohe Herstellungskosten sowie eine fehlende Infrastruktur, etwa zur Wasserstoffversorgung. Inwieweit allein mit alternativen Antrieben, wie Brennstoffzellen oder Batterien, verkehrsbedingte Umweltprobleme gelöst werden können, ist offen. Alternative (Brennstoffzellen)-Antriebe können jedoch einen wichtigen, in einer marktnahen Entwicklungsphase befindlichen "Baustein" für eine umweltschonende Abwicklung von Transportaufgaben in Ballungsgebieten darstellen.

---

25 NECAR I und II führen als Brennstoff Wasserstoff mit; NECAR III wird mit Methanol betrieben, welches fahrzeugintern zu Wasserstoff reformiert wird.

### 3. **Ökonomische Aspekte**

Ökonomische Kriterien (Investitionen, Betriebskosten, Stromgestehungskosten etc.) sind ausschlaggebend für eine Markteinführung und eine signifikante Marktpenetration von Brennstoffzellen. Derzeit verfügbare Kostendaten beziehen sich zumeist auf Investitionen für einzelne Brennstoffzellen-Systeme sowie partiell auf Betriebskosten. Für eine Beurteilung des ökonomischen Potentials der Brennstoffzellen-Technologie müßten jedoch neben mittelfristig anvisierten Zielkosten herstellender Firmen auch der potentielle Aufwand für eine entsprechende Brennstoffversorgung mit einbezogen werden. Da bis dato auch hierzu nur wenige Angaben vorliegen, wird im folgenden versucht, Größenordnungen für Kosten, insbesondere im Vergleich zu konventionellen Techniken, anzugeben. Eine Betrachtung eines weitergehenden Kostenrahmens hinsichtlich Brennstoffversorgung etc. wäre eine Option für eine Fortführung dieses Projektes.

Die **Herstellung** von Brennstoffzellen erfolgt, mit Ausnahme der halbautomatischen Produktion von 200-kW-PAFC-Anlagen, derzeit weltweit in **Einzel-fertigung**, was zu signifikant **hohen Investitionen** für Neuanlagen auch im Pilotmaßstab führt. Darüber hinaus sind eine Reihe von eingesetzten Materialien in Brennstoffzellen verhältnismäßig teuer, wie etwa Platin- bzw. Gold-Katalysatoren der PEMFC oder der Festoxidelektrolyt der SOFC. Bislang stehen auch keine verfahrenstechnisch ausgereiften Verfahren zur Serienproduktion etwa von großflächigen festen Elektrolyten oder zur Beschichtung der Elektroden zur Verfügung.

Eine genaue Angabe aktueller Herstellungskosten ist relativ schwierig, da nicht nachvollziehbar ist, inwieweit Zuschüsse und Entwicklungskosten eingerechnet wurden. Beispielsweise liegen die von der Fa. ONSI mitgeteilten Investitionen für die 200-kW-BHKW-Einheit bei ca. 600.000 US\$. Für die nächsten Jahre wird von der Fa. ONSI eine weitere Kostendegression auf spezifische Investitionen zwischen 1.500 und 2.000 US\$/kW erwartet. PAFC-Systeme würden sich damit in einigen Anwendungsbereichen der Wirtschaftlichkeit annähern und den Markt für dezentrale Brennstoffzellen-Systeme in KWK öffnen. Dies würde auch dazu beitragen, Betriebserfahrungen mit Brennstoffzellen zu sammeln (DLR-ITT 1997). **Spezifische Kosten** (Investition bezogen auf die installierte Leistung) liegen damit bei verfügbaren Brennstoffzellen-Heizkraftwerken, wie die 200-kW-PAFC-Anlagen der Fa. ONSI, bei etwa 3.000 US\$/kW installierter Leistung. Da sich PAFC-Anlagen bereits in ei-

### III. Anwendungsspektrum

ner ersten Kommerzialisierungsphase befinden, weisen diese eher realistische Preisangaben auf, als Systeme, die sich noch im Pilot- oder Labormaßstab befinden, wie MCFC- und SOFC-Anlagen. Letztere werden derzeit mit einem Faktor von 2 bis 4 teurer geschätzt als PAFC-Systeme. Angegebene Kosten für PEMFC-Systeme reichen über eine weite Spanne von einigen hundert Dollar bis hin zu 10.000 US\$/kW.

Neben Kosten für den eigentlichen Brennstoffzellen-Stack fallen solche für die **Peripherie** an, die gemeinhin, aufgrund der Brennstoffaufbereitung, Steuerung, Stromentnahme etc., höher anzusetzen sind. Bei Gesamtkostenangaben für eine Brennstoffzelle incl. Peripherie kann zumeist von einem Verhältnis von ca. 1/3 für den Stack und ca. 2/3 für die Peripherie ausgegangen werden. Die relativen Kostenanteile der peripheren Komponenten erhöhen sich tendenziell bei abnehmenden Herstellungskosten der Brennstoffzelle. Insbesondere bei Brennstoffzellen-Anlagen kleiner Leistung ist der Kostenanteil der peripheren Brenngassysteme höher als der für die eigentliche Brennstoffzelle.

Ein **Vergleich der Brennstoffzellen- mit konventionellen Technologien** kann über spezifische Stromgestehungskosten erfolgen. Tabelle 10 enthält einen Vergleich von Stromgestehungskosten von Braun- und Steinkohle-Kraftwerken, Gas- und Dampfturbinen-, Gasdieselmotor- und Brennstoffzellen-Heizkraftwerken. Bei diesem Vergleich wird von einer Reihe spezifischer Annahmen ausgegangen (die ansatzweise in der Tabellenfußnote wiedergegeben wurden), so daß hier im wesentlichen die erhaltenen **Größenordnungen** von Interesse sind. Der hier aufgeführte Prototyp eines Brennstoffzellen-HKW ist u.a. in einer Ausführung bei der HEAG-Versorgungs-AG installiert. Die spezifischen Kosten der "Hessischen Brennstoffzelle" beliefen sich beispielsweise im Jahre 1996 auf ca. 33 Pf/kWh (el) und umfassen Kapitaldienst und Rückstellungen mit 16,8 Pf/kWh (el), Instandhaltung, Bedienung und Elektrizitätsanschluß mit 10,4 Pf/kWh (el), Brennstoff (Erdgas) mit 9,5 Pf/kWh (el) sowie eine Gutschrift für Einnahmen aus dem Wärmeverkauf von 3,7 Pf/kWh (el). Diese Angaben gelten für eine elektrische Spitzenausgangsleistung von 177 kW und einer Benutzungsdauer von 6.050 h/a. Bei einer Verfügbarkeit von ca. 87 % hätte die Benutzungsdauer 1996 bei 7.660 h/a liegen können, so daß die spezifischen Kosten bei gleichbleibendem Wärmeverkauf auf 26,1 Pf/kWh (el) hätten gesenkt werden können (Brammer et al. 1997).

Zu erkennen ist, daß die Erzeugung elektrischer Energie durch die ersten kommerziell hergestellten PAFC-Anlagen noch nicht im Wettbewerb mit konventionellen Technologien bestehen kann. Jedoch ist anzumerken, daß an diesem Beispiel die ersten zwei Betriebsjahre einer Testanlage wiedergegeben

### 3. Ökonomische Aspekte

wurden. Gelänge im Zuge der weiteren Technologieentwicklung eine Halbierung der Gesamtinvestitionen, so würde die Brennstoffzelle sehr wohl mit einem Gasdieselmotor-HKW konkurrieren können (Ahn et al. 1996).

Tab. 10: Vergleich der Stromgestehungskosten unterschiedlicher Kraftwerke

<i>Art der spezifischen Kosten [DM/kWh](el)</i>	<i>Braunkohle-KW</i>	<i>Steinkohle-KW</i>	<i>Gas- und Dampfturbinen-HKW</i>	<i>Gasdieselmotor-HKW</i>	<i>Brennstoffzellen-HKW (Prototyp)</i>
Gesamtinvestitionen	3.200	2.200	1.600	4.500	10.350
Kapitaldienst	0,0422	0,0290	0,0224	0,0701	0,1364
Instandhaltung und Bedienung	0,0178	0,0127	0,0101	0,0396	0,0605
Brennstoff	0,0325	0,0346	0,0600	0,1091	0,0947
Emissionen <sup>1)</sup>	0,0209	0,0177	0,0088	0,0140	0,0108
Wärmegutschrift	0	0	-0,0082	-0,0272	-0,0128
Gesamtkosten	0,1134	0,0940	0,0931	0,2056	0,2896

KW = Kraftwerk; HKW = Heizkraftwerk; Das Brennstoffzellen-HKW enthält eine PAFC der Fa. ONSI des Typs PC 25. Die Investitionen für das Brennstoffzellen-HKW enthalten die Kosten für drei Austauschvorgänge der Brennstoffzelle. Bei dieser Wirtschaftlichkeitsberechnung wurden u.a. folgende Annahmen getroffen: Lebensdauer des Brennstoffzellen-Stapels (0,2 MW) 5 Jahre und der restlichen Komponenten 20 Jahre, Gasdieselmotor-HKW (0,2 MW) 15 Jahre, Gas- und Dampfturbinen-HKW (80 MW) 18 Jahre, Braunkohle-KW (800 MW) und Steinkohle-KW (700 MW) 20 Jahre. Als Wirkungsgrade wurden angenommen: Brennstoffzelle 38 %, Gasdieselmotor-HKW 33 %, Gas- und Dampfturbinen-KW 50 %, Steinkohle-KW 39 % und Braunkohle KW 40 %. Bei den Emissionen wurden massenspezifische externe Kosten berücksichtigt.

1) Die Einrechnung externer Kosten ist in der Praxis derzeit nicht üblich.

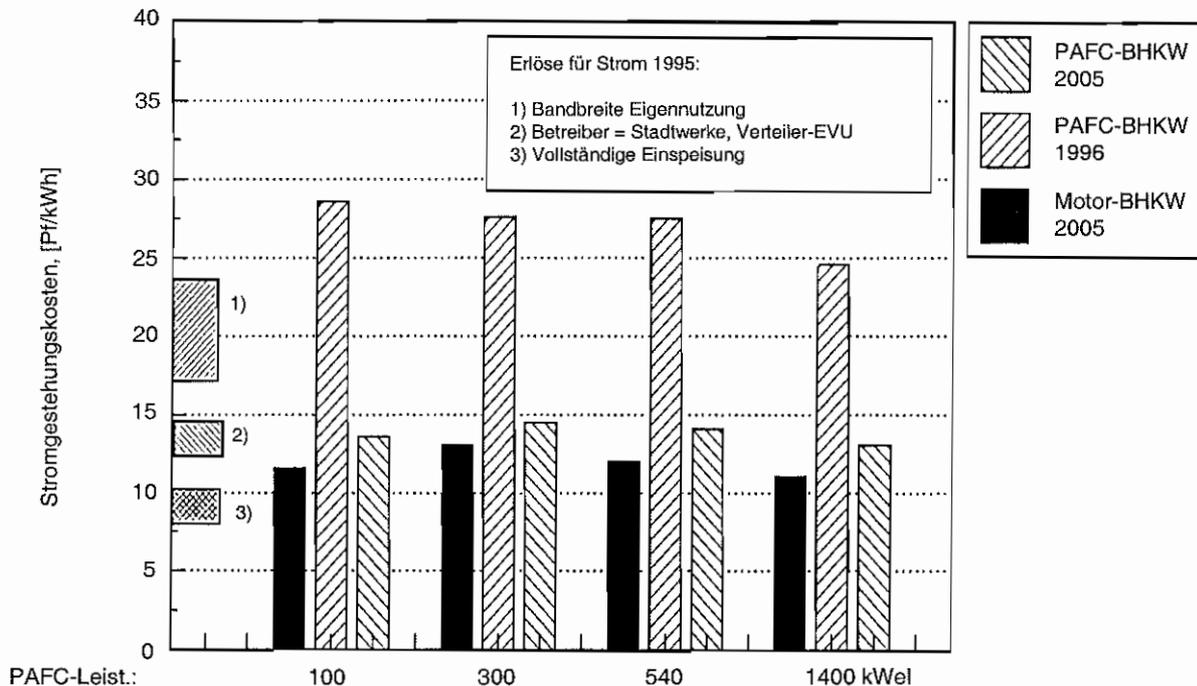
Quelle: Ahn et al. 1996, S. 16

Berechnungen in DLR-ITT (1997, S. 69) kommen zum Ergebnis, daß die Stromgestehungskosten von PAFC-BHKW-Anlagen (ebenfalls unter Berücksichtigung entsprechender Wärmegutschriften) derzeit zwischen 25 und 29 Pf/kWh liegen (Zinssatz 7 %; Abschreibung für das BHKW-Modul 15 a, für die Peripherie 20 a), also das rund Zweifache der Stromgestehungskosten vergleichbarer Motor-BHKW betragen (Abb. 7). Eine Abschätzung für 2005 (halbierte Investitionen, längerer Lebensdauer des Brennstoffzellen-Stacks und auf ein Drittel reduzierte Betriebs- und Wartungskosten) ergibt bei den gewählten

### III. Anwendungsspektrum

Annahmen, daß nur knapp eine Kostenannäherung (Differenz ca. 2 Pf/kWh (el)) an die ebenfalls weiterentwickelten Motor-BHKW erreicht werden könnte.

Abb. 7: Stromgestehungskosten heutiger und ausgereifter PAFC-BHKW und Vergleich mit weiterentwickelten Motor-BHKW sowie heutigen Stromerlösmöglichkeiten



Quelle: DLR-ITT 1997, S. 70

Insgesamt liegen Stromgestehungskosten von Brennstoffzellen, wie etwa die der PAFC, im Vergleich zu konventionellen Technologien derzeit noch signifikant höher. Anzumerken ist jedoch, daß für Brennstoffzellen noch keine Ergebnisse von Langzeitversuchen vorliegen, so daß in einer Kostenrechnung zumeist auf angenommene Standzeiten Bezug genommen wird. Positiv hingegen sollen bei Brennstoffzellen-Anlagen die Betriebskosten ausfallen; sie sollen bei PAFC-Kraftwerken (KWK-Anlagen) um 25 bis 40 % unter denen konventioneller Energielieferanten liegen (VDI 1997a).

Die spezifischen Kosten derzeit verfügbarer **PEMFC-Prototypen** liegen bei ca. 80.000 - 100.000 DM/kW (Weule 1995). Bei Stückzahlen von 8 - 10 sind, aufgrund von Verbesserungen der Fertigungstechnik, spezifische Kosten von 20.000 - 40.000 DM/kW möglich, was bei Kleinflotten mit Stückzahlen von

### 3. Ökonomische Aspekte

50 - 200 (evtl. bis 2003) eine Kostendegression auf 2.000 - 4.000 DM/kW bringen könnte. In Abhängigkeit von der weiteren Entwicklung der Stückzahlen wäre etwa bei 100.000 Stück eine Kostenreduktion auf 200 - 400 DM/kW möglich (evtl. 2010). Damit wäre ein Brennstoffzellen-Antrieb immer noch zwei- bis viermal teurer als ein Verbrennungsmotor heutiger Bauart.

**Kostensenkungen** sind somit für alle Brennstoffzellen für einen signifikanten Markteintritt vordringlich. Selbst der Preis für PAFC-Anlagen müßte für einen signifikanten Markteinstieg deutlich, etwa auf 1.000 US\$/kW, abgesenkt werden. Im mobilen Bereich könnten Brennstoffzellen-Systeme mit Kosten um 1.000 US\$/kW für größere Nutzfahrzeuge (Lokomotiven etc.) eventuell noch tolerierbar sein, für den Straßenverkehr (Pkw etc.) sind diese deutlich zu hoch. Hier hätten evtl. Brennstoffzellen mit Kosten von 200 - 300 US\$/kW für Fahrzeugsysteme von 20 - 50 kW eine Chance (Kordes/Simader 1997, S. 341).

Zu erkennen sind signifikante Unterschiede bei Kostendegressionsfaktoren zwischen stationären und mobilen Anwendungen. Die **Preiskonkurrenz** im Fahrzeugbereich von etablierten Technologien zur Brennstoffzelle ist deutlich härter als im stationären Bereich. Kostenangaben für die Herstellung konventioneller Pkw-Motoren (Otto-, Dieselmotor) liegen bei bis zu 25 - 35 US\$/kW (Information des DoE, nach Drenckhahn 1997), so daß für Brennstoffzellen hier Kostendegressionsfaktoren von bis zu einhundert auftreten, um in einen konkurrenzfähigen Kostenbereich von etwa 100 - 200 DM/kW zu kommen.

**Preisfaktoren** sind beispielsweise bei der PEMFC die Membran selbst sowie die Platin- bzw. Goldbeläge. Kosteneinsparpotentiale liegen in der Verbilligung verwendeter Materialien (Materialersatz bzw. deutlich geringere Aufbringungsmengen), der Vereinfachung der Produktionsschritte (Löten etc.) sowie einer Serienfertigung, wobei ein signifikanter Verbilligungseffekt erst ab einer Stückzahl von ca. 100.000/a eintritt (Drenckhahn 1997; Weule 1995). Kostensenkend würde sich bei der PEMFC beispielsweise eine geringere Platinbeladung der Membran von derzeit ca. 4 mg/cm<sup>2</sup> auf unter 0,15 mg/cm<sup>2</sup> auswirken. Durch eine feinere Verteilung der katalytisch aktiven Partikel auf der Membranoberfläche bleiben die elektrochemischen Eigenschaften bestehen. Auch lassen sich Werkstoffe auf Nickelbasis eventuell durch Eisenlegierungen ersetzen. Darüber hinaus sollten der Aufbau der Brennstoffzellen und die damit zusammenhängende Fertigung vereinfacht werden, um eine Serienproduktion zu erleichtern (VDI 1997a). Eine weitere wesentliche Einflußgröße für die Kosten des Brennstoffzellen-Stacks ist seine Stromdichte, welche umgekehrt proportional zur benötigten effektiven Querschnittsfläche der Zellen ist. Je höher die Stromdichte, desto geringer ist die benötigte effektive Querschnittsfläche der

### III. Anwendungsspektrum

Zellen, und desto geringer sind die Kosten hinsichtlich Material und Herstellung. Die höchsten Stromdichten sind mit einem Wasserstoff/Sauerstoffgemisch etwa mit AFC-, PEMFC- oder auch SOFC-Systemen erzielbar.

Kundenseitige Investitionen können neben einer Absenkung der Fertigungskosten auch durch Anschubfinanzierung des Verkaufes deutlich vermindert werden. Beispielsweise hat die amerikanische Regierung ein **Förderprogramm** (Teil des "Climate Change Action Plans" 1995 - 1997) beschlossen mit dem Ziel, eine signifikante Ausweitung der Brennstoffzellen-Herstellung in den USA zu fördern, so daß diese gegenüber traditionellen Energieerzeugungsanlagen wettbewerbsfähig werden. Ziel des Programms ist es, die Kosten der Brennstoffzellen-Anlagen für den Betreiber zu reduzieren (Förderung von 1.000 US\$/kW). In der Folge davon sollen das Produktionsvolumen wachsen und die Produktionskosten für die Anlage fallen. Dabei soll ein Kreislauf zunehmender Verkäufe und reduzierter Kosten in Gang gesetzt werden, um dann schrittweise, wenn das System wettbewerbsfähig ist, die Förderung zurückzuführen (Nurdin 1997).

## 4. Ökologische Aspekte

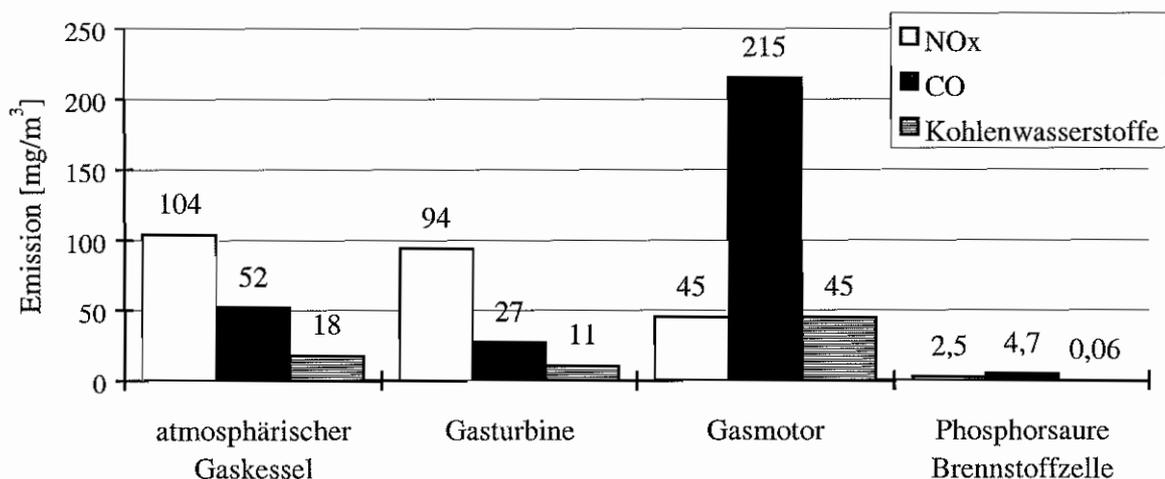
Brennstoffzellen selbst weisen neben einer hohen Effizienz geringe bis keine Schadstoffemissionen auf. Im folgenden soll der **lokale Emissionsvergleich** zu konventionellen Technologien im Vordergrund stehen. Für einen umfassenden Emissionsvergleich sind darüber hinaus Emissionen zu berücksichtigen, welche in vorgelagerten Prozessen, insbesondere bei der Brennstoffaufbereitung, entstehen. Für im **stationären Bereich** einsetzbare Brennstoffzellen zeigt Abbildung 8 exemplarisch Emissionsunterschiede von erdgasbetriebenen konventionellen Techniken im Vergleich zur phosphorsauren Brennstoffzelle auf. Im Vordergrund steht hierbei ein Einsatz dieser Brennstoffzelle in der dezentralen Energieversorgung in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK), wobei hier derzeit überwiegend Gasmotoren und Gasturbinen installiert sind.

Beim Einsatz einer phosphorsauren Brennstoffzelle in KWK-Anlagen sind minimale Werte für **NO<sub>x</sub>-**, **CO-** und **Kohlenwasserstoffemissionen** gegenüber denen zu erwarten, die ein Gas-BHKW erzeugt. Staub- und SO<sub>2</sub>-Emissionen sind auf beiden Seiten vernachlässigbar gering, da Erdgas in der Regel einen niedrigen Schwefelgehalt und minimalen Staubanteil aufweist. Bei einer umfassenden Bewertung der in obiger Abbildung dargestellten Emissionen sind zu-

#### 4. Ökologische Aspekte

sätzliche Aspekte zu berücksichtigen: Zum einen hat die Weiterentwicklung von Gasmotoren und Gasturbinen auch zum Ziel, Emissionen dieser Stromerzeugungstechniken weiter zu senken und damit eine deutliche Angleichung der Werte an die der Brennstoffzelle zu erreichen (Beckervordersandforth 1996), wobei sich hier Grenzen diesbezüglich abzeichnen.

Abb. 8: Vergleich luftgängiger Emissionen ausgewählter Stromerzeugungstechniken auf Erdgasbasis



Bezüge der Emissionswerte beim Gaskessel auf (Gemis) bzw. Blauer-Engel-Werte; beim Gasmotor auf TA-Luft mit  $\lambda=1$  und 3-Wege-Katalysator (nach FZ 1996); bei der Gasturbine auf Siemens, Typ V94.3A, bei der Brennstoffzelle auf Herstellerangaben<sup>26</sup> der Fa. ONSI, Typ 25A; Werte für Gasmotor, Gasturbine und Brennstoffzelle sind Betriebswerte und beziehen sich auf trockenes Abgas mit 5 % O<sub>2</sub>; Kohlenwasserstoffangaben ohne Methan.

Quelle: Eigene Zusammenstellung nach Tauber 1996 und Wagner/König 1997

Im Verkehr entstehen luftgängige Schadstoffe, etwa beim Ottomotor, vorwiegend lokal und können nur mit beträchtlichem Zusatzaufwand und auch das nur teilweise zurückgehalten werden. Im **mobilen Bereich** einsetzbare Brennstoffzellen zeichnen sich durch lokale Emissionsarmut bzw. -freiheit an Schadstoffen wie CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, und unverbrannten Kohlenwasserstoffen aus. Darüber hinaus sind diese Schadstoffe auch unter Einbeziehung der Treibstoffherstel-

26 Unter Praxisbedingungen wurden Emissionswerte der PAFC-Anlage (Fa. ONSI, Typ 25) beispielsweise bei der Ruhrgas AG in einer Versuchsanlage mit CO < 15 mg/m<sup>3</sup> und NO<sub>x</sub> < 5 mg/m<sup>3</sup> gemessen (Hünnekes 1997). Zu klären wären die genauen Bezugsbedingungen der Angaben in Abbildung 8 (mit/ohne Reformierung etc.).

### III. Anwendungsspektrum

lung um ein Mehrfaches geringer als bei Otto- oder Dieselmotoren. Exemplarisch sind in Tabelle 11 für einen Benzinmotor und einen Brennstoffzellen-Antrieb mit Methanol aus Erdgas Gesamtemissionen aufgeführt. Für den Benzinmotor gibt die derzeit geltende "EURO-2-Norm" Emissionswerte für Kohlenmonoxid (CO) und die Summe an Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>) und Kohlenwasserstoffen (HC) an; "EURO-3" und "EURO-4" stellen zukünftige Richtgrenzwerte dar.

Tab. 11: Schadstoffemissionen eines Benzinmotors und eines Brennstoffzellen-Methanol-Antriebes

	CO [mg/km]	NO <sub>x</sub> [mg/km]	HC [mg/km]
Benzinmotor			
– "EURO-2-Norm" <sup>1)</sup>	2.200	beide zusammen 500	
– "EURO-3" <sup>2)</sup>	1.500	140	170
– "EURO-4" <sup>2)</sup>	700	70	80
Brennstoffzellen-System <sup>3)</sup>	20	100	250

Quelle: 1) Richtlinie 1994; 2) Kraftfahrzeugsteueränderungsgesetz (KraftStÄndG 1997); 3) Ekdunge/Ra-berg 1996 (nach DLR-ITT 1997); Brennstoffzellen-System (40 kW) mit Methanol aus Erdgas betrieben

Bei der Systemauslegung der Brennstoffzelle, wie auch beim Abgaskatalysator eines Gasmotors, müssen verfahrenstechnische Grenzwerte von Verunreinigungen in den eingesetzten **Brenngasen** sicher eingehalten werden. Für diese spezifischen Details des Brennstoffzellen-Gesamtsystems liegen noch keine Aussagen vor. In erster Näherung kann auf Spezifikationen zulässiger Verunreinigungen von Katalysatorsystemen zurückgegriffen werden, wie sie für die Dampfreformierung und in der Petrochemie bei vergleichbaren Reaktionen üblich sind. Jedes System muß jedoch im Einzelfall entsprechend der Zusammensetzung der anfallenden Brenngase optimiert werden. Da bei Brennstoffzellen keine experimentellen Daten über zulässige Grenzwerte von Spurengasen und Katalysatorgiften in Brenngasen vorliegen, besteht hier erheblicher Forschungsbedarf (DLR-ITT 1997, S. 18).

Die eigentliche Brennstoffzellen-Reaktion, die Umsetzung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser, verläuft frei von Schadstoffemissionen. Jedoch ist die Erzeugung von Wasserstoff, der als Sekundärenergieträger einen Energie-

#### 4. *Ökologische Aspekte*

speicher darstellt, nicht frei von Schadstoffemissionen. So müssen beispielsweise bezüglich **CO<sub>2</sub>-Emissionen** die (fossilen) Energieträger berücksichtigt werden, welche zur Wasserstofferzeugung eingesetzt werden. Daher ergibt sich bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen in erster Näherung kein signifikanter Vorteil der Brennstoffzellen-Technologie, da bei der Erzeugung von Wasserstoff, etwa aus Erdgas, wie bei konventionellen Systemen, Kohlendioxid entsteht. Zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen sollten somit möglichst erneuerbare Energieträger (wie Photovoltaik, Wasserkraft, Windenergie) zur Wasserstofferzeugung eingesetzt werden. Durch technische Optimierung von Brennstoffzellen-Anlagen sind, aufgrund ihrer höheren Wirkungsgrade und damit vergleichsweise geringeren Erdgasverbräuche, geringere spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen möglich.

**Zusammenfassend** kann festgehalten werden, daß Brennstoffzellen eine **ökologisch hochinteressante Alternative** zu konventionellen Technologien darstellen. Bei der Emissionsbeurteilung im mobilen und stationären Bereich müssen jedoch auch vorgelagerte Prozesse, insbesondere die Brennstoffaufbereitung, mitberücksichtigt werden; eine Bilanzierung über die gesamte Kette ist noch Forschungsgegenstand. Auch eine Abschätzung des potentiellen Beitrages von Brennstoffzellen zum CO<sub>2</sub>-Ziel der Bundesregierung - die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland bis zum Jahr 2005 um 25 % gegenüber 1990 zu reduzieren - steht noch aus.



## IV. Zum Stand der internationalen Brennstoffzellen-Forschung

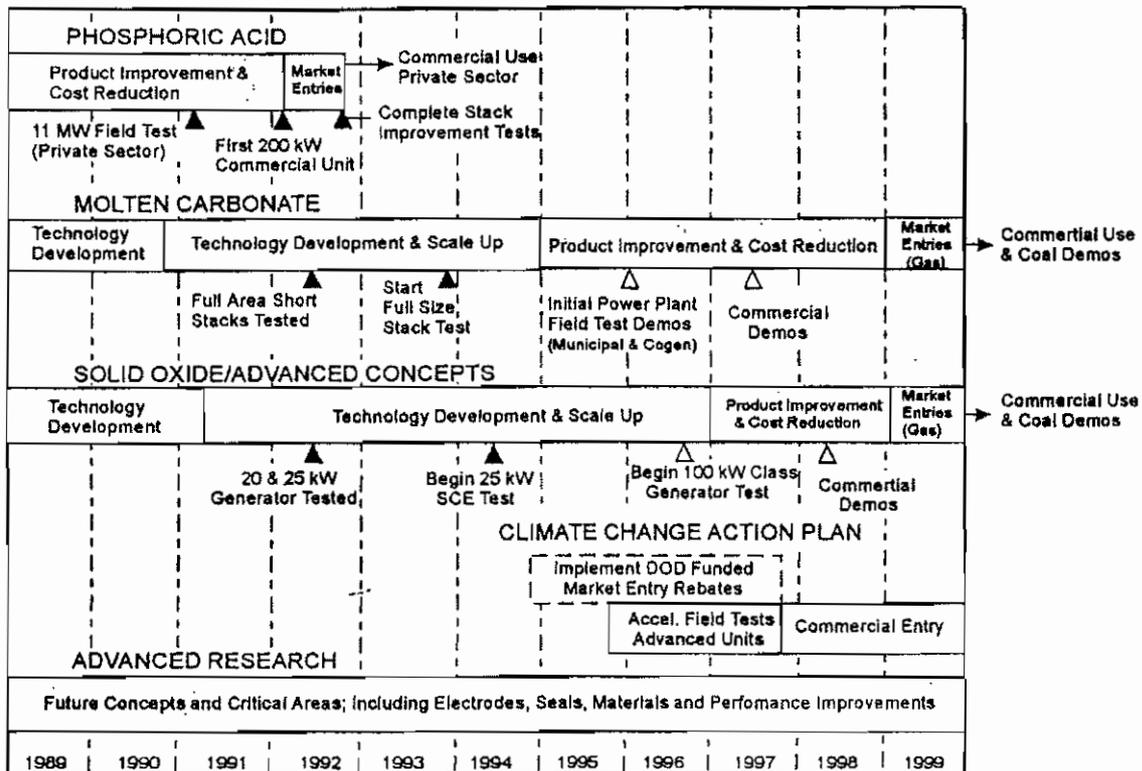
Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten von Brennstoffzellen wurden in den letzten Jahren weltweit zunehmend forciert, wobei der internationale Stand von Japan und Nordamerika dominiert wird. Ausgehend von Entwicklungen in den USA wurde nach einer gewissen Stagnation Anfang der achtziger Jahre in Japan ein langfristiges Entwicklungsprogramm für unterschiedliche Brennstoffzellen-Konzepte begonnen. Ausgangspunkt war ein von Toshiba (Japan) initiiertes Kooperationsabkommen mit United Technologies/International Fuel Cells (USA) auf dem Gebiet der phosphorsauren Brennstoffzellen, welches zur Gründung der Firma ONSI führte. Relativ früh wurde von der japanischen Regierung gemeinsam mit der Industrie die strategische umwelt- und energiepolitische Bedeutung von Brennstoffzellen und dezentralen Systemen in der Kraft-Wärme-Kopplung erkannt. In Folge dieser vom japanischen Ministry of International Trade and Industry (MITI) koordinierten FuE-Anstrengungen wurden in den USA und schließlich auch in verschiedenen Ländern Europas die eher marginalen Forschungsaktivitäten ausgebaut. Gleichzeitig wurden zunehmend internationale Kooperationen zwischen Industriepartnern begründet und erweitert (DLR 1997, S. 35). Exemplarisch ist ein Verbundvorhaben zwischen Ballard Power Systems Inc. (Vancouver, Kanada) und der Daimler Benz AG (Stuttgart, Deutschland) zu nennen, in dem für Weiterentwicklungen von Membran-Brennstoffzellen-Systemen für den Automobilssektor insgesamt ca. 450 Mio. CA\$ investiert werden sollen (Ballard 1997).

Im folgenden werden ausgewählte wesentliche Aktivitäten zu aktuellen Brennstoffzellen-Entwicklungen in Nordamerika, Japan und Europa dargestellt. Dabei aufgeführte Förderprogramme, Firmen sowie Institutionen stellen eine **repräsentative Auswahl** dar, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, einen **Überblick** über die Vielfältigkeit und den Stellenwert wesentlicher internationaler Brennstoffzellen-Aktivitäten zu geben.

## 1. Nordamerika

In den Vereinigten Staaten von Amerika und Kanada sind Hauptaktivitäten der Brennstoffzellen-Entwicklung sowie -Herstellung zu verzeichnen. Bei vielen Unternehmen werden Brennstoffzellen professionell und mit erheblichem personellen Aufwand weiterentwickelt, wobei der finanzielle Aufwand überwiegend durch staatliche Förderung oder durch Aufträge interessierter Anwender gedeckt wird (Jaerschky/Weinzierl 1997). Es gibt zahlreiche staatliche Programme, wie die "Clean Air Act Amendments" (CAAA) in den USA, welche einen Rahmen für Maßnahmen zur Emissionsminderung etwa im Verkehr oder in der Energieerzeugung bilden. Weiterhin gibt es spezielle Brennstoffzellen-Programme, wie in den USA das "Joint DoD/DoE Fuel Cell Program",<sup>27</sup> in denen - vor dem Hintergrund der Reduzierung von Treibhausgasemissionen und damit einer effizienten Nutzung fossiler Brennstoffe - eine Beschleunigung der Kommerzialisierung von Brennstoffzellen, etwa der PAFC, verankert ist.

Abb. 9: Brennstoffzellen-Programm des Dep. of Energy (DoE) in den USA



Quelle: Kordesch/Simader 1996, S. 346

27 Das Programm wird vom "Department of Defense" (DoD) gesponsert und vom "Department of Energy" (DoE) gemanagt (Hooie/Manilla 1996).

## 1. Nordamerika

Daneben sind auch spezielle Programme für den Verkehrsbereich vorhanden, etwa das DoD-Programm "Fuel Cells in Transportation", welches zum Ziel hat, eine technologische Basis für kosteneffiziente brennstoffzellengetriebene Fahrzeuge zu schaffen (Brogan 1995). Somit sind Forschungsschwerpunkte für terrestrische Anwendungen zunehmend bei der PEMFC sowie den Hochtemperatur-Brennstoffzellen MCFC und SOFC zu sehen. Die PAFC wird als am ehesten technologisch ausgreift betrachtet und nur noch in ihrer kommerziellen Verbreitung gefördert. Einen Überblick über das Brennstoffzellen-Programm des US-DoE gibt Abbildung 9.

Tab. 12: Ausgewählte Aktivitäten in Nordamerika

	<i>Ballard</i>	<i>IFC/ONSI</i>	<i>ERC</i>	<i>Westinghouse</i>
Zelltyp	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Beschreibung	dünne Platten	dünne Platten	dünne Platten	fingerdicke Rohre
Betriebstemperatur [°C]	80	200	650	800 - 1.000
Brennstoff	H <sub>2</sub> (mit Reform- er Erdgas und Methanol)	H <sub>2</sub> (mit Reform- er Erdgas und Methanol)	H <sub>2</sub> , CO, Erd- gas, Kohlen- wasserstoffgase	H <sub>2</sub> , CO, Erdgas, Kohlenwasserstoff- gase
derzeitiger Stand	250-kW-Demon- strationsanlage wird gebaut	Serienfertigung 200 kW; PC 25 in Betrieb	2-MW-Prototyp (außer Betrieb)	100-kW-Prototyp im Bau
erwartete Kosten bei Serienferti- gung [DM/kW] <sup>1)</sup>	2.200	2.200	2.200	1.500
Wirkungsgrad [%]	50 bei H <sub>2</sub> 40 bei Erdgas	50 bei H <sub>2</sub> < 40 bei Erdgas	50, > 50 bei nach- geschalteter Dampfturbine	50, > 60 bei nachge- schalteter Gastur- bine
Anwendungs- schwerpunkte	Verkehr; BHKW	Schientrieb- wagen, Schiffs- antriebe, BHKW	Kraftwerke	Kleinkraftwerke, Kraftwerke, BHKW

1) vermutlich erwartete Kosten bei Fertigung mittelgroßer Serien

Quelle: Jaerschky/Weinzierl 1997, S. 26 (geändert)

#### IV. Zum Stand der internationalen Brennstoffzellen-Forschung

In Nordamerika sind eine Reihe bekannter Firmen und Institutionen ansässig, welche auf dem Gebiet der Brennstoffzellen-Technologie tätig sind. Dazu gehören u.a. Ballard, Epri (Electric Power Research Institute),<sup>28</sup> Westinghouse, International Fuel Cells (IFC/ONSI) und ERC (Energy Research Corporation), wobei die Brennstoffzellen-Technologie mit verschiedenen Schwerpunkten weiterentwickelt wird. Tabelle 12 gibt einen Überblick über wesentliche Besonderheiten ausgewählter Konzepte.

Im folgenden werden ausgewählte Aktivitäten in Nordamerika zu einzelnen Brennstoffzellen-Systemen beschrieben:

##### *Alkalische Brennstoffzelle (AFC)*

AFC-Anlagen stehen nicht im Vordergrund der zivilen Forschung; sie werden ausschließlich für die NASA produziert und von staatlicher Seite nicht mehr gefördert. So entwickelt und produziert die "International Fuel Cell Corporation" (IFC) AFC-Anlagen für die bemannte Raumfahrt. Beispielsweise enthält der Space Shuttle drei 12-kW-Anlagen, deren Wirkungsgrad bei ca. 70 % liegt (Kordes/Simader 1996, S. 349).

##### *Membran-Brennstoffzelle (PEMFC)*

International gesehen, sind auf dem Gebiet der Membrantechnik bei mobilen Anwendungen die USA und Kanada führend. Ein wesentliches Projekt, mit einem Umfang von 14 Mio. US\$, führt General Motors in Kooperation mit Ballard, Dow Chemical und Los Alamos National Laboratory durch unter maßgeblicher Förderung vom US-Department of Energy. Das Gesamtprojekt hat eine Laufzeit von sieben Jahren (1990 - 1997) und zielt auf den Aufbau einer Brennstoffzellen-Testanlage für Fahrzeuge. Als Treibstoff wird Methanol eingesetzt, welcher im Fahrzeug in einem kleinen, speziell entwickelten und auf typische Fahrzyklen abgestimmten Reformier zu Wasserstoff umgesetzt wird (Ledjeff 1993, S. 224).

In Kanada ist die Entwicklung der PEMFC insbesondere von der Fa. Ballard<sup>29</sup> forciert worden. Hier werden Brennstoffzellen-Systeme für den

---

28 EPRI ist ein von amerikanischen Energieversorgungsunternehmen finanziertes Forschungsinstitut und Koordinierungszentrum.

29 Bei der Fa. Ballard Power Systems Inc. arbeiten ca. 200 Personen auf dem Gebiet der Brennstoffzellen (Entwicklung und Herstellung) (Jaerschky/Weinzierl 1997).

## 1. Nordamerika

Wasserstoff/Luft sowie Methanol/Luft-Betrieb für den mobilen und stationären Einsatz entwickelt. Im Test befinden sich z.Z. Brennstoffzellen-Busse im Stadtverkehr von Vancouver sowie in Chicago mit 60 Sitzplätzen und einer Reichweite bis 280 km (DLR-ITT 1997, S. 37); Brennstoff ist Wasserstoff. Entwicklungsziel ist ein Buskonzept für ca. 75 Passagiere mit einer Reichweite von 400 - 560 km, welches bis 1999 kommerziell verfügbar sein soll (Beck 1996; Kabs 1997). Weiterhin zu nennen sind hier die Kooperation von Ballard mit Daimler-Benz (Kap. IV) sowie die Markteinführung von ZEV (Kap. III.2). Parallel zu Aktivitäten im mobilen wurde im stationären Bereich von Ballard u.a. ein 250 kW Blockheizkraftwerk installiert.

Darüber hinaus gibt es in Nordamerika noch eine Reihe weiterer Firmen und Institutionen, die PEMFC-Anlagen entwickeln bzw. anbieten etwa für Kleinstanwendungen.

### *Phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC)*

Der einzige kommerzielle Hersteller von PAFC-Anlagen, die auch weltweit vertrieben werden,<sup>30</sup> ist die Fa. ONSI. Die Fa. ONSI ist eine Tochter von International Fuel Cells<sup>31</sup> (IFC), Toshiba und Ansaldo für die Produktion und die Weiterentwicklung der 200-kW-Anlage (PC 25), die bereits teilautomatisiert gefertigt und weltweit vertrieben wird.<sup>32</sup> Die Fertigungskapazität für die nächsten Jahre ist zum Teil bereits ausverkauft. Die in Betrieb befindlichen Brennstoffzellen-Anlagen (derzeit 97 Stück) werden mit einer Satelliteninformationsübertragung überwacht. Einige derzeit installierte ONSI-Anlagen der PC 25 sind bereits sechs Monate unterbrechungsfrei in Betrieb gewesen (Jaerschky/Weinzierl 1997).

Die PAFC-Technologie wird vom US-Department of Energy als die technisch ausgereifteste betrachtet, wobei deren Entwicklung inklusive Pilotanlagen mit bisher ca. 300 Mio. US\$ gefördert wurde (Kordes/Simader 1996, S. 2). Seit Anfang der 90er Jahre wird dabei zunehmend die kommerzielle Verbreitung von PAFC-Anlagen gefördert. Für den Zeitraum von 1995 bis 1997 wurde von der US-amerikanischen Regierung ein Förderprogramm in Höhe von

---

30 Daneben werden auch von einer japanischen Firma PAFC-Anlagen hergestellt, die zumeist national installiert werden.

31 Für die Brennstoffzellen-Entwicklung (PAFC, AFC, PEMFC) wurde von IFC bisher insgesamt 1 Mrd. US\$ ausgegeben (Jaerschky/Weinzierl 1997).

32 U.a. sind sämtliche in der Bundesrepublik bei Energieversorgungsunternehmen installierte PAFC-Anlagen (bisher sieben) von der Fa. ONSI.

#### IV. Zum Stand der internationalen Brennstoffzellen-Forschung

29 Mio. US\$ bewilligt, welches die Kosten der Anlage auf ein Drittel der Gesamtkosten bzw. auf 1.000 US\$/kW beschränken soll. In Folge davon wächst das Produktionsvolumen, die Kosten für die Anlage gehen zurück und somit reduziert sich auch die finanzielle Förderung. Dadurch soll das System wettbewerbsfähig und ein Kreislauf zunehmender Verkäufe und reduzierter Kosten in Gang gesetzt werden (Nurdin 1997).

##### *Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC)*

Die MCFC wird als eine vielversprechende Technologie zur Strom- und Wärmeversorgung vom US-Department of Energy intensiv gefördert. An der Weiterentwicklung dieses Brennstoffzellen-Typs, bei dem durch Prozeßwärmeauskoppelung höhere Wirkungsgrade als bei den Niedrig- und Mitteltemperatur-Brennstoffzellen erreicht werden können, sind insbesondere Energy Research Corporation (ERC), Molten Carbonate Power Corp. (M-C Power) und International Fuel Cells (IFC) beteiligt. Energy Research Corporation (ERC) hat u.a. eine 2-MW-Demonstrationsanlage in Santa Clara in Kalifornien<sup>33</sup> gebaut. Entwicklungsziel ist ein marktfähiges, modular aufgebautes MCFC-System zur Wärme- und Strombereitstellung im Leistungsbereich 120 kW bis 2 MW. Derzeit ist ERC dabei, Produktionskapazitäten für MCFC-Anlagen in den USA aufzubauen. Darüber hinaus gibt es in Zusammenarbeit mit der American Public Power Association (APPA) Pläne zur Kommerzialisierung von MCFC-Anlagen für 1997 (DLR-ITT 1997, S. 37; Jaerschky/Weinzierl 1997; Kordesch/ Simader 1996, S. 345).

##### *Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)*

In den USA sind beide Entwicklungslinien der oxidkeramischen Brennstoffzellen - das Flachzellen- als auch das Röhrenkonzept - vertreten. Marktführer für das Röhrenkonzept ist weltweit die Fa. Westinghouse (USA).<sup>34</sup> Diese hat 20 und 25-kW-Module im Versuchsbetrieb gefahren und möchte eine erdgasgefeuerte 100-kW-Anlage im Laufe des Jahres 1997 in den Niederlanden in Betrieb

---

33 Die MCFC-Anlage in Santa Clara wurde im Frühjahr 1996 in Betrieb genommen und ist seit dem Frühjahr 1997 außer Betrieb. Sie ist zumeist, aufgrund technischer Probleme, mit Teillast gefahren worden (Kabs 1997). Der verfahrenstechnische Aufwand für die peripheren Komponenten der Brennstoffzelle war relativ hoch (Jaerschky/Weinzierl 1997).

34 Bei der Fa. Westinghouse arbeiten ca. 100 Personen im "Science Technology Center" auf dem Gebiet der Brennstoffzelle (Jaerschky/Weinzierl 1997, S. 28).

nehmen.<sup>35</sup> Danach soll ein System für druckaufgeladenen Betrieb gebaut werden, wobei hier zur weiteren Erhöhung des Wirkungsgrades eine Gasturbine nachgeschaltet werden kann. Der zukünftige Einsatzbereich für ein solches System wird zwischen 10 und 100 MW gesehen (Jaerschky/Weinzierl 1997). Zahlreiche Institute befassen sich in den USA auch mit dem Flachzellenkonzept. So ist ein von EPRI koordiniertes Untersuchungsprogramm auf Dünnschichtkonzepte und Materialien ausgelegt, die eine Erniedrigung der Betriebstemperatur der SOFC-Brennstoffzelle auf ca. 800°C zum Ziel hat (Bakker 1996 in DLR-ITT 1997, S. 37). Der Umfang der staatlichen Förderung für SOFC-Anlagen ist in etwa vergleichbar mit dem für MCFC-Anlagen. SOFC-Anlagen werden in den USA primär für kleinere kommerzielle und industrielle Anwendungen entwickelt (Williams 1997).

### **Fazit**

In Nordamerika ist durch einen deregulierten Strom- und Wärmemarkt, eine flächenmäßig weit ausgedehnte Versorgungsstruktur - mit einem hohen Bedarf an wirtschaftlicher, dezentraler Energiebereitstellung - und nicht zuletzt durch erhöhten Handlungsbedarf in ozonbelasteten Ballungszentren ein verstärktes Interesse an alternativen, effizienten und umweltschonenden Technologien vorhanden. Das anhaltende Interesse spiegelt sich in einer jahrzehntelangen, kontinuierlichen und mit relativ hohem finanziellen Einsatz geförderten Entwicklung von Brennstoffzellen-Systemen wider. Als ein Ergebnis dieser Förderung werden PAFC-Anlagen fast ausschließlich in den USA (bereits in halbautomatischer Fertigung) hergestellt und weltweit vertrieben. Die staatliche Förderung betrifft auch die Kommerzialisierung der PAFC. Daneben gibt es in Amerika ein eigenes Konzept für die SOFC (Röhrenkonzept), mit welchem die von diesem Typ derzeit größte Pilotanlage realisiert wird. Darüber hinaus werden in Kanada PEMFC entwickelt, die bereits in einigen Fahrzeug-Prototypen verkehrstauglich eingebaut sind.

---

35 Die 100-kW-SOFC-Anlage in den Niederlanden soll gemeinsam mit fünf holländischen und einem dänischen EVU betrieben werden.

## 2. Japan

In Japan findet sich neben Nordamerika ein weiterer Hauptschwerpunkt in der Brennstoffzellen-Forschung. Strategischer Hintergrund war hier die Stabilisierung bzw. Reduzierung des Importbedarfes an fossilen Energieträgern. Darüber hinaus sind die Stromkosten in Japan traditionell hoch (etwa doppelt so hoch wie in Deutschland, nahezu dreimal höher als in Nordamerika). Diese Energiekostensituation förderte die frühzeitige Entwicklung energiesparender Verfahrenstechnologien und effizienter Umwandlungstechniken. Gleichzeitig sieht die japanische Industrie, infolge des wachsenden Bedarfs an effizienter und umweltfreundlicher Stromerzeugung in Asien und zahlreichen Schwellenländern, einen langfristigen Exportmarkt für diese Technologien (DLR-ITT 1997, S. 36).

Den entscheidenden Anstoß für die Entwicklung eigener Brennstoffzellen-Technologien erhielt die japanische Industrie durch staatliche Projekte der Agency of Industrial Science and Technology (AIST) und des Ministry of International Trade and Industry (MITI). Mit Projekten, wie "Sunshine" (1974 - 1993), "Moonlight" (1979 - 1993) und "New Sunshine" (1993 - dato), verfolgte die japanische Regierung auf breiter Basis u.a. das Ziel, durch die Entwicklung neuer, effizienter Energietechnologien die einseitige Abhängigkeit von importierten Mineralölprodukten zu reduzieren. Aktuelle Aktivitäten zur Entwicklung der Brennstoffzellen-Technologie werden von der New Energy and Industrial Technology Development Organisation<sup>36</sup> (NEDO) koordiniert, deren Zeitplan in Abbildung 10 dargestellt ist. Das Budget von staatlicher Seite für die Brennstoffzellen-Entwicklung betrug für das Jahr 1994 ca. 50 Mio. US\$. Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der japanischen Elektrizitätswirtschaft betreffend Brennstoffzellen werden in Unternehmensregie durchgeführt sowie in Zusammenarbeit mit dem Central Research Institute of Electric Power Industry<sup>37</sup> (Crieipi) abgewickelt (FCDIC 1996; Kabs 1997; Kordes/Simader 1996, S. 351; Peter 1996; Sasaki/Takasu 1997).

Abbildung 10 zeigt verschiedene Entwicklungsstufen und Schwerpunkte für die vier derzeit noch geförderten Brennstoffzellen-Systeme. Am weitesten entwickelt ist die phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC), welche sich in der Phase der Kommerzialisierung befindet; hier sind Anlagen mit bis zu 11 MW installiert worden. Der zweite Schwerpunkt liegt auf den Hochtemperatur-Brenn-

---

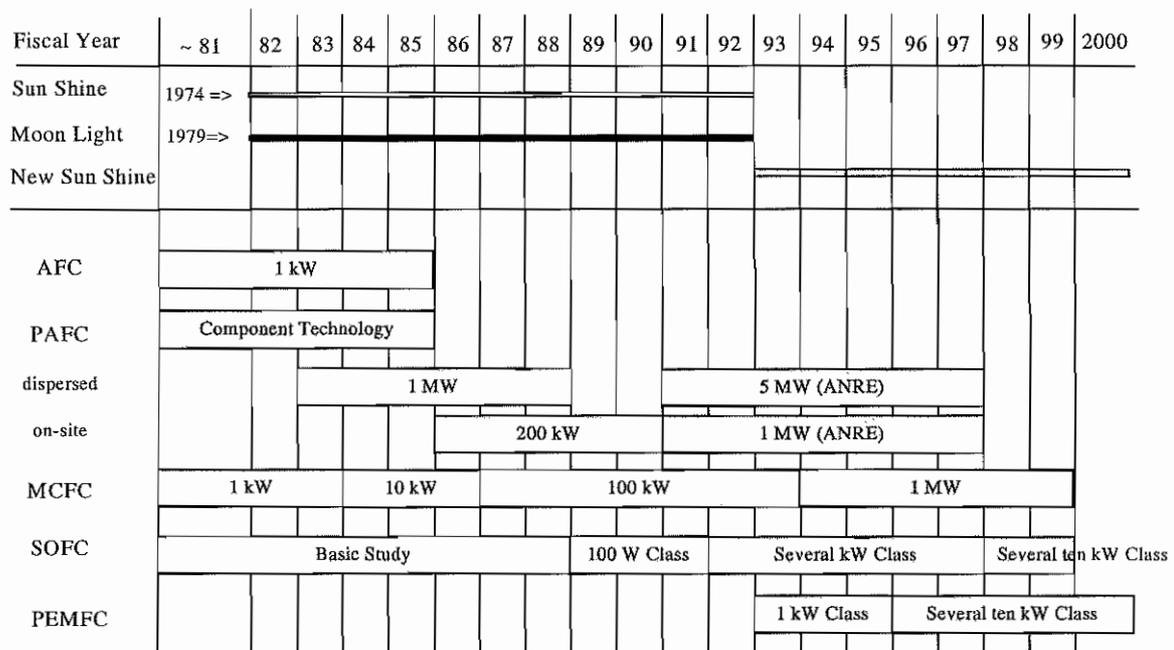
36 NEDO ist ein Projektträger für MITI; vergleichbar etwa mit BEO für das BMBF in Deutschland.

37 Das Crieipi kann als japanisches Gegenstück zum amerikanischen Epri angesehen werden.

## 2. Japan

stoffzellen. Hier wurde der Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC) eine höhere Priorität eingeräumt, so daß bereits eine Pilotanlage mit 1 MW Leistung gebaut wird. Oxidkeramische Brennstoffzellen befinden sich noch in der Entwicklung, hier wird an einer 10-kW-Pilotanlage gearbeitet. Die "Renaissance" der Membran-Brennstoffzelle (PEMFC) in den 90ern hat auch in Japan stattgefunden; Systeme im 10-kW-Bereich sind Entwicklungsziel; momentan sind 1-kW-Anlagen verfügbar. Anzumerken ist, daß die Arbeiten zur Brennstoffzellen-Technologie eingebettet sind u.a. in FuE-Arbeiten zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft.<sup>38</sup> Im folgenden wird auf einzelne Brennstoffzellen-Systeme eingegangen.

Abb. 10: NEDO-Zeitplan zur Entwicklung von Brennstoffzellen-Technologien in Japan



Quelle: NEDO 1996; Sasaki 1997

38 Für den Aufbau eines weltweiten Netzwerkes zur Gewinnung, Lieferung und Anwendung erneuerbarer Energien wurde ein Programm zum Aufbau eines Welt-Energie-Netzwerkes, sog. "We-Net", gegründet. Hierbei wird u.a. die Gewinnung und der Transport von Wasserstoff untersucht, der etwa in Wasserstoffturbinen, als Treibstoff im Verkehr oder als Stadtgas eingesetzt werden kann (Müller 1997; Müller/Friedl 1996).

#### IV. Zum Stand der internationalen Brennstoffzellen-Forschung

##### *Alkalische Brennstoffzelle (AFC)*

Alkalische Brennstoffzellen-Systeme werden nicht mehr staatlich gefördert (FCDIC 1996) und sind deshalb nicht in Abbildung 10 aufgeführt. Die Förderung dieser Systeme wurde etwa 1985 eingestellt. Sie werden nur noch für Spezialzwecke angefertigt (Drenckhahn 1997).

##### *Membran-Brennstoffzelle (PEMFC)*

Die Entwicklung der Membran-Brennstoffzellen befindet sich, im Vergleich zu Arbeiten in Nordamerika, noch eher am Anfang (Kap. IV.1). Bisher wurden in Japan 1-kW-Module im Wasserstoff/Luft-Betrieb<sup>39</sup> entwickelt. Die PEMFC soll nun intensiver gefördert werden, wobei Entwicklungsziel der Bau größerer Einheiten mit mehreren kW Leistung für Hausheizungen und Fahrzeuge ist. Im Transportbereich soll dabei auf einen Methanol/Luft-Betrieb im 10-kW-Leistungsbereich erweitert werden (FCDIC 1996, S. 126 ff.).

##### *Phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC)*

Bereits Ende der siebziger, Anfang der achtziger Jahre haben Toshiba, Fuji Electric u.a. damit begonnen, aufbauend auf amerikanischen Patenten, PAFC-Anlagen für die kommerzielle Stromversorgung zu entwickeln (50- bis 200-kW-Klasse). Die ersten Anlagen haben 1982 den Betrieb aufgenommen. Größere Anlagen in der MW-Klasse folgten, wie etwa eine 4,5-MW-<sup>40</sup> sowie eine 11-MW-Anlage<sup>41</sup> von TEPCO (Tokyo Electric Power Corporation); letztere Anlage stellt bisher die weltweit größte ihrer Art dar. Bis Ende 1994 sind von japanischen EVU über 60 Anlagen<sup>42</sup> unterschiedlicher Leistung getestet worden. Rund die Hälfte dieser Anlagen hat jedoch ihren Demonstrationsbetrieb wieder beendet. Mit dem Ziel, bis März 1997 1-MW-Anlagen für Objektversorgungen (Normaldruckanlagen) und 5-MW-Anlagen (druckbetriebene Anlagen) als Kraftwerkseinheit zu entwickeln, gründeten japanische EVU und Gasversorgungsunternehmen die PAFC-Technology Research Association (PAFC-

---

39 Firmen, die sich mit der Entwicklung von PEMFC-Systemen befassen, sind u.a. Toshiba Corporation, SANYO Electric Co. Ltd. und Mitsubishi Electric Corporation.

40 Die 4,5-MW-Anlage war 1983-1985 in Betrieb.

41 Die 11-MW-Anlage ist 1990 in Betrieb gegangen und in der Zwischenzeit abgeschaltet worden.

42 NEDO veröffentlichte hingegen, daß im März 1994 87 PAFC-Anlagen in Japan in Betrieb waren mit einer Gesamtleistung von über 20 MW (Kordes/Simader 1996, S. 349; nach Homma 1994).

## 2. Japan

TRA). Das Entwicklungsprogramm umfaßt ein finanzielles Volumen von 100 Mio. US\$, zu dem die öffentliche Hand 50 % beiträgt. Als Planungswert wird zum Jahr 2010 von einer installierten elektrischen Leistung von 10 GW ausgegangen (Anahara 1995; FCDIC 1997; Peter 1996).

### *Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC)*

Bei den Hochtemperatur-Brennstoffzellen wurde die MCFC länger und intensiver gefördert als die SOFC (bisher flossen ca. 95 % der finanziellen Zuwendungen bei Hochtemperatur-Brennstoffzellen in die MCFC und ca. 5 % in die SOFC) (Drenckhahn 1997); dies ändert sich jedoch zugunsten der SOFC, die verfahrenstechnische Vereinfachungen ermöglicht. Systematische Entwicklungsarbeiten wurden durch das "Moonlight-Program" initiiert. Begonnen wurde mit der Entwicklung einer 10-kW-Zelle; ab 1987 wurde an 100-kW-Zellen gearbeitet (jeweils mit externer Reformierung). Zur Bündelung der Kräfte hat die japanische Herstellerindustrie 1988 die MCFC-Technology Research Association (MCFC-TRA) gegründet. Ziel ist die Entwicklung einer 1 MW-Anlage mit externer Reformierung bis zum Frühjahr 1998. Daneben werden in der Industrie auch Arbeiten zur internen Reformierung durchgeführt (Peter 1996).

### *Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)*

Nur ein geringer Teil der staatlichen Förderung wurde für die Entwicklung der SOFC eingesetzt (Drenckhahn 1997). Somit steht die oxidkeramische Brennstoffzelle in ihrem Entwicklungshorizont der MCFC-Technik deutlich nach, wobei in letzter Zeit Forschungsarbeiten an der SOFC intensiviert wurden. Die japanischen Entwicklungen berücksichtigen bei der SOFC sowohl das Röhren- als auch das Flachzellendesign. Entwicklungen begannen zumeist als Gemeinschaftsprojekte.<sup>43</sup> Entwicklungsziele sind u.a. die Errichtung einer 10 kW-Anlage (atmosphärisch) sowie einer 1 kW-Anlage (druckbetrieben) (Peter 1996; Sasaki/Takasu 1997).

---

43 So wurde u.a. eine 35-W-SOFC im Flachzellenkonzept als Gemeinschaftsprojekt der Firmen TEPCO und Mitsubishi sowie Electric Power Development Company (EPDC) entwickelt. An dem Röhrenkonzept arbeiten Kansai Electric Power zusammen mit der amerikanischen Firma Westinghouse, mit dem Ziel, die 25-kW-Zelle weiterzuentwickeln (Peter 1996).

## **Fazit**

In Japan haben in erster Linie die direkte Abhängigkeit von Brennstoffimporten und im internationalen Vergleich sehr hohe Strompreise zu einer intensiven und kontinuierlichen Entwicklung energiesparender Technologien geführt. Die Brennstoffzellen-Technologie spielt dabei eine zentrale Rolle, was in verschiedenen nationalen Rahmenprogrammen dokumentiert ist. Insbesondere werden mit neueren Entwicklungen etwa im Hochtemperaturbereich (MCFC, SOFC) großkraftwerkstechnische Anwendungen anvisiert; dokumentiert auch dadurch, daß die weltweit leistungsmäßig größten, stationären Brennstoffzellen (PAFC) zuerst in Japan installiert wurden. Neben zentralen spielen aufgrund der Ausdehnung Japans auch dezentrale stationäre Anwendungen eine wesentliche Rolle. PAFC-Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung werden partiell auch in Japan hergestellt, jedoch zumeist im nationalen Markt eingesetzt. Im Fahrzeugbereich sind die laufenden Entwicklungen im Vergleich zu Amerika bisher weniger intensiv verfolgt worden. Derzeit wird hierbei besonders ein Methanolbetrieb favorisiert.

Bei den beiden Hochtemperatur- sowie bei der Membran-Brennstoffzelle gibt es eine Reihe von Kooperationen von japanischen mit nordamerikanischen Firmen. Zwecks Bündelung einheimischer Forschungskapazitäten wurden in Japan für phosphorsaure und Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen finanzstarke Fördervereinigungen gegründet.

## **3. Europa**

Die Brennstoffzellen-Entwicklung in Europa begann in den 60er Jahren mit einer Vielzahl von Programmen insbesondere bezüglich AFC (Belgien, Frankreich, Deutschland) aber auch im Hochtemperaturbereich mit MCFC (Niederlande) und SOFC (Deutschland). Sämtliche Aktivitäten, mit Ausnahme der für AFC (Belgien, Deutschland), liefen etwa bis 1976 aus. Das Interesse an Brennstoffzellen nahm in den 80er Jahren wieder zu. So wurde etwa 1985 seitens der EC das "JOULE"-Programm aufgelegt, welches Elemente zur Brennstoffzellen-Entwicklung enthielt. Zu diesem Zeitpunkt lagen europäische Forschungsarbeiten jedoch bereits deutlich hinter nordamerikanischen und japanischen Entwicklungen zurück (Huynh 1995; Ponthieu 1997b).

### 3. Europa

Aktivitäten auf dem Gebiet der Brennstoffzellen-Forschung sind in den einzelnen europäischen Ländern unterschiedlich ausgeprägt. Diese werden seitens der EU als auch im Rahmen nationaler Programme gefördert. In Westeuropa sind Brennstoffzellen-Aktivitäten besonders ausgeprägt in den Niederlanden, der Schweiz, in Italien, in England sowie in Deutschland; dazu gekommen sind in den letzten Jahren u.a. auch Dänemark, Frankreich sowie Schweden. Die folgende Ausführungen behandeln sowohl länderübergreifende als auch nationale Aktivitäten ausgewählter Länder.

#### 3.1 Länderübergreifende Aktivitäten

Zu den hier aufgeführten länderübergreifenden Aktivitäten gehören die der Europäischen Kommission sowie der Internationalen Energieagentur.

##### 3.1.1 Europäische Kommission (EC)

Derzeit läuft das "Fourth Frame Work Programme - FP 4" der EC (1994 - 1998), welches einen Rahmen für EC-finanzierte Forschungsaktivitäten darstellt. Für Brennstoffzellen wurde speziell ein Strategiepapier (European Commission 1995) erstellt, welches einen Überblick über den europäischen Stand der Brennstoffzellen-Technologie gibt und für den Zeitraum 1995 bis 2005 Zieloptionen für deren Weiterentwicklung (Kosten, Standzeiten etc.) zusammenfaßt. Hintergrund dieses Strategiepapiers, welches sich derzeit in einer grundlegenden Überarbeitung befindet (Ponthieu 1997a), ist die Koordinierung europäischer und nationaler Programme, um Vorteile europäischer Aktivitäten herauszustellen und weitere Prioritäten zu setzen.

Die Förderung von Brennstoffzellen seitens der EC wird in verschiedenen Programmen, wie JOULE und BRITE-EURAM (DG XII) und Thermie (DG XVII), koordiniert. Schwerpunkte sind bei JOULE die Grundlagenforschung für Brennstoffzellen-Stacks und -Systeme sowie die Herstellung von Prototypen (ca. 22 MECU für PEMFC, PAFC, MCFC und SOFC in den Jahren 1992 - 1994), bei BRITE-EURAM die Entwicklung von Herstellungsverfahren für Brennstoffzellen-Systeme und Materialien (ca. 7 MECU für SOFC) sowie bei Thermie die Demonstration und Implementierung neuer Technologien (ca. 7,3 MECU für PAFC und MCFC) (European Commission 1995; Ponthieu 1997b).

Seitens der EC werden zumeist etwa 50 % der anfallenden FuE-Kosten übernommen. Für den Zeitraum 1992 - 1995 ergibt sich die in Tabelle 13 darge-

#### IV. Zum Stand der internationalen Brennstoffzellen-Forschung

stellte Aufteilung auf die einzelnen Brennstoffzellen-Systeme hinsichtlich bearbeiteter Projekte und dem Finanzierungsrahmen.

Tabelle 13 ist zu entnehmen, daß in den letzten Jahren seitens der EC **schwerpunktmäßig Hochtemperatur-Brennstoffzellen** gefördert wurden, wobei im Zeitraum 1992 -1995 ca. 34 MECU für Brennstoffzellen-Entwicklungen insgesamt ausgegeben wurden. Da nur ein Teil der anfallenden FuE-Kosten von der EC übernommen wurden, ist im genannten Zeitraum von einem Finanzierungsvolumen von ca. 88 MECU auszugehen. Durch die EC wurde bisher bevorzugt die **Stack-Entwicklung** unterstützt als die **Systementwicklung**. Dem Aufbau von Wasserstoffnetzwerken wird momentan eher weniger Bedeutung beigemessen.

Tab. 13: Aufteilung der Finanzierung verschiedener Brennstoffzellen-Aktivitäten seitens der EC im Zeitraum 1992 - 1995

Typ	Anzahl FuE- Projekte	Anzahl Demo- Projekte	Summe Projekte	EC Finan- zierung [MECU]	Kosten insgesamt [MECU]	Summe Kosten
PEMFC	1	0		1,4	2,9	
DMFC	5	0	6 <sup>1)</sup>	1,7	2,0	4,9 <sup>1)</sup>
PAFC	1	5	6 <sup>2)</sup>	1,9	17,0	17,0 <sup>2)</sup>
MCFC	6	4		12,0	39,0	
SOFC	10	0	20 <sup>3)</sup>	13,5	21,0	60,0 <sup>3)</sup>
Systeme	4	0		0,7	1,25	
Reformer	6	0	10 <sup>4)</sup>	2,5	4,4	5,65 <sup>4)</sup>
TOTAL	33	9	42	33,7	87,55	87,55

Summe für: 1) Niedrig-, 2) Mittel-, 3) Hochtemperatur-Brennstoffzellen, 4) Systementwicklung

Quelle: Huynh 1995 (Darstellung geändert)

Für den mobilen Bereich hat 1995 eine Task Force "Auto von Morgen" ihre Arbeit aufgenommen, mit dem Ziel, zu entsprechenden Forschungs- und Demonstrationsbemühungen beizutragen, wozu u.a. auch Fahrzeug-Prototypen mit Brennstoffzellen gehören (Europäische Kommission 1996).

### 3.1.2 Internationale Energieagentur (IEA)

Im Rahmen des "IEA Advanced Fuel Cell Programme" wird im Zeitraum 1996 - 1998 an der Erstellung von mehreren Annexen gearbeitet, deren wesentliche Charakteristika - Bezeichnung, Schwerpunkte, Koordinator und involvierte Länder - Tabelle 14 entnommen werden können.

Ziel dieser Arbeiten in fünf verschiedenen Arbeitsgruppen ist ein gegenseitiger, länderübergreifender Informationsaustausch und eine Koordinierung von Forschungsaktivitäten. Für die Mitarbeit in den jeweiligen Gremien werden seitens der IEA keine finanziellen Mittel zur Verfügung gestellt.

Tab. 14: IEA Advanced Fuel Cell Programme 1996 - 1998

<i>No.</i>	<i>Annex</i>	<i>Schwerpunkte</i>	<i>Koordinator</i>	<i>Länder</i>
VI	MCFC unter realen Betriebsbedingungen	Stack-Entwicklung; Lebensdauer-Tests; Standardisierung, Anlagenbilanz etc.	ECN (NL)	D, I, J, NL
VII	SOFC unter realen Betriebsbedingungen	Anlagenbilanz, Stack-Entwicklung, Materialien etc.	FZ Jülich (D)	AUS, DK, F, D, J, NL, NZ, N, CH, UK, USA
VIII	PEMFC	Zellenentwicklung, Materialien, Anlagenoptimierung, DMFC etc.	Argonne National Laboratory (USA)	CDN, D, I, J, NL, CH, UK
IX	Brennstoffzellen für stationäre Anwendungen	Ökonomie, Technologien, Umwelt, Kommerzialisierung	Sydskraft (S)	D, I, J, NL, N, S
X	Brennstoffzellen für mobile Anwendungen	Systemanalyse, Lebenszyklen, Brennstoffsysteme etc.	FZ Jülich (D)	D, NL, USA

Quelle: McEvoy/Nisancioglu 1997

## 3.2 Nationale Aktivitäten

Neben den länderübergreifenden Aktivitäten gibt es in den meisten Ländern Westeuropas nationale Forschungsprogramme, die Brennstoffzellen-Entwicklungen integrieren bzw. darauf ausgelegt sind. Exemplarisch wird im folgenden ausführlicher auf deutsche Aktivitäten hierzu eingegangen; eine Auswahl weiterer Länder wird abschließend zusammenfassend behandelt.

### 3.2.1 Bundesrepublik Deutschland

In der Bundesrepublik Deutschland werden eine Reihe von Forschungsarbeiten im Bereich Wasserstofftechnologien und Brennstoffzellen vom BMBF koordiniert. Die Entwicklung von Brennstoffzellen wie auch die Wasserstofftechnik wurde in früheren Programmen bei den erneuerbaren Energien eingegliedert. Im Zuge einer prognostizierten langfristig zunehmenden Bedeutung, wurden sie im 4. Programm Energieforschung und Energietechnologien des BMBF zu einem eigenen Programmteil zusammengefaßt (BFTA 1996, S. 26).

Tendenziell sind seit Anfang der 90er Jahre die Fördermittel des BMBF für Forschungsprojekte im Bereich Wasserstofftechnologien und Brennstoffzellen gestiegen. Derzeit werden insgesamt ca. 22,2 Mio. DM pro Jahr für den vorgenannten Bereich ausgegeben, wobei sich ca.  $\frac{3}{4}$  (etwa 17 Mio. DM) auf die Brennstoffzellen und ca.  $\frac{1}{4}$  (etwa 5 Mio. DM) auf Wasserstofftechniken (tendenziell eher abnehmend) verteilen (Deutscher Bundestag 1997; Hünnekes 1997)

Vom BMBF werden verstärkt **anwendungsorientierte Verbundforschungsvorhaben** unterstützt; Hauptauftragnehmer ist zumeist die Industrie und öffentliche Institutionen werden Unterauftragnehmer eingebunden. Neben Großunternehmen, wie Siemens AG, Daimler-Benz AG und Hoechst AG mit ihren Beteiligungsunternehmen, sind verschiedene kleinere und mittlere Unternehmen, einzelne Hochschulen, die Fraunhofer-Gesellschaft und die Großforschungseinrichtungen (GFE) DLR und Forschungszentrum Jülich mit der Entwicklung befaßt. Die Förderung der Verbundforschung von Unternehmen und öffentlichen Forschungseinrichtungen erfolgt bei finanzieller Eigenbeteiligung der Partner, z.B. GFE im Rahmen ihrer Grundfinanzierung mit etwa 20 Mio. DM pro Jahr, die Industrieunternehmen mit 50 - 70 % der Projektkosten (BMBF 1996; Hünnekes 1997).

### 3. Europa

Die Förderung des BMBF konzentriert sich derzeit auf die Entwicklung von **drei Brennstoffzellen-Typen**: die beiden Hochtemperatur-Brennstoffzellen SOFC und MCFC sowie die Niedrigtemperatur-Brennstoffzelle PEMFC. Demonstrationsanlagen technisch ausgereifterer Systeme, wie etwa PAFC-Anlagen, werden derzeit nicht gefördert. Eine Besonderheit in der deutschen Forschungsförderung ist, daß im Vergleich zu den USA und Japan eine organisatorische Trennung von Zuständigkeiten für Forschung und potentieller Markteinführung<sup>44</sup> gegeben ist (Hünnekes 1997). Darüber hinaus gibt es im Vergleich zu den USA und Japan keine von Energieversorgungsunternehmen gemeinschaftlich finanzierten Forschungs- bzw. Koordinierungszentren wie Crieipi oder Epri.

Auf Länderebene sind verschiedene Aktivitäten zu verzeichnen, die Forschungsarbeiten zu Brennstoffzellen koordinieren. Exemplarisch sei die Landesinitiative "Zukunftsenergien" des Landes NRW benannt, welche u.a. eine Arbeitsgruppe zu Brennstoffzellen unterhält und sich als Kommunikations- und Kooperationsplattform sieht mit dem Ziel, den Dialog zwischen Unternehmen, Entwicklern, Planern, Handwerksbetrieben und Hochschulen anzuregen (Landesinitiative Zukunftsenergien 1997).

#### *Alkalische Brennstoffzelle (AFC)*

Die alkalische Brennstoffzelle wurde auch in Deutschland als erste bis zur Anwendungsreife, u.a. von der Fa. Siemens, entwickelt. Aus technischen und ökonomischen Gründen (teure Materialien, CO<sub>2</sub>-Empfindlichkeit und damit sehr hohe Anforderungen an die Brennstoffreinheit etc.) wurden auch in Deutschland die Forschungsarbeiten hierzu weitestgehend eingestellt. Die AFC ist weiterhin nur noch für Militär- und Raumfahrtanwendungen interessant.

#### *Membran-Brennstoffzelle (PEMFC)*

An Membran-Brennstoffzellen wird für den mobilen und stationären Einsatz gearbeitet. In einem Verbundprojekt des BMBF zur Entwicklung der PEMFC für mobile Anwendungen (1994 - 1998), an dem mehrere deutsche Firmen (BASF AG, Daimler-Benz AG, Degussa AG, Heräus GmbH, Hoechst AG, Siemens AG) und Forschungseinrichtungen (DLR Stuttgart, FZ Jülich, GHS Kas-

---

44 In Deutschland ist für die Forschung das BMBF zuständig. Für eine potentielle Markteinführung wäre für den stationären Bereich das BMWi und für den mobilen Bereich das BMV zuständig.

#### IV. Zum Stand der internationalen Brennstoffzellen-Forschung

sel, FHG-ISE Freiburg, MPI Stuttgart) beteiligt sind, wird das Ziel verfolgt, die für den Betrieb von Elektrofahrzeugen benötigte elektrische Energie bedarfsgerecht aus Treibstoffen, wie Wasserstoff oder Methanol, bereitzustellen (BMBF 1996; Hünnekes 1997).

Als ein Produkt der Kooperationsgemeinschaft Daimler-Benz AG und Ballard Power Systems Inc., welche zusammen eine globale Spitzenstellung bei der Integration von PEMFC-Aggregaten in Fahrzeuge halten ist der im Mai 1997 von Daimler-Benz vorgestellte, liniendiensttaugliche Brennstoffzellen-Bus (NEBUS) zu benennen. Er hat eine Reichweite von 250 km<sup>45</sup> und wird mit Wasserstoff, der in Tanks deponiert ist, betrieben. Die Entwicklung der Brennstoffzellen-Technologie wurde in Verbindung mit dem kanadischen Unternehmen Ballard forciert. Auf Pkw-Ebene gibt es dazu vergleichbare Projekte von Daimler-Benz AG wie die wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge NECAR I und II (New Electric Car). Für die nächste Generation an Brennstoffzellen-Fahrzeugen wird auf Methanol, fahrzeugintern zu Wasserstoff reformiert, gesetzt. Bis zum Jahr 2000 soll eine Grundsatzentscheidung getroffen werden, ob mit Brennstoffzellen für Fahrzeuge in die Serienentwicklung gegangen wird (Daimler-Benz 1997a u. b).

Daneben laufen Untersuchungen an Laboranlagen zum stationären Einsatz der PEMFC in der Hausversorgung, u.a. bei der Fa. Siemens und bei einer Reihe von Forschungseinrichtungen.

##### *Phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC)*

Da wesentliche Entwicklungen für phosphorsaure Brennstoffzellen in den USA und Japan durchgeführt wurden und bereits 200-kW-Aggregate auf dem Markt erhältlich sind (Kap. III.1, IV.1, IV.2), werden derzeit keine Entwicklungsarbeiten für PAFC-Anlagen vom BMBF gefördert. Trotzdem sind bereits sieben 200-kW-Anlagen der Fa. ONSI (Typ PC 25) in Deutschland installiert, die mit reformiertem Erdgas betrieben werden. Dieser Testbetrieb wird von Elektrizitäts- und Gasversorgungsunternehmen sowie Stadtwerken gefahren (BMBF 1996); die Installation weiterer PAFC-Anlagen ist geplant (Kabs 1997).

---

45 Zum Vergleich: Das übliche Tagespensum eines Linienbusses liegt etwa bei 140 bis 170 km.

#### *Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC)*

Den Hochtemperatur-Brennstoffzellen, MCFC und SOFC, wird eine besondere Bedeutung in der Forschungsförderung beigemessen, da mit ihrer Hilfe auch heimische Braunkohle (Braunkohlengas) auf umweltfreundliche Weise verstromt werden kann. Ausgehend davon, daß Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen einen deutlichen Entwicklungsvorsprung zu oxidkeramischen Brennstoffzellen aufweisen, wird die Entwicklung der MCFC-Technologie seitens des BMBF derzeit noch in einem Projekt mit der Fa. MTU gefördert. Ziel dieses Projektes ist eine Erhöhung der Lebensdauer der MCFC-Stacks bei reduzierten Herstellkosten (BEO 1996).

Untersuchungen zur Braunkohlegasverstromung in MCFC wurden bis 1995 in einem Gemeinschaftsprojekt gefördert. Unter Federführung der Fa. MTU GmbH haben sich RWE AG, Ruhrgas AG, Haldor Topsøe A/S und Elkraft A.m.b.A. zu einem Konsortium zusammengeschlossen mit dem Ziel, die Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen-Technologie zur marktreifen Anwendung weiterzuentwickeln. Untersucht wurden technische, umweltrelevante und wirtschaftliche Eigenschaften eines MCFC-Kraftwerkes im Vergleich zu konventioneller Technik. Im Ergebnis wurde die prinzipielle Einsatzmöglichkeit des MCFC-Kraftwerkskonzeptes für Braunkohlegas auf höchstem Wirkungsgradniveau bestätigt, wenngleich für einen wirtschaftlichen großtechnischen Einsatz im Kraftwerksbereich noch erhebliche Entwicklungsanstrengungen erforderlich sind (Moll et al. 1995).

Seit Mitte 1996 steht eine Testausführung, das sog. "Hot Modul", am MTU-Standort Ottobrunn bei München, welches von o.g. Firmenkonsortium entwickelt wurde (Ewe 1996). Als nächster Schritt wurde 1997 eine Demonstrationsanlage als Kraftwerksausführung in Dorsten (Ruhrgas AG) aufgestellt, wo inzwischen erste Probeläufe durchgeführt wurden (Hünnekes 1997).

#### *Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)*

Die oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC) wird deutlich intensiver gefördert als die MCFC; sie liegt in ihrem Entwicklungsstand zwar hinter dem der MCFC, verspricht jedoch höhere Wirkungsgrade bei vereinfachter Verfahrenstechnik.

In Deutschland wird das Flachzellenkonzept (Kap. II.4.3) favorisiert, welches mit jeweils technischen Verfeinerungen etwa von Daimler/Dornier, Siemens und dem Forschungszentrum Jülich verfolgt wird. Ziel ist der Einsatz in

#### IV. Zum Stand der internationalen Brennstoffzellen-Forschung

dezentralen Kleinkraftwerken im Leistungsbereich von einigen 100 kW bis 5 - 10 MW. Derzeit werden Anlagen von 10 bis 20 kW getestet, die die prinzipielle Machbarkeit der Stack-Konzepte aufzeigen. Geplant ist etwa bis 1998 eine 50-kW- und bis 2000 eine 100-kW-Anlage (Beie et al. 1997; Drenckhahn 1996,)

Seit 1989 wird das Flachzellenkonzept der Fa. Siemens vom BMBF gefördert. Seit 1993 gibt es ein gemeinsames Verbundvorhaben mit einem Lenkungsausschuß, der mit Vertretern aus Industrie und Forschung sowie des BMBF besetzt ist. In diese Verbundvorhaben sind die von Daimler Benz/Dornier bzw. Siemens verfolgten Entwicklungslinien integriert. Auch ein gemeinsames Projekt mit der RWE AG zum Betrieb von SOFC mit Braunkohlegas wurde in diesem Rahmen realisiert (BMBF 1996).

In einem Gemeinschaftsprojekt wird von FZ Jülich GmbH, Rheinbraun AG und RWE Energie AG auch die SOFC Tests im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit zur Braunkohleverstromung unterzogen, wobei von Daimler AG/Dornier und Siemens AG /KWU entwickelte SOFC eingesetzt werden. Dabei geht es zuerst um die prinzipielle Einsatzmöglichkeit, die bestätigt wurde, und um die Identifizierung von Potentialen und Entwicklungsprioritäten (Moll et al. 1996).

Eine SOFC-Pilotanlage des schweizerischen Konzeptes (Fa. Sulzer) wird derzeit von der DEW in Dortmund zusammen mit der Dortmunder Universität und unterstützt vom Land NRW unter realen Bedingungen getestet (Diethelm et al. 1997).

### 3.3 Weitere Länder

Eine Reihe weiterer Länder, wie Dänemark, England, Frankreich, Italien, die Niederlande, Schweden und die Schweiz, ist in der Brennstoffzellen-Entwicklung aktiv. Diese Aktivitäten wurden teilweise in den letzten Jahren erst begonnen, wie etwa in Frankreich und Dänemark, teilweise laufen hierzu auch schon langjährige Arbeiten, wie etwa in Italien und den Niederlanden.

#### *Alkalische Brennstoffzelle (AFC)*

Zur alkalischen Brennstoffzelle laufen insgesamt kaum noch Projekte, wobei AFC-Konzepte vereinzelt noch immer -oder teilweise wieder - verfolgt werden. Ein Projekt zum Einsatz der AFC in Fahrzeugen gab es beispielsweise in den Niederlanden im Rahmen von EUREKA, dessen Ziel es war, Demonstrations-

### 3. Europa

busse, ausgerüstet mit alkalischen Brennstoffzellen, Ni/Cd-Batterien und einem Speicher für flüssigen Wasserstoff, unter realen Praxisbedingungen in Brüssel und Amsterdam zu testen (van den Broeck 1993).

#### *Membran-Brennstoffzelle (PEMFC)*

Die italienische Fa. Ansaldo ist Projektführer europäischer Projekte mit dem Schwerpunkt Membran-Brennstoffzellen für den Fahrzeugantrieb (Marcenaro/Federice 1996, nach DLR-ITT 1997). Entwickler von Membran-Brennstoffzellen in diesen Projekten ist ebenfalls die italienische Fa. De Nora (Mantegazza/Maggiore 1996, nach DLR-ITT 1997), welche neben der Verfahrenstechnik des Gesamtsystems auch bei der Elektrodenentwicklung (zusammen mit E-Tek (USA) sowie GDE (D)) aktiv ist (DLR-ITT 1997, S. 37).

Aktivitäten zur Entwicklung der PEMFC gibt es darüber hinaus u.a. in den Niederlanden (ECN etc.), in England sowie in Skandinavien. Die Membran-Brennstoffzelle wird mittlerweile auch von Ländern, die bisher weniger aktiv in der Brennstoffzellen-Forschung waren, wie etwa Frankreich, "entdeckt". Zu erkennen ist, daß fahrzeughherstellende Firmen versuchen, den Anschluß an derzeit laufenden Entwicklungen zu halten, was zum Teil auch an eigenen Forschungsarbeiten zu erkennen ist. Der Einsatz von PEMFC-Anlagen in der dezentralen Energieversorgung ist eher als "Nebenprodukt" dieser Entwicklungen zu betrachten.

#### *Phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC)*

Phosphorsaure Brennstoffzellen werden, wie in Deutschland auch in sonstigen europäischen Ländern zwar eingesetzt, jedoch in Amerika von der Firma ONSI gebaut. Vertrieben werden diese Anlagen in Europa über die Fa. CLC/Ansaldo (europäischer Lizenznehmer der ONSI). Aufgrund des Entwicklungsvorsprunges von Nordamerika sowie Japan werden jedoch keine PAFC-Aktivitäten in Europa gefördert.

#### *Schmelzkarbonat- (MCFC) und Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)*

Auf dem Gebiet der Hochtemperatur-Brennstoffzellen führt u.a. ECN (NL) zahlreiche Projekte durch, wobei Schwerpunkt die effiziente Nutzung von Erd-

#### *IV. Zum Stand der internationalen Brennstoffzellen-Forschung*

gas in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen ist (DLR-ITT 1997, S. 37). Gebaut wurden bisher europaweit jedoch eher kleinere Prototypen für Laborzwecke.

Bei SOFC-Anlagen ist das eigenständige Konzept der schweizerischen Fa. Sulzer zu nennen, welches eine Art Wärmetauschersystem integriert hat (HEXIS = **H**eat **E**xchanger **I**ntegrated **S**tack). Dieses System ist eher für Kleinanlagen ausgelegt. Eine Testanlage wird in Dortmund gefahren (s.o.) (Diethelm et al. 1997).

### **Fazit**

In Europa hat die Abkehr von bemannten Raumfahrtprogrammen zu einer weniger kontinuierlichen Entwicklung von Brennstoffzellen-Systemen geführt. Auch sind umweltrelevante Probleme eher mit einer Zeitverzögerung, etwa im Vergleich zu Nordamerika, bewußt angegangen worden. Darüber hinaus waren Versorgungsstrukturen lange Zeit gut etabliert (z.B. Deutschland), welche sich erst seit relativ kurzer Zeit, im Zuge von Deregulierungsbemühungen der Europäischen Union, deutlich verändern. Der infolgedessen aufgetretene Entwicklungsunterschied zu Nordamerika bzw. Japan ist bei Brennstoffzellen somit nachvollziehbar. In den letzten Jahren ist eine Renaissance in der europäischen Brennstoffzellen-Forschung eingetreten. Forciert wurden insbesondere die Membran-Brennstoffzelle (PEMFC) sowie die beiden Hochtemperatur-Brennstoffzellen (MCFC, SOFC). In die phosphorsaure Brennstoffzelle wird nicht mehr investiert; hier wurden einige Pilotanlagen aus Amerika importiert, welche derzeit, zumeist bei Energieversorgungsunternehmen bzw. Stadtwerken getestet werden. Darüber hinaus gibt es bei der SOFC ein alternatives Flachzellenkonzept, welches jeweils in Modifizierungen in Deutschland sowie in der Schweiz separat entwickelt und hergestellt wird. Ein Prototyp des schweizerischen Konzeptes ist in einem deutschen Stadtwerk installiert. Daneben gibt es internationale Kooperationen etwa zwischen deutschen und kanadischen bzw. amerikanischen Unternehmen bei der PEMFC oder auch zwischen deutschen, amerikanischen und dänischen Unternehmen auf dem Gebiet der MCFC.

Derzeit kann davon ausgegangen werden, daß europäische Arbeiten in einigen Anwendungen einen guten und ausbaufähigen Entwicklungsstand erreicht haben, auch wenn in Europa derzeit keine Brennstoffzellen für kommerzielle Zwecke produziert werden. Die Herstellung von Brennstoffzellen erfolgt zumeist für Laborzwecke; es gibt in Europa keine Produktionslinien. Die in die Entwicklung und Demonstration von Brennstoffzellen fließenden **finanziellen**

### 3. Europa

**Mittel** sind sehr unterschiedlich verteilt. Einen Vergleich öffentlicher Fördermittel zur Brennstoffzellen-Entwicklung in den USA, Japan und Deutschland gibt Tabelle 15.

Tab. 15: Vergleich öffentlicher Fördermittel zur Brennstoffzellen-Entwicklung in den USA, Japan und Deutschland (Bezug 1995)

Länder	Öffentliche Mittel [Mio. US\$]	Öffentliche Mittel bezogen auf Einwohner <sup>1)</sup> [US\$/Kopf]	Öffentliche Mittel bezogen auf BIP <sup>2)</sup> [ ]
USA	ca. 73 <sup>3)</sup>	0,28	$12 \cdot 10^{-6}$
Japan	ca. 65 <sup>3)</sup>	0,52	$20 \cdot 10^{-6}$
Deutschland	ca. 12 <sup>4)</sup>	0,15	$7 \cdot 10^{-6}$

Quelle: eigene Berechnungen; Bezugswerte: 1) Zieger 1997, 2) Kielhorn 1997, 3) BMBF 1996, 4) Hünnekes 1997 (umgerechnet). Die für Deutschland angegebenen Mittel beziehen sich allein auf die Projektförderung; zusätzlich werden vom BMBF für die Brennstoffzellen-Forschung noch rund 20 Mio. DM im Rahmen der Grundfinanzierung der GFE vergeben.

In Tabelle 15 spiegelt sich die Intensität der Bemühungen und die damit dahinterstehende Notwendigkeit des Aufzeigens von alternativen Verfahren zur Energieerzeugung wieder. Japan ist außerordentlich bemüht, die Brennstoffzellen-Technologie so bald wie möglich zur Energie- und Wärmeerzeugung verfügbar zu haben. Dahinter stehen in Japan Argumente wie extrem hohe Strompreise, verglichen mit amerikanischen oder deutschen Verhältnissen, oder auch die Nichtverfügbarkeit über Rohstoffe (Erdöl etc.), wobei intensiv an Hochtemperatur-Brennstoffzellen geforscht wird. In den USA hat es eine relativ kontinuierliche Entwicklung der Brennstoffzellen-Technologie gegeben, so daß jetzt versucht wird, den in einigen Bereichen gewonnenen Entwicklungsvorsprung zu halten und auszubauen (z.B. Herstellungs-Know-how bei PAFC, eigenes Konzept bei SOFC). In Deutschland wird, bezogen auf Einwohner bzw. Bruttoinlandsprodukt, deutlich weniger in die Entwicklung der Brennstoffzellen-Technologie investiert. Dies kann vor dem Hintergrund betrachtet werden, daß es in Deutschland, wie in Westeuropa generell, keine etwa mit den USA vergleichbare Kontinuität in der Brennstoffzellen-Entwicklung gegeben hat.



## V. Schlußbetrachtung

Eine umfassende Abschätzung und Bewertung der Entwicklungs- und Einsatzpotentiale der Brennstoffzellen-Technologie wäre einzubetten in weitergehende Fragestellungen, die die **Ausgestaltung des zukünftigen Energie- und Verkehrssystems** im 21. Jahrhundert betreffen. Als deren Leitbild wird zunehmend ein **nachhaltiger Umgang mit Umweltressourcen** angesehen. "Sustainable Development", bezogen auf eine - globale - Energie- und Verkehrsproblematik, umfaßt Ziele und Anforderungen, in deren Rahmen Stellenwert und damit Marktchancen von Brennstoffzellen-Technologien diskutiert werden müßten.

*Woher kommen Impulse für Veränderungen und welche Anforderungen können an zukünftige Energieversorgungs- bzw. Verkehrssysteme gestellt werden?*

Heute ist eine ausreichende Bereitstellung und eine zuverlässige Verfügbarkeit zumeist auf der Basis fossiler Brennstoffe bereitgestellter **Energie** ein selbstverständlicher Bestandteil der modernen Industriegesellschaft. Daneben ist **Mobilität** ein zentraler Faktor wirtschaftlicher und privater Aktivitäten und die Kraftfahrzeugindustrie eine entscheidende Komponente des gesellschaftlichen Wohlstands. Es zeichnen sich jedoch Konstellationen ab, die Veränderungen im Energieversorgungs- und Verkehrssystem bei gleichbleibendem Versorgungskomfort induzieren könnten. Dazu gehören u.a. folgende:

- Nach wie vor stellen Verbrennungsprozesse fossiler Brennstoffe im stationären wie auch im Verkehrsbereich, trotz einer Reihe technischer Verbesserungen und gesetzlich verschärfter Grenzwerte, in vielen Ballungsgebieten **Hauptemittenten** etwa von luftgängigen Schadstoffen dar. Diese tragen u.a. zum Sommersmog (Ozonvorläufersubstanzen) oder zum Treibhauseffekt (CO<sub>2</sub> etc.) bei. In diesem Zusammenhang ist das gewachsene gesellschaftliche **Umweltbewußtsein** eine Grundlage, neben verbesserten konventionellen auch neue, alternative Verbrennungs- und Antriebstechnologien auf breiter Basis einzusetzen.
- Daneben nimmt weltweit der Vorrat kostengünstig zu erschließender fossiler Primärenergieträger in absehbaren Zeiträumen ab, so daß sich **Rohstoffressourcen** auf immer weniger Länder konzentrieren und Importabhängigkeiten die Folge sein könnten. Mittel- und langfristig gesehen ist bei derzeit wieder steigenden Stromverbräuchen der Einsatz alternativer Brennstoffe

## V. *Schlußbetrachtung*

und Technologien eine ökologisch attraktive, energiepolitisch wichtige und technisch bereits realisierbare Option - neben fossiler und kernenergetischer Energieerzeugung sowie konventionellen Fahrzeugantrieben.

- Darüber hinaus verändern sich nationale und internationale Rahmenbedingungen zunehmend. **Deregulierte Energiemärkte** (z.B. USA, EU-Binnenmarkttrichtlinie Elektrizität, Novellierung des Energiewirtschaftsgesetzes in Deutschland) führen weltweit zu veränderten Marktbedingungen, welche Konsequenzen für eine kostengünstige Strombereitstellung etwa in ländlichen Gebieten haben könnten.

Zu Anforderungen an **künftige Energieversorgungssysteme** gehören u.a. bedarfsgerechte (zeitlich und räumlich flexible etc.) sowie stabile (zuverlässige, risikoarme, ausreichende etc.) Bereitstellung von Energie. Dabei sind Aspekte wie Versorgungssicherheit und Zuverlässigkeit der Energieversorgungsstrukturen in bezug auf ihre Verfügbarkeit, Störanfälligkeit, flexible Anpassung an Nachfrageschwankungen, langfristige Ausbaufähigkeit etc. relevant. Hierin ist die technische Umsetzbarkeit und betriebswirtschaftliche Effizienz neuer, umweltschonender energiewandelnder Technologien einzuordnen, insbesondere vor dem Hintergrund der Anpassungsfähigkeit an zukünftige Entwicklungen. Daneben sind ökologische Anforderungen, resultierend aus der Klima- und Umweltproblematik, relevant, beispielsweise die Erreichbarkeit von nationalen CO<sub>2</sub>-Minderungszielen.

Anforderungen an **zukünftige Verkehrssysteme** heben zum einen auf die Entwicklung "sauberer" Fahrzeuge mit angemessenen Leistungsmerkmalen und zum anderen auf integrierte Verkehrskonzepte ab. Dabei sind auf beiden Ebenen die Steigerung der Sicherheit (Verbesserung der Kooperation/Organisation zwischen den Verkehrsteilnehmern etc.), der Wirtschaftlichkeit (flüssiger Verkehrsablauf, effiziente Fahrweise etc.), der Umweltverträglichkeit (Verminde rung des Schadstoffausstoßes etc.), der Leistungsfähigkeit (bedarfsgerechte Harmonisierung des Verkehrsaufkommens etc.) und des Fahrkomforts (Verkehrsablauf etc.) zielführend. Eine entscheidende Rolle spielt auch hier die Anpassungsfähigkeit von Antriebstechnologien an zukünftige Entwicklungen (Verfügbarkeit von Brennstoffen etc.).

Die Chancen und Risiken für den Einsatz von Brennstoffzellen, beispielsweise im Zuge der Deregulierung in der **Elektrizitätswirtschaft**, können derzeit nicht abschließend beurteilt werden, u.a. deshalb, weil sich Strom- und Wärmemärkte entsprechend den neuen Rahmenbedingungen noch deutlich verändern werden. Perspektiven könnten sich vermutlich für Gasversorger ergeben,

## V. *Schlußbetrachtung*

bei einem verstärkten Einsatz von Brennstoffzellen einen größeren Anteil als bisher an einem neu entstehenden Energiemarkt zu belegen. Somit könnte sich der Energiemix weiter zugunsten von Gas entwickeln. Bereits jetzt erkennbar ist das Interesse überregionaler und regionaler Energieversorgungsunternehmen anhand installierter Brennstoffzellen-Prototypen. Hintergrund ist u.a. die Möglichkeit, mit variabel zu installierenden Brennstoffzellen-Anlagen den Aufwand für eine dezentrale Strom- und Wärmebereitstellung, etwa in ländlichen Gebieten, zu reduzieren und somit Alternativen anzubieten.

Im **Verkehrsbereich** zeigen verschiedene prototypische brennstoffzellegetriebene Fahrzeuge, wie Busse, Gabelstapler oder Pkw, daß im Rahmen einer Neubewertung verkehrspolitischer Zielsetzungen, neue Antriebstechnologien, neben einem zweckmäßigen Verkehrsmanagement (Nahverkehr etc.), der Nutzung alternativer Kraftstoffe (Biokraftstoffe etc.) und verbesserter konventioneller Antriebe, ein "Standbein" zur anvisierten Emissionsminderung darstellen könnten (z.B. Auto-Oil-Programm der EU). Als Anstoß für einen - weitverbreiteten - Einsatz neuer Antriebstechnologien bestehen grundsätzlich politische Möglichkeiten, wie Förderprogramme in den USA zur Subventionierung der phosphorsauren Brennstoffzelle (mit dem Ziel einer beschleunigten Markteinführung) oder auch staatliche Vorgaben für die Zulassung von "Zero-Emission-Vehicles" zeigen. Im Zuge der hohen Umweltrelevanz des Verkehrsbereiches ist der Handlungsbedarf, etwa emissionsarme Antriebskonzepte verstärkt einzuführen, relativ hoch, so daß Chancen für einen verstärkten Einsatz von Brennstoffzellen im Verkehrsbereich durchaus gegeben sind.

### *Offene Aspekte bezüglich eines Brennstoffzellen-Einsatzes*

Faktoren, die die Adaption und Diffusion einer neuen, etwa der Brennstoffzellen-Technologie in den Markt beeinflussen, setzen sich aus verschiedenen, miteinander verflochtenen Motivationen und Hemmnissen zusammen. Die Diffusionschancen einer neuen Technologie auf dem Energie- bzw. Fahrzeugmarkt entscheiden sich über **Kosten und Preise**. Dabei ist die Bereitschaft, mehr finanzielle Mittel für vergleichbare(n) oder weniger Versorgungssicherheit bzw. Komfort auszugeben, begrenzt. Beispielsweise ist derzeit bei konventionellen Antriebstechnologien mit Otto- oder Dieselmotorausstattung ein Trend zu Leichtbauweisen erkennbar. Dabei erzielte Gewichtseinsparungen werden zu meist durch Komfort erhöhungen (bei Sitzen, Sicherheit etc.) wieder ausgeglichen. Ein akzeptables Marktsegment für derzeit deutlich teurere brennstoffzellegetriebene Fahrzeuge mit vergleichsweise geringerem Komfort (z.B. An-

## V. *Schlußbetrachtung*

fahrverhalten, Fahrleistung, Reichweite) erscheint, trotz umweltspezifischer Vorteile (weniger Emissionen etc.), momentan eher unrealistisch.

Neben finanziellen Argumenten wird der **Gebrauchswert** einer neuen Technologie auch über emotionale Komponenten definiert. Dazu gehört u.a. die Gewöhnung etwa an Motorengeräusche oder an den Umgang mit üblichen Brennstoffen im Hausbereich. Dabei könnten für eine Akzeptanz der Brennstoffzellen-Technik auch praktische Aspekte, wie eine eventuell verbesserte Handhabbarkeit oder Platzeinsparung, eine wesentliche Rolle spielen.

Darüber hinaus sind einige **technische Aspekte** der Brennstoffzellen-Systeme nicht ausreichend geklärt. Probleme gibt es, wie in einer Reihe von Pilotanlagen demonstriert, insbesondere in der Peripherie bzw. im Zusammenspiel von Stack und Peripherie, da Systemauslegungen bisher eher eine untergeordnete Priorität hatten.

Weiterhin ist die **Entsorgung** von "verbrauchten" Brennstoffzellen noch nicht geklärt (z.B. haben derzeit verfügbare PAFC-Stacks eine erwartete Standzeit von etwa fünf Jahren). Mittel- und Niedrigtemperatur-Brennstoffzellen haben eine Restbeladung an wertvollen Katalysatormaterialien, die nach entsprechender Aufarbeitung weiter genutzt werden könnten, genauso wie verwertbare Reste des Elektrolyten sowie weiterer Zellenmaterialien. Hierzu gibt es bislang keine Konzepte.

Ein wesentlicher Faktor stellt die Ausgestaltung der **Brennstoffversorgung** in Bezug auf eine benötigte bzw. derzeit vorhandene Infrastruktur dar. So können Brennstoffe, wie Erdgas oder Methanol, können am ehesten mit der bestehenden Infrastruktur (etwa Stadtgasversorgung oder Tankstellensystem) zur Verfügung gestellt werden; für Wasserstoff hingegen gibt es eine solche Möglichkeit bis dato nicht. Hier bieten sich u.a. zentrale Speichermöglichkeiten, etwa in Fahrzeugpools von Speditionen, an. Darüber hinaus wären weitere Möglichkeiten zur Wasserstoffbereitstellung, wie die Benzinreformierung, zu diskutieren. Die Klärung der Frage der Brennstoffversorgung (Untersuchung von sinnvollem Energiemix) ist für eine erfolgreiche Markteinführung von Brennstoffzellen essentiell.

### **Fazit und Ausblick**

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß die Brennstoffzellen-Technologie zwar eine **hohe forschungs-, energie- und umweltpolitische Attraktivität** hat, jedoch technisch noch nicht ausgereizt, augenblicklich noch zu kostenintensiv und damit vermutlich "morgen" noch nicht realisierbar ist. An-

## V. *Schlußbetrachtung*

ders als etwa das Automobil, das in der heutigen Ausführung eine kontinuierliche Entwicklung von über einhundert Jahren hinter sich hat, werden Brennstoffzellen erst seit etwa dreißig Jahren wieder intensiv entwickelt.

Zur Beurteilung einer breiten Einsetzbarkeit der Brennstoffzellen-Technologie sind noch **verschiedene Aspekte zu klären**. Dazu gehören Verbesserungen technischer Details, die sich signifikant kostensenkend auswirken müssen, sowie, als eine grundlegende Frage für jedes künftige Einsatzszenario von Brennstoffzellen, die Brennstoffversorgung. Denn Wasserstoff effizient und in erforderlichen Mengen, möglichst ohne Treibhausgase, herzustellen, ist derzeit relativ teuer.

Zu diskutieren bleibt auch die Frage der energie-, klima- und verkehrspolitischen Rahmenbedingungen. Diese sind augenblicklich nicht so, daß sich hieraus entscheidende Impulse für Entwicklungssprünge oder unmittelbare Marktpotentiale ergeben könnten. Das technische Entwicklungspotential und die ökonomischen Perspektiven der Brennstoffzellen-Technologie lassen sich also mit dem derzeitigen Informations-/Kenntnisstand **nicht abschließend beurteilen**. Zum einen ändert sich die Situation auf dem Brennstoffzellen-Markt sehr schnell, und zum anderen sind aufgrund der Aktualität dieses Themas Firmen, Institutionen etc. mit Auskünften zum aktuellen Stand der Brennstoffzellen-Forschung eher zurückhaltend. Darüber hinaus konnte eine Reihe weiterer Aspekte im vorliegenden Sachstandsbericht nur angerissen werden. Dazu gehören u.a. **Markchancen** oder auch die Entsorgungsproblematik von Brennstoffzellen. Das Marktpotential der verschiedenen Brennstoffzellen-Systeme wird in Abhängigkeit vom anvisierten Einsatzfeld derzeit sehr unterschiedlich beurteilt; Einschätzungen reichen von Nischenanwendungen bis hin zu größeren Marktanteilen. Dahinter stehen verschiedene Annahmen und Strategien, deren Analyse ein transparenteres Bild über kurz-, mittel- und langfristige Anwendungspotentiale für Brennstoffzellen ergeben könnte.

Neben solchen Fragen der technischen Machbarkeit, ökonomischen Rentabilität und ökologischen Verträglichkeit im engeren Sinne wären in einem umfassenden Ansatz die Rolle von Brennstoffzellen in einem zukünftigen ökonomisch tragfähigen und ökologisch attraktiven Energieversorgungs- und Verkehrssystem zu beleuchten. Dies schließt die Frage ein, ob und wie durch politische Maßnahmen entsprechende Rahmenbedingungen geschaffen werden könnten. Mittlerweile hat der Ausschuß für Bildung, Wissenschaft, Forschung, Technologie und Technikfolgenabschätzung beschlossen, daß die Bearbeitung der Brennstoffzellen-Thematik durch das TAB in Form eines TA-Projektes fortgesetzt wird.



# Literatur

## 1. Vom TAB in Auftrag gegebene Gutachten

DLR-ITT (Deutsche Forschungsgesellschaft für Luft- und Raumfahrt e.V. - Institut für Technische Thermodynamik) (1997): Technischer Stand und wirtschaftliches Potential der Brennstoffzellen-Technologie im internationalen Vergleich (Autoren: Fischer, M., Nitsch, J., Schnurnberger, W.). Stuttgart

## 2. Weitere Literatur

AHN, J., BRAMMER, F., WENDT, H. (1996): Projekt "Hessische Brennstoffzelle". In: BWK 3, S. 13-17

ANAHARA, R. (1995): PAFC Plants in Japan. In: Ledjeff 1995b, S. 45-62

ARB (Air Resources Board) (1997): What's new on the California air resources information system (CARBIS). In: <http://www.arb.ca.gov/html/whatsnew.htm>

BALLARD (1997): Ballard and Daimler-Benz to invest over \$450 million in fuel cell ventures to develop the next generation of engines for the world's automobiles. News release, April 14

BARTHEL, H., GROEHN, H.G., MERGEL, J. (1997): Die autonome, solarelektrische Versorgung der Zentralbibliothek des FZ Jülich mit Hilfe eines Energiespeichers, bestehend aus Elektrolyseur und Brennstoffzelle. Vortrag im Symposium "Brennstoffzellen" auf dem Kongreß renergie '97, 05.-8.06., Hamm

BECKERVORDERERSANDFORTH, C.P. (1996): Kraft-Wärme-Kopplung: Systeme im wirtschaftlichen Vergleich. In: FZ 1996, S. 31-51

BEIE, H.J., BLUM, L., DRENCKHAHN, W., GREINER, H., RUDOLF, B., SCHICHL, H. (1997): SOFC Development at Siemens. In: Stimming et al. 1997, S. 51-60

BEO (Projektträger Biologie, Energie, Ökologie des BMBF) (1996) (Hg.): Erneuerbare Energiequellen/Rationelle Energieanwendung. Jahresbericht '95. Jülich

BFTA (Ausschuß für Bildung, Wissenschaft, Forschung, Technologie und Technikfolgenabschätzung) (1996): 4. Programm Energieforschung und Energietechnologien. Anlage 1 zur Kabinettsvorlage des BMBF vom 13.05.1996. Ausschußdrucksache 13/365, Bonn

## Literatur

- BMBF (Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie) (1996): BMBF-Förderschwerpunkt Wasserstofftechnologie und Brennstoffzellen. Bonn
- BRAMMER, F.A., BIEHLE, P., STEINER, M. (1997): Erfahrungen mit dezentraler Energieversorgung mit PAFC-Heizkraftwerken. In: Energietechnische Gesellschaft (Hg.): ETG-Tage '97 vom 20.-24.07.1997. ETG-Fachbericht Nr. 66, Berlin, Offenbach, S. 189-207
- BROECK, H. van den (1993): Alkaline fuel cells. In: Ledjeff, K. (Hg.): Energie für Elektroautos. Karlsruhe, S. 201-216
- BROGAN, J.J. (1995): Status of DoD Program for fuel cells in transportation. Office of Propulsion Systems, US-Department of Energy
- DAIMLER BENZ (Hg.) (1997a): Brennstoffzellen-Bus. In: <http://www.daimler-benz.com>
- DAIMLER BENZ (Hg.) (1997b): Bedeutung der Entwicklung der Brennstoffzellen-Technologie für Daimler-Benz. Presse-Information PRI\_0257.doc
- DEUTSCHER BUNDESTAG (1997): Schriftliche Fragen. Frage Nr. 152, Drucksache 13/7218, Bonn, S. 72
- DIETHELM, R., BRUN, J., GAMPER, TH., KELLER, M., KRUSCHWITZ, R., LENEL, D. (1997): Status of the Sulzer Hexis solid oxide fuel cell (SOFC) system development. In: Stimming et al. 1997, S. 79-87
- DIW (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung) (1996): Verkehr in Zahlen. Bundesministerium für Verkehr (Hg.), Berlin, Bonn
- DRENCKHAHN, W. (1990): Technik und Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellen-Kraftwerken. In: Wendt, H., Plzak, V. (Hg.): Brennstoffzellen. Düsseldorf, S. 153-165
- DRENCKHAHN, W. (1996): Die Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC) - eine Option für die Energieversorgung von morgen. In: FZ 1996, S. 139-146
- DRENCKHAHN, W. (1997): Persönliche Mitteilung vom 26.04. Siemens AG, Erlangen
- DRENCKHAHN, W., HASSMANN, K. (1993): Brennstoffzellen als Energiewandler. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 43 (6), S. 382-389
- DRENCKHAHN, W., LEZUO, A. (1996): Fuel cells for decentralized cogeneration plants. In: Proceedings of Power Gen Europe '96, 26.-28.06., Budapest
- EKDUNGE, P., RABERG, M. (1996): The fuel cell vehicle - Analysis of energy use, emissions and cost. In: Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference, Stuttgart, Vol. 2, S. 1623-1636
- ENQUETE-KOMMISSION (Hg.) (1994): Mobilität und Klima. Wege zu einer klimaverträglichen Verkehrspolitik. 2. Bericht der Enquete-Kommission des Dt. Bundestages "Schutz der Erdatmosphäre", Bonn

## 2. Weitere Literatur

- EUROPÄISCHE KOMMISSION (1996): Task Force "Auto von Morgen". Aktionsplan. Brüssel
- EUROPEAN COMMISSION (1995): A ten year fuel cell research, development and demonstration strategy for Europe. Brussels
- EWE, TH. (1996): Das Öko-Kraftwerk. In: bild der wissenschaft 11, S. 16-22
- FCDIC (Fuel Cell Development Information Center) (1996): Fuel Cell RD&D in Japan. Tokyo
- FIEDLER, R.G., HELFER, M., ESSERS, U. (1994): Energieeinsparung und CO<sub>2</sub>-Minderung im Verkehr. Arbeitsbericht Nr. 22 der Akademie für Technikfolgenabschätzung Baden-Württemberg, Stuttgart
- FZ (Forum für Zukunftsenergien) (Hg.) (1996): Brennstoffzellen im Energiemarkt. Tagungsband, 12.-14.03.96, Köln
- GEMIS (Gesamt Emissionsmodell integrierter Systeme): Version 1.0. Ministerium für Umwelt, Energie- und Bundesangelegenheiten des Landes Hessen, Wiesbaden
- GERKING, J. (1997): Elektrolyseur/Brennstoffzelle als neues Speicherkonzept. In: VDI Berichte Nr. 1321, Düsseldorf, S. 375-380
- HEEK, K.H. van (1995): Erzeugung und Konditionierung von Gasen für den Einsatz in Brennstoffzellen. In: VDI-Berichte Nr. 1174 "Energieversorgung von Brennstoffzellen", Düsseldorf, S. 97-115
- HELLING, J. (1992): Reduktion von Energiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen beim Pkw-Verkehr. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen (42) 3, S. 126-133
- HOFFMANN, TH. (1997): Persönliche Mitteilung vom 01.08. VDEW, Frankfurt a. M.
- HOFFMANN, TH., RUMPEL, M. (1997): Persönliche Mitteilung vom 21.08. VDEW, Frankfurt a. M.
- HÖHLEIN, B. (1997): Annex X: Fuel cell systems for transportation. IEA Implementing Agreement for a Programme of R, D & D on Advanced Fuel Cells, Jülich
- HÖHLEIN, B., BIEDERMANN, P. (1996): Bewertung von Antrieben und Energieträgern für den Pkw-Straßenverkehr. In: VDI-Berichte Nr. 1307, Düsseldorf, S. 285-300
- HÖHLEIN, B., BIEDERMANN, P., KLEMP, D., GEIß, H. (1996a): Verkehrsemissionen und Sommersmog. Monographien des Forschungszentrums Jülich, Band 26, Jülich
- HÖHLEIN, B., BOE, M., BOGILD-HANSEN, J., BRÖCKERHOFF, P., COLSMAN, G., EMONTS, B., MENZER, R., RIEDEL, E. (1996b): Hydrogen from methanol for fuel cells in mobile systems; development of a compact reformer. In: J. Power Sources 61, S. 143-147
- HOMMA, T. et al. (1994): Current status of fuel cells in Japan. In: Proceedings of the Fuel Cell Seminar, San Diego (CA), S. 675

## Literatur

- HOOIE, D.T., MANILLA, R.D. (1996): Joint DoD/DoE fuel cell program. In: Proceedings of the Fuel Cell '96 Review Meeting, 20.-21.08.96, S. 31-33
- HÜNNEKES, CH. (1997): Persönliche Mitteilung vom 10.04. und 26.08. BMBF, Bonn
- HUYNH, X.L. (1995): Fuel cell programme of the European Commission. In: Ledjeff 1995b, S. 17-23
- JAERSCHKY, R., WEINZIERL, K. (1997): Entwicklung der Brennstoffzellen-Technik in Nordamerika. In: Elektrizitätswirtschaft 96 (1/2), S. 26-29
- JAKUBKE, H.-D., JESCHKE, H. (Hg.) (1987): Chemie - Brockhaus abc. Leipzig
- KABS, H. (1997): Persönliche Mitteilung vom 20.05. Forschungszentrum Jülich
- KIELHORN, M. (1997): Persönliche Mitteilung vom 17.06. Statistisches Bundesamt - Verbindungsbüro Bonn
- KOM(96)248: Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament betreffend die künftige Strategie zur Bekämpfung der Luftverunreinigung durch den Straßenverkehr unter Berücksichtigung der Ergebnisse des Auto-Öl-Programms; Vorschlag für eine Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates über die Qualität von Otto- und Dieselmotoren und zur Änderung der Richtlinie 93/12/EWG des Rates; Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinien 70/156/EWG und 70/220/EWG (von der Kommission vorgelegt), vom 18.06.1996
- KORDESCH, K., SIMADER, G. (1996): Fuel cells and their applications. Weinheim u.a.O.
- KRAFTSTÄNDG (Kraftfahrzeugsteueränderungsgesetz) (1997): Gesetz zur stärkeren Berücksichtigung der Schadstoffemissionen bei der Besteuerung von Personenkraftwagen (Kraftfahrzeugsteueränderungsgesetz 1997 - KraftStÄndG 1997). BGBl. I, S. 805
- LANDESINITIATIVE ZUKUNFTSENERGIEN NRW (c/o MWMTV) (Hg.) (1997): Innovation & Energie. Das Nachrichten-Magazin der Landesinitiative Zukunftsenergien. Ausgabe Mai, Düsseldorf
- LEDJEFF, K. (1993): Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzellen. In: Ledjeff, K. (Hg.): Energie für Elektroautos. Karlsruhe, S. 217-234
- LEDJEFF, K. (1995a): Brennstoffzellen - ein Überblick. In: Ledjeff 1995b, S. 25-44
- LEDJEFF, K. (1995b) (Hg.): Brennstoffzellen (Entwicklung, Technologien, Anwendung). Heidelberg
- MANTEGAZZA, C., MAGGIORE, A. (1996): Hydrogen Energy Progress XI. In: Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference, Stuttgart, Vol. 2, S. 1647-1656

## 2. Weitere Literatur

- MARCENARO, B., FEDERICE, F. (1996): Ansaldo programs on fuel cell vehicles. In: Proceedings of the Fuel Cell Seminar 1996, Courtesy Associates, Washington, S. 304-306
- McEVOY, A.J., NISCANCIUGLU, K. (eds.) (1997): Materials and processes. IEA Programme of R, D & D on advanced fuel cells. Annex VII: Solid oxide fuel cells under real operating conditions. In: Proceedings of the 10th SOFC Workshop, 28.-31.01.97, Les Diablerets (CH)
- MOLL, W., FINKER, A., PETERS, K.-M., HUPPMANN, G., RUDBECK, P. (1995): Kraftwerksstudie auf der Basis der Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen-Technologie (MCFC). In: VGB Kraftwerkstechnik 75 (1), S. 26-31
- MOLL, W., GAYER, H.A., KARKOWSKI, H.G., REITER, H.K., SCHAMM, R. (1996): Braunkohle-Verstromung in SOFC-Brennstoffzellenkraftwerken. In: FZ 1996, S. 195-211
- MÜLLER A., FRIEDL, C. (1996): Wasserstoff auf japanisch. In: VDI nachrichten, 19.07., S. 20
- MÜLLER, A. (1997): Japans saubere Strategie. In: Handelsblatt, 25.03., S. 65
- NABIELECK, H. (1997): Persönliche Mitteilung vom 09.06. Forschungszentrum Jülich
- NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organisation) (1996): Fuel cell power generation technology. Tokyo
- NÖLSCHER, CH. (1996): Brennstoffzellen - Energiequelle für das 21. Jahrhundert?. In: Physik in unserer Zeit 27 (2), S. 52-59
- NURDIN, M.A.B. (1997): Brennstoffzellen - eine jetzt zunehmend wettbewerbsfähige Wirklichkeit für stationäre und mobile Einsatzmöglichkeiten vor dem Jahr 2000. In: Kurzfassung der Vortragsgruppen Neue Prozesse der Chemischen Technik, Symposium Brennstoffzellen, Elektrochemische Prozesse, Sonochemie. Achema '97, Frankfurt/Main
- PETER, M. (1996): Brennstoffzellen-Entwicklung in Japan - eine Bestandsaufnahme. In: Elektrizitätswirtschaft 95 (5), S. 280-282
- PONTHIEU, E. (1997a): Persönliche Mitteilung vom 12.02. Europäische Kommission, Brüssel
- PONTHIEU, E. (1997b): SOFC support programmes by the European Commission. In: Stimming et al. 1997, S. 20-25
- PRUSCHEK, R., OELJEKLAUS, G., GÖTTLICHER, G., KLOSTER, R. (1997): Gas-Dampfwerke mit hohen Wirkungsgraden. In: VDI Berichte Nr. 1321, Düsseldorf, S. 1-19
- RENSFELT, E., HALLGREN, A. (1997): Biomass gasification in Sweden. Country report. Unveröffentlichtes Manuskript

## Literatur

- RICHTLINIE (1994): Richtlinie 94/12/EG des Europäischen Parlamentes des Rates vom 23.03.1994 über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG
- SASAKI, H. (1997): Status of SOFC development in Japan. Contribution to the 5th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells, 02.-5.06.1997, Aachen
- SASAKI, H., TAKASU, K. (1997): Status of SOFC development in Japan. In: Stimming et al. 1997, S. 12-19
- SCHNURNBERGER, W. (1993): Energieträger Wasserstoff: Elektrolytische Herstellung - Nutzung in Brennstoffzellen. In: Praxis der Naturwissenschaften. 42 (7), S. 2-11
- SINGHAL, S.C. (1997): Recent progress in tubular solid oxide fuel cell technology. In: Stimming et al. 1997, S. 37-50
- STANDPUNKT (1996): Schwerpunkt: Innovation in der Kraftwerkstechnik. In: Standpunkt 19, Siemens AG, Bereich Energieversorgung
- STEINBRECHER, N. (1996): Effiziente und verträgliche Bereitstellung von Strom aus fester Biomasse mit Hilfe des Vergasungsprozesses. Technische Studienarbeit Fachbereich Elektrische Energietechnik der TH Darmstadt, Februar
- STIMMING, U., SINGHAL, S. C., TAGAWA, H., LEHNERT, W. (eds.) (1997): Solid oxide fuel cells (SOFC-V). Proceedings of the Fifth International Symposium, Pennington (USA)
- TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (1992): TA-Projekt "Risiken bei einem verstärkten Wasserstoffeinsatz". (Autoren: Socher, M., Riecken, Th.). TAB-Arbeitsbericht 13, Bonn
- TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (1997): Monitoring "Nachwachsende Rohstoffe", Vergasung und Pyrolyse von Biomasse (Autoren: Rösch, Ch., Wintzer, D.). TAB-Arbeitsbericht 49, Bonn
- TAUBER, C. (1996): Zukünftiger Brennstoffzelleneinsatz aus Sicht eines überregionalen Energieversorgungsunternehmens. In: Tagungsunterlagen zum VDEW-Infotag "Brennstoffzellen - eine Option für die zukünftige Stromversorgung?", Frankfurt a.M.
- UBA (Umweltbundesamt) (1996): Emissionen nach Emittentengruppen in Deutschland. In: <http://www.umweltbundesamt.de>
- VDEW, BGW (1997) (Hg.): Begriffsbestimmungen der Versorgungswirtschaft. Teil B, Heft 2: Fernwärmewirtschaft. Frankfurt a.M., Bonn
- VDI (1997a): Brennstoffzelle bald zum Niedrigpreis?. In: VDI nachrichten, 20.06., S. 12
- VDI (1997b): Wettlauf zwischen Brennstoffzelle und Batterie hat längst begonnen. In: VDI nachrichten, 02.05., S. 16

## 2. Weitere Literatur

VEAUX, CH. (1994): Entwicklung von Gasturbinen und Gasturbinenprozessen. Unveröffentlichtes Manuskript. Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion, Universität Karlsruhe

VORST, WM D. van, GEORGE, S. (1997): Impact of the California Clean Air Act. Int. J. Hydrogen Energy, 22 (1), S. 31-38

WAGNER, H.-J., KÖNIG, S. (1997): Brennstoffzellen - Funktion, Entwicklungsstand, künftige Einsatzgebiete. In: Elektrizitätswirtschaft 96 (1/2), S. 15-22

WAGNER, U. (1997): Rügen war kein Praxistest. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 47 (6), S. 326-327

WEULE, H. (1995): Neue Antriebe und Energieträger - Chancen für den Automobilbau. In: Tagungsband 16. Internationales Wiener Motorensymposium, 4.-5.05.1995, S. 3-23

WILLIAMS, M.C. (1997): US Solid oxide fuel cell power plant development and commercialization. In: Stimming et al. 1997, S. 3-11

WISMANN, G. (1996): Betriebserfahrungen mit 200 kW Phosphorsäure-Brennstoffzellen bei der Thyssengas GmbH in Duisburg. In: FZ 1996, S. 79-105

ZIEGER (1997): Persönliche Mitteilung vom 19.06. Statistisches Bundesamt - Zweigstelle Berlin



# Anhang

## 1. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Reaktionen in einer Brennstoffzelle bei saurem Elektrolyten.....	17
Tab. 2: Gängige Brennstoffzellen-Typen und ihre Bezeichnung .....	20
Tab. 3: Brennstoffzellen-Einteilung nach Temperatur und Elektrolyt .....	20
Tab. 4: Stromdichten verschiedener Brennstoffzellen (Größenordnungen) .....	29
Tab. 5: Anforderungen verschiedener Brennstoffzellen-Typen an die Brenngaszusammensetzung .....	32
Tab. 6: Wirkungsgradspektrum von Brennstoffzellen (Größenordnungen).....	37
Tab. 7: Übergeordnete Charakteristika und Trends von Brennstoffzellen .....	38
Tab. 8: Anwendungsmöglichkeiten für Brennstoffzellen mit Zuordnung zu typischen Anlagengrößen .....	39
Tab. 9: Zuordnung derzeit verfügbarer Brennstoffzellen-Typen zu konkreten Anwendungen.....	40
Tab. 10: Vergleich der Stromgestehungskosten unterschiedlicher Kraftwerke .....	59
Tab. 11: Schadstoffemissionen eines Benzinmotors und eines Brennstoffzellen-Methanol-Antriebes .....	64
Tab. 12: Ausgewählte Aktivitäten in Nordamerika .....	69
Tab. 13: Aufteilung der Finanzierung verschiedener Brennstoffzellen-Aktivitäten seitens der EC im Zeitraum 1992 - 1995 .....	80
Tab. 14: IEA Advanced Fuel Cell Programme 1996 - 1998.....	81
Tab. 15: Vergleich öffentlicher Fördermittel zur Brennstoffzellen-Entwicklung in den USA, Japan und Deutschland (Bezug 1995) .....	89
Tab. 16: Zusammenstellung ausgewählter Brennstoffzellen-Demonstrationsanlagen .....	108

## 2. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Behandelte Bereiche im vorliegenden Sachstandsbericht.....	11
Abb. 2: Arbeitsweise einer Brennstoffzelle im Vergleich zur konventionellen Stromerzeugung.....	13
Abb. 3: Funktionaler Aufbau einer Brennstoffzelle mit saurem Elektrolyten.....	16

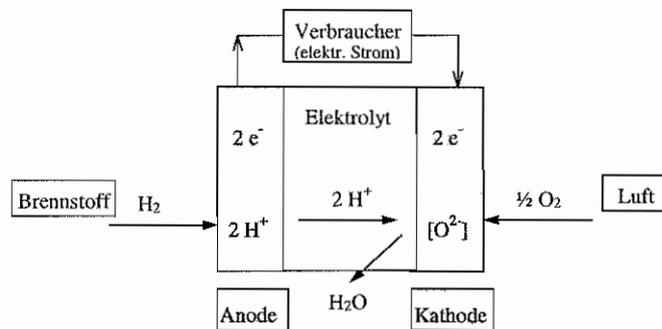
## *Anhang*

Abb. 4: Prinzipieller Aufbau eines Stacks (Beispiel mit phosphorsauren Brennstoffzellen) .....	18
Abb. 5: Zusammenhang zwischen Betriebstemperatur der Brennstoffzelle und geforderter Brennstoffreinheit .....	30
Abb. 6: Brennstoffaufbereitung für verschiedene Brennstoffzellen-Typen beim Einsatz kohlenwasserstoffhaltiger Brenngase, flüssiger sowie fester Brennstoffe .....	33
Abb. 7: Stromgestehungskosten heutiger und ausgereifter PAFC-BHKW und Vergleich mit weiterentwickelten Motor-BHKW sowie heutigen Stromerlösmöglichkeiten .....	60
Abb. 8: Vergleich luftgängiger Emissionen ausgewählter Stromerzeugungstechniken auf Erdgasbasis .....	63
Abb. 9: Brennstoffzellen-Programm des Dep. of Energy (DoE) in den USA.....	68
Abb. 10: NEDO-Zeitplan zur Entwicklung von Brennstoffzellen-Technologien in Japan .....	75
Abb. 11: Anoden- und Kathodenreaktionen verschiedener Brennstoffzellen-Systeme .....	107

### 3. Reaktionen an Anode und Kathode

Innerhalb einer Brennstoffzelle laufen, entsprechend dem eingesetzten Elektrolyt, unterschiedliche Reaktionen ab. Abbildung 11 verdeutlicht den schematischen Aufbau einer alkalischen Brennstoffzelle, wobei im unteren Teil der Abbildung Anoden- und Kathodenreaktionen dieser und weiterer Brennstoffzellen-Systeme aufgeführt sind; angeordnet nach steigender Betriebstemperatur. Die Ellipsen in der unteren Bildmitte weisen Elektrolyt (z.B. Kaliumhydroxid (KOH)) und "wandernde" Ionen (z.B. Hydroxidionen (OH<sup>-</sup>)) mit deren Richtung aus.

Abb. 11: Anoden- und Kathodenreaktionen verschiedener Brennstoffzellen-Systeme



	Folgereaktion Anode	Elektrolyt	Folgereaktion Kathode	Zunahme der Betriebstemperatur
AFC	Anodenreaktion $2\text{H}^+ + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	KOH OH <sup>-</sup>	$\text{H}_2\text{O} + [\text{O}^{2-}] \rightarrow 2\text{OH}^-$	Kathodenreaktion $2\text{e}^- + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow [\text{O}^{2-}]$
PEMFC	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	R-SO <sub>3</sub> -H <sup>+</sup> H <sup>+</sup>	$2\text{H}^+ + [\text{O}^{2-}] \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	
PAFC		H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> H <sup>+</sup>	$2\text{H}^+ + [\text{O}^{2-}] \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	
MCFC	$2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$	(Li,K) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	$\text{CO}_2 + [\text{O}^{2-}] \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$	
SOFC	$2\text{H}^+ + [\text{O}^{2-}] \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	(S.E.) <sub>x</sub> O <sub>y</sub> ZrO <sub>2</sub> [O <sup>2-</sup> ]		

## 4. Brennstoffzellen-Anlagen

Tab. 16: Zusammenstellung ausgewählter Brennstoffzellen-Demonstrationsanlagen

<i>BZ-Typ</i>	<i>Leistung</i>	<i>Bemerkungen</i>
PAFC	11 MW	Japan, nicht mehr in Betrieb
PAFC	5 MW	Osaka (J), Anlage in Betrieb
PAFC	1 MW	Tokio (J), Anlage in Betrieb
PAFC	1,5 MW	Mailand (I), Betreiber AEM (städt. EVU von Mailand); der Stack ist von IFC (eine Mutter von ONSI, USA), die Peripherie von Ansaldo (I); Brennstoff ist Erdgas; die Anlage liefert weniger als 1 MW. Grund sind Schwierigkeiten bei der verfahrenstechnischen Optimierung der Gesamtanlage (modulare Bauweise von verschiedenen Anbietern).
PAFC	200 kW	Hamburg (HEW), Hersteller ist die Fa. ONSI (USA); Brennstoffe sind H <sub>2</sub> und Erdgas. Einsatz als KWK.
PAFC	200 kW	Düren (Thyssengas), Hersteller ist die Fa. ONSI. Brennstoff: Erdgas; Einsatz als KWK
PAFC	200 kW	Bochum; Brennstoff: Erdgas; Einsatz als KWK
PAFC	200 kW	Neuenburg vorm Wald (Bayern), EU gefördert, Brennstoff: Erdgas, Einsatz als KWK
PAFC	200 kW	Darmstadt (HEAG) ("Hessische Brennstoffzelle"), Hersteller ist die Fa. ONSI (PC 25); Brennstoff: Erdgas; Einsatz als KWK
MCFC	280 kW	Dorsten (D) (RWE Verbundprojekt mit Haldor Topsøe); Anlage 1997 angelaufen
MCFC	250 kW	San Diego (NAVI)
MCFC	1 MW	Japan (Test beginnt vorauss. 1998)
MCFC	2 MW	Santa Clara (Die Anlage ist im Mai 1997 endgültig abgeschaltet worden; sie ist insgesamt nur kurzzeitig gelaufen.)
SOFC	100 kW	Arnheim (Finanzierung über dänisch-niederländisches Konsortium); Hersteller Fa. Westinghouse (USA) (Röhrenkonzept); geplant für Herbst 1997
SOFC	25 kW	Japan (Westinghouse-Konzept)
SOFC	25 kW	Japan (Westinghouse-Konzept)
SOFC	7 kW	Stadtwerke Dortmund; Hersteller: Sulzer (CH) (Flachzellenkonzept)

#### 4. Brennstoffzellen-Anlagen

PEMFC	33 kW	Stuttgart; Pkw "NECAR II"; Daimler, Brennstoff: H <sub>2</sub> (Mai 1996)
PEMFC		Stuttgart; Pkw "NECAR III"; Daimler-Benz; Brennstoff: H <sub>2</sub> aus mitgeführtem, reformiertem Methanol (Oktober 1997)
PEMFC	250 kW	Stuttgart; Bus "NEBUS"; Daimler-Benz; Brennstoff: H <sub>2</sub> ; (Mai 1997)
PEMFC	10 kW	Neuenburg vorm Wald (D), Gabelstapler von der Fa. Siemens (wird im Laufe des Jahres 1997 installiert.)
AFC		Brüssel und Amsterdam; Demo-Busse im Rahmen des EUREKA-Projektes; Hybridfahrzeuge Brennstoffzelle mit Batterie (AFC mit Ni/Cd-Batterie und Speicher für flüssigen H <sub>2</sub> )

Quelle: Eigene Zusammenstellung, wobei die Liste bei weitem keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben kann. Bei dieser Zusammenstellung wurden bekannte Angaben aus mehrfach zitierter Literatur verwendet. Die Liste wurde ergänzt nach Gesprächen mit Kabs 1997, Nabieleck 1997, van den Broeck 1993, Drenckhahn 1997, Hünnekes 1997.

## 5. Abkürzungen

$\lambda$	Luftzahl
<b>AFC</b>	Alkaline Fuel Cell (Alkalische Brennstoffzelle)
<b>APPA</b>	American Public Power Association
<b>CAAA</b>	Clean Air Act Amendments
<b>Cd</b>	Cadmium
<b>CH<sub>4</sub></b>	Methan
<b>Cl</b>	Chlor
<b>CO</b>	Kohlenmonoxid
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlendioxid
<b>Criepi</b>	Central Research Institute of Electric Power Industry (Japan)
<b>DMFC</b>	Direct Methanol Fuel Cell (Direktmethanol-Brennstoffzelle)
<b>DoD</b>	Department of Defense (USA)
<b>DoE</b>	Department of Energy (USA)
<b>EC</b>	European Commission
<b>ECN</b>	Netherlands Energy Research Foundation
<b>el</b>	elektrisch (Bezug bei Wirkungsgradangaben)
<b>EPDC</b>	Electric Power Development Company (Japan)
<b>Epri</b>	Electric Power Research Institute (USA)
<b>ERC</b>	Energy Research Corporation
<b>EU</b>	Europäische Kommission
<b>EVU</b>	Energieversorgungsunternehmen
<b>EZEV</b>	Equivalent-Zero-Emission-Vehicles
<b>FP</b>	Frame Work Programme (der EC)
<b>GFE</b>	Großforschungseinrichtungen
<b>GT</b>	Gasturbine
<b>GuD</b>	Gas- und Dampfturbinen-Anlagen
<b>H<sub>2</sub></b>	Wasserstoff
<b>H<sub>2</sub>S</b>	Schwefelwasserstoff
<b>HC</b>	Kohlenwasserstoffe
<b>IEA</b>	Internationale Energieagentur

## 5. Abkürzungen

<b>IFC</b>	International Fuel Cells
<b>IGCC</b>	Integrated Coal Gasification Combined Cycle Gas Turbine
<b>IMFC</b>	Indirect Methanol Fuel Cell (Indirekt-Methanol-Brennstoffzelle)
<b>KraftStÄndG</b>	Kraftfahrzeugsteueränderungsgesetz der Bundesregierung
<b>KW</b>	Kraftwerk
<b>KWK</b>	Kraft-Wärme-Kopplung
<b>LPG</b>	Liquefied Petroleum Gas (Flüssiggas)
<b>M-C Power</b>	Molten Carbonate Power Corp. (USA)
<b>MCFC</b>	Molten Carbonate Fuel Cell (Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle)
<b>MCFC-TRA</b>	MCFC-Technology Research Association (Japan)
<b>MTU</b>	Motoren- und Turbinenunion Friedrichshafen GmbH
<b>NEBUS</b>	New Electric Bus (Daimler Benz, Deutschland)
<b>NECAR</b>	New Electric Car (Daimler Benz, Deutschland)
<b>NEDO</b>	New Energy and Industrial Technology Development Organisation (Japan)
<b>Ni</b>	Nickel
<b>O<sub>2</sub></b>	Sauerstoff
<b>PAFC</b>	Phosphoric Acid Fuel Cell (Phosphorsaure Brennstoffzelle)
<b>PAFC-TRA</b>	PAFC-Technology Research Association (Japan)
<b>PEMFC</b>	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (Polymerelektrolyt-Membran-Brennstoffzelle)
<b>S</b>	Schwefel
<b>SOFC</b>	Solid Oxide Fuel Cell (Oxidkeramische Brennstoffzelle)
<b>TEPCO</b>	Tokyo Electric Power Company
<b>ZEV</b>	Zero-Emission-Vehicles



## Glossar

**Anode** - elektrisch positiv geladene Elektrode.

**Auto-Oil-Programm** - Das "Auto-Oil-Programme" ist ein von der Kommission 1992 initiiertes Programm, das die europäische Mineralöl- und Automobilindustrie auffordert, eine solide Entscheidungsgrundlage für emissionsmindernde Maßnahmen zu schaffen. Ziel des Programms ist es, kostengünstige Maßnahmen auf den Gebieten Fahrzeugtechnik, Kraftstoffqualität und Dauerhaltbarkeit sowie der nichttechnischen Maßnahmen zur Verminderung des Schadstoffausstoßes im Straßenverkehr zu erarbeiten.

**Benutzungsdauer** [h/a] - Verhältnis von gelieferter elektrischer Energie [kWh/a] (el) und der Nennleistung [kW].

**Blockheizkraftwerk (BHKW)** - Heizkraftwerk, welches für die Bedarfsdeckung in einem räumlich begrenzten Versorgungsgebiet ausgelegt ist (ursprünglich Häuser-Block) (vgl. VDEW/BGW). BHKW können durch gleichzeitige Strom- und Wärmeerzeugung die Energie des Brennstoffs bis zu ca. 90 % ausnutzen. Sie zeichnen sich durch zumeist kleinere Anlagengrößen und eine verbrauchernahe Installation aus. Gängige elektrische Leistungen heutiger Blockheizkraftwerke liegen im Bereich von 5 kW bis 10 MW. Zumeist werden hier Verbrennungsmotoren oder Gasturbinen mit Generatoren eingesetzt. Ein Einsatz von Brennstoffzellen wird angestrebt.

**Brennstoffzelle** - elektrochemische Stromquelle, die bei kontinuierlicher Zufuhr von Reaktionskomponenten zu den Elektroden kontinuierlich elektrische Energie erzeugt.

**Carnotscher Kreisprozeß** - von S. Carnot 1824 entwickelter reversibler Kreisprozeß, der die theoretische Grundlage zur Berechnung des Wirkungsgrades aller periodisch arbeitenden Wärmekraftmaschinen bildet.

**Elektrode** - elektrisch leitendes Teil, welches einen Stromübergang in ein anderes Medium (Gas, Flüssigkeit, Festkörper) ermöglicht.

**Elektrolyse** - Zersetzung chemischer Verbindungen durch elektrischen Strom.

**Elektrolyseur** - Vorrichtung zur Gasgewinnung durch Elektrolyse.

**Elektrolyt** - den elektrischen Strom leitende und sich dabei zersetzende Lösung oder Schmelze; ein Elektrolyt ist einerseits ionenleitend, andererseits jedoch elektronisch isolierend, um die Elektroden nicht kurzzuschließen.

**GuD-Prozeß** - Kombination eines Gasturbinen- und einem Dampfturbinenprozesses. Bei dieser Kopplung werden die noch heißen Abgase der Gasturbine zur Dampferzeugung in einem unbefeuerten Abhitzeessel verwendet.

**Heizkraftwerk** - Kraftwerk, dessen wesentlicher Bestandteil eine KWK-Anlage ist. Das Heizkraftwerk kann auch Anlagenteile umfassen, in denen elektrische Energie oder Wärme ungekoppelt bereitgestellt werden (VDEW/BGW 1997).

**Kathode** - elektrisch negativ geladene Elektrode.

**Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)** - gleichzeitige Umwandlung von eingesetzter Energie in mechanische oder elektrische Energie und Wärme in einer technischen Anlage. (Anmerkung: Soweit die elektrische Energie und die Wärme in der Anlage selbst verbleiben, handelt es sich nicht um KWK (z.B. zur regenerativen Speisewasssererzeugung)) (vgl. VDEW/BGW).

**Kraft-Wärme-Kopplungsanlage** - Einrichtung, in der der technische Prozeß der KWK stattfindet. KWK-Anlagen können z.B. sein Dampfturbinen-, Gasturbinen-, Verbrennungsmotoren- und Brennstoffzellen-Anlagen.

**IGCC** (Integrated Coal Gasification Combined Cycle Gas Turbine) - Gasturbine befeuert mit einem Gas, welches ein Produkt der Kohlevergasung ist.

**Kohlegas** - durch Ent- oder Vergasung von Steinkohle hergestelltes Heizgas.

**Laststunden** - Zeit [Stunden/Jahr], in der vom Brennstoffzellen-Kraftwerk Leistung ans Netz abgegeben wurde (zumeist ohne Anfahrvorgänge); unabhängig davon, ob Voll- oder Teillastbetrieb gefahren wurde.

**Partielle Oxidation** - Bei der Sauerstoff-Druckvergasung (partielle Oxidation) werden Erdöl und Erdölfractionen, insbesondere aber Rückstände der Erdölverarbeitung mit reinem Sauerstoff vergast. Das zu vergasende Einsatzprodukt wird zusammen mit Wasserdampf und Sauerstoff einem Düsenbrenner zugeführt und bei 1.200 bis 1.600°C partiell verbrannt. Das Abgas wird nachfolgend von Aschebestandteilen etc. gereinigt und zu Synthesegas weiterverarbeitet.

**Reformer** - Anlagenteil, in welchem die Reformierung abläuft.

**Reformierung** - hier brennstoffzelleninterne oder -externe Umwandlung eingesetzter Brennstoffe (Erdgas etc.) zu Wasserstoff bzw. wasserstoffreichem Synthesegas; Umwandlung erfolgt extern in sog. Reformern.

**Stack** - gebräuchliche Bezeichnung für das bei einer Reihenschaltung mehrerer Brennstoffzellen entstehende kompakte Gebilde - den Brennstoffzellen-Stapel.

**Steam Reforming** - Bei der Dampfreformierung (steam reforming) erfolgt die Vergasung in Gegenwart von Wasserdampf und einem Katalysator. Als Einsatzprodukt wird Erdgas, Raffineriegas oder Benzin eingesetzt, welches bei 700 bis 900°C zu Synthesegas umgesetzt wird. Aufgrund der Schwefelempfindlichkeit des Katalysators muß das Einsatzprodukt entschwefelt werden.

**Stromdichte** - Quotient aus erreichter Stromstärke und wirksamer Elektrodenfläche bei einer Elektrolyse [ $A/cm^2$ ].

**Verfügbarkeit** - Verhältnis aus gefahrenen Laststunden zur Kalenderzeit (betrachtet wird der gesamte Zeitraum seit Erstinbetriebnahme bis dato incl. Ausfallzeiten).

**Vergasung** - Zersetzung eines kohlenstoffhaltigen Brennstoffs durch die Zugabe eines Oxidationsmittels und dessen Überführung in ein brennbares Gas.

**Vollastbetriebsstunden** - Benutzungsstunden bei Bemessungsleistung, d.h. gefahrene Stunden bezogen auf Vollast (Auslegungsleistung lt. Hersteller) in [Stunden/Jahr].

## **Brennstoffzellen-Systeme**

### *Niedrigtemperatur-Brennstoffzellen*

- Alkalische Brennstoffzelle (AFC)  
ca. 80°C
- Membran-Brennstoffzelle (PEMFC)  
ca. 80°C
- Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC)

### *Mitteltemperatur-Brennstoffzelle*

- Phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC)  
ca. 200°C

### *Hochtemperatur-Brennstoffzellen*

- Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC)  
ca. 650°C
- Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)  
ca. 1.000°C