

## BRENNSTOFFZELLEN - FUNKTION, POTENZIAL UND STAND DER ENTWICKLUNGEN

**Rudolf Henne**

Institut für Technische Thermodynamik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

### Vorwort

Die folgenden Ausführungen können angesichts der Vielfältigkeit der gegenwärtigen Brennstoffzellen-Entwicklungen und der damit zusammenhängenden Aspekte nicht flächendeckend sein. Sie können nur einige Schwerpunkte und Facetten hervorheben und näher beleuchten. Selbst bei täglicher Beschäftigung mit dem Brennstoffzellengeschehen ist es schwierig, die zahlreichen Veröffentlichungen und Verlautbarungen zu verfolgen und ihre Bedeutung einzuschätzen.

### 1. Einleitung

Brennstoffzellen und Brennstoffzellensysteme haben in jüngster Zeit ein rasch wachsendes Interesse in Forschung, Industrie und Öffentlichkeit erlangt. Erste, meist prototypische Systeme gelangten und gelangen in die Erprobung. Dies aus mehreren Gründen, von denen die wichtigsten wohl die im Folgenden aufgeführten sind:

- Sie sind Direktumwandler von in Brennstoffen gebundener chemischer Energie in elektrische Energie bei der Reaktion mit (Luft-) Sauerstoff; und im Gegensatz zu elektrochemischen Batterien kann eine Brennstoffzelle kontinuierlich elektrische Energie abgeben, solange sie mit Brennstoff und Luftsauerstoff versorgt wird, ohne dass sich das Wandlersystem aus Elektroden und Elektrolyt verändert.
- Da diese Reaktion nicht den Beschränkungen eines Carnot-Kreisprozesses unterliegt, können prinzipiell wesentlich höhere Wirkungsgrade bei der Stromerzeugung erzielt werden, verbunden mit einer entsprechend niedrigeren spezifischen CO<sub>2</sub>-Freisetzung beim Einsatz von Kohlenwasserstoffen als Brennstoffe.
- Da verhältnismässig niedrige Reaktionstemperaturen vorliegen, ist die Schadstofffreisetzung beispielsweise von NO<sub>x</sub> praktisch vernachlässigbar.
- Brennstoffzellen haben keine beweglichen Teile, sind daher in dieser Hinsicht wartungsarm und erzeugen keinen Lärm oder Schwingungen - die bei Brennstoffzellensystemen wahrnehmbaren Geräusche stammen vorwiegend von erforderlichen Gebläsen für die Luftversorgung.
- Brennstoffzellen sind modular, d. h. Brennstoffzellensysteme können durch eine entsprechende Zahl serien- und parallelverschalteter identischer Zellen in ihrer Leistungsgrösse dem Bedarf angepasst werden.

- Brennstoffzellen lassen sich daher prinzipiell in einem grossen Leistungsbereich einsetzen, angefangen von kleinen portablen Einheiten, beispielsweise im Computer- und Freizeitbereich, über Einheiten in kW-Grösse für stationäre oder mobile Wärme- und Strombereitstellung bis in den MW-Bereich mit Kraft-Wärme-Kopplung oder in Verschaltstufen z. B. von Kraftwerken zur Erzielung sehr hoher Wirkungs- und Brennstoffnutzungsgrade. Eine für die mobile Anwendung besonders attraktive Eigenschaft von Brennstoffzellen stellt die Zunahme ihres Wirkungsgrades bei Teillastbetrieb dar, was im Gegensatz zum Verhalten von Verbrennungskraftmaschinen steht.

Das nun verstärkt entstehende Bewusstsein über deutlich werdende Umweltprobleme, beispielsweise durch die CO<sub>2</sub>-Freisetzung und die offensichtliche Begrenztheit wirtschaftlich und ökologisch günstig verfügbarer fossiler Energieträger wie Erdöl und Erdgas, haben nun weltweit eine immense Brennstoffzellennachfrage ausgelöst, und entsprechend entstand eine hohe Erwartungshaltung: Brennstoffzellen sollen ob ihrer spezifischen Eigenschaften einerseits die Verfügbarkeit fossiler Energieträger verlängern und andererseits die Einführung und Nutzung regenerativ erzeugter Energieträger wie Wasserstoff begünstigen, d. h. eine Brückenfunktion zwischen zwei „Energieversorgungswelten“ ausüben. Unterzieht man die gegenwärtige Situation einer kritischen Betrachtung hinsichtlich der Realisierung von Brennstoffzellensystemen, so kommt man verallgemeinernd zu folgenden Feststellungen, die auch das weitere Vorgehen beim Brennstoffzellen-F+E bestimmen:

- Die volumen- und gewichtsbezogenen Leistungsdichten der Brennstoffzellensysteme sind weitgehend noch zu gering und
- ihre Herstellung (noch) zu teuer im Vergleich zu eingeführten, konventionellen Energiewandlern. Ansätze zur Reduzierung der Kosten sind:
  - Verminderung des Einsatzes teurer Materialien (Katalysatoren) oder Erschliessung neuer, kostengünstigerer Materialien zu deren Ersatz
  - Verbilligung der derzeit üblichen Herstellungstechniken durch ihre Weiterentwicklung zu automatisierten, serientauglichen Verfahren oder durch Erarbeitung neuer Verfahren mit entsprechendem Potenzial
  - neue Designs, vorzugsweise dünn-schichtige, die weniger Material benötigen, die gleichzeitig auch günstiger fertigbar sein müssen.
- Die Lebensdauer der Zellen ist meist noch unzureichend. Um Wege zur Lösung dieses Problemkomplexes zu finden, müssen erst noch die Degradationsvorgänge und -ursachen weiter aufgeklärt werden.
- Die peripheren Komponenten, die aus einer Ansammlung von Zellen erst ein technisch einsetzbares System werden lassen und den Betrieb der Zellen ermöglichen, werden sicher auch in Zukunft zu mehr als 50 % die Kosten eines Systems ausmachen. Sie müssen zu serienfertigungsgerechten, kostengünstigen Produkten weiter entwickelt werden.

2. Brennstoffzellenhistorie

Trotz der attraktiven Eigenschaften von Brennstoffzellen hat es sehr lange nach der Entdeckung des Brennstoffzelleneffekts gedauert, bis dieser nun eine verbreitete technische Relevanz bekam. 1838 entdeckte Christian Friedrich Schoenbein den Effekt und unabhängig erfand und betrieb etwa zeitgleich William Robert Grove den ersten Brennstoffzellen-Generator mit Luft und einer kontinuierlichen H<sub>2</sub>-Quelle (Zink in angesäuertem Wasser), wobei die Voraussetzungen hierfür in der 2. Hälfte des 18. Jahrhunderts durch die Geburt der Physikalischen Chemie geschaffen wurden. In Bild 1 ist der historische Aufbau der Groveschen Erfindung wiedergegeben.

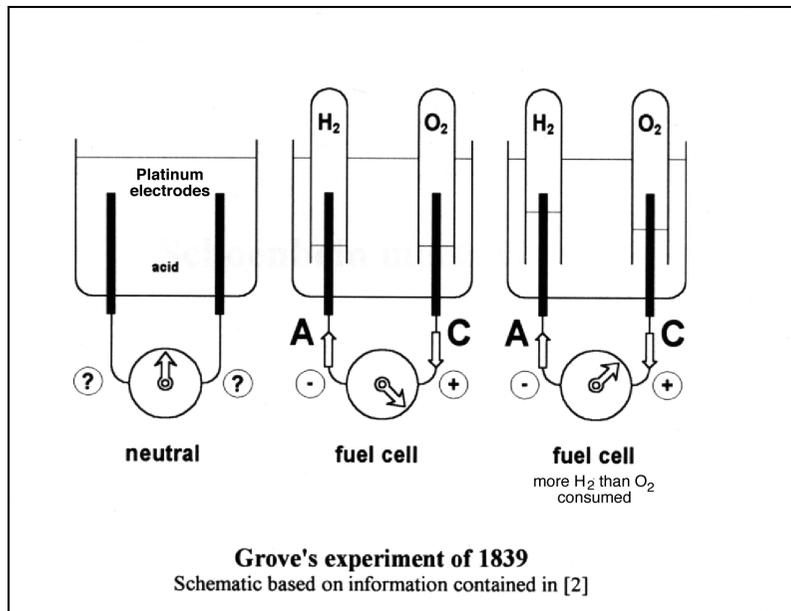


Bild 1: Schema des Grove'schen Experiments

Eine relevante Nutzung fand die Erfindung jedoch im 19. Jahrhundert nicht, da es die von James Watt technisch realisierte Dampfmaschine gab und 1866 Werner von Siemens, der Entdecker des dynamischen Prinzips, die erste Dynamomaschine konstruierte. Dabei äusserte der spätere Nobelpreisträger Wilhelm Ostwald bereits 1884 auf der 2. Jahrestagung des Verbands Deutscher Elektrotechniker: „Die Brennstoffzelle ist eine grössere zivilisatorische Leistung als die Dampfmaschine und wird schon bald den Siemensschen Generator in das Museum verbannt“. Der Begriff „bald“ ist wohl interpretierbar und das mit dem Museum, wenn überhaupt, wird wohl noch etliche Zeiten dauern!

Um 1900 kam erstes technisches Interesse an der Direktverstromung fossiler Energieträger auf, jedoch bestand noch keine Möglichkeit einer technischen Realisierung. Mit der Erfindung von Gasdiffusionselektroden mit platinierterm Kohlenstoff für die Wasserstoffelektroden durch A. Schmid in den 20er Jahren kam man in dieser Hinsicht einen beträchtlichen Schritt weiter. Der 2. Weltkrieg stoppte jedoch zunächst Interesse und Weiterentwicklung, die dann mit der Realisierung von alkalischen Brennstoffzellen (AFC) mit porösen Metallelektroden durch F. T. Bacon eine Fortsetzung fand. Dabei handelte es sich um Prototypen der späteren NASA-Raumfahrt-Brennstoffzellen, welche 1969 den Flug zum Mond ermöglichten, wobei flüssiger Wasserstoff und Sauerstoff als Reaktanden mitgeführt und zum Einsatz kamen. 1970 baute dann K. Kordesch ein Hybrid-Fahrzeug für 4 Personen mit einem H<sub>2</sub>-Brennstoffzellen/ Batterie-System, das 3 Jahre im Städteinsatz betrieben wurde.

Nach erfolgreichem Mondflug sank das Interesse an der Raumfahrt und damit auch die Aktivität bei alkalischen Brennstoffzellen zu Gunsten phosphorsaurer Zellen (PAFC), die eine bessere Eignung für stationäre Anwendungen versprochen. Reformer für Kohlenwasserstoffe wurden entwickelt; der Schwerpunkt der relevanten Aktivitäten verlagerte sich mehr und mehr von den USA nach Japan.

	Anode (Energieträger)	Elektrolyt	Kathode (Oxidant)
Oxidkeramische BZ (Solid Oxid Fuel Cell) SOFC	Kohlenwasserstoffe H <sub>2</sub>	1000 °C Keramik 800-1000 °C	Luft O <sub>2</sub>
Schmelzkarbonat BZ (Molten Carbonat Fuel Cell) MCFC	Kohlenwasserstoffe H <sub>2</sub>	Karbonat-schmelze 600-650 °C	Luft O <sub>2</sub>
Phosphorsäure BZ (Phosphoric Acid Fuel Cell) PAFC	H <sub>2</sub>	Temperatur Phosphorsäure 160-220 °C	Luft O <sub>2</sub>
Direktmethanol BZ (Direct Methanol Fuel Cell) DMFC	Methanol	Polymer 80-110 °C	Luft O <sub>2</sub>
Polymer Elektrolyt Membran BZ PEMFC	H <sub>2</sub>	60-80 °C	O <sub>2</sub>
Alkalische BZ (Alcaline Fuel Cell) AFC	H <sub>2</sub>	20 °C Kalilauge 60-90 °C	O <sub>2</sub>

Bild 2: Brennstoffzellentypen, geordnet nach Arbeitstemperaturen

Nach 1970 traten Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen (MCFC) für eine effiziente Nutzung von Hochtemperaturwärme in den Vordergrund des Interesses. Ebenfalls auf die Hochtemperaturanwendung ausgerichtet wurden vor etwa 10 Jahren die Arbeiten an Festelektrolyt-Brennstoffzellen (SOFC) intensiviert, gleichzeitig wurden Entwicklungen an Membran-Brennstoffzellen (PEFC) wieder aufgenommen, da sie wegen eingetretener Verfügbarkeit von neuen Membranen (Polymeren) und Katalysatoren nun technisch realisierbar wurden. Wegen ihrer für den mobilen Einsatz prinzipiell vorteilhaften Eigenschaften finden sie gegenwärtig bei den Niedertemperaturbrennstoffzellen die höchste Aufmerksamkeit.

Wie die historische Aufzählung andeutet, gibt es eine Reihe unterschiedlicher Brennstoffzellentypen, die sich hauptsächlich in ihrer materialmässigen Zusammensetzung, im Ladungstrennenden Elektrolyten bzw. in der Ladungsträgerart, für die der Elektrolyt durchlässig ist, sowie hinsichtlich der verwendbaren Reaktanden und dem Einsatztemperaturbereich unterscheiden.

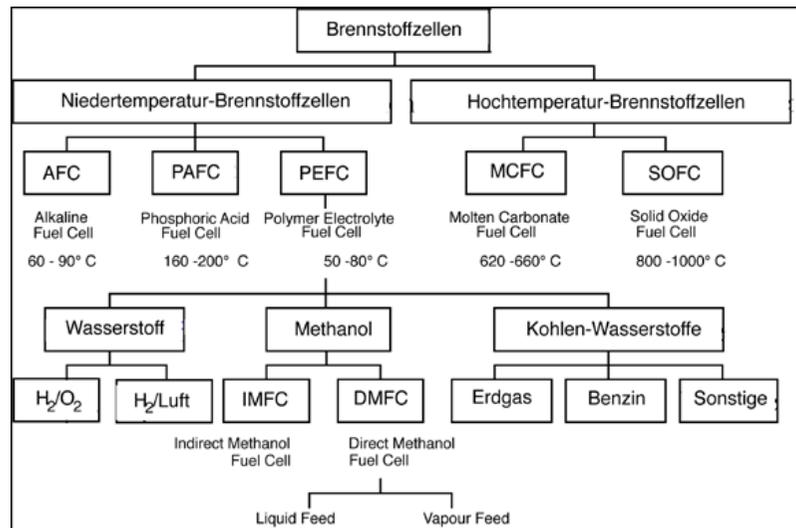


Bild 3: Brennstoffzellentypen und ihre Brennstoffe

Die Bilder 2 und 3 geben diese Vielfalt wieder, geordnet nach der Arbeitstemperatur. Wie weiter unten noch ausführlicher dargelegt werden wird, finden diese Brennstoffzellen bzw. Brennstoffzellensysteme in einem grossen Leistungsbereich und vielfältigen Einsatzarten Anwendung: portabel, mobil und stationär, wobei bei mobil mittlerweile auch an Einsätze nicht nur in Fahrzeugen sondern neuerdings auch in Schiffen und Flugzeugen gedacht wird. In Unterseebooten haben PEFC-Systeme bereits eine feste Position eingenommen; für Raumfahrtanwendungen sind nach wie vor AFCs interessant, beispielsweise in sog. regenerativen Systemen

zusammen mit Elektrolyseuren und Solarzellen – wie in Bild 4 dargestellt – für eine auch durch solare Schattenphasen nicht unterbrochene Stromversorgung.

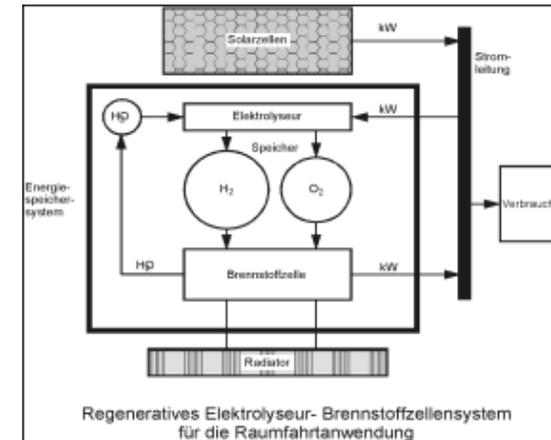


Bild 4: Regeneratives Elektrolyseur-Brennstoffzellensystem

### 3. Grundprinzipien von Brennstoffzellen

Im Folgenden sollen erläuternd als exemplarische Beispiele für Nieder- und Hochtemperatur-Brennstoffzellen die Bau- und Funktionsprinzipien von Zellen des Polymer-Elektrolyt (PEFC) und des Fest-Elektrolyt (SOFC)-Typs dargestellt werden, wobei bei den ersteren die Elektrolyte protonenleitend, beim SOFC-Typ die Leitung durch die Elektrolyte durch doppelt negativ geladene Sauerstoffionen erfolgt. Beide Zellenarten finden derzeit das jeweils höchste Interesse, erstere bevorzugt hinsichtlich mobiler Anwendung, letztere mehr für die stationäre Strom- und Wärmebereitstellung unter Nutzung von Erdgas. Doch zunächst soll auf die elektrochemische Wirkungsweise von Brennstoffzellen eingegangen werden.

#### 3.1 Elektrochemische Wirkungsweise von Brennstoffzellen

Durch die Trennung der Reaktionsbereiche mit Hilfe einer nur für eine Ladungsträgerart durchlässigen Membran ist eine Brennstoffzelle in der Lage, kontinuierlich – und ohne den den Wirkungsgrad mindern den Umweg über die thermische Energieform wie bei Carnot-Prozessen – elektrische Energie bereitzustellen, so lange die letztendlichen Reaktionspartner H<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> zugeführt werden. Die dabei erfolgende Änderung der Bildungsenthalpie  $\Delta H$ , gemäss der Reaktion  $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O(l) + \Delta H$ , mit  $\Delta H = -286 \text{ kJ/mol}$ , kann allerdings nur teilweise in die elektrische Form umgesetzt werden; maximal umgesetzt werden kann der Energiewert, der bei der reversiblen Oxidation von H<sub>2</sub> verfügbar wird, nämlich die Änderung der Gibbsschen freien Bil-

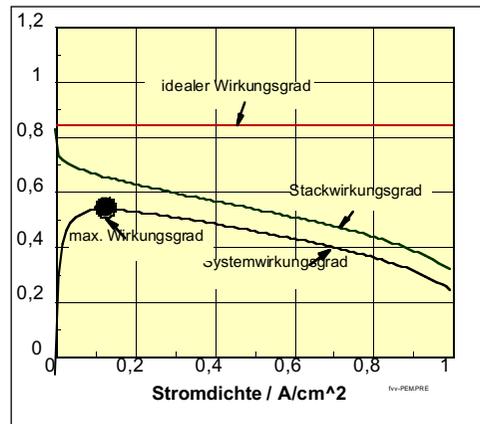
dungsenergie  $\Delta G$ . Diese Änderung beträgt bei Normalbedingungen (1 bar, 298,15 K)  $-237$  kJ/mol. Der Gibbschen Funktion gemäss entspricht die Differenz zwischen  $\Delta H$  und  $\Delta G$  dem Produkt  $T\Delta S$  der Brennstoffzellenarbeitstemperatur  $T$  und der Änderung der Entropie  $\Delta S$ . Daher beträgt der maximale thermodynamische Wirkungsgrad

$$\eta_{thermo} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - T \cdot \frac{\Delta S}{\Delta H}$$

d. h. der Wirkungsgrad sinkt mit steigender Arbeitstemperatur. Mit  $\Delta G$ , der Faraday-Konstante  $F$  und der Zahl  $n$ , der im Prozess spezifisch involvierten Elektronenzahl, bekommt man gemäss der Gleichung

$$E_0 = -\frac{\Delta G}{n_e F}$$

die von der Brennstoffzelle ohne Stromfluss (offener Stromkreis) bereitgestellte Spannung  $E_0$  (Leerlaufspannung), welche bei Normalbedingungen 1,229 V beträgt. Bei Stromfluss ergeben sich allerdings Verluste, beispielsweise durch Übergangspolarisationen, durch ohmschen Widerstand, durch Verarmungen an Reaktanden und durch das entstehende und behindernde Wasser.



**Bild 5:**

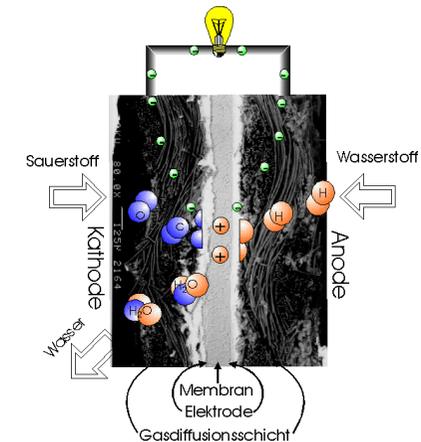
**Stack- und Systemwirkungsgrad von Brennstoffzellen abhängig von der Stromdichte**

Bild 5 zeigt in Abhängigkeit von der Stromdichte beispielsweise den Verlauf der Zellspannung, des idealen und realen Wirkungsgrads von Zelle und Stack sowie den Systemwirkungsgrad. Deutlich wird, dass im Gegensatz zur Verbrennungskraftmaschine bei Brennstoffzellen bei Teillast ein Maximum vorliegt. Der Abfall zu niedrigen Stromdichten hin erklärt sich durch die dann spezifisch stärker ins Gewicht fallenden Verbräuche, verursacht für die Brennstoffaufbe-

reitung, für die Förderung von Brenngas und Luft und für die Leistungsaufbereitung und durch all die anderen Komponenten, die ein Brennstoffzellenstack zu einem einsetzbaren System werden lassen.

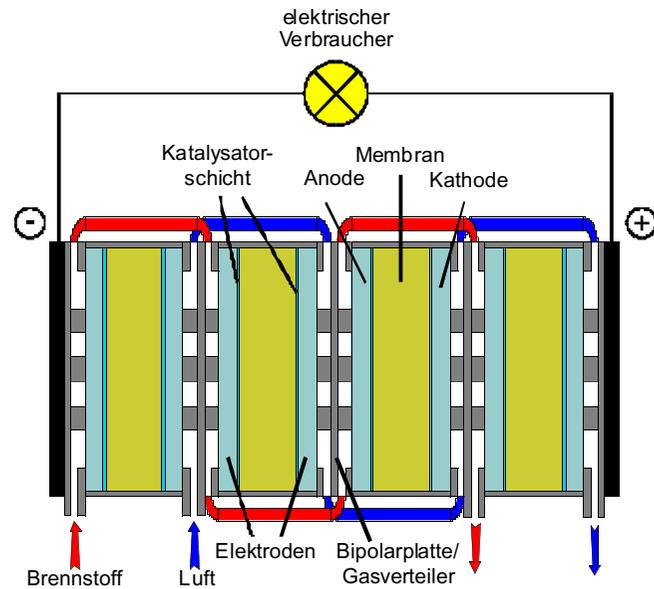
### 3.2 Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen

Bild 6 zeigt Querschnitt und Prinzip einer PEFC mit der protonendurchlässigen Membran und den beidseitigen Reaktions- und Gasdiffusionsschichten. Brenngas ( $H_2$ ) – PEFCs sind CO empfindlich! – gelangt anodenseitig zur Reaktionsschicht, wo der molekulare Wasserstoff dissoziiert und die H-Atome durch Elektronenabgabe oxidiert werden. Die entstandenen Protonen wandern durch den Elektrolyten zur Kathodenseite, wo sie im Grenzbereich Elektrolyt/ kathodische Reaktionsschicht mit dissoziierten und durch Aufnahme von Elektronen reduzierten – also aus dem zugeführten Luftsauerstoff gebildeten Sauerstoffionen zu Wassermolekülen reagieren, die durch die Diffusionsschicht abzuführen sind. Die für die Reduktion des Sauerstoffs erforderlichen Elektronen können bei diesem Aufbau nur über eine äussere Last von der Anodenseite, wo sie bei der Oxidation des Brennstoffes freigesetzt werden, zur Kathodenseite gelangen.



**Bild 6: PEFC Querschnitt und Prinzip**

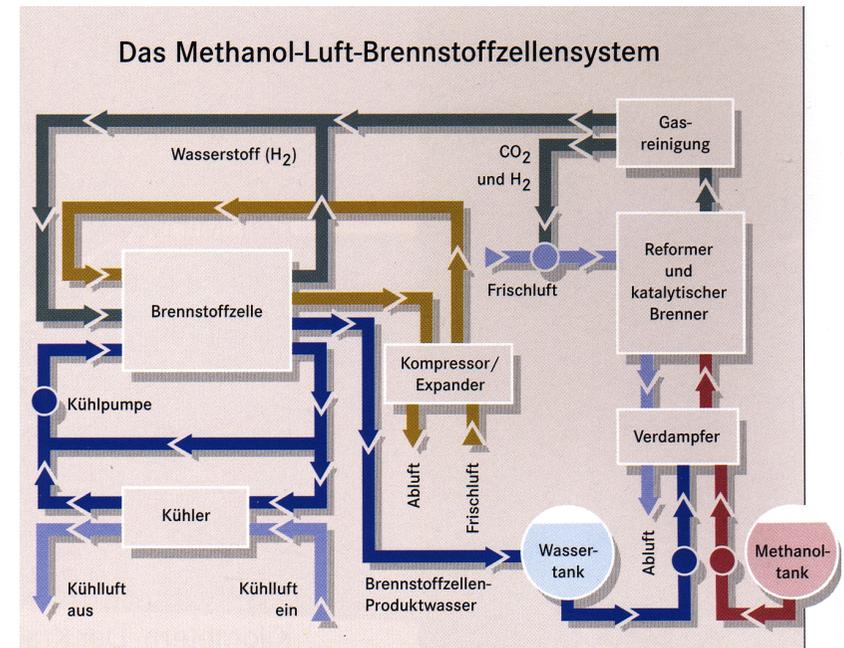
Die pro Zelle bei technisch relevanten Stromdichten von einigen  $100 \text{ mA/cm}^2$  verfügbare Spannung liegt dabei um ca.  $0,5 \text{ V}$ , d. h. Brennstoffzellenstacks (-einheiten) bestehen meist aus einer grossen Anzahl serienschalteter Zellen, um einen brauchbaren Ausgangsspannungswert bereitzustellen. Bipolarplatten zwischen den einzelnen Zellen dienen dabei der elektrischen Verschaltung, aber auch der Trennung der Gasräume und der mechanischen Stackstabilität. Ein solcher Stackverbund ist in Bild 7 dargestellt.



**Bild 7: Prinzip der Zellenverschaltung zu einem Stackverbund**

Wegen der (noch) nicht ausreichenden (und) verbreiteten Verfügbarkeit, aber auch wegen der aufwändigen Mitführbarkeit von Wasserstoff beschäftigt man sich in den letzten Jahren intensiv mit Methanol als Brennstoff für Niedertemperatur-Brennstoffzellen im Fahrzeugeinsatz. Methanol lässt sich wie Benzin in flüssiger Form und unter Normaldruck in Fahrzeugen mitführen, wobei allerdings seine Umweltverträglichkeit Fragen aufwirft. Ein bei Prototypenfahrzeugen bereits realisierter Weg, das Methanol für die PEFCs nutzbar zu machen, ist die Reformierung des Methanols on-board zu  $H_2$  (und  $CO_2$ ) (Bild 8). Dies erfolgt in einem mehrstufigen Prozess, beginnend mit einer Hochtemperaturstufe.

Da, wie bereits oben erwähnt, CO für PEFCs bzw. für das in den Reaktionsschichten als Katalysator enthaltene Platin vergiftend wirkt, indem Platinoberflächen durch relativ feste CO-Anlagerung passiviert werden, müssen die CO-Gehalte des Brenngases bis in den Bereich von etwa 50 ppm abgesenkt werden, was einen ziemlichen apparativen Aufwand mit entsprechender Minderung der Leistungsdichte und des Wirkungsgrades eines solchen Systems bedeutet. Aus diesem Grund sucht man nun verstärkt nach Möglichkeiten, PEFCs direkt für Methanol – in gasförmiger oder in in Wasser vermischter Form zugeführt – verträglich zu machen, d. h. Direktmethanol-Brennstoffzellen (DMFCs) zu realisieren. Obwohl bereits beträchtliche Fortschritte bei diesen Realisierungsbemühungen gemacht werden konnten, scheinen vor einer technischen Anwendung noch etliche Hürden zu überwinden zu sein.



**Bild 8: Brennstoffzellensystem mit der Methanol-Reformierung im Fahrzeug**

Diese bestehen in folgenden (derzeitigen) wesentlichen Problemen:

- Das bei dem Umsetzungsprozess auf der Anodenseite involvierte CO führt zur partiellen Vergiftung des Pt-Katalysators, was einerseits durch ein erhöhtes Inventar an Platin und andererseits durch den Zusatz von Ruthenium in Grenzen und in dynamischem Gleichgewicht gehalten wird – Ruthenium fördert die Autoxidation des CO zu  $CO_2$  und damit zur Befreiung der Platinoberflächen. Die derzeit erforderlichen Pt- und Ru-Gehalte sind noch viel zu hoch, um wettbewerbsfähige Kosten zu erreichen. Daher wird intensiv an Möglichkeiten zur Reduktion dieser Gehalte, aber auch zum Ersatz dieser Katalysatoren beispielsweise durch (noch nicht gefundene bzw. entwickelte) Mischoxide gearbeitet.
- Die z. Z. eingesetzten bzw. verfügbaren Membranpolymere funktionieren nur in wasserbefeuchtetem Zustand. Mit dem Wasser erfolgt aber auch ein gewisser Durchtritt von Methanol von der Anoden- zur Kathodenseite mit entsprechenden Folgen hinsichtlich Vergiftung und Ökonomie. Neue Polymere mit vermindertem Methanoldurchtritt sind daher in Entwicklung.
- DMFCs sind derzeit in ihrer Umsetzungsdynamik, in ihrer Leistungsdichte und im Wirkungsgrad PEFCs mit Wasserstoffbetrieb noch ziemlich unterlegen. In diesen Hinsichten

will man mit höheren Betriebstemperaturen (um 150 °C) weiterkommen, aber auch hierzu fehlen noch die geeigneten und kostengünstigen Membranpolymere.

### 3.3 Festelektrolyt-Brennstoffzelle (SOFC)

Am oberen Ende der Temperaturskala sind die Hochtemperatur-Brennstoffzellen vom SOFC-Typ angesiedelt mit Arbeitstemperaturen bisher im Bereich zwischen etwa 800 und 1000 °C, wobei für gewisse Anwendungen intensive Entwicklungen im Gang sind, die Voraussetzungen für eine Absenkung unter 800 °C zu schaffen, um damit die technologischen und materialmäßigen Anforderung und damit die Kosten zu senken sowie die Degradationseffekte zu mindern.

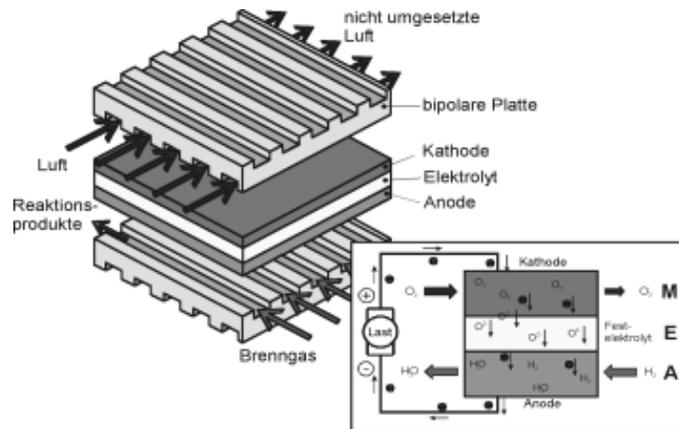


Bild 9: Prinzip einer planaren SOFC

Bild 9 zeigt Aufbauprinzip und Wirkungsweise einer SOFC. Kernbestandteil stellt der gasdichte, keramische Elektrolyt aus  $ZrO_2$  dar, das mit Yttrium-, Cer- oder Scandiumoxid zur Phasenstabilisierung und zur Erhöhung der Sauerstoffionenleitfähigkeit dotiert ist. Auf beiden Seiten des Elektrolyten befinden sich die offenporigen Elektroden, auf der Anoden-, d. h. der Brenngasseite, aus einem Nickel-Zirkonoxidgemisch, auf der Luftseite aus einem Mischoxid mit Perowskitstruktur, beispielsweise aus Lanthan-Strontium-Manganit bestehend. Der Luftsauerstoff wird auf der Kathodenseite dissoziiert und durch Aufnahme von zwei Elektronen pro Atom zu  $O_2^-$  reduziert. Für diese Ionen ist der Elektrolyt durchlässig. Auf der Anodenseite wird das Brenngas zugeführt. Im Falle des Wasserstoffs geschieht das gleiche wie bei der PEFC, nur dass in diesem Fall die Reaktion mit den Sauerstoffionen im Bereich des Elektrolyt-Anodenübergangs stattfindet und der entstehende Wasserdampf auf der Anodenseite abzuführen ist. Die auf dieser Seite frei werdenden Elektronen können auch hier nur über einen äusse-

ren Verbraucher zur Sauerstoffseite gelangen. Gleichfalls liegt bei Stromfluss die Arbeitsspannung pro Zelle zwischen etwa 0,5 und 0,7 V, so dass auch hier in technischen Ausführungen etliche Zellen elektrisch verschaltet werden. Hierzu dienen ebenfalls Bipolarplatten, die allerdings sowohl in oxidierender als auch reduzierender Umgebung stabil sein müssen, eine hohe Elektronenleitfähigkeit aufweisen und in ihrer Wärmedehnung der des Elektrolyten entsprechen sollen. Perowskitische Keramiken oder speziell entwickelte, pulvermetallurgisch und aufwändig zu verarbeitende Materialien auf Chrombasis kommen hierfür derzeit zur Anwendung. Für abgesenkte Arbeitstemperaturen von etwa 800 °C und darunter sind spezielle FeCr-Legierungen, die umformtechnisch und daher kostengünstiger behandelt werden können, in Entwicklung.

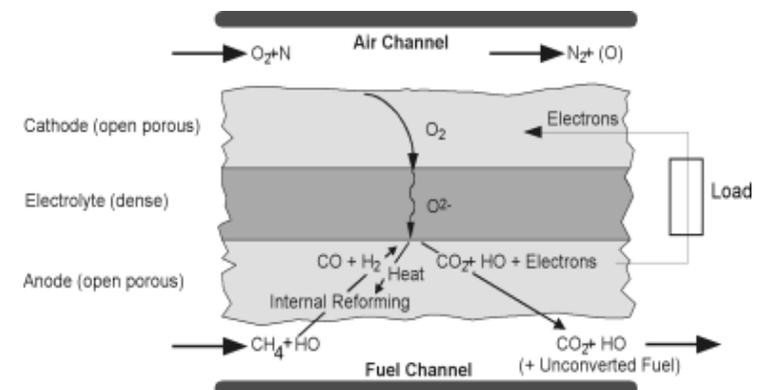


Bild 10: Prinzip der internen Reformierung bei SOFCs

Hochtemperatur-Brennstoffzellen vom SOFC-Typ weisen einige wesentliche Eigenschaften auf, die sie insbesondere für die kombinierte Bereitstellung von Strom und Wärme und für die Nutzung einer breiten Brennstoffpalette interessant machen. Zu diesen Eigenschaften gehören:

- die Unempfindlichkeit gegen CO, bzw. die direkte Nutzbarkeit dieses Gases für die Erzeugung elektrischer Energie,
- die hohen Betriebstemperaturen, die eine Nutzung der Abwärme in nachgeschalteten Wandlern erlauben und damit einen sehr hohen Gesamtwirkungsgrad ermöglichen,
- die hohen Arbeitstemperaturen und das Vorhandensein von Nickel in der Anode, so dass eine interne Reformierung von Kohlenwasserstoffen in der Zelle möglich ist – siehe Prinzipbild 10 –, lediglich höhere Kohlenwasserstoffe erfordern ein Vorreformieren zum Cracken von Mehrfachbindungen und zur Vermeidung von Russbildung,
- wegen der relativen Unempfindlichkeit und der Möglichkeit der internen Reformierung treten neben Erdgas nun auch Biogase und andere aus Biomasse gewinnbare Kohlenwasserstoffe als Brenngase in den Blickpunkt, was insbesondere für dezentrale Versorgungseinrichtungen interessant ist und mithelfen kann, fossile Energieträger zu ersetzen,
- das Potenzial von SOFCs, bei teilweiser Vorreformierung und Reinigung auch Benzin als

Brennstoff verarbeiten zu können, veranlasste Automobilfirmen und Zulieferer, auch die Entwicklung von sog. APUs (Auxiliary Power Units) mit Benzin als Brennstoff und SOFCs als Wandler zu starten, um damit die Probleme der Wasserstoffversorgung und der Wasserstoffmitnahme oder einer aufwändigen Methanolaufbereitung in Fahrzeugen wie bei Niedertemperatur-Brennstoffzellen zu umgehen. APUs mit einem elektrischen Leistungsniveau von mehreren kW sollen alle Funktionen des Verbrennungsmotors außer dem Vortrieb übernehmen – und dies in viel effizienterer Weise – und auch den Wunsch nach mehr elektrischer Leistung im Fahrzeug beispielsweise für die Standklimatisierung zu erfüllen helfen. Insgesamt könnten solche APUs nicht nur den Komfort des Fahrzeuges, sondern auch seine Wirtschaftlichkeit beträchtlich erhöhen, allerdings sind bis dahin noch einige Entwicklungen erfolgreich zu bewältigen, beispielsweise hinsichtlich einer akzeptablen Startzeit, ausreichender Temperaturwechselbelastbarkeit sowie mechanischer Stabilität und Dichtheit.

Hochtemperatur-Brennstoffzellen (SOFC) werden weltweit in verschiedenen geometrischen Ausführungen entwickelt, wobei für den niedrigeren Leistungsbereich planare Konzepte überwiegen, die für diesen Bereich eine höhere Leistungsdichte, Effizienz und Wirtschaftlichkeit erwarten lassen. In der ersten Generation planarer Zellen bildete der Elektrolyt die tragende Komponente der Zelle, bei der auf die dicht gesinterte Elektrolytfolie auf beide Seiten die Elektroden beispielsweise mit Siebdruck und anschliessendem Sinterprozess aufgebracht werden. Wegen dieser Tragfunktion können solche Folien in ihrer Stärke kaum unter 150 bis 250  $\mu\text{m}$  abgesenkt werden. Da aber die Ionenleitung im Elektrolyten den grössten Beitrag zu den internen Verlusten darstellt, ist man bestrebt, einerseits die Leitfähigkeit des Elektrolyten, beispielsweise durch entsprechende Dotierung zu erhöhen, andererseits die Elektrolytdicke abzusinken, um damit nicht nur die Leistungsdichte und Effizienz zu erhöhen, sondern auch die Möglichkeit für eine Betriebstemperaturabsenkung zu eröffnen. Diese Dickenabsenkung in den Bereich unter 50  $\mu\text{m}$  konnte nur durch Übergang zu einem anderen Zellenaufbau bewerkstelligt werden. In der sog. 2. Generation stellt nun eine Elektrode oder eine andere Tragestruktur die Basis dar, auf die die anderen Zellschichten in sehr dünner Ausführung aufgetragen werden können. In diesem Sinne arbeiten das Forschungszentrum Jülich (FZJ) und das DLR-Stuttgart in Wechselwirkung mit zwei unterschiedlichen technologischen Ansätzen an der Realisierung solcher Zellen und Stacks, das FZJ mit dem sog. Substratkonzept, bei dem auf einer relativ dicken, gesinterten Anode ein dünner Elektrolyt und die Kathode sintertechnisch aufgebracht werden, das DLR-Stuttgart verwendet in seinem Spritzkonzept poröse, metallische Substrate, auf die die Zellschichten mit speziell modifizierten Plasmaspritzverfahren in dünner Ausführung aufgetragen werden. Bei beiden Entwicklungen konnten bereits attraktive hohe Leistungsdichten um  $1 \text{ W/cm}^2$  (bei etwa  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und ebenfalls noch brauchbare Werte von mehr als  $0,5 \text{ W/cm}^2$  im Bereich von  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  und darunter erzielt werden.

Im Vergleich zu den planaren SOFC-Konzepten hat das tubulare Design der Firma Siemens-Westinghouse Power Corp. (SWPC) eine wesentlich höhere technologische Reife erlangt, was auch die Verfügbarkeit von prototypischen Systemen im Leistungsbereich 100 bis 200 kW und

den erfolgreichen Betrieb mit Erdgas über mehr als 1000 Stunden dokumentiert. Bei diesem Konzept bilden gesinterte, an ihrem Ende geschlossene 1,8 m lange poröse Keramikrohre aus Perowskitmaterial als Kathoden die Tragestruktur, auf die der dichte Elektrolyt, der für die elektrische Verschaltung erforderliche Kontaktstreifen sowie die Anode aufgebracht werden – siehe Bild 11 –. Die Aussenseiten der zu einem Bündel verschalteten Rohre befinden sich in der Brenngasatmosphäre, während die Rohrrinnenvolumina mit dem Luftsauerstoff versorgt werden. Ein solches Design, bei dem jedes Rohr eine Zelle darstellt, ist technisch simpel und robust, da die Abdichtungen zwischen den beiden Reaktandenbereichen keine besonderen Ansprüche stellen; die bei einer solchen Geometrie jedoch vorliegenden relativ grossen Stromwege erfordern jedoch zur Erreichung einer genügenden Leitfähigkeit relativ dicke Elektrodenschichten und hohe Betriebstemperaturen um  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  und noch höhere kritische Temperaturen zur sintertechnischen Fertigung. Insbesondere die Herstellung des dichten Elektrolyten aus YSZ mit „Electrochemical Vapor Deposition“ (EVD) ist sehr zeit- und kostenaufwändig. Daher werden gegenwärtig alternative Verfahren untersucht bzw. adaptiert, um dieses Verfahren kostengünstiger zu ersetzen, ohne zu grosse Einbußen bei der derzeit sehr hohen Elektrolytqualität zu erleiden.

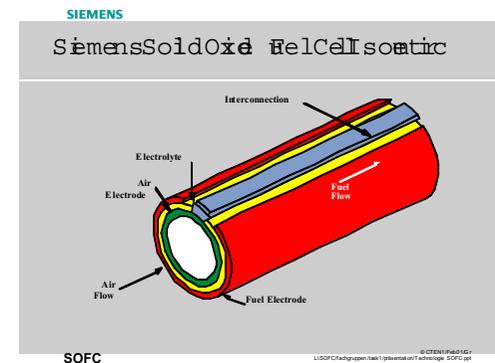


Bild 11: Tubulare SOFC von SWPC

#### 4. Einsatzspektrum von Brennstoffzellensystemen, Realisierungen und Projekte

Das bereits realisierte bzw. potenziell realisierbare Leistungsspektrum von Brennstoffzellen und Brennstoffzellensystemen überdeckt einen weiten Bereich von wenigen Watt bis zu mehreren MWel und auch das Anwendungsspektrum zeigt eine entsprechende Breite:

- portable Einheiten mit vorwiegend kleiner Leistung
- mobile mit kleiner bis mittlerer Leistung und
- stationäre mit kleiner bis sehr hoher Leistung.

Wenn es gelingt, die Kosten weiter abzusenken, werden kleine Brennstoffzelleneinheiten besonders bei portablen Computern, Camcordern oder mobilen Telefonen einen grossen Markt finden, wobei wiederaufladbare Hydridspeicher, möglicherweise auch kleine Methanolkartuschen, für die Brennstoffversorgung sorgen.



**Bild 12: Kleine portable Brennstoffzelleneinheit (FhG-ISE)**

Einige hervorzuhebende Vorteile eines solchen Einsatzes sind die im Vergleich zu Batterien wesentlich längere Reichweite, das beträchtlich niedrigere Gewicht und Volumen und das Entfallen des mit Batterien üblicherweise existierenden Entsorgungsproblems. Bild 12 zeigt eine beim Freiburger Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (FhG-ISE) erarbeitete Realisierung einer kleinen portablen Brennstoffzelleneinheit für Laptops.

Bei den mobilen Anwendungen von Brennstoffzellen denkt man in erster Linie an den Ersatz des Diesel- oder Ottomotors in Personenwagen oder Bussen. Aber auch die Verwendung in Schiffen und Zügen kann im Verlauf der Entwicklung attraktiv werden – für U-Boote haben sich Brennstoffzellensysteme ja bereits durchgesetzt. Über die potenzielle Rolle von „Auxiliary Power Units“ (APUs) in Fahrzeugen zur Bordstromversorgung und zur Entlastung des Motors von allen Aufgaben außer dem Fahrzeugvortrieb, wobei die Brennstoffzellen vorzugsweise mit dem gleichen Treibstoff wie der Motor versorgt werden, wurde bereits weiter oben im Zusammenhang mit SOFCs eingegangen. Auch an den Einsatz grösserer APUs in Flugzeugen wird gedacht. Sie können vor allem für die Versorgung der Klimatisierungseinrichtungen dienen, um die dafür bisher eingesetzten lauten und wenig effizienten Hilfsturbinen zu ersetzen.

Hinsichtlich des Pkw-Einsatzes von Brennstoffzellen haben mehrere Fahrzeughersteller inzwischen eine Reihe von Prototypen mit vorwiegend Polymerelektrolyt-Brennstoffzellenstacks (PEFC), aber unterschiedlichen Brennstoffversorgungskonzepten vorgestellt (Bild 13). Es wurden bereits Pkws realisiert, bei denen der Wasserstoff in Metallhydridspeichern, in verflüssigter Form oder gasförmig unter hohem Druck mitgeführt wird, letzteres auch für Busse.

Diese Vielfalt zeigt das Problem der H<sub>2</sub>-Mitnahme in Fahrzeugen für eine akzeptable Reichweite, das bisher noch nicht zufriedenstellend – zumindest nicht voll wettbewerbsfähig zur Benzinbetankung – gelöst ist, denn Metallhydridspeicher haben eine geringe Speicherkapazität oder sind schwer, bei verflüssigtem Wasserstoff ist der energetische Aufwand für die Verflüssigung hoch und Druckwasserstofftanks haben ein beträchtliches Volumen, hier sind Arbeiten im Gange, Tanks für bis zu 700 bar anstelle der bisherigen 300 bar zu entwickeln. In dieser Situation wird, wie bereits oben erwähnt, sehr intensiv an Brennstoffzellen gearbeitet, die indirekt oder besser direkt (DMFC) Methanol als Brennstoff nutzen können. Methanol kann ähnlich wie Benzin behandelt und mitgeführt werden, allerdings spricht noch einiges dagegen, wie z. B. Umweltaspekte, der Aufwand für die Erzeugung von nahezu CO-freiem Wasserstoff aus Methanol im Fahrzeug bzw. die derzeit noch nicht gegebene Verfügbarkeit von leistungsfähigen und hinsichtlich der Kosten akzeptablen Brennstoffzellen, die direkt mit Methanol betrieben werden können.



**Bild 13: Fahrzeugrealisierungen mit Brennstoffzellen**

Beim stationären Einsatz von Brennstoffzellen ist man vor allem an der gekoppelten Bereitstellung von Strom und Wärme (CHP: Combined Heat and Power) interessiert, um damit neben einem hohen elektrischen Wirkungsgrad auch insgesamt sehr hohe Brennstoffnutzungsgrade zu erzielen. Einheiten von einigen wenigen kW<sub>e</sub>, beispielsweise für den Hausbedarf, bis zu etlichen 100 kW<sub>e</sub> sind hierbei auf der Basis unterschiedlicher Brennstoffzellentypen in Entwicklung. Für den hohen Leistungsbereich ist die Auswahl allerdings auf die beiden Hochtemperaturtypen MCFC und SOFC beschränkt. Die bei diesen anfallende hochtemperaturige Abwärme begünstigt deren weitere Nutzung in nachgeschalteten Energiewandlern, wobei eine weitere Wirkungsgradsteigerung ermöglicht wird.

Bei den stationären Systemen mittlerer Leistung ist die Technologie von phosphorsauren Brennstoffzellen (PAFC) am weitesten fortgeschritten. Die PC25Cs der Firma ONSI mit ca. 200 kW<sub>e</sub> sind bereits ein kommerziell erhältliches Produkt mit einem elektrischen Wirkungsgrad bis etwa 40 % und einem Gesamtnutzungsgrad von bis zu 80 %, wenn man die bei etwa

100 °C anfallende Abwärme einsetzt. Weltweit sollen bereits über 170 derartige Anlagen existieren, 8 davon allein in Deutschland, wobei neben Wasserstoff auch Klärgas zum Einsatz kommt. Für den stationären PEFC-Einsatz sind verschiedene Entwickler und potenzielle Hersteller aktiv. Plug Power, USA, steigt gerade in die Serienfertigung von Erdgas-betriebenen Stacks mit ca. 5 kW<sub>e</sub> und einem elektrischen Wirkungsgrad von etwa 30 % ein, wobei eine Partnerschaft mit der deutschen Firma Vaillant besteht. Alstom Ballard – im mobilen Bereich Hauptpartner von DaimlerChrysler – hat bereits 4 Anlagen (Stand 2000) mit 250 kW<sub>e</sub> erstellt, eine davon in Berlin, wobei ein  $\eta_e$ -Wert von 40 % und ein Gesamtnutzungsgrad von 70 bis 90 % angestrebt wird. In nächster Zeit soll in Dresden eine Fabrikationsanlage für die kommerzielle Fertigung solcher stationärer PEFC-Systeme entstehen.

Ebenfalls vorwiegend für den stationären Einsatz vorgesehen sind Systeme, die auf MCFCs (Molten Carbonate Fuel Cells) und SOFCs (Solid Oxide Fuel Cells) aufbauen. Unter der Bezeichnung „Hot Module“ hat die Firma **mtu** prototypische 300 kW<sub>e</sub>-Systeme realisiert – eins davon ist in Bielefeld stationiert (Bild 14). Die Betriebstemperatur dieser Module liegt im Bereich 600 bis 650 °C, was sehr günstig ist hinsichtlich der Nutzung der Abwärme und der Verwendbarkeit „gängiger“ Werkstoffe. Die elektrischen Wirkungsgrade sollen über 50 % liegen. Eine Kommerzialisierung dieser Module ist ab etwa 2002 vorgesehen.

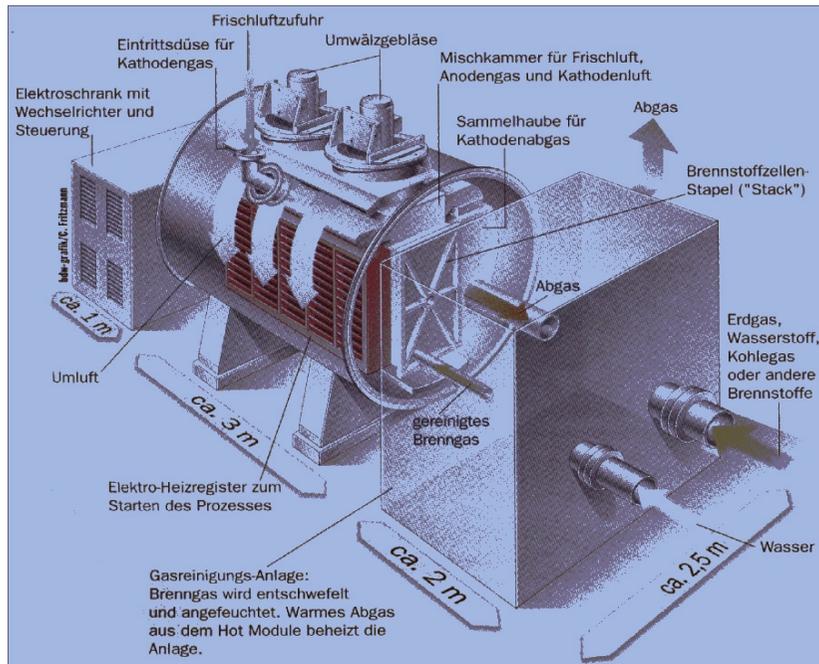


Bild 14: Schema eines 300 kW Hot Module (MCFC, mtu)

Bei den SOFCs, die im derzeitigen Entwicklungsstand im Temperaturbereich 800 bis 1000 °C arbeiten, sind die Entwicklungen sowohl für das niedrige wie auch das höhere Leistungsniveau bereits weit fortgeschritten. Unter der Produktbezeichnung Sulzer HEXIS sind für die Hausversorgung mit Wärme (~ 5 kW) und Strom (1-2 kW) etliche Erdgas-„befeuerte“ Einheiten mit einem elektrischen Wirkungsgrad von etwa 35 % bereits im Einsatz, so auch eine in Dortmund. Die verwendeten Zellen weisen eine ebene, runde Geometrie auf mit zentraler bzw. peripherer Zuführung von Brenngas bzw. Luft (Bild 15). Eine grössere Anzahl soll nun in den Feldtest gehen.

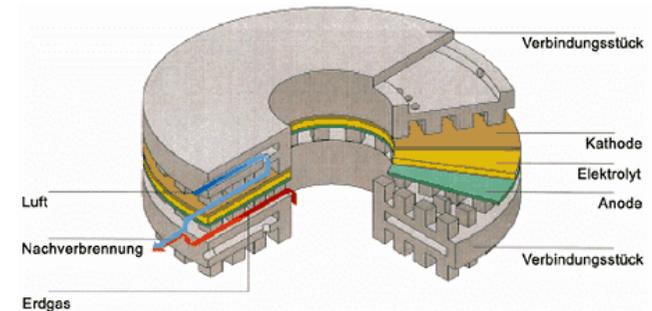


Bild 15: HEXIS

Für den höheren Leistungsbereich ( $\geq 100$  kW<sub>e</sub>) arbeitet Westinghouse (seit dem Kauf durch Siemens vor etwa 2 Jahren nun SiemensWestinghouse Power Corporation (SWPC)) in Pittsburgh und Erlangen an Brennstoffzellenstacks mit tubularen Zellen als Grundelement. Diese Zellen bestehen aus vorwiegend keramischen, einseitig verschlossenen Röhren von etwa 2 cm Durchmesser und einer aktiven Länge von 1,8 m (Querschnitt siehe Bild 11). Mehrere Rohre sind zu einem Bündel zusammengefasst. Erste prototypische Systeme mit einer elektrischen Leistung von ca. 100 kW und einem elektrischen Wirkungsgrad um 47 % waren bereits erfolgreich im Test. Gefördert durch die EU und in Zusammenarbeit von SWPC, EnBW, EdF, GdF und der TIWAG ist bei der EnBW in Marbach bei Stuttgart eine 1 MW-Anlage im Entstehen. Diese Anlage soll aus vier 200 kW-SOFC-Modulen und einer 200 kW-Mikrogasturbine bestehen und einen elektrischen Gesamtwirkungsgrad um 60 % aufweisen. Das Funktionsschema dieser Anlage ist in Bild 16 ersichtlich.

Für den Leistungsbereich zwischen wenigen kW<sub>e</sub> und etwa 100 kW<sub>e</sub> sind weltweit etliche Entwicklungen im Gange mit vorwiegend planarem Design, wobei die Zellen meistens von einer Elektrode oder einem Substrat getragen sind, um damit dünne Elektrolyte und dadurch hohe Leistungsdichten auch bei abgesenkten Temperaturen (<800 °C) zu ermöglichen. Beispielhaft ist hier das bereits erwähnte vom BMWi unterstützte deutsche ZEUS-Projekt zu nennen, bei dem das Forschungszentrum Jülich und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik in Stuttgart, im Wettbewerb unterschied-

licher Fertigungstechnologien und in Zusammenarbeit dabei sind, Stacks der 5 kW<sub>e</sub>-Klasse aus ebenen Dünnschichtzellen, d. h. mit SOFCs der 2. Generation, zu realisieren.

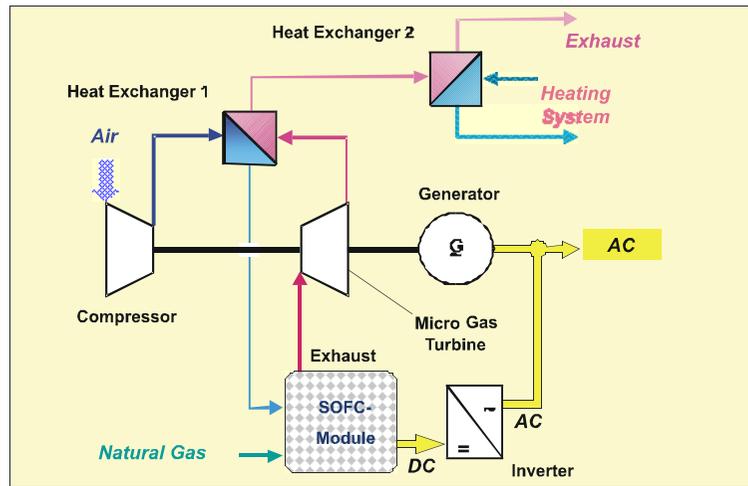


Bild 16: Schema einer SOFC/Mikrogasturbinen-Anlage

### 5. Ökonomische und ökologische Aspekte

Bei weiterhin rasch fortschreitender Entwicklung kann erwartet werden, dass sehr bald im Bereich der portablen elektronischen Geräte wie Laptops kleine Brennstoffzeleinheiten hinsichtlich der Kosten mit derzeitigen Hochleistungsbatterien konkurrenzfähig werden. Dabei haben sie die zusätzlichen Vorteile einer potenziell höheren Leistungsdichte und Reichweite, wobei der Brennstoff als Wasserstoff in Metallhydrid gespeichert oder in Form von flüssigem Methanol mitgeführt wird. In beiden Fällen ist ein leichter Austausch der Kartuschen oder ein Nachladen bzw. Nachfüllen möglich. Die mit Batterien verbundenen Probleme des Rezyklirens bzw. Entsorgens entfallen.

Bei der Anwendung von Membranbrennstoffzellen in Fahrzeugen sind – wie aus Bild 17 ersichtlich – der gegenüber Verbrennungskraftmaschinen deutlich höhere Wirkungsgrad, der insbesondere bei Teillastbetrieb noch zunimmt, sowie die lokal stark verminderte Umweltbelastung deutliche Vorteile, allerdings stellen neben den derzeitigen Kosten das noch nicht zufriedenstellend gelöste Problem der Brennstoffmitführung erhebliche Hindernisse dar. Auch müssen, wie weiter unten kurz gestreift, die Aspekte der Brennstoffbereitstellung, der Zellenherstellung und des Rezyklirens bei einer ganzheitlichen Betrachtung und Beurteilung berücksichtigt werden.

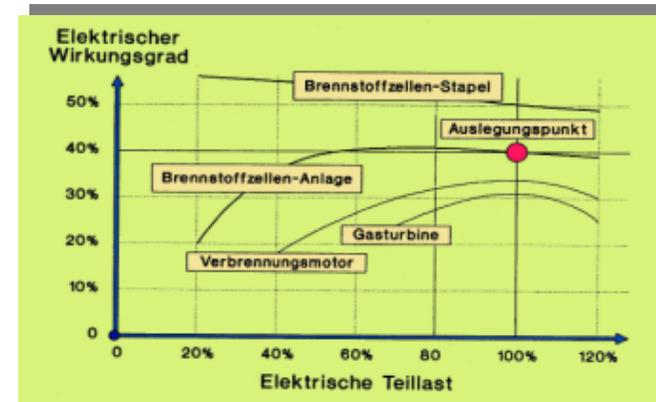


Bild 17: Wirkungsgrad und Teillastverhalten von Brennstoffzellen im Vergleich zu „konventionellen“ Wandlern

Für den stationären Einsatz von Brennstoffzellen ist vor allem die gekoppelte Bereitstellung von Strom und Wärme mit dem resultierenden sehr hohen Gesamtnutzungsgrad der eingesetzten chemischen Energie ein überzeugendes Argument. In Zusammenhang mit der Stromerzeugung im höheren Leistungsbereich sind insbesondere Hochtemperatur-Brennstoffzellen-Systeme besonders attraktiv, da das hohe Temperaturniveau der Abwärme ihre weitere Nutzung in nachgeschalteten Wandlerstufen begünstigt, was, wie Bild 18 demonstriert, sehr hohe elektrische Wirkungsgrade erwarten lässt.

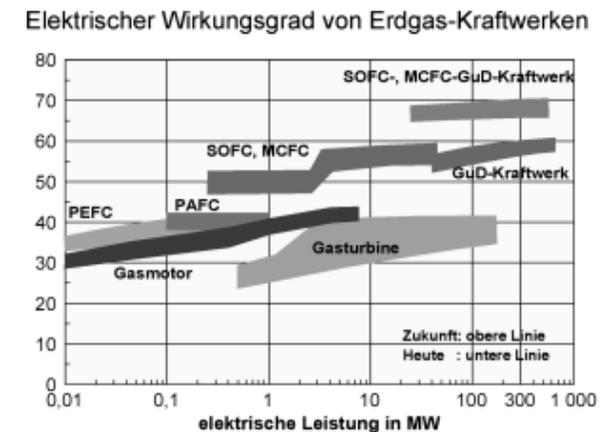


Bild 18: Elektrische Gesamtwirkungsgrade (in Prozent) diverser Brennstoffzellen allein und im Verbund mit weiteren nachgeschalteten Wandlern

Auch hinsichtlich niedriger Emissionen von CO, NO<sub>x</sub> und NMHC zeigt sich die Brennstoffzelle in der Kraft-Wärme-Kopplung gegenüber Systemen mit Verbrennungsmotor oder Gasturbine deutlich überlegen, wie aus der prognostizierenden Graphik in Bild 19 deutlich wird.

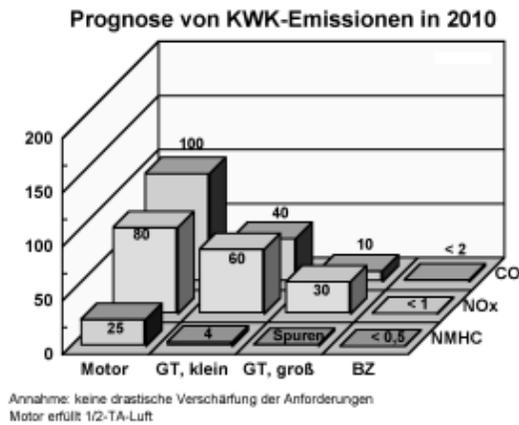


Bild 19: Prognose von KWK-Emissionen in 2010

Eine eingehende Betrachtung lässt rasch offensichtlich werden, dass bei der Beurteilung der Umweltwirksamkeit von Brennstoffzellen die Basis der Brenngaserzeugung nicht unberücksichtigt bleiben darf, wie die Tabelle in Bild 20 zeigt.

Einsatzfeld	mobil		dezentrale KWK		industrielle KWK		zentrale Stromerzeugung	
	PEFC (H <sub>2</sub> )	PEFC (MeOH)	PEFC	PEFC	SOFC/GT	SOFC/GT	SOFC/GT	SOFC/GT
BZ-Technologie	PEFC (H <sub>2</sub> )	PEFC (MeOH)	PEFC	PEFC	SOFC/GT	SOFC/GT	SOFC/GT	SOFC/GT
Vergleichstechnologie	Otto-Motor*	Otto-Motor*	Motor-BHKW	ungekoppelt**	Gasturbine	ungekoppelt**	Erdgas-GuD	ungekoppelt**
erschöpf. Energie	-14%	11%	26%	-39%	-12%	-47%	-9%	-36%
Treibhauseffekt	-28%	-13%	3%	-37%	-12%	-47%	-10%	-34%
Versauerung	-66%	-52%	-57%	-81%	-68%	-80%	-31%	-71%
Eutrophierung	-69%	-63%	-84%	-75%	-87%	-69%	-57%	-44%
Kanzerogenität	-98%	-95%	-77%	-89%	-77%	-97%	-54%	-92%

PEFC (H<sub>2</sub>/MeOH): Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle mit Brennstoff Wasserstoff/Methanol) SOFC/GT: Solid Oxide Fuel Cell  
mit Gasturbine. \* 5 l Benzin/100 km, Euro 4-Grenzwert \*\* mit Strommix und Erdgas-Brenner

Bild 20: Emissionen im Vergleich bei Verwendung fossiler Energieträger als Ausgangsbasis

Für den Einsatz in Fahrzeugen und in dezentralen bzw. industriellen BHKWs ist dort u. a. der Primärenergieverbrauch von BZ-Systemen im Vergleich zu konventionellen Systemen aufgelistet, wobei fossile Energieträger die Ausgangsbasis bilden. Dabei fällt auf, dass im Falle von Methanol-betriebenen Brennstoffzellen im mobilen Einsatz sogar ein höherer Verbrauch erschöpflicher Energie vorliegt. Hinsichtlich der anderen Auswirkungen (Treibhauseffekt, Versauerung, Eutrophierung und Kanzerogenität) bringt die Brennstoffzelle allerdings fast durchweg deutliche Verbesserungen.

Noch deutlicher zeigt Bild 21 die Bedeutung der Brennstoffbasis im mobilen Bereich, wobei nicht allein die Auswirkungen des Fahrens, sondern auch die der Kraftstoff- und Fahrzeugherstellung sowie der Entsorgung und des Rezyklierens von Materialien auf die CO<sub>2</sub>-Freisetzung dargestellt ist. So lange fossile Energieträger die Basis bilden, können – global, ganzheitlich gesehen – nur höchstens geringe Reduktionen der negativen Umweltauswirkungen erzielt werden. Erst wenn die Brennstoffe Methanol und Wasserstoff regenerativ erzeugt werden, ergeben sich neben den starken lokalen Verbesserungen auch entsprechend grosse im Globalen. Auch für Brennstoffzellen ist der Übergang von der fossilen zur regenerativ geprägten Energiewelt eine Verpflichtung.

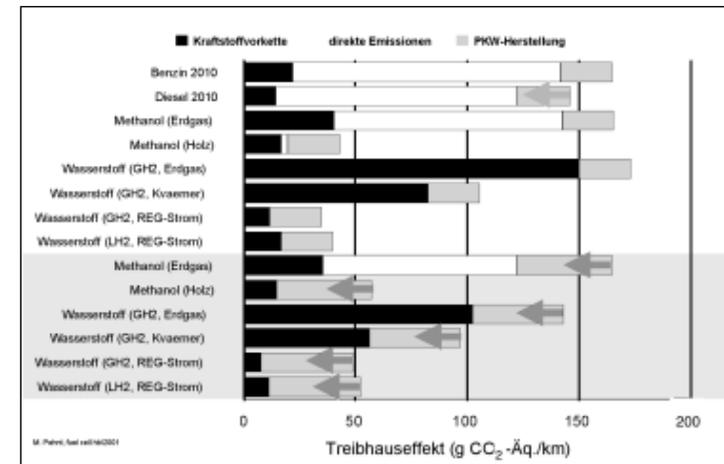


Bild 21: Treibhauseffekt

Man kann davon ausgehen, dass selbst bei Realisierung der unbestritten hohen ökologischen Potenziale die Brennstoffzellensysteme erst dann eine grössere technische Bedeutung insbesondere im mobilen Bereich erlangen werden, wenn auch die Kosten und die Lebensdauer mit den derzeit eingesetzten Energiewandlern mithalten können. Für verschiedene Einsatzbereiche sind in der folgenden Tabelle die vermutlichen kritischen Kostenlimits und nachzuweisende Lebensdauer dargestellt:

Einsatzgebiet	kritische Kosten [DM/kW <sub>e</sub> ]	Lebensdauer [h]
Pkw	≤ 100	> 4 000
Lkw/Bus	~ 300	~ 10 000
APU	~ 400	~ 5 000
Stationär (BHKW)		
- Haushalt	2 000	40 000
- Kraftwerk	2 000	> 60 000

Im Vergleich zum derzeitigen Entwicklungsstand müssen die Lebensdauer je nach Anwendung verdoppelt bis verfünffacht und die Kosten auf etwa 10 % abgesenkt werden, beides bei entsprechender Weiterentwicklung durchaus realisierbar.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Brennstoffzellen diverser Art haben bereits ihre prinzipielle Eignung nachgewiesen, fossile Brennstoffe mit höherem Wirkungsgrad im Vergleich zu derzeitigen Wandlern für die Strom- und Wärmeerzeugung zu nutzen und auch die Einführung regenerativ erzeugter Brennstoffe zu begünstigen. Sie können damit einen wichtigen Beitrag für die Schonung fossiler Energiequellen und deren Reichweiteverlängerung sowie für die Reduzierung der Umweltbelastung bei der Energiebereitstellung leisten. Brennstoffzellen haben daher das Potenzial, eine wichtige Komponente für eine zukünftige, nachhaltige Energieversorgung zu werden, insofern sind Brennstoffzellenaktivitäten eine unabdingbare Notwendigkeit. Trotz der noch hohen Kosten sind prototypische Anlagen zu bauen, um Erfahrungen zu sammeln und um Hinweise für Kostensenkungen zu erhalten. Wichtige Ansätze und Ziele bei der Kostensenkung, bei Erhöhung von Leistungsdichte und Lebensdauer sind vor allem:

- die Verminderung des Bedarfs teurer Werkstoffe und Suche nach kostengünstigen als Ersatz,
- die Entwicklung materialschonender Designs und serienfertigungsgeeigneter Herstellungsverfahren,
- die Erarbeitung von Rezyklierungsverfahren,
- die Entwicklung billiger serienfertigungsgeeigneter peripherer Komponenten,
- die Ermöglichung günstigerer Betriebsbedingungen (DMFCs mit höheren (> 100 °C) und SOFCs mit niedrigeren (≤ 800 °C) Betriebstemperaturen,
- Aufklärung und Abmilderung der Degradationsvorgänge und
- Fortschritte bei Brennstoffherzeugung und -bereitstellung

Es gibt noch viel zu tun. Geduld und Kontinuität sind gefordert.

## Literatur

Für eine vertiefte Beschäftigung mit Historie, aktuellen Entwicklungen und mit der Bedeutung der Brennstoffzellen werden u.a. folgende Schriften empfohlen:

U. Bossel: The Birth of the Fuel Cell 1835-1845. European Fuel Cell Forum 2000, Dr. Ulf Bossel, Oberrohrdorf, Schweiz.

N.Q. Minh, T. Takahashi: Science and Technology of Ceramic Fuel Cells. Elsevier Verlag, Amsterdam 1995.

Brennstoffzellen ... effiziente Energietechnik der Zukunft (Tagungsband). Tagung des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg, 20.-21.07.2000, Friedrichshafen.

Zukunftstechnologie Brennstoffzelle. Jahrestagung 1999 des Forschungsverbunds Sonnenenergie (FVS), FVS c/o Hahn-Meitner Institut GmbH, Kekuléstr. 5, D-12489 Berlin.

World Energy Outlook. Internationale Energieagentur, Paris (1998).

C. Carpetis: Globale Umweltvorteile bei der Nutzung von Elektroantrieben und/oder Batterien im Vergleich zu Antrieben mit Verbrennungsmotoren. DLR-IB-200044417400 (2000).

Dienhardt, Pehnt, M. und Nitsch, J.: Analyse von Einsatzmöglichkeiten und Rahmenbedingungen verschiedener Brennstoffzellensysteme in Industrie und zentraler öffentlicher Stromversorgung. Gutachten im Auftrag des Büros für Technikfolgen-Abschätzung (1999)

M. Pehnt: Ökologische Nachhaltigkeitspotentiale von Verkehrsmitteln und Kraftstoffen. DLR-STB-Bericht Nr. 24 (2001).

R. Henne und H. Müller-Steinhagen: Brennstoffzellentechnologie – ein allgemeiner Überblick. Tagungsband f-cell-Symposium „Die Brennstoffzelle“, Stuttgart, 15.-16.10.2001, Wirtschaftsförderung Region Stuttgart (Hrsg.).