Bundesverband
Kraft-Wärme-Kopplung e.V. (B.KWK)

Bund für
Umwelt und
Naturschutz
Deutschland

BUND
FREUNDE DER ERDE

Zwischen Euphorie und Ernüchterung

Stand und mittelfristige Perspektiven stationärer Brennstoffzellen

Oktober 2004

Martin Pehnt, Klaus Traube

gedruckt auf 100% Recyclingpapier

Bundesverband
Kraft-Wärme-Kopplung e.V. (B.KWK)

Alt-Tegel 16
D-13507 Berlin

Tel. 030.43 60 79 10
Fax. 030.43 60 79 11

email info@bkwk.de
www.bkwk.de

BUND
Bundesgeschäftsstelle

Am Köllnischen Park 1
D-10179 Berlin

Fon 030 / 27 58 64 - 0
Fax 030 / 27 58 64 - 40

bund@bund.net
www.bund.net

ZWISCHEN EUPHORIE UND ERNÜCHTERUNG

Stand und mittelfristige Perspektiven stationärer Brennstoffzellen

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	2
Einführung	3
Die Funktionsweise der Brennstoffzellentechnologie	4
Die Ausgangsposition	5
- Zentrale Problemlösung?	5
- Wasserstoffwirtschaft	6
- Aktuelle Marktsituation	8
Ökobilanzen im Vergleich	11
Markteintritts-Hemmnisse und Entwicklungsziele	15
Literatur	17
Anhang: Funktionsweise der Brennstoffzelle	18
Einleitung	18
Gasaufbereitung	20
Funktionsprinzip der Brennstoffzelle, unterschiedliche Typen	21

ZUSAMMENFASSUNG

Brennstoffzellen stehen vor einer Weggabelung. Auf der einen Seite zeugen zahlreiche Allianzen zwischen Gas- und Stromversorgern, Elektrounternehmen, Automobilfirmen, Mineralölkonzernen und Ingenieurbüros, aber auch Kompetenznetzwerke, Informations- und Weiterbildungsinitiativen und Demoprojekte von Aufbruchstimmung. Auf der anderen Seite kehrt eine gewisse Ernüchterung ein, nicht nur bezüglich des zeitlichen Verlaufs der Einführung, der immer wieder korrigiert wurde, sondern auch bezüglich der sich öffnenden Marktperspektiven.

Wesentliche Vorteile von Brennstoffzellen sind potenziell hohe elektrische Nutzungsgrade und äußerst geringe Schadstoff-Emissionen. Dennoch wartet die Brennstoffzelle seit ihrer Erfindung vor 160 Jahren auf den Durchbruch. Das liegt an einer Reihe entscheidender Hemmnisse. Dies sind vor allen Dingen die noch mangelhafte technische Reife der Systeme, die derzeit mit Degradation und häufigen Störfällen zu kämpfen haben, und die hohen Investitionskosten.

Bei der stationären Stromerzeugung liegt der potenzielle Markt für Brennstoffzellen im Bereich von KWK- Anlagen kleiner Leistung, wo sie mit motorischen Blockheizkraftwerken, und Gasturbinen für die industrielle Kraft-Wärme-Kopplung konkurrieren. Hier sind die Brennstoffzellen noch um einen Faktor 2,5 bis 20 zu teuer.

Auch bei den konkurrierenden konventionellen Systemen sind in Zukunft weitere technische Verbesserungen und Kostensenkungen zu erwarten. Motorische Blockheizkraftwerke erreichen schon heute hohe elektrische und Gesamt-Nutzungsgrade und sind in vielen Anwendungen bereits wirtschaftlich attraktiv. Gasturbinen für industrielle Kraft-Wärme-Kopplung werden ebenfalls kontinuierlich verbessert, mit umweltfreundlichen Brennkammern versehen und hinsichtlich ihrer Energieausbeute optimiert. Das Stiefkind der KWK- Technologien, der Stirling-Motor, dessen Markteintritt bevorsteht, hat zwar einen vergleichsweise niedrigen elektrischen Nutzungsgrad. Er zeichnet sich aber durch geringe Schadstoff-Emissionen und hohe Gesamtnutzungsgrade deutlich über 90 % aus.

Gegenüber den konkurrierenden Kraft-Wärme-Kopplungs-Technologien fällt der Klimavorsprung wegen der geringeren Gesamtnutzungsgrade der Brennstoffzelle, die auch in absehbarer Zeit aus wärmetechnischen Gründen unter denen der Konkurrenzsysteme liegen werden, geringer aus bzw. verschwindet ganz. Mit anderen Worten: Die Brennstoffzelle ist keine Alternative zur Kraft-Wärme-Kopplung, sondern sie ist eine unter mehreren Alternativen von Kraft-Wärme-Kopplung.

Natürlich können Brennstoffzellen-Kraftwerke – wie auch motorische Blockheizkraftwerke, Gasturbinen oder Stirling-Motoren! – mit regenerativen Brennstoffen betrieben werden. Während solarer Wasserstoff für stationäre Brennstoffzellen (mit Ausnahme von netzfernen Anwendungen) eine ferne Zukunftsvision ist, ist die Nutzung von Biomasse – Waldrestholz, nachwachsende Rohstoffe, Gülle, Klärschlamm u.a. – attraktiv. Da die Potenziale dieser Energieträger in Deutschland begrenzt sind, ist eine effiziente Nutzung dieser knappen – und kostspieligen – Energieträger durch Verstromung in Kraft-Wärme-Kopplung sehr erwünscht. Doch die Technologie der Biomasse-Vergasung leidet ebenfalls noch unter einer Reihe von Kinderkrankheiten. Am ehesten könnte die Kopplung von Biogas-Anlagen, die Reststoffe beispielsweise aus der Landwirtschaft vergären, mit Brennstoffzellen funktionstüchtig sein.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Brennstoffzellen-Entwicklung ist nicht zuletzt eine Förderung von Kraft-Wärme-Kopplung insgesamt. Fatal wäre es, wenn das Warten auf die Brennstoffzelle die Installation anderer KWK- Anlagen behindern würde. Umgekehrt wird ein Schuh daraus: Denn KWK- Technologien können schon heute infrastrukturelle Voraussetzungen schaffen, z. B. Nahwärmenetze, die später auch Brennstoffzellen zugute kommen, wenn sie die technischen und Kostenziele erreicht haben. Auch die zahlreichen institutionellen Hemmnisse, wie ein technisch einfacher und unbürokratisch geregelter Netzzugang, gehören dazu.

Es sollte also gelingen, die Begeisterung für Brennstoffzellen umzumünzen in eine Begeisterung für Kraft-Wärme-Technologien insgesamt, unter denen die Brennstoffzelle einen gebührenden Platz einnehmen wird.

EINFÜHRUNG

Vor hundert Jahren verkündete der Chemiker Wilhelm Ostwald, das 20. Jahrhundert solle ein Jahrhundert der elektrochemischen, verbrennungsfreien Energiewandlung werden. Im Kohlezeitalter schien seine Devise "Kein Rauch, kein Ruß" Zukunftsmusik.

Erst die nächste Jahrhundertwende bringt uns elektrochemischen Energiesystemen deutlich näher. Die Entwicklung effizienter und schadstoffarmer Energiewandler ist eine wesentliche Aufgabe der Energietechnik. Neben der Verbesserung von konventionellen Technologien kommt als eine „neue Technologie“ die Brennstoffzelle in Betracht. Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler, die eine kontinuierliche Umwandlung der chemischen Energie eines Brennstoffes und eines Oxidationsmittels in elektrische Energie ermöglichen.

Als Anwendung kommt neben dem Verkehrsbereich die stationäre Stromerzeugung in Frage. Dort liegt das Marktpotenzial der Brennstoffzelle voraussichtlich im Bereich kleiner Einheiten mit elektrischen Leistungen von einem Kilowatt bis einigen Megawatt. In diesem Bereich wird Strom derzeit in der Regel mittels Motorkraftwerken und kleinen Gasturbinen erzeugt und zwar (abgesehen von Notstromanlagen) nahezu ausschließlich in Kraft- Wärme- Kopplung (KWK) zur Versorgung begrenzter Objekte – Wohngebäude, Gewerbe- und Industriebetriebe – mit Strom und Heiz- oder Prozesswärme. Dies ist auch der potenzielle Markt für stationäre Brennstoffzellen, die ebenfalls in KWK operieren und mit Motor- und Gasturbinen- BHKW konkurrieren müssen. Daneben werden auch kleine, portable Systeme entwickelt, z. B. als Batterieersatz für Laptops.

In diesem Positionspapier wollen wir einen Überblick über die Funktion, den Einsatz und die Perspektive von Brennstoffzellen im stationären Einsatz geben und untersuchen, wie sich die Brennstoffzelle im Energiemarkt positionieren könnte. Wir beschränken uns auf den Einsatz im Kraftwerksmarkt, weil die Anwendung von Brennstoffzellen beispielsweise im Verkehrsbereich andere, komplexe Fragen aufwirft, wie beispielsweise die Frage nach zukünftigen Kraftstoffen und deren Infrastruktur (siehe auch [Pehnt 2002a und b, Traube 1992]).

Wir skizzieren zunächst die Funktionsweise und beleuchten dann die derzeitige Ausgangsposition. Dann wird die Ökobilanz zukünftiger Brennstoffzellen mit der von konkurrierenden KWK- Technologien verglichen. Schließlich werden Markteintritts-Hemmnisse und Entwicklungsmöglichkeiten betrachtet.

Eine Brennstoffzelle wandelt die chemische Energie eines Brennstoffes und eines Reduktionsmittels durch eine elektrochemische Reaktion kontinuierlich in elektrische Energie um. Die in der Reaktion

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$$

freigesetzte Energie kann zu einem Teil in elektrische Energie transformiert werden (siehe Anhang).

Die Brennstoffzelle „zähmt“ die Energie der Knallgasreaktion, genauer: eine Trennschicht, Elektrolyt genannt, verhindert, dass der Wasserstoff direkt zum Sauerstoff gelangt und das Gasgemisch explodiert. Dieser Elektrolyt kann eine ionenleitende Flüssigkeit sein, oder auch eine Membran, eine Karbonatschmelze, eine Säure, Lauge oder eine Keramik.

Die eigentlichen elektrochemischen Vorgänge an den beiden Elektroden sind nichts anderes als die Umwandlung elektrisch neutraler Teilchen – Wasserstoff und Sauerstoff – in elektrisch geladene Ionen. Dabei werden Elektronen vom Wasserstoff abgegeben und fließen über den äußeren Stromkreis zur Sauerstoffseite: dieser Elektronenfluss ist der elektrische Strom, den uns die Brennstoffzelle liefert. Die elektrisch geladenen Ionen im Elektrolyten transportieren den Strom zwischen den Elektroden. Elektrizität wird also in elektrochemischen Zellen im Kreis geführt, ohne verloren zu gehen *(Abbildung 1)*: als Ionenstrom im Inneren des Elektrolyten und als Elektronenstrom in den Metalldrähten des äußeren Stromkreises. Die chemische Energie der Knallgasreaktion treibt diesen Stromfluss, so lange Wasserstoff und Sauerstoff an den Elektroden zur Verfügung stehen. Das Wasser, das bei der direkten Verbrennung von Knallgas entsteht, muss laufend aus der Zelle entfernt werden. Die Verlustwärme, die bei der Reaktion entsteht, kann genutzt werden: beispielsweise als Heizwärme für Gebäude und Prozesse.

Eine Brennstoffzelle ist also wie eine "offene" Batterie: solange die Reaktionsgase zugeführt werden, kann kontinuierlich Strom fließen. Und dies prinzipiell beliebig lange. Eine Aufladung wie bei den Batterien ist nicht notwendig, denn die chemische Energie wird nicht in der Brennstoffzelle gespeichert, sondern von außen zugeführt, als Luftsauerstoff und Wasserstoffgas. Um nennenswerte Spannungen zu erreichen, werden viele solcher Brennstoffzellen aufeinander gestapelt – man spricht dann von Brennstoffzellen- Stacks („Stapel“) – und in Reihe geschaltet.

Steht Wasserstoff nicht unmittelbar zur Verfügung, sondern beispielsweise Erdgas, so kann dieses in den Brennstoffzellen-Anlagen in einem sogenannten Reformer in ein wasserstoffreiches Gas umgewandelt werden. In manchen Brennstoffzellen, den Hochtemperatur-Brennstoffzellen, findet diese Umwandlung auch unmittelbar an den einzelnen Zellen statt.

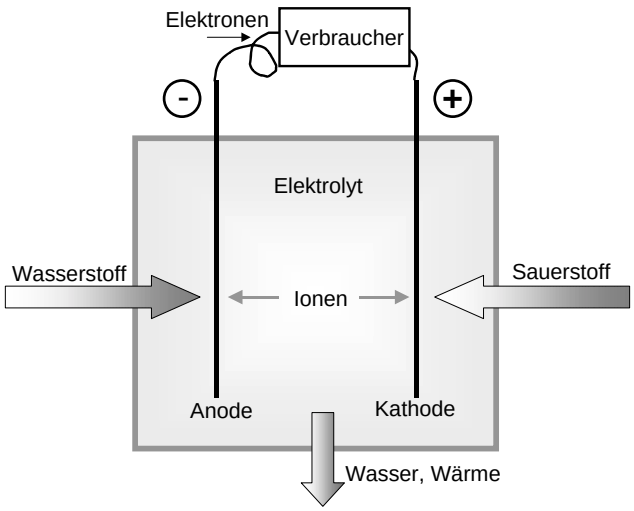


Abbildung 1:

Das Prinzip der Brennstoffzelle: durch "kalte Verbrennung" von Wasserstoff und Sauerstoff wird die chemische Energie des Wasserstoffs direkt in elektri-

ZENTRALE PROBLEMLÖSUNG?

Sofern sie sich am Markt durchsetzen, werden Brennstoffzellen das energietechnische Arsenal zur Stromerzeugung effektiv ergänzen. Seit einigen Jahren kursieren aber hochgestimmte, überzogene Erwartungen, die sich energiepolitisch kontraproduktiv auswirken. Dazu zwei typische Beispiele aus eher konträren Bereichen des energiepolitischen Spektrums:

Die Publikumszeitschrift der RWE *Agenda* (Ausgabe 1/00) ernannte die Brennstoffzelle zur „Technik des dritten Jahrtausends". Sie bilde den „fließenden Übergang zu dezentralen und regenerativen Energiesystemen. Die Brennstoffzelle, darin sind sich alle Experten einig, wird schon in wenigen Jahren die Energieversorgung revolutionieren".

Im "Zukunftsenergieprogramm" vom Oktober 2001 der Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen heißt es: "Schritt für Schritt beenden wir das Zeitalter der fossilen Energien: Wind- und Sonnenenergie werden durch die Brennstoffzelle ergänzt; diese Technologie wiederum stellen wir nach und nach um von Erd- auf Biogas oder solar erzeugten Wasserstoff."[1]

Beide Beispiele verknüpfen die Brennstoffzelle suggestiv mit regenerativen Energien. Seit einigen Jahren entspricht dies weit verbreiteten Vorstellungen. In der Medienberichterstattung wird die Brennstoffzelle nicht selten als regenerative Energietechnologie eingeordnet. Das Duo Brennstoffzelle und solarer Wasserstoff gilt weithin als die energiewirtschaftliche Zukunft. Zudem erscheint die Brennstoffzelle als der Schlüssel zur Dezentralisierung der Energieversorgung.

Die Gleichsetzung von Brennstoffzelle mit Dezentralität erscheint plausibel angesichts der Ankündigungen über die massenweise Einführung von kleinen Brennstoffzellen für die Strom- und Wärmeversorgung von Ein- und Mehrfamilienhäusern und deren stromseitige Verschaltung zu „virtuellen (Groß-) Kraftwerken". Diese Bilder nähren die Vorstellung, mit der Brennstoffzelle entstünde erst die KWK- Technologie, welche diese Dezentralisierung der Stromerzeugung ermöglicht. Gängig ist es auch, die gekoppelte Stromerzeugung mittels Brennstoffzellen der ungekoppelten Stromerzeugung gegenüberzustellen und die so ermittelten Effizienzvorteile nicht der KWK gutzuschreiben, sondern der Brennstoffzelle. Dieser Ansatz wird auch durch wissenschaftliche Gutachten vorgezeichnet. So heißt es im TA-Gutachten zur Brennstoffzellen-Technologie des Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag: „Ein entscheidender Vorteil der Brennstoffzellen ist in der Möglichkeit der Abwärmenutzung – insbesondere im dezentralen Einsatz – zu sehen".[2]

Das ist irreführend, weil jede Anlage zur Stromerzeugung aus Brennstoffen mit begrenztem Zusatzaufwand zur Auskopplung der – zwangsläufig mit der Stromerzeugung verbundenen – Abwärme als nutzbare Heiz- oder Prozesswärme ausgerüstet werden kann. Das gilt für Anlagen mit Gas- und Dampfturbinen oder Verbrennungsmotoren ebenso wie für Brennstoffzellen.
Wenn Strom größtenteils nicht in KWK erzeugt wird, dann liegt das nicht an der zur Stromerzeugung verwendeten Technologie, sondern an der starken Zentralisierung der Stromerzeugung in Großkraftwerken[3].

---

[1] Vom atomaren zum solarem Zeitalter. Das Zukunftsenergieprogramm. Hrsg. Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen, Oktober 2001

[2] D. Oertel/T. Fleischer. TA-Projekt „Brennstoffzellen-Technologie", Endbericht. TAB- Arbeitsbericht Nr.67, Dezember 2000, S. 30. Auch veröffentlicht als Bundestagsdrucksache 14/5054, 8.1.2001.

[3] Je stärker die Stromerzeugung in ortsfernen Großkraftwerken zentralisiert ist, desto geringer ist das Potenzial für die KWK. Die Bedeutung dieser Struktur der Stromerzeugung wird deutlich beim Ländervergleich. Laut EUROSTAT

Zur Dezentralisierung der Stromerzeugung mittels KWK- Anlagen bedarf es nicht der Brennstoffzelle, die Technologie ist am Markt vorhanden. Motor- BHKW ließen sich ebenso wie Brennstoffzellen zu „virtuellen“ (Groß-) Kraftwerken verschalten. Ob Brennstoffzellen dezentral in KWK operieren, entscheidet nicht die Technologie, sondern die Anwendung. Würden Großkraftwerke auf der grünen Wiese mittels Brennstoffzellen errichtet, so wären diese weder dezentral noch KWK- Anlagen.

Energiewirtschaftlich relevant ist lediglich die Frage, ob Brennstoffzellen für den Einsatz als KWK- Anlagen (d.h. auch: zur dezentralen Stromerzeugung) geeigneter sind als die konkurrierenden Technologien. Das entscheidet sich an der relativen wirtschaftlichen und energetischen Effizienz. Diese Frage wird freilich aus dem Blickfeld verdrängt, wenn die Brennstoffzelle nicht an den konkurrierenden Technologien gemessen wird, sondern an der ungekoppelten Erzeugung, weil sie als ***die*** dezentrale KWK- Technologie präsentiert wird.

Die gängigen überzogenen Erwartungen an die Brennstoffzellen wirken kontraproduktiv, weil sie davon ablenken, was heute zu tun ist, um die Energieversorgung nachhaltig zu gestalten. Beispielsweise wurde das Image der Brennstoffzelle schon politisch instrumentalisiert, um den seinerzeit von der Bundesregierung geplanten KWK- Ausbau mittels einer KWK- Quote zu verhindern.[4]

WASSERSTOFFWIRTSCHAFT?

Die Brennstoffzelle benötigt Wasserstoff als Energieträger, der dazu unter erheblichem Aufwand an Energie und Kosten durch Reformierung aus fossilen oder biogenen Brennstoffen oder durch Elektrolyse von Wasser hergestellt werden muss. Gegenüber den konkurrierenden Technologien ist das kein Vorteil, sondern zunächst eine Einschränkung.

Doch die "Wasserstoffwirtschaft" gilt im Duo mit der Brennstoffzelle weithin als die nachhaltige Zukunft des Energiesystems. Diese populäre Verheißung hat sich in der Politik etabliert, so im Langzeitprogramm der europäischen Kommission vom Oktober 2003 "European Hydrogen and Fuel Cell Technology Partnership", das darauf abzielt, in Europa den Umstieg in die Wasserstoffwirtschaft zu verwirklichen. So zählte auch das "Zukunftsenergieprogramm" der grünen Bundestagsfraktion den "Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur zu den wichtigsten Komponenten eines neuen Energieversorgungssystems." [5]

Das Bild einer „Wasserstoffwirtschaft“ wurde in den fünfziger Jahren kreiert, und erlebte eine erste Blüte in der Folge der Ölpreiskrisen der siebziger Jahre. Wissenschaftler propagierten Wasserstoff als Mittel für Speicherung und Transport enormer Mengen an Energie, die in fernen Regionen zunächst in Form von Strom gewonnen werden sollten, der vor Ort zur Wasserstoffherstellung dient. So sollte Wasserstoff mittels gigantischer Solarkraftwerke in der Sahara oder mittels einer Konzentration von Atomkraftwerken in der Südsee erzeugt und von dort importiert werden.[6] Solche Gigantomanien waren zeitgebunden und werden längst nicht mehr ernsthaft propagiert. Aber das Bild der Wasserstoffwirtschaft blieb erhalten und wurde neu

---

wurden im Jahr 2000 in Deutschland 11% des Stroms in KWK erzeugt, in Frankreich nur 3%, dagegen in Dänemark 53%, in den Niederlanden 38%, in Finnland 36%.

[4] In ihrem Aktionsprogramm Klimaschutz vom 26.1.2001 argumentierten die großen Stromkonzerne, die KWK-Quote werde "unter Festschreibung der heutigen konventionellen Technik Überkapazitäten schaffen und damit in wenigen Jahren erst marktreifen, innovativen neuen Technologien wie der Brennstoffzelle das unter anderen Rahmenbedingungen entstehende Marktpotential abschnüren."

[5] Aus dem "Zukunftsenergieprogramm" der grünen Bundestagsfraktion." Vom atomaren zum solarem Zeitalter" vom Oktober 2001: "Wasserstoff kann die Brennstoffbasis für die Strom- und Wärmeerzeugung in hocheffizienten Gas- und Dampfturbinenkraftwerken, für Brennstoffzellen sowie für Fahrzeugantriebe bilden. Und deshalb zählt der Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur zu den wichtigsten Komponenten eines neuen Energieversorgungssystems."

[6] Siehe dazu v.a. J. Bokris/ E.W. Justi: Wasserstoff – Energie für alle Zeiten. Neuauflage München 1980.

fundiert. Wasserstoff wird nunmehr hauptsächlich propagiert als Brennstoff für den Fahrzeugantrieb, so auch von BMW für Verbrennungsmotoren und von Daimler-Chrysler für Brennstoffzellen, daneben noch zur Speicherung von unstetig in Wind- und Solarkraftwerken erzeugtem Strom.

Die Etablierung des Bildes vom Wasserstoff als zentralem Problemlöser führte seit Anfang der 80er Jahren zur Bereitstellung von Fördergeldern für Entwicklungen im Bereich der Wasserstofftechnologie und für Untersuchungen zu ihrer Markteinführung im Rahmen von Energieszenarien. Daher lassen sich heute recht gut fundierte Aussagen zu Ökologie und Kosten eines großflächigen Einsatzes von Wasserstoff als Energieträger machen. Solche im folgendem verwendeten Aussagen sind einem kürzlich von J. Nitsch (DLR) erstellten Gutachten zu "Potenziale der Wasserstoffwirtschaft" [7] entnommen.

Der populären Suggestion, Wasserstoff sei ja als Bestandteil des Wassers in unerschöpflichen Mengen verfügbar, ist zunächst die banale Tatsache entgegen zu halten, dass Wasserstoff kein in der Natur vorkommender Primärenergieträger ist, sondern aus Wasser oder Kohlenwasserstoffen (d. h. fossilen oder biogenen Primärenergieträgern) hergestellt werden muss. Das geschieht heute fast ausschließlich durch Reformierung von fossilen Brennstoffen, v.a. Erdgas. Dabei enthält der Wasserstoff – auch in Zukunft – nur 70% bis maximal 75% der in Form von Erdgas eingesetzten Energie. Wegen dieses Verlustes an nutzbarer Energie erbringt auch der Einsatz von aus Erdgas erzeugtem Wasserstoff in Brennstoffzellen gegenüber dem Einsatz von Erdgas in konventionellen BHKW keine oder kaum Verminderung von CO_2-Emissionen, wie wir weiter unten noch zeigen.

Generell kann der Einsatz von Wasserstoff nur dann zur CO_2-Minderung beitragen, wenn er mittels regenerativer Energieträger erzeugt wird, sofern man Atomstrom nicht auch als eine Alternative ansieht. Der "regenerative" Wasserstoff kann durch Wasserelektrolyse mittels Strom aus Wasser- und Windkraft, aus solaren oder geothermischen Kraftwerken erzeugt werden, im Prinzip auch durch Vergasung oder Vergärung (mit anschließender Reformierung) von Biomasse. Der Nutzungsgrad fortschrittlicher Verfahren von Elektrolyse bzw. Vergasung liegt wiederum nur um 70-75%. Bezieht man den vor- und nachgelagerten Energieeinsatz ein, dann wird der zukünftige, großtechnisch regenerativ erzeugte Wasserstoff aus Elektrolyse nur etwa zwei Drittel der zur Herstellung eingesetzten elektrischen Energie enthalten und je kWh etwa doppelt so teuer werden wie der eingesetzte regenerative Strom.

Dennoch mag der Einsatz des durch Elektrolyse gewonnenen Wasserstoffs zum Antrieb von Fahrzeugen eines Tages sinnvoll sein. Aber der hier interessierende, nochmals mit Verlusten und Kosten verbundene Einsatz des Wasserstoffs zur **stationären** Stromerzeugung (ob in Brennstoffzellen oder konventionellen Stromerzeugern[8]) wäre offensichtlich unsinnig, wenn der zur Herstellung eingesetzte Strom in das öffentliche Netz eingespeist und somit direkt genutzt werden könnte.

Diese Möglichkeit wird erst bei einem hohen Anteil des Stroms, der durch die unstetige Windkraft und Solarstrahlung "fluktuierend" erzeugt wird, an Grenzen stoßen.[9] Jenseits dieser Grenzen könnten überschüssige, vom Netz nicht aufnehmbare Stromspitzen zur Herstellung von Wasserstoff für eine spätere Rückverstromung eingesetzt werden. Der Wasserstoff diente damit gleichsam der Speicherung fluktuierender Stromspitzen. Nur dazu, abgesehen von Nischenmärkten, könnte ein Einsatz von Wasserstoff zur stationären Stromerzeugung einmal in Frage kommen.

---

[7] Joachim Nitsch: Potenziale der Wasserstoffwirtschaft, Gutachten für den Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU). Stuttgart, Juni 2002

[8] Wasserstoff könnte selbstredend nicht nur in Brennstoffzellen, sondern überall anstelle fossiler oder biogener Brennstoffe eingesetzt werden, so auch in Verbrennungsmotoren, Gasturbinen oder Dampfkraftwerken.

[9] Bei diesem Modell wird vorausgesetzt, dass es nicht zu örtlichen Engpässen kommt, sondern das Netz für einen überregionalen Ausgleich ausgebaut ist und erst dann fluktuierende Stromspitzen nicht mehr aufnehmen kann, wenn sie momentan (nach überregionalem Ausgleich) den abgeforderten Strombedarf übersteigen.

Die Bedingungen für diesen Einsatz von Wasserstoff seien hier illustriert am Beispiel der "Langfristszenarien für eine nachhaltige Energienutzung in Deutschland", die vom Wuppertal Institut und dem DLR im Auftrag des Umweltbundesamtes entwickelt und im Juni 2000 vorgelegt wurden. Für dieses Szenario war ein Absinken der CO_2-Emissionen bis 2050 auf 20% des Niveaus von 1990 vorgegeben. Das wird im Szenario erreicht durch eine Senkung des Primärenergieverbrauchs bis 2050 auf knapp die Hälfte des derzeitigen, wovon ein Drittel regenerativ erzeugt wird. Die Stromerzeugung sinkt dagegen nur wenig und erreicht bis 2050 einen regenerativen Anteil um 60%; davon wird knapp die Hälfte im Inland "fluktuierend" aus Windkraft und Photovoltaik erzeugt. Trotz dieser hohen Anteile wird Wasserstoff nicht zur Stromerzeugung benötigt, sondern lediglich im Verkehr eingesetzt, wo er in 2050 – regenerativ erzeugt – 17% des Energiebedarfs deckt. Bezogen auf den gesamten Endenergiebedarf beträgt der Wasserstoffanteil dann knapp 3%.

Das Beispiel demonstriert: die großtechnische Erzeugung von Wasserstoff zum quantitativ relevanten Einsatz in der **stationären** Stromerzeugung wird, wenn überhaupt, jedenfalls noch auf Jahrzehnte hinaus nicht anstehen. Als **regenerativer** Brennstoff für stationäre Brennstoffzellen kommt noch auf lange Sicht praktisch nur Biomasse in Frage.

AKTUELLE MARKTSITUATION

Auf dem Markt gab es bisher nur das Brennstoffzellensystem von ONSI/UTC zu kaufen, das mit 200 kW elektrischer Leistung als Erdgas-Blockheizkraftwerk (BHKW) weltweit in einigen hundert Exemplaren installiert ist. Die Entwicklung wurde aber im Jahr 2003 aufgegeben, weil eine Reduktion der Herstellkosten bis zu Konkurrenzfähigkeit mit konventionellen BHKW nicht erreichbar erschien. Alle anderen bereits installierten Brennstoffzellenanlagen sind nicht kommerziell auf dem Markt erhältlich, sondern dienen als Labor- oder Feldtestgeräte.

Als Resultat langjähriger, aufwendiger Entwicklungsarbeiten begannen etwa ab 2000 eine Reihe von Unternehmen mit Feldtests von sog. Vorserienmodellen für die Versorgung mit Strom und Wärme von

- einerseits Ein- bzw. Mehrfamilienhäusern ("Hausenergieversorgung") im Bereich elektrischer Leistungen von 1 bis 5 kW,
- andererseits Gewerbebetrieben und Wohnanlagen im Bereich elektrischer Leistungen von einigen hundert kW.

Im Bereich der **Hausenergieanlagen** werden derzeit (2004), in Deutschland und Nachbarländern eine größeren Anzahl von Feldtestgeräten mit Erdgasbetrieb erprobt von

- Sulzer- Hexis, planare Hochtemperatur Feststoff-Zelle (SOFC: Solid Oxide Fuel Cell) "HXS 1000 Premiere", 1 kW_{el}/ 2,5 kW_{th}
- Vaillant, PEM-(Proton Exchange Membrane) Zelle von Plug Power (USA), 4,6 kW_{el}/ 7 kW_{th}

Nach Beginn der Feldtests von Sulzer- Hexis und Vaillant ist offensichtlich innerhalb nur eines Jahres eine weitgehende Ernüchterung hinsichtlich der Hausgeräte eingetreten. Beide Hersteller haben die Anzahl Feldtestgeräte gegenüber den angekündigten Mengen stark reduziert, um zunächst die Entwicklung für verbesserte Vorseriengeräte voranzutreiben. Während Vaillant Ende des Jahres 2000 angekündigt hatte, in 2003 und 2004 werden "einige tausend Anlagen in Betrieb gehen"[10], wurden bis Mitte 2004 tatsächlich etwa 50 Anlagen installiert. Sulzer- Hexis hat bisher etwa 100 Anlagen ausgeliefert. Vaillant kündigte an, eine weitere Forschungs- und Entwicklungsphase zwischenschalten zu müssen mit dem Ziel, eine bei höheren Temperaturen

[10] E&M 15.12.2000

operierende PEMFC zu entwickeln und damit die Gasaufbereitung und Heizungseinbindung zu erleichtern.

Bei den noch erforderlichen Entwicklungen geht es außerdem u.a. um die Lebensdauer der Zellstapel, Abmessungen und Gewicht der Geräte[11], die Wirkungsgrade und v.a. die viel zu hohen Herstellkosten. Sulzer- Hexis ab Ende 2005 ein "seriennahes" Produkt als Kleinserie ausliefern.[12]. Vaillant spricht von einer nächsten "vorkommerziellen" Phase ab 2005/6 und rechnet mit der Serienreife für breite Anwendung nun nicht mehr vor 2010[13]. Nennenswerte Marktanteile sind demnach bis Ende des Jahrzehnts nicht zu erwarten.

In der Entwicklung von Brennstoffzellensystemen im Bereich 1 – 5 kWe engagieren sich zudem die Firmen Viessmann (2 kW_e/5 kW_{th}), die zur Baxi group gehörende european fuel cell gmbh (1,5 kW_e/3 kW_{th}) sowie RWE und Buderus, die im Juli 2004 eine Kooperation auf der Basis der Brennstoffzelle der amerikanischen IdaTech (4,6 kW_e/7 kW_{th}) vereinbarten. Es handelt sich in allen Fällen um PEM- Zellen, die derzeit als Prototypen getestet werden und frühestens ab 2005 in Feldtests erprobt werden sollen.

Während im Leistungsbereich um 5 kW_e bereits motorische BHKW am Markt etabliert sind (Marktführer Senertec liefert in 2004 über 2000 Geräte), galt der für Einfamilienhäuser geeignete Leistungsbereich um 1 kW_e als kommende Domäne der Brennstoffzelle. Im Jahr 2003 hat aber Honda in Japan ein motorisches 1 kW_e BHKW auf den Markt gebracht und bis Oktober 2004 bereits ca. 10.000 Geräte verkauft.[14] Ebenfalls in 2003 begannen zwei britische Energieversorger, die E.ON- Tochter Powergen und die zur BG Group gehörende MicroGen, Feldtests mit je etwa fünfzig erdgasbetriebenen 1 kW_e Stirling- Motoren. Powergen kündigte im August 2004 an, 80.000 dieser 1 kW_e Stirling- BHKW von der neuseeländischen Firma Whisper Tech zu ordern und innerhalb der nächsten fünf Jahre zu installieren.

Alle BHKW- Entwicklungen im Leistungsbereich 1 – 5 kW_e, Brennstoffzellen wie Motoren, werden mit Zusatzbrennern ausgerüstet und sollen als Alternative zu konventionellen Gasheizgeräten vermarktet werden. Der Energieversorger Powergen will sich im Hausgerätemarkt etablieren, indem er Hausheizgeräte kombiniert mit Gaslieferungen anbietet. Die Heizgeräte-Hersteller Vaillant und Baxi engagieren sich neuerdings sowohl in der Brennstoffzellen- Entwicklung als auch im Motor- BHKW- Markt.[15]

Im Bereich der **mittelgroßen Brennstoffzellen** für Industrie-/Gewerbebetriebe und große Wohnanlagen treten in Deutschland vier Hersteller auf, die sich bisher vorwiegend auf BHKW-Modelle im Bereich von 200 bis 250 kW elektrischer Leistung konzentrieren, nämlich

- **ONSI,** nunmehr **UTC Fuel Cells** 200 kW_{el} BHKW (Erdgas- PAFC)[16]; dies ist die einzige Anlage, die schon kommerziell vertrieben wurde; weltweit sind einige hundert Exemplare verkauft worden, davon wurden etwa 20 in Deutschland installiert. Der elektrische Wirkungsgrad liegt bei Betriebsbeginn bei knapp 40%. Im Vergleich zu den marktgängigen Motor- BHKW dieser Leistungsklasse wiegt der nur geringfügig höhere elektrische Wirkungsgrad die weit höheren Investitionskosten nicht auf. Der PAFC wird kein erhebliches Entwicklungspotential zugeschrieben, im Jahr 2003 hat UTC die PAFC- Technologie vorläu-

[11] So wog das 1 kWe Sulzer-Hexis-Gerät mit 450 kg (etwa soviel wie das 9 kW_{el}–Stirling Gerät von Solo) und war in üblichen Heizungskellern kaum unterzubringen.

[12] BINE projektinfo 06/04 Hausenergiesysteme mit Brennstoffzellen

[13] E&M 15.2.2004

[14] Persönliche Mitteilung Jürgen Krantz, Honda Europe, 27.10.2004.

[15] Vaillant hat Power Plus Technologies, Hersteller des 5 kW_e- Motor-BHKW Ecopower, übernommen, Baxi sowohl Senertec als auch die Hamburger european fuell cell GmbH. .

[16] PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell, Erläuterung siehe Anhang "Grundlagen zur Brennstoffzelle.

fig zu Gunsten der PEMFC aufgegeben. Allerdings wird vermutet, dass UTC nach einer nicht erfolgreichen Entwicklung der PEMFC die PAFC-Technologie wieder aufgreift.

- **Ballard** 250 kW_{el} BHKW (Erdgas- PEM). Die erste Anlage in Europa wird seit Mitte 2000 in Berlin von der BEWAG als Demonstrationsprojekt betrieben[17]. Im Dauertest bei 212 kW_{el} netto wurden elektrische Wirkungsgrade um 33-35% gemessen (eher niedriger als bei konventionellen Motor- BHKW dieser Leistung) bei einer Brennstoffausnutzung um 75%. Insgesamt sind fünf Anlagen in Europa installiert. Im Jahr 2003 hat Alstom die Vermarktung dieser Anlagen aufgegeben, weitere Anlagen scheinen für Europa nicht geplant zu sein. Auch Ballard konzentriert sich für den stationären Einsatz auf die Entwicklung kleiner Systeme im 1 kW_{el}-Bereich.[18]
- **Siemens- Westinghouse** (SOFC). Eine 100 kW_{el} Anlage ist seit März 2001 in Holland in Betrieb und hat 46% elektrischen Wirkungsgrad bei 73% Bennstoffausnutzung erreicht. Einige weitere Anlagen mit höheren elektrischen Leistungen wurden u. a. in den USA installiert. Es sollen 47% elektrischer Wirkungsgrad bei 80% Brennstoffausnutzung erreicht werden. Ein Hybrid-Pilotprojekt mit erhöhtem Gasdruck und nachgeschalteter Gasturbine wurde 2002 in den USA eingeweiht und soll 53% elektrischen Wirkungsgrad erreicht haben, wurde aber nach 3000 Betriebsstunden stillgelegt. EnBW und Siemens planten die Installation eines weiteren Hybridprojekts von 1 MW_{el} in Marbach für 2003, das 55-60% el. Wirkungsgrad erreichen soll. Das Projekt wurde 2002 aufgegeben, angeblich weil auf dem Markt keine passende Mikrogasturbine zu finden war. Derzeit spricht Siemens davon, dass vor weiteren Felderprobungen zunächst noch enorme Entwicklungsarbeit zu leisten sei.
- **MTU CFC Solutions** 250 kW_{el} "HotModule" (MCFC)[19]. MTU (DaimlerChrysler) begann die Entwicklung Anfang der neunziger Jahre und bezieht Brennstoffzellen- Komponenten unter Lizenz von Fuel Cell Energy Inc. (USA). Eine erste Anlage wurde im November 1999 bei den Stadtwerken Bielefeld installiert. Bis Mitte 2004 wurden 8 HotModule installiert und erprobt. Der erreichte elektrische Wirkungsgrad wurde als "weltweit höchster" einer Brennstoffzelle zu 47% angegeben, der Zielwert zu 50%, der derzeitige Stückpreis zu 7.000 - 8.000 €/kW_{el}. Eine Serienfertigung zum Stückpreis von 2.500 €/kW_{el} soll 2006/7 beginnen, Zielwert sei 1500 €/kW[20]. RWE hat sich im Jahr 2003 mit einer Sperrminorität an MTU CFC Solutions beteiligt .

Diese Entwicklungen deuten darauf hin, dass allenfalls die mittelgroße Anlage von MTU/RWE noch vor 2010 am Markt eine nennenswerte Rolle spielen wird, nicht aber die zunächst spektakulär in Szene gesetzten Kleinst- Brennstoffzellen. In deren Leistungsbereich 1 – 5 kW_e sind bisher nur Motor- BHKW, vermutlich demnächst auch Stirling- BHKW am Markt erhältlich.

Nach dem Abklingen der euphorischen Phase tritt nun die Frage in den Vordergrund, welche Perspektiven für die Brennstoffzellen mittelfristig – etwa im Zeitraum 2010 – 2030 – absehbar sind. Dieser Frage gehen wir im weiteren nach. Dabei beziehen wir uns v.a. auf die Ergebnisse der im Herbst 2003 abgeschlossenen, umfangreichen BMU-Studie zu diesen Perspektiven [BMU 2004].

---

[17] Unter Beteiligung von EDF, EON und VEAG, Projektkosten (für 5 Jahre Betrieb) 7,5 Mio DM, 40% davon finanziert durch EU, 10% Beteiligung Alstom.

[18] Fuel Cell Today Market Survey: Large Stationary Applications", Oktober 2004.

[19] MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell, zu Deutsch Schmelzkarbonat- Brennstoffzelle, Erläuterung siehe Anhang "Grundlagen zur Brennstoffzelle".

[20] Angaben G.Huppmann, MTU, in einem Vortrag auf dem 3.KWK-Symposium der Uni Duisburg am 24.6.03.

Die Begeisterung für Brennstoffzellen gründet vor allem in den ausgezeichneten potenziellen elektrischen Wirkungsgraden und den niedrigen Schadstoffemissionen im Betrieb.

Um die Vorteile von Brennstoffzellen- KWK- Systemen gegenüber den konkurrierenden Kraft-Wärme-Kopplungs (KWK)-Systemen (Motor-BHKW (MBHKW), Gasturbine, Stirling-Motor) bemessen zu können, ist es nicht allein ausreichend, den elektrischen Nutzungsgrad heranzuziehen. Der elektrische Nutzungsgrad, soweit er sich aus den realisierten Pilotanlagen, Simulationsrechnungen und Zielangaben der Hersteller definieren lässt, wird in der Tat deutlich über den konventionellen Konkurrenzsystemen liegen.[21]

Vielmehr hängt die Klima- und Energiebilanz wesentlich vom Gesamtnutzungsgrad ab, der neben der erzeugten Elektrizität die ausgekoppelte Wärme berücksichtigt. Bislang ist nicht abzusehen, dass Brennstoffzellen die hohen Gesamtnutzungsgrade beispielsweise motorischer BHKW erreichen können. Die meisten Hersteller gehen von 80, maximal 85 % Jahresnutzungsgrad aus. Im Vergleich dazu erzielen beispielsweise Motor- BHKW (insbesondere solche mit Brennwertnutzung) und Stirling-Motoren Nutzungsgrade z. T. deutlich über 90 %.

Diese Unterschiede erklären sich nicht nur durch – bislang – vernachlässigte Bemühungen der Hersteller und Entwickler im Bereich der thermischen Optimierung der Brennstoffzellen-Systeme. Vielmehr sind Brennstoffzellen durch ein komplexes thermisches Management gekennzeichnet, um beispielsweise Luft vorzuwärmen und einen funktionierenden Wasserhaushalt zu gewährleisten. U. a. durch dieses Wärmemanagement und die Vielzahl der kleineren Verlustquellen im Brennstoffzellen- BHKW, die wärmetechnisch nur aufwändig zu erschließen sind, ist eine Anhebung des Gesamtnutzungsgrades über die angenommenen Zielnutzungsgrade hinaus äußerst schwierig zu realisieren. Es ist daher in absehbarer Zeit davon auszugehen, dass Brennstoffzellen-Kraftwerke im Gesamtnutzungsgrad unter den Konkurrenztechnologien liegen werden.Zum Vergleich der verschiedenen KWK- Optionen untereinander und mit der ungekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme wurden im Rahmen eines umfangreichen Forschungsvorhabens für das Bundesumweltministerium [BMU 2004] detaillierte Ökobilanzen erstellt. Diese berücksichtigen neben dem Betrieb des Kraftwerkes auch die Bereitstellung des Erdgases und die Produktion der Kraftwerke (inklusive aller Materialien und Verarbeitungsschritte). Durch eine solche Lebenswegbetrachtung soll sichergestellt werden, dass sich auch im Bereich der vorgelagerten Umweltwirkungen keine aus ökologischer Sicht kritischen Aspekte ergeben.Zur Festlegung der Nutzungsgrade – in [BMU 2004] werden generell Jahresnutzungsgrade zu Grunde gelegt – wurden neben einer Auswertung der Literatur und der Analyse von Betriebsdaten existierender und Pilotanlagen Hersteller- und Betreiberbefragungen durchgeführt. Die festgelegten Nutzungsgrade von Brennstoffzellen sind im Rahmen der Befragungen und eines Workshops diskutiert und festgelegt worden. Dabei wurde als Analysezeitpunkt das Jahr 2010 zu Grunde gelegt. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass Brennstoffzellen technologisch noch optimierungsbedürftig sind. Zugleich wird auch den Konkurrenztechnologien ein technologieabhängiger Entwicklungsspielraum gegenüber heute eingeräumt. Da insbesondere bei den kleinen Brennstoffzellenheizgeräten noch Unsicherheit über die erzielbaren Gesamtnutzungsgrade herrscht, wird bei den neuen Technologien zudem eine Bandbreite von

[21] Für Kleinsysteme im Bereich der Hausenergieversorgung werden für 2010 Nutzungsgrade zwischen 28 und 32 % erwartet; BHKW der Größenklasse 200 kW_{el} könnten zwischen 40 (Niedertemperatur- BZ) und 55 % (druckaufgeladene Hochtemperatur- BZ) erreichen, und größere Systeme (>1 MW_{el}) auf Basis von Hochtemperatur-Brennstoffzellen könnten hybrid mit einer Gas- (SOFC) bzw. Dampfturbine (MCFC) gekoppelt werden und dadurch elektrische Nutzungsgrade bis zu 60 % erzielen. Die Entwicklung von Hybrid-Systemen ist derzeit allerdings von technischen Schwierigkeiten gekennzeichnet, so dass noch offen ist, in welchem Zeitrahmen Siemens Westinghouse als wesentlicher Entwickler der SOFC diesen Technologiepfad realisiert.

Nutzungsgraden festgelegt („mittlere“ und „obere“, d. h. optimistischere Abschätzung). Die resultierenden elektrischen und thermischen Jahresnutzungsgrade sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Für Stirling-Aggregate wurden Nutzungsgrade deutscher Hersteller für Systeme mit Leistungen zwischen 3 und 10 kW_{el} zu Grunde gelegt, die auf hohe elektrische Nutzungsgrade abzielen, nicht jedoch die Systeme beispielsweise von WhispherTech, deren elektrische Nutzungsgrade lediglich 10 bis 12 % betragen.[22]

KWK- Systeme produzieren naturgemäß Strom und Wärme. Um einen Vergleich zu anderen stromerzeugenden Systemen zu ermöglichen, muss das Kuppelprodukt Wärme angemessen berücksichtigt werden. In diesem Vergleich wurde die Wärme bei der Mikro- KWK und der Nahwärme- KWK mit einem modernen, optimal betriebenen Gas-Brennwertkessel gutgeschrieben, bei der industriellen KWK mit einem Gas-Industriekessel. Diese Wahl der Gutschrift entspricht der Fragestellung, zwischen welchen modernen Energietechnologien auf Basis des gleichen Energieträgers im Rahmen eines Zubaus (bzw. Ersatzes) von Strom- und Wärmebereitstellungskapazität aus ökologischer Perspektive zu wählen ist.[23]

Vergleicht man die verschiedenen KWK- Optionen mit der ungekoppelten Stromerzeugung (Abbildung 2), so fällt auf, dass (bei Betrieb mit Erdgas) gegenüber der zentralen Stromerzeugung alle KWK- Technologien deutliche Vorteile bieten, auch gegenüber einem modernen Gas- GuD- Großkraftwerk. Im Vergleich zu der Stromerzeugung in einem modernen GuD-Kraftwerk ohne KWK und der Wärmeerzeugung in einem Gas-Brennwertkessel spart die KWK-Technologie „Brennstoffzelle“ beispielsweise zwanzig bis dreißig Prozent klimaschädlichen Kohlendioxids, im Vergleich zum durchschnittlichen deutschen Kraftwerkspark sogar fast 50 Prozent.

TABELLE 1: NUTZUNGSGRADE DER UNTERSUCHTEN KWK- TECHNOLOGIEN 2010

Die Vorteile der Brennstoffzelle gegenüber den Konkurrenztechnologien (Stirling, Motor-BHKW, Gasturbine, GuD- Kraftwerk mit KWK (hier nicht dargestellt)) hingegen hängen vom Gesamtnutzungsgrad ab und sind noch durch eine deutliche Datenunsicherheit geprägt. Je nach erzielbarem Nutzungsgrad emittieren – bei einer Wärmegutschrift mit modernen Gasheizgeräten – Brennstoffzellensysteme geringfügig mehr oder weniger Treibhausgase als die Konkurrenzsysteme.

Die Gesamt-Klimagasreduktionswirkung in Deutschland ergibt sich aus dem Produkt der spezifischen Klimagasreduktion (pro kWh) und dem Erzeugungspotenzial. Hier könnten Brennstoffzellen – je nach Betriebsart und Objekt – insbesondere bei wärmegeführtem Betrieb aufgrund der höheren Stromkennzahl ein höheres Erzeugungspotenzial aufweisen als konventionelle KWK. Aus Klimasicht ist zusammengefasst die Brennstoffzelle keine Alternative *zur* Kraft-Wärme-Kopplung, sondern sie ist eine unter mehreren Alternativen *von* Kraft-Wärme-Kopplung. Dem ökologisch vorteilhaften hohen elektrischen Nutzungsgrad stehen dabei die im Vergleich zu den Konkurrenten niedrigeren Gesamtnutzungsgrade entgegen.

Es ist offensichtlich, dass die Vorteile der fossil betriebenen Brennstoffzelle wie auch der anderen KWK- Technologien bei sinkender Kohlenstoffintensität der ungekoppelten Strom- und Wärmebereitstellung abnehmen werden; dies wird neue Technologien ökologisch konkurrenzfähig machen und den Druck auf den KWK-Sektor erhöhen, ebenfalls auf erneuerbare Brennstoffe zurück zu greifen.

---

[22] Für eine Ökobilanz dieser MikroKWK-Optionen vgl. [TIPS 2004].

[23] Anstelle der Wärmegutschrift mit einem modernen Erdgasbrenner könnte man alternativ dazu die Substitution beispielsweise eines Mixes an Heizsystemen auf Basis unterschiedlicher Brennstoffe durch KWK-Anlagen analysieren. Der Vergleich würde dann die Fragestellung behandeln, welche Umweltentlastungen durch Ersatz bestehender Heizanlagen erfolgen würde. Dabei würden KWK-Technologien insgesamt, insbesondere solche mit niedriger Stromkennzahl (Motor- und Stirling-BHKW), noch besser im Vergleich zur ungekoppelten Erzeugung abschneiden. Allerdings würden durch diese Wahl des Gutschriftsystems Umweltentlastungen durch einen Brennstoffwechsel (Heizöl zu Gas), durch einen Generationswechsel der Anlagen (Modernisierung) und durch den Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung kumuliert berechnet.

	Elektrischer Jahresnutzungsgrad		Gesamter Jahresnutzungsgrad (elektrisch + thermisch)	
	Mittlere	Obere	Mittlere	Obere
	Abschätzung		Abschätzung	
Mikro- KWK				
PEFC	28	32	80	90
SOFC	28*	32*	80*	90*
Stirling-Motor	23	24	90	96
Motor-BHKW	25	25	85	94
Dezentrale KWK (200-300 kW_{el}) **				
PEMFC	40	42	80	84
PAFC	37	-	80	-
MCFC	50	52	80	85
SOFC (atmosphärisch)	47	49	80	85
SOFC (mit Gasturbine)	58	60	80	85
Motor- BHKW	35	35	85	90
Industrielle KWK (1-3 MW_{el}), mit Warmwassernutzung				
MCFC (mit Dampfturbine)	55	56	80	85
SOFC (mit Gasturbine)	58	60	80	85
Gasturbine	32	39	82	84

Quelle: ergänzt nach [BMU 2004]. Mittlere und obere Abschätzung: * zzgl. Wärmeverluste durch Hot-Standby.

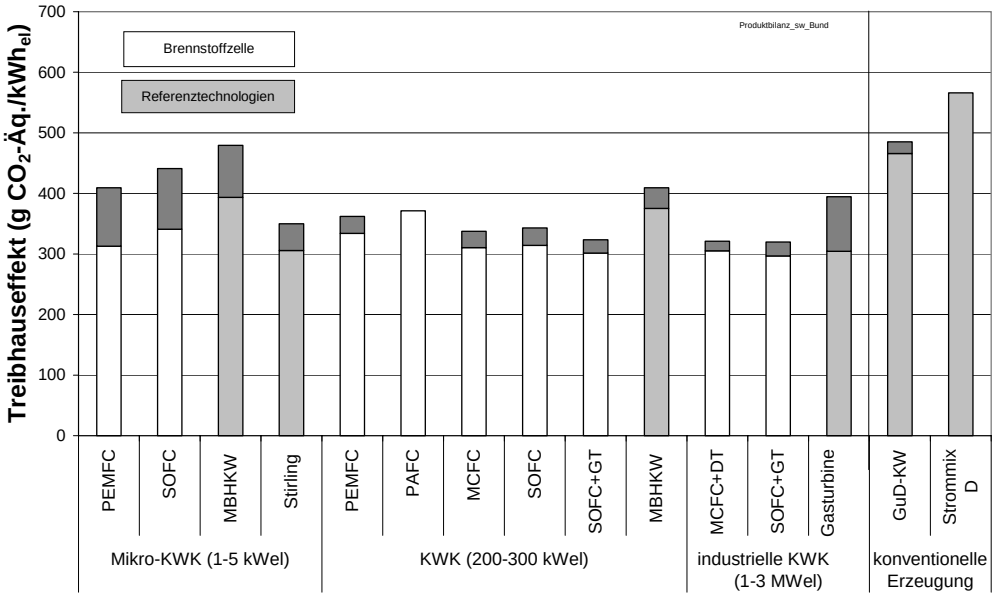
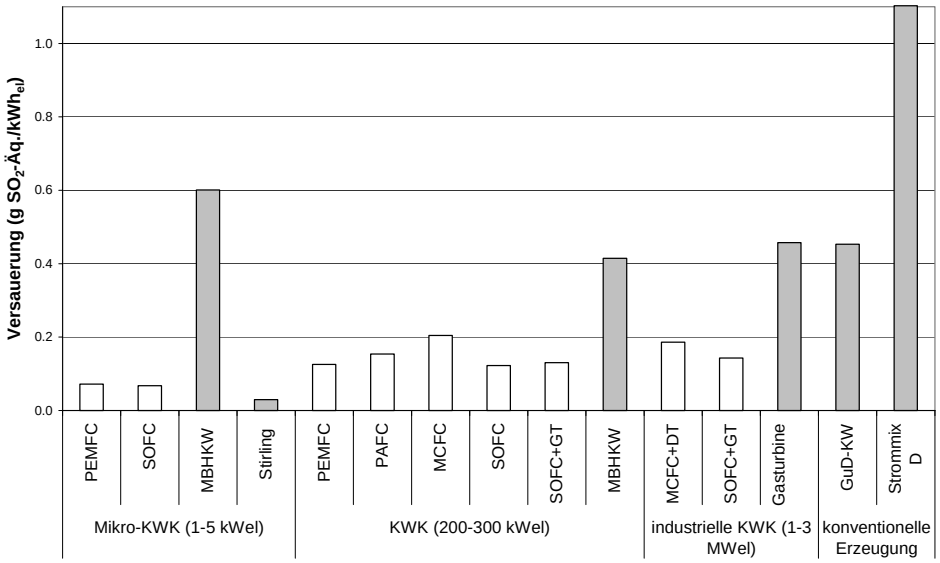


Abbildung 2: *Klimabilanz verschiedener KWK-Optionen (Brennstoff: Erdgas) und ungekoppelter Stromerzeugung. Technologiestatus 2010. Für KWK-Technologien ist jeweils die optimistische „obere"-Abschätzung (weißer bzw. hellgrauer Balkenanteil) und die mittlere Abschätzung (gesamter Balken) dargestellt (angelehnt an [BMU 2004]).*


Versauerung (g SO2-Äq./kWhel)
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
PEMFC
SOFC
MBHKW
Stirling
PEMFC
PAFC
MCFC
SOFC
SOFC+GT
MBHKW
MCFC+DT
SOFC+GT
Gasturbine
GuD-KW
Strommix D
Mikro-KWK (1-5 kWel)
KWK (200-300 kWel)
industrielle KWK (1-3 MWel)
konventionelle Erzeugung

Das wesentlichste Markteintritts- Hemmnis von Brennstoffzellen sind die hohen Investitionskosten. Heutige Kraftwerke sind gegenüber den Konkurrenzsystemen noch einen Faktor 2,5 bis 20 zu teuer. Kleine Systeme kosten immer noch zwischen 10.000 und 50.000 Euro pro Kilowatt, größere bis zu 18.000 Euro pro Kilowatt.

Große Hoffnungen werden in die Kostenreduktionspotenziale gelegt, die sich durch ein verbessertes Stack- und Systemlayout, durch reduzierte Degradation der Systeme, Low-cost-Materialien, standardisierte Peripherie-Komponenten und insbesondere auch durch Lerneffekte und Großserienfertigung ergeben könnten. Dabei tragen die eigentlichen Brennstoffzellen-Stapel – je nach Systemlayout – nur ein Drittel, manchmal noch weniger zu den Gesamtkosten bei. Wesentlicher Entwicklungsbedarf besteht also insbesondere bei der Systemintegration und den konventionellen Komponenten.

Vielfach werden „Lernkurven“ zugrunde gelegt, um die Kostenentwicklung abbilden zu können. Unterstellt man „Lernfaktoren“[24] von 0,8, die im frühen Reifestadium einer Technologie durchaus erreicht werden können, und Markteintrittskosten von 15.000 €/kW bei 20 MW kumulierter Produktion, so könnten Systemkosten von 2.000 €/kW bei einer kumulierten Produktion von über 10.000 MW erreicht werden. Bei der Interpretation dieser Informationen sollten jedoch einige Aspekte beachtet werden:

- Konventionelle Technologien unterliegen ebenfalls und weiterhin Lernkurven, wenn auch ggf. mit geringeren Lernfaktoren.
- Der Kostenverlauf ist extrem stark vom Lernfaktor und der kumulierten Produktion zum Markteintritt abhängig (hier: 20 MW).
- Die Phosphorsaure Brennstoffzelle PAFC, der einzige kommerziell verfügbare Brennstoffzellentyp, demonstriert, dass die Entwicklung auch anders laufen kann: Für die UTC PC25C, die billigste unter den Brennstoffzellen-Kraftwerken, wurden einst 1.400 €/kW für 1998 angekündigt. Im Jahr 2003 stagnierten sie bei 4.500 €/kW – Grund für UTC, die PAFC-Technologie zu verlassen (siehe oben).
- Selbst wenn die oben skizzierte Kostensenkung einträte, wären Brennstoffzellen damit noch nicht durchgängig konkurrenzfähig. Berechnungen für anlegbare Kosten[25] zeigen, dass im Vergleich zu Motor-BHKW beispielsweise in Siedlungs-KWK Zielkosten von 600 bis 1.000 €/kW für eine wirtschaftliche Tragfähigkeit notwendig sind. In Mikro-KWK-Anwendungen ergeben sich Zielkosten zwischen 1.000 und – bei für Brennstoffzellen günstigen Rahmenbedingungen – 3.000 €/kW.

Ein weiteres wesentliches Hemmnis ist die mangelhafte technologische Reife der Systeme, die nur durch weitere erhebliche F&E- Aufwendungen behoben werden kann. Zwar weisen die einzelnen Brennstoffzellentypen einen durchaus unterschiedlichen Entwicklungsstand auf. Gemeinsam ist ihnen allen – mit Ausnahme der PAFC – , dass bislang nur Pilotsysteme realisiert wurden, die eine begrenzte Laufzeit haben und von der Zielperformance (Nutzungsgrade, Lebensdauer, Verfügbarkeit) deutlich entfernt sind. Auch die Teillastfähigkeit und die Dynamik der Brennstoffzellen-Kraftwerke ist noch verbesserungsbedürftig.

---

[24] Lernfaktoren geben an, um welchen Faktor sich die spezifischen Investitionskosten bei einer Verdoppelung der kumulierten Produktion verringern.

[25] Anlegbare Kosten sind die Erstinvestitionskosten, die ein System kosten darf, um gegenüber konventionellen Systemen konkurrenzfähig zu sein.

Probleme ergeben sich nicht nur bei der Erreichung der Zielkosten und -leistungsfähigkeit, sondern vor allem bei der Lebensdauer eines Brennstoffzellensystems. Die erforderlichen Stacklebensdauern von 40.000 Stunden (auch diese erfordern noch einen mehrfachen Stackaustausch während der Lebenszeit des Kraftwerks) wurden noch nicht einmal in den kommerziell erhältlichen PAFC-Systemen erreicht. Heutige Anlagen erreichen lediglich Lebensdauern zwischen 2.000 und 10.000 Stunden. Auch viele konventionelle Komponenten, die für das Brennstoffzellensystem erforderlich sind, beispielsweise Pumpen, Verdichter, Regelung, Wechselrichter, kleine Reformer oder Mikroturbinen, sind kaum verfügbar.

Verschärft wird dieser Konflikt dadurch, dass der Einsatz kostengünstiger Produktionsverfahren und Materialien dem Ziel einer erhöhten Lebensdauer (und Leistungsfähigkeit) zuwider läuft. Dies lässt sich am Beispiel der Hausheizungs-SOFC verfolgen, deren gegenwärtige Lebensdauer durch ein kostengünstiges Produktionsverfahren einer Komponente drastisch gegenüber dem Vorgängermodell reduziert wurde.

Die technologische Reife dürfte sich nicht als Knock-Out-Kriterium der Brennstoffzelle erweisen. Wohl aber wird die Zeitachse einer erfolgreichen Einführung neben den Kosten von der Verfügbarkeit der Technologie bestimmt werden.

Vor dem Hintergrund dieser ökologischen, ökonomischen und technischen Entwicklungen sind die zukünftigen Perspektiven der Brennstoffzelle durchaus ambivalent einzuschätzen. Ein sich dynamisch entwickelnder Energiemarkt trägt zu dieser Ambivalenz bei und erhöht den Konkurrenzdruck auf Brennstoffzellen-KWK. Beispielsweise verringert der sinkende Raumwärmebedarf den möglichen Beitrag durch KWK und ermöglicht neue Versorgungskonzepte unter Einbezug erneuerbarer Energien. Andererseits könnten Brennstoffzellen langfristig den Markt der Mikro-KWK auch im Einfamilienhaus öffnen und damit neue Marktperspektiven für Contracting-Firmen, Energiedienstleister oder Gasversorger erschließen. Allerdings dringen auch in dieses Marktsegment mittlerweile Stirling- und sogar motorische BHKW vor.

Auch die Rahmenbedingungen der KWK allgemein und damit auch der Brennstoffzellen sind in Punkto Einspeisevergütung, vermiedene Kosten, Netzanbindung, etc. alles andere als sicher.

Die langfristigen Visionen der Brennstoffzellen-Industrie zielen über den Erdgas-Betrieb hinaus. Natürlich können Brennstoffzellen-Kraftwerke – wie auch motorische Blockheizkraftwerke, Gasturbinen oder Stirling-Motoren – mit regenerativen Brennstoffen betrieben werden. Während solarer Wasserstoff für stationäre Brennstoffzellen (mit Ausnahme von netzfernen Anwendungen) jedoch eine ferne Zukunftsvision ist (siehe oben), ist die Nutzung von Biomasse – Waldrestholz, nachwachsende Rohstoffe, Gülle, Klärschlamm u. a. – äußerst attraktiv. Denn die Potenziale dieser Energieträger in Deutschland sind begrenzt, eine effiziente Nutzung dieser knappen – und kostspieligen – Energieträger mittels KWK-Technologien daher sehr erwünscht. Doch die Technologie der Biomasse-Vergasung leidet ebenfalls noch unter einer Reihe von Kinderkrankheiten. Brennstoffzellen stellen hier in Bezug auf Gasreinheit und -zusammensetzung noch höhere Anforderungen an den Brennstoff als motorische BHKW. Am ehesten könnte die Kopplung von Biogas-Anlagen, die Reststoffe beispielsweise aus der Landwirtschaft vergären, mit Brennstoffzellen zeitnah funktionstüchtig sein.

Die Euphorie für die Brennstoffzelle darf in keinem Fall dazu führen, dass heute anstehende Investitionsentscheidungen für die konventionelle KWK verschoben werden. Auch andere innovative KWK- Technologien, beispielsweise der Stirling-Motor, sollten von der Technikbegeisterung profitieren können.

Umgekehrt wird ein Schuh daraus: Denn KWK-Technologien können schon heute infrastrukturelle und rechtliche Voraussetzungen schaffen – z. B. Nahwärmenetze, technisch einfacher und unbürokratisch geregelter Netzzugang und angepasste Standards und Zertifizierung – die spä-

ter auch Brennstoffzellen zugute kommen, wenn sie die technischen und Kostenziele erreicht haben.

Es sollte also gelingen, die Begeisterung für Brennstoffzellen umzumünzen in eine Begeisterung für Kraft-Wärme-Technologien insgesamt, unter denen die Brennstoffzelle einen gebührenden Platz einnehmen kann.

LITERATUR

[BMU 2004] W. Krewitt, M. Pehnt, M. Fischedick, H. Temming (Hrsg.). „Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung– Ökobilanzen, Szenarien und Marktpotenziale“, Erich Schmidt Verlag Berlin 2004.

[Pehnt 2002a] M. Pehnt, „Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen im Energie- und Verkehrssektor“, VDI Verlag, Düsseldorf 2002.

[Pehnt 2002b] M. Pehnt, „Energierevolution Brennstoffzelle? Perspektiven Fakten Anwendungen“, Wiley-VCH, Weinheim 2002. Populärwissenschaftliches Sachbuch rund um die Brennstoffzelle.

[TIPS 2004] M. Pehnt, M. Cames, C. Fischer, B. Prätorius, L. Schneider, K. Schumacher, Jan-Peter Voß, “MicroCHP – a sustainable innovation?”; Teilstudie im Rahmen des Verbundprojektes “Transformation and Innovation in the Power Sector”, im Auftrag des BMBF. IFEU, DIW, Öko-Institut, FU Berlin; eingereicht bei Energy Policy.

Download unter www.tips-project.de

[Traube 1992] K. Traube, "Perspektiven der Umstrukturierung des westdeutschen Energiesystems angesichts des CO_2-Problems“. Bremer Energie-Institut, Mai 1992

[WWF 2003] M. Pehnt, S. Ramesohl, „Fuel cells for distributed power: benefits, barriers, and market perspectives“, Studie im Auftrag von World Wide Fund for Nature und Fuel Cell Europe, IFEU, Wuppertal Institut 2003.

www.panda.org/epo (Publications).

ANHANG

Funktionsweise der Brennstoffzelle

von Hans Ackermann und Martin Pehnt

EINLEITUNG

Brennstoffzellen (BZ) sind elektrochemische Systeme, welche die in stofflichen Energieträgern gespeicherte chemische Energie in Elektrizität und Wärme umwandeln. Werden beide genutzt, so liegt die Betriebsweise der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) vor und man kann von einem Brennstoffzellen-BHKW sprechen. Von der physikalisch-chemischen Funktionsweise her beurteilt stellt eine BZ ein galvanisches Element (Batterie) dar, bei dem die Reaktionspartner ständig von außen nachgespeist und die Reaktionsprodukte ebenfalls laufend abgeführt werden.

Der ideale Energieträger ist Wasserstoff (H_2), der an der Anode zugeführt wird. Er reagiert mit dem an der Kathode zugeführten Sauerstoff (O_2) entsprechend der Bruttoreaktion

$$2\ H_2 + O_2 \rightarrow 2\ H_2O + \Delta E\ ,$$

wobei die Energie ΔE (genauer: Enthalpie) in Form von Elektrizität und Wärme freigesetzt wird. Die Brennstoffzellenreaktion stellt die Umkehrung der Wasserelektrolyse dar, bei der Wasser durch die in Form von Gleichstrom zugeführte elektrische Energie in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird.

In Abbildung 4 sind die unterschiedlichen Umwandlungsschritte von chemischer zu elektrischer Energie für Brennstoffzellen sowie Kraftmaschinen ohne Berücksichtigung von Abwärmeflüssen skizziert. Der augenfälligste Unterschied beider Pfade ist, dass bei der BZ die Zwischenstufen der Erzeugung von thermischer Energie (Verbrennung) und von mechanischer Bewegungsenergie entfallen. Daher wird bei der BZ oft von „kalter“ Verbrennung und von „direkter“ Umwandlung von chemischer in elektrische Energie gesprochen.

Der Reaktionspartner Sauerstoff kann i. a. durch die Umgebungsluft bereitgestellt werden. Der Brennstoff Wasserstoff bedarf hingegen in den meisten Anwendungsfällen einer zusätzlichen Generierung, die in der vorgeschalteten, oder teilweise auch in die Zelle integrierten, Komponente des Reformers erfolgt. In einem zukünfti

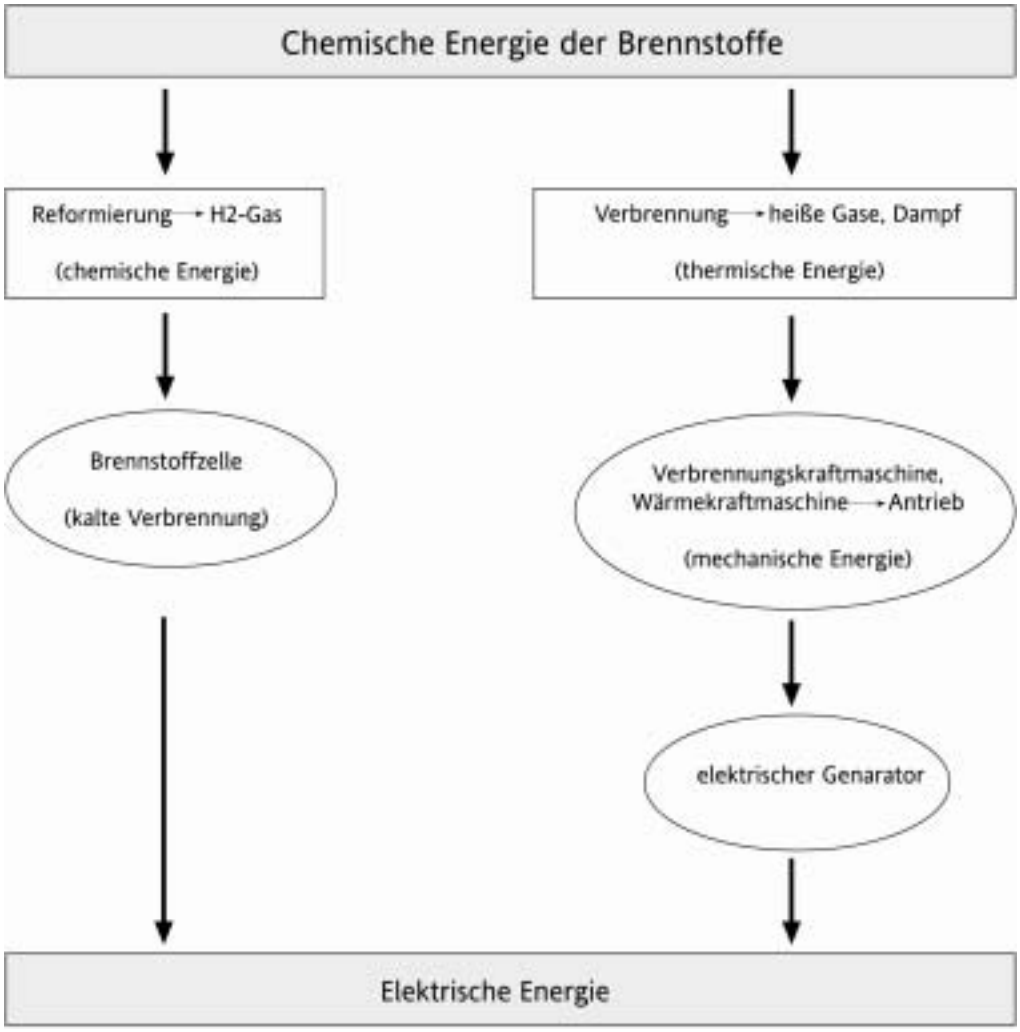


Abbildung 4: *Umwandlungspfade chemischer Brennstoffenergie in elektrische Energie (ohne Abwärmebetrachtung)*

Die elektrischen Wirkungsgrade η_{el} , die durch das Verhältnis von elektrischer Nutzenergie zu primär eingesetzter chemischer Energie gegeben sind, gehorchen in den beiden Umwandlungspfaden in
Abbildung *4* völlig verschiedenen Gesetzen. Während bei den Kraftmaschinen η_{el} mit der Temperatur des Arbeitsfluids steigt, sinkt beispielsweise bei H_2/O_2-Brennstoffzellen η_{el} mit steigender Reaktionstemperatur merklich ab. Daher erreichen Brennstoffzellen schon bei niedrigen Temperaturen (z. B. 100 – 200 °C) η_{el}-Werte, die Kraftmaschinen kaum, oder erst bei sehr hohen Temperaturen, erreichen können. Die gelegentlich zitierten idealen Wirkungsgrade sind allerdings in beiden Fällen von der Realität weit entfernt.

Neben dem elektrischen Wirkungsgrad ist noch die Stromkennzahl eine wichtige Größe bei Anlagen mit KWK-Betrieb. Sie ist durch das Verhältnis von im Koppelprozess erzeugter elektrischer zu thermischer Nutzenergie gegeben.

GASAUFBEREITUNG

Die derzeit sich in der Diskussion befindlichen Brennstoffzellen verbrennen Wasserstoff. Wegen der ausgebauten Erdgas-Infrastruktur kommt der H_2-Bereitstellung durch Reformierung von Erdgas (CH_4) besondere Bedeutung zu. Diese geschieht zumeist im auf ca. 800°C geheizten Reformierungsreaktor durch eine endotherme, katalytische Reaktion mit Wasserdampf (H_2O):

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3\,H_2$$

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

$$\text{brutto:} \quad CH_4 + 2\,H_2O \rightarrow CO_2 + 4\,H_2$$

Es wird also ein wasserstoffreiches Synthesegas gebildet, das noch Kohlendioxid (CO_2) und Kohlenmonoxid (CO)-Verunreinigungen enthält.

Als ein weiterer Primärbrennstoff wird Methanol (CH_3OH) angesehen. Methanol wäre nicht nur für die Anwendung in Fahrzeugen vorteilhaft, sondern hat auch wegen seiner Herstellbarkeit aus Biomasse potenzielle Bedeutung in zukünftigen, auf erneuerbaren Energieträgern abgestützten Versorgungssystemen. Auch hier ist die endotherme, katalytische Reaktion mit Wasserdampf bei Temperaturen um 280 °C am wichtigsten:

$$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 3\,H_2 \;.$$

Durch die unvermeidbare Begleitreaktion

$$CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$$

wird neben H_2 und CO_2 auch CO in kleinen Mengen erzeugt. CO ist ein sehr reaktives chemisches Gift für Platinkatalysatoren, wie sie insbesondere in der PEMFC (siehe unten) eingesetzt sind. Daher muss dem Dampfreformer eine CO-Feinreinigungsstufe nachgeschaltet werden, die den CO-Gehalt auf 10-100 ppm verringert.

Prinzipiell ist auch die Reformierung anderer kohlenwasserstoffhaltiger Primärenergieträger wie Flüssiggas, Biogas, Ethanol, Benzin, Rapsölmethyester, usf. denkbar, sie dürfte jedoch mittelfristig von nachrangiger Bedeutung sein.

Neben der bisher besprochenen externen Reformierung im vorgeschalteten Reformer kann bei den Hochtemperatur-BZ MCFC und SOFC auch interne Reformierung stattfinden. Hier werden die primär zugeführten Kohlenwasserstoffe direkt im Anodenbereich der BZ zum H_2-haltigen Synthesegas reformiert.

Die Entwicklung kleiner, kompakter und kostengünstiger Reformer erfordert noch erhebliche Anstrengungen. Außerdem ist zu beachten, dass die derzeitigen Anfahrzeiten der Dampfreformer von 15 – 30 min auf die erforderlichen Betriebstemperaturen ein rasches Reagieren des Gesamtsystems auf Leistungsanforderungen behindern.

FUNKTIONSPRINZIP DER BRENNSTOFFZELLE, UNTERSCHIEDLICHE TYPEN

In Abbildung 5 ist der Aufbau einer BZ mit Protonen (ein anderer Name für positiv geladene Wasserstoff-Ionen H^+) als Träger der elektrolytischen Leitung dargestellt, die im Elektrolyten zwischen den beiden Elektroden wandern. Der in die poröse Anode eindiffundierende Wasserstoff wird unter Abgabe von zwei Elektronen (e^-) zu H^+ oxydiert ($H_2 \rightarrow 2\ H^+ + 2\ e^-$). Die gebildeten Protonen dringen in den Elektrolyten ein und wandern zur Kathode, während die Elektronen als Nutzstrom durch den äußeren Stromkreis fließen. An der Kathode bildet der zugeführte Luftsauerstoff negative Sauerstoff-Ionen ($\frac{1}{2}O_2 + 2\ e^- \rightarrow O^{2-}$), die mit den herbeigewanderten Protonen zu Wasser reagieren, das abgeführt werden muss.

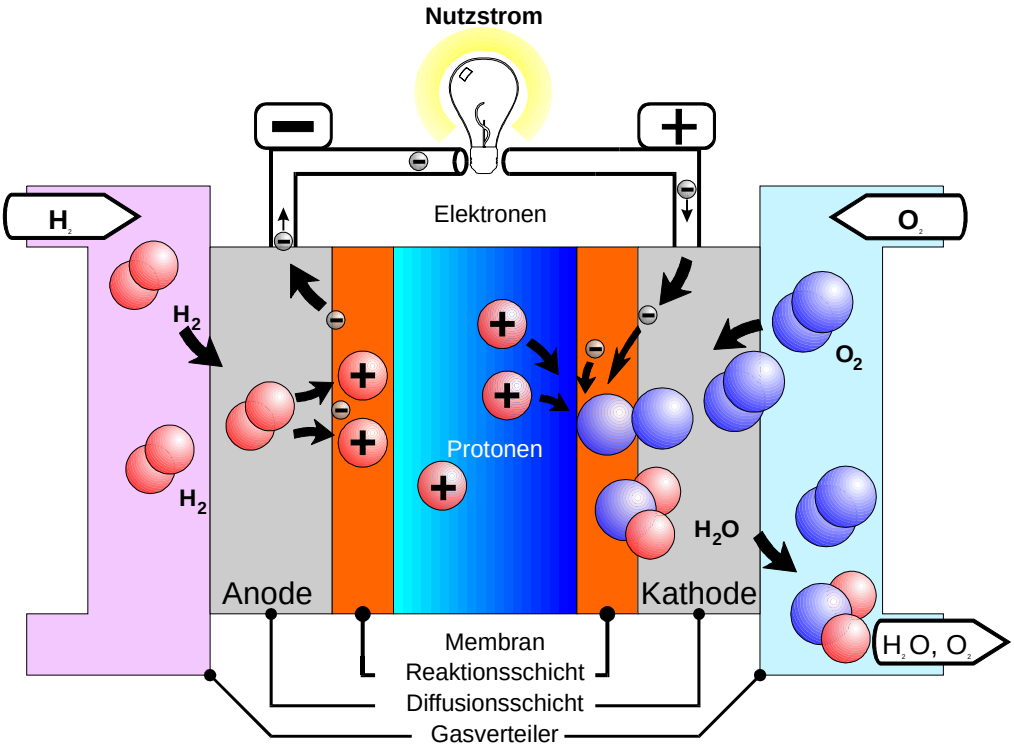


Abbildung 5: *Prinzipieller Aufbau einer Brennstoffzelle am Beispiel der PEMFC (Quelle: DLR, in [Pehnt 2002a])*

Die Wirkung einer BZ besteht also darin, die Bruttoreaktion $H_2 + ½O_2 \rightarrow H_2O$ in Einzelreaktionen aufzutrennen, die zu einer Ionenwanderung durch den Elektrolyten und einem externen elektrischen Nutzstrom führen. Theoretisch liefert die Bruttoreaktion zu Wasser eine Zellenspannung im Leerlauf von 1,23 Volt, die im praktischen Betrieb auf ca. 0,7 Volt absinkt. Höhere Gesamtspannungen bis etwa 200 Volt werden dadurch erzielt, dass viele Einzelzellen sandwichartig unter Zwischenschaltung von sogenannten Bipolarplatten zu Stapeln oder Stacks zusammengefügt werden (siehe Abbildung 6). Außer zur elektrisch leitenden Verbindung der Einzelzellen dienen die Bipolarplatten zur Zufuhr der Reaktionsgase und zur Ableitung des Reaktionsprodukts Wasser.

So einfach das Prinzip klingt, so anspruchsvoll und schwierig ist die materialmäßige Realisierung. Eine knappe Aufzählung der von den Komponenten geforderten Eigenschaften soll dies verdeutlichen. Die Elektroden müssen gut elektrisch leiten, gasdurchlässig sein, hohe katalytische Aktivität für die Anoden- bzw. Kathodenreaktion aufweisen bei gleichzeitiger chemischer Stabilität. Der Elektrolyt muss gasdicht, hoch ionenleitend, aber nicht elektronenleitend und chemisch stabil in reduzierendem wie oxydierendem Milieu sein. Die bipolaren Platten müssen ebenfalls chemisch stabil bei guter elektrischer Leitfähigkeit und Gasdichtigkeit sein. Alle genannten Komponenten sollen möglichst dünn, flächig (z.B. bis ½ m^2), langlebig, billig und umweltverträglich herstell- und rezyklierbar sein. Von einer befriedigenden Erfüllung dieser Forderungen ist die technische Entwicklung noch meilenweit entfernt. Die aktuellen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten konzentrieren sich daher besonders auf neue, verbesserte Werkstoffe und Herstellungsverfahren.

Die fünf wichtigsten Brennstoffzellen-Typen werden nach Art des Elektrolyten und der sich damit ergebenden Betriebstemperatur klassifiziert. Daraus leiten sich ihre nachfolgend genannten Bezeichnungen ab:

- **AFC:** Alkalische Brennstoffzelle (**A**lkaline **F**uel **C**ell),
- **PEMFC:** Polymermembran-Brennstoffzelle (**P**olymer **E**lectrolyte **M**embrane **F**uel **C**ell oder auch **P**roton **E**xchange **M**embrane **F**uel **C**ell),
- **PAFC:** Phosphorsaure Brennstoffzelle (**P**hosphoric **A**cid **F**uel **C**ell),
- **MCFC:** Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (**M**olten **C**arbonate **F**uel **C**ell),
- **SOFC:** Oxidkeramische Brennstoffzelle (**S**olid **O**xide **F**uel **C**ell.

Die AFC verwendet Kalilauge in poröser Matrix als Elektrolyt, in dem OH^--Ionen bei 80 °C Betriebstemperatur von der Kathode zur Anode wandern. Da die AFC beide Reaktionsgase H_2 wie O_2 in höchstreiner Form benötigt, ist sie trotz ihres hohen η_{el} für die Energiewirtschaft bedeutungslos. Sie gilt als technisch ausgereift und wird in der Raumfahrt und in militärischen Bereichen eingesetzt. Die wichtigsten Eigenschaften der übrigen vier Typen sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

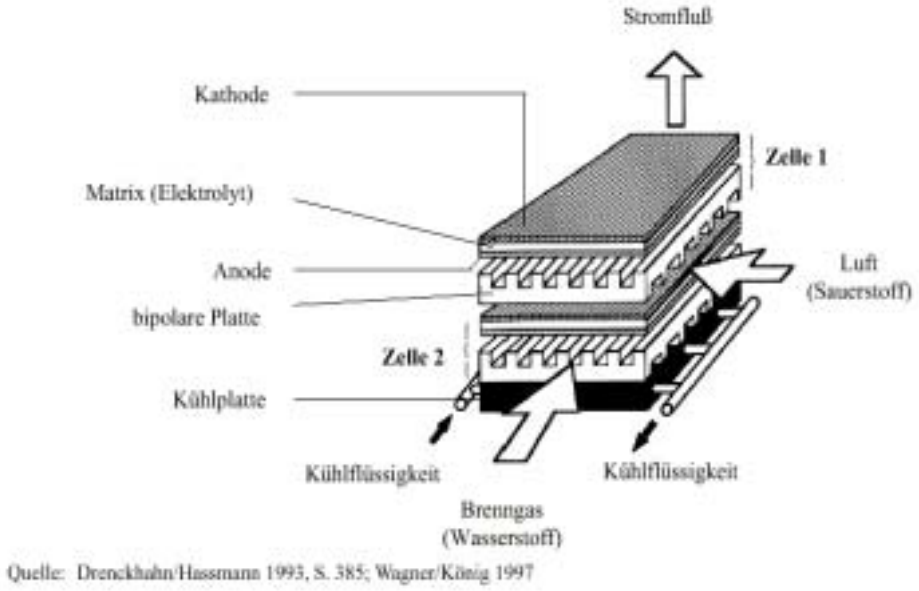


Abbildung 6: *Aufbau eines Brennstoffzellenstapels (Stack) am Beispiel der PAFC (Quelle: Bundestagsdrucksache 14/5054 vom 08.01.2001, TA-Projekt „Brennstoffzellen-Technologie")*

TABELLE 2 ÜBERSICHT DER WICHTIGSTEN ZU ERWARTENDEN ZUKÜNFTIGEN TECHNISCHEN DATEN VON BRENNSTOFFZELLEN (OHNE ALKALISCHE BRENNSTOFFZELLE) [BMU 2004]

	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Elektrolyt	Protonenleitende Membran	Phosphorsäure in poröser Matrix	Karbonatschmelze in einer Matrix	Keramischer Fest-körper
Ionenleitung durch	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
Betriebstemperatur	60 - 80°C	200°C	650°C	800 - 1000°C
Brennstoff zur Zelle	Wasserstoff (H_2) [a]	Wasserstoff (H_2) [a]	H_2, Erdgas, Biogas, Kohlegas [b]	H_2, Erdgas, Biogas, Kohlegas [b]
el. Systemnutzungs-grad (mit Erdgas)	Klein BZHG: 28 % bis 32 % Großsystem: 40 %	37 %	50 % (ohne DT) 55 % (mit DT)	Klein BZHG: 28 % Großsystem: 47 % bis 60 % (hybrid)
Gesamtnutzungsgrad	80 % bis 90 %	80 % bis 90 %	80 % bis 90 %	80 % bis 90 %
Arbeitstemperatur des Zellstapels	bis ca. 90°C	200°C	650°C	ca. 950°C
Temperatur der nutzbaren Wärme	bis ca. 80°C	bis max. 120°C	ca. 400°C	ca. 450°C bis 500°C
Anwendung typische Leistung	mobil, BHKW 2 bis 200 kW_{el}	KWK 200 kW_{el}	KW, KWK 250 kW_{el}	KW, KWK 1 kW – 10 MW_{el}
Entwicklungsstand (2003)	Prototyp 3 kW_{el}, 200 kW_{el}	Kleinserie 200 kW_{el}	Demonstration 250 kW_{el},	Demonstration 250 kW_{el} (druckaufgeladen, ohne GT)

a) Bei Einsatz eines Reformers auch weitere Gase wie Erd-, Bio- oder Grubengas

b) Interne Reformierung möglich
KW: Kraftwerk, KWK: Kraft-Wärme-Kopplung, DT: Dampfturbine, GT: Gasturbine, BZHG: Brennstoffzellenheizgerät

Den angegebenen Betriebstemperaturen gemäß werden AFC und PEMFC als Niedrigtemperatur-, die PAFC als Mitteltemperatur- und schließlich die MCFC und SOFC als Hochtemperatur-Brennstoffzellen bezeichnet. Die Temperatur der auskoppelbaren Nutzwärme im BHKW-Betrieb liegt erheblich unter den angegebenen BZ-Temperaturen, wie Betriebserfahrungen mit einem PAFC-BHKW zeigen.

Die angegebenen elektrischen Systemnutzungsgrade η_{el} liegen deutlich tiefer als die thermodynamischen Idealwerte. Dieser beträgt z. B. für die H_2/O_2-BZ 78% bei 100 °C. Dazu tragen vielerlei Verlustmechanismen bei, wie z. B. Spannungsabfall am inneren Zellenwiderstand, Permeation von Brennstoffen durch den Elektrolyten („chemischer Kurzschluss“), parasitäre chemische Konkurrenzreaktionen, Vorwärmung und Warmhaltung, Brennstoffaufbereitung, Abfuhr von Reaktionsprodukten und Kühlung. Für die praktische Anwendung sind die Systemnutzungsgrade bedeutsam, die insbesondere auch den Reformierungsaufwand berücksichtigen. Weiterhin ist zu beachten, dass noch wenig praktische Betriebserfahrung vorliegt und daher die angegebenen Werte noch als unbestätigte Zielwerte anzusehen sind, die selbst von den meisten Demonstrationsanlagen noch nicht erreicht werden.