

BERLINER **FORUM**
WISSENSCHAFT UND INNOVATION

Die Brennstoffzelle

Zukünftige Querschnittstechnologie für
den Industriestandort Deutschland?

Konferenz der
Friedrich-Ebert-Stiftung
6. Dezember 2000

Herausgeber:

Dirk **Kohn**
Hans **Mathieu**
Dietmar **Molthagen**
Elisabeth **Schumann-Braune**

ISBN 3-89892-034-8

Copyright 2001 by Friedrich-Ebert-Stiftung
Godesberger Allee 149, 53175 Berlin

Umschlag: Pellens Kommunikationsdesign GmbH, Bonn

Layout: PAPYRUS – Schreib- und Büroservice, Bonn

Druck: Toennes Satz + Druck, Erkrath

Printed in Germany 2001

INHALT

Vorwort	5
----------------------	---

TEIL I: FACHGESPRÄCH

A. Thesepapiere

1. <i>Primärenergie für die Brennstoffzelle: Quellen, Umweltbelastung und Energieverbrauch</i> Ulrich Stimming, Matthias Rzepka, Felix Ziegler	9
2. <i>Wie bald und wie billig: Wie wirtschaftlich wird die Brennstoffzelle?</i> Georg Erdmann	17
3. <i>Strom und Wärme aus der Heizung: Das Vaillant Brennstoffzellen-Heizgerät</i> Thomas Behringer	27
4. <i>Brennstoffzelle und Mobilität: Welche verkehrswirtschaftliche Energie-Strategie?</i> Gerhard Isenberg	37
5. <i>Industrielle Kernkompetenzen und Beschäftigung: Brauchen wir die Brennstoffzelle für die Wettbewerbsfähigkeit des Industriestandortes Deutschland?</i> Jürgen Wengel, Elna Schirrmeister, Frank Marscheider-Weidemann	39

B. Diskussionsbeiträge	49
-------------------------------------	----

TEIL II: PODIUMSDISKUSSION

A. Impulsreferat

<i>Die Brennstoffzelle: Querschnittstechnologie für den Industriestandort Deutschland?</i> Detlef Stolten, Bernd Höhle	59
---	----

B. Podiumsdiskussion	69
-----------------------------------	----

TEIL III: STUDIE

<i>Brennstoffzellen: Technologiefeld für das 21. Jahrhundert</i> Rolf Theenhaus, Klaus Bonhoff	79
---	----

Autoren, Podiumsteilnehmer und Moderatoren	93
---	----

Zunehmend findet die Brennstoffzelle Beachtung als Querschnittstechnologie für die zukünftige Energie- und Verkehrspolitik. Prototypen von Kraftfahrzeugen und Kraftwerken mit Brennstoffzellen werden bereits getestet. In wenigen Jahren sollen die ersten Serienprodukte auf den Markt kommen.

In der umwelt- und energiepolitischen Diskussion wird die Brennstoffzelle oft mit der Vision einer emissionsfreien und regenerativen Wasserstoffwirtschaft in Verbindung gebracht. Da sich in einer Brennstoffzelle Wasserstoff und Sauerstoff ohne Schadstoffemissionen zu Wasser verbinden und dabei Strom und Wärme erzeugen, könne mit der Brennstoffzelle der Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft gelingen, die sich von fossilen Primärenergien und den damit verbundenen Umweltrisiken verabschiedet.

Wie die Beiträge und Diskussionen in diesem Konferenzband zum ersten **Berliner Forum Wissenschaft und Innovation** der Friedrich-Ebert-Stiftung über *Die Brennstoffzelle: Zukünftige Querschnittstechnologie für den Industriestandort Deutschland?* deutlich machen, ist diese Vision nicht ohne Grundlage. Aber der Weg dorthin ist noch weit, und der Teufel steckt im Detail.

Die Brennstoffzelle, bzw. die verschiedenen Arten von Brennstoffzellen, sind zwar zur Anwendung in praktisch allen Bereichen, darunter auch im Verkehr, geeignet, aber sie bieten nur ein Standbein einer regenerativen Wasserstoffwirtschaft, nämlich die Umwandlung des Energieträgers in Nutzenergie. Wasserstoff muss jedoch zuvor aus bzw. unter Einsatz von Primärenergieträgern hergestellt werden. Von der Herstellung ausreichender Mengen von Wasserstoff auf der Grundlage regenerativer Energieträger sind wir allerdings weit entfernt. Somit ist der Ausgangspunkt für den Einsatz der Brennstoffzelle der einer zwar wachsenden, aber auf absehbare Zeit noch beschränkten Verfügbarkeit regenerativer Energien. Dies bedeutet, dass für die Bewertung der Energieeffizienz und Umwelteffekte der Brennstoffzelle die Energieverluste und Schadstoffemission traditioneller, fossiler Primärträger beim Einsatz in bzw. zur Her-

stellung von Sekundärenergieträgern für Brennstoffzellen berücksichtigt werden müssen.

Auch unter diesen Umständen führen Brennstoffzellen zu verbesserter Energieeffizienz und Verminderung von Umweltbelastungen. Sieht man von Nischenmärkten ab, müssen Brennstoffzellensysteme in den nächsten Jahren konkurrenzfähig zu bereits etablierten Produkten werden. Gerade in den stationären und mobilen Anwendungen mit den potentiell größten Produktionsmengen ist daher die Frage der Zielkosten und der dazu notwendigen Mindestmengen von Bedeutung. Ob diese ohne Förderung oder Anreize – z.B. steuerliche Vergünstigungen – erreichbar sein werden, erscheint zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch fraglich. Dennoch betrachten einige Unternehmen Brennstoffzellensysteme für stationäre und vor allem mobile Anwendungen als strategisch. So haben in der Automobilindustrie inzwischen fast alle führenden Hersteller Prototypen von Fahrzeugen entwickelt, in denen Brennstoffzellen zum Einsatz kommen.

Der Einsatz von Brennstoffzellensystemen auf breiter Basis in der Energieversorgung und im Verkehr würde voraussichtlich weitreichende Auswirkungen auf beiden Gebieten haben. In der Energieversorgung könnten Brennstoffzellensysteme eine dezentrale Kraft-Wärme-Koppelung ermöglichen, die weniger Leitungsverluste zur Folge hätte, stark schadstoffmindernd wirken würde und außerdem energetisch besser mit dem Trend zu wachsendem Strombedarf und besserer Wärmedämmung harmonisieren würde. Auch im Verkehr wären positive Auswirkungen auf die Umwelt zu erwarten, wenn auch weniger ausgeprägt als im stationären Bereich. Der Einsatz von Brennstoffzellen für den Fahrzeugantrieb hätte jedoch weitreichende technologische und industrielle Auswirkungen. Die für den Antrieb der Fahrzeuge notwendigen Elektromotoren würden nicht nur die industrielle Struktur der Automobilindustrie verändern, sondern auch den Technologiemarkt im Verkehr, und schließlich neue Fahrzeugkonzepte ermöglichen.

Auf dem ersten **Berliner Forum Wissenschaft und Innovation** am 6. Dezember 2000 wurden die Perspektiven der Brennstoffzelle in einem Fachgespräch und einer Podiumsdiskussion ausführlich diskutiert. In dem vorliegenden Konferenzband finden sich die Thesenpapiere für das Fachgespräch, das einleitende Impulsreferat für die anschließende Podiumsdiskussion, sowie die Diskussionsbeiträge für beide Teile der Konferenz. Die zuvor angesprochenen Fragestellungen von den Primärenergiequellen und Umweltwirkungen, über Zielkosten und notwendige Herstellungsmengen, bis hin zur Bedeutung der Brennstoffzelle für die industrielle Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands werden aufgegriffen. Vertreter führender Unternehmen stellten Produkte und Strategien dar. Bereits 1999 wurde von der Friedrich-Ebert-Stiftung eine Kurzstudie über die technischen Grundlagen und Stand und Perspektiven der Anwendungen der Brennstoffzelle in Auftrag gegeben. Diese Studie bildet den Abschluss des Bandes.

Insgesamt bieten die Beiträge und Diskussionen nicht nur einen Überblick über den gegenwärtigen Stand der Entwicklung der Brennstoffzelle, sondern vor allem auch ihrer politikrelevanten Aspekte. Insgesamt tendieren die hier versammelten Autoren und Diskussions Teilnehmer dazu, in der Brennstoffzelle eine Querschnittstechnologie mit positiven Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands zu sehen. Eine Industriepolitik klassischer Prägung wird jedoch abgelehnt. Stattdessen wird einer Kombination aus stabilen Rahmenbedingungen, z.B. in der Forschungsförderung zur Weiterentwicklung von Brennstoffzellentechnologien, und einer marktorientierten Anschubförderung, z.B. durch geringere steuerliche Belastung von Brennstoffzellenfahrzeugen, der Vorzug gegeben.

Hans Mathieu
Friedrich-Ebert-Stiftung

TEIL I: FACHGESPRÄCH

A. THESENPAPIERE

1.	<i>Primärenergie für die Brennstoffzelle: Quellen, Umweltbelastung und Energieverbrauch</i> Ulrich Stimming , Matthias Rzepka , Felix Ziegler	9
2.	<i>Wie bald und wie billig: Wie wirtschaftlich wird die Brennstoffzelle?</i> Georg Erdmann	17
3.	<i>Strom und Wärme aus der Heizung: Das Vaillant Brennstoffzellen-Heizgerät</i> Thomas Behringer	27
4.	<i>Brennstoffzelle und Mobilität: Welche verkehrswirtschaftliche Energie-Strategie?</i> Gerhard Isenberg	37
5.	<i>Industrielle Kernkompetenzen und Beschäftigung: Brauchen wir die Brennstoffzelle für die Wettbewerbsfähigkeit des Industriestandortes Deutschland?</i> Jürgen Wengel , Elna Schirrmeister , Frank Marscheider-Weidemann	39

1.

PRIMÄRENERGIE FÜR DIE BRENNSTOFFZELLE: QUELLEN, UMWELTBELASTUNG, ENERGIEBEDARF¹

Ulrich **Stimming**, Technische Universität München und Bayerisches
Zentrum für Angewandte Energieforschung
Matthias **Rzepka**, Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung
Felix **Ziegler**, Technische Universität München²

1. Einleitung

Die Frage, welche Primärenergie für die Brennstoffzelle geeignet ist, verändert sich bei genauer Betrachtung eher zu der Frage, welche Primärenergie langfristig verfügbar und nutzbar sein wird. Damit ändert sich der Titel des Vortrags eigentlich in „Brennstoffzellen für verfügbare Energieträger“.

Wir werden uns kurz beschäftigen mit der Frage der Basis zukünftiger Energieversorgung und werden daran eine Diskussion möglicher sinnvoller Sekundärenergieträger oder -speicher anschließen. Für diese Energieträger müssen passende Wandler, z.B. Brennstoffzellen, verfügbar sein, die natürlich auch in die jeweiligen Verbrauchsstrukturen passen müssen. Erst nach Klärung dieser Fragekette kann eine sinnvolle Aussage über Energieverbrauch und Umweltbelastung gemacht werden.

2. Verfügbare Primärenergiequellen

Die derzeit bekannten und wirtschaftlich förderbaren Vorräte an fossilen, nicht-regenerativen Quellen reichen bei gleichbleibendem Energiebedarf noch etwas 50 – 150 Jahre. Trotz weltweiter Anstrengungen zur Energieeinsparung

wird der Gesamtenergiebedarf der Weltbevölkerung aber weiter ansteigen, so dass die Frist, innerhalb der fossile Energiequellen zum derzeitigen Preis genutzt werden können, eher noch kürzer ist. Bei steigendem Preis wird die Reichweite ebenfalls zunehmen, allerdings muss auch mit Engpässen bei der Förderleistung gerechnet werden. Langfristig werden also regenerative Energiequellen wirtschaftlich werden und so einen stetig steigenden Marktanteil erhalten, auch wenn noch fossile Vorräte vorhanden sind und ohne Berücksichtigung der Möglichkeit, dass aufgrund des Klimaschutzes regulierend in den Verbrauch fossiler Energieträger eingegriffen wird.

2.1 Fossile Energiequellen

Mineralöl, Steinkohle und vor allem Braunkohle enthalten bis zu 4% Schwefel. Um die Emission des Schadstoffes SO₂ (Schwefeldioxid) bei der Verbrennung möglichst zu reduzieren, müssen fossile Energieträger daher vor der Verbrennung möglichst weitgehend entschwefelt werden. Dies gilt in verstärktem Maße auch für den Einsatz fossiler Energieträger in Brennstoffzellen.

Tabelle 1 zeigt einen Überblick über die derzeit noch vorhandenen fossilen Vorräte (Stand 1997/98).

Tabelle 1: Vorräte fossiler Energieträger (Stand 1997/98)

	Erdöl	Erdgas	Steinkohle
Vorräte [kWh]	1,8 * 10 ¹⁵	1,4 * 10 ¹⁵	4,5 * 10 ¹⁵
Derzeitige Förderung [kWh/Jahr]	4,1 * 10 ¹³	2,2 * 10 ¹³	3,0 * 10 ¹³
Reichweite [Jahre]	45	65	150

Quelle: BMWI: Energiedaten 2000

¹ Das Thesenpapier wurde von Prof. Ulrich Stimming präsentiert.

² Seit 2001 an der Technischen Universität Berlin.

2.2 Regenerative Energiequellen

Regenerative Energiequellen tragen heutzutage erst einen sehr kleinen Teil zur weltweiten Energieversorgung bei. Langfristig müssen sie jedoch die zur Neige gehenden fossilen (und nuklearen) Energiequellen ersetzen. Sie sind grundsätzlich CO₂-neutral, der Hauptteil an Schadstoff-Emissionen fällt auf die Bereitstellung und Entsorgung der Anlagen zur Energiegewinnung, vor allem bei der Photovoltaik.

Im folgenden soll ein kurzer Überblick über die zur Verfügung stehenden regenerativen Energiequellen gegeben werden. Das Potenzial ist dabei jeweils anhand einiger Abschätzungen angegeben. Vergleichszahlen für Deutschland beziehen sich auf einen Primärenergieverbrauch (PEV) von $14200 \cdot 10^{15} \text{ J/a} = 5500 \text{ W} / \text{Einwohner}$ [1]. Der Verbrauch an elektrischer Energie (EEV) im gleichen Zeitraum betrug $1700 \cdot 10^{15} \text{ J/a} = 660 \text{ W} / \text{Einwohner}$ [1].

• Wasserkraft

Der Anteil in Deutschland beträgt zur Zeit etwa 0,4% (bzgl. PEV) bzw. 3,7% (bzgl. EEV) [1]. Das Potenzial der Wasserkraftnutzung von Flussläufen ist weitgehend ausgeschöpft, Anlagen zur Wasserkraftnutzung der Weltmeere (Wellen, Gezeiten, Meeresströmungen) befinden sich noch im Versuchsstadium.

• Biomasse

Die energetische Nutzung von Klärgas, Biogas, Brennholz, Ölpflanzen, Miscanthus etc. in Deutschland trägt zur Zeit etwa 1,0% des PEV bei [1]. Dieser Anteil lässt sich jedoch noch deutlich steigern. Bei Einbezug der gesamten landwirtschaftlichen Brachfläche in Europa ergibt sich ein Potenzial von 10% des derzeitigen Primärenergiebedarfs Europas.

• Windkraft

Der jetzige Anteil in Deutschland bzgl. PEV beträgt 0,2% (bzw. 1,4% bzgl. EEV) [6] mit steilem Trend nach oben (Neuinstallationen in Deutschland: 500–1.000 MW/Jahr). Allein auf dem Gebiet von Garzweiler II (50 km²) könnten mit Windkraftanlagen ca. 40% der in Deutschland benötigten elektrischen Energie erzeugt werden. Der weltweit erreichbare Anteil wird auf 10% des Primärenergiebedarfs geschätzt.

• Photovoltaik, Kollektoren

Photovoltaikanlagen in Deutschland erzeugen zur Zeit 0,003% des PEV [1] (bzw. 0,02% des EEV), die entsprechenden Werte für Kollektoren sind etwa 15 mal größer (0,04% bzgl. PEV [1]).

Die jährlichen Steigerungsraten für beide Technologien liegen zur Zeit zwischen 20% und 50%. Aufgrund der geringen Sonneneinstrahlung in Deutschland ist die direkte Nutzung jedoch nur für spezielle Zwecke sinnvoll (Photovoltaik für „Versorgungsinseln“, Kollektoren für die Warmwasserbereitung). Großtechnische solarthermische Anlagen bzw. Photovoltaik-Kraftwerke in sonnenreichen Ländern könnten jedoch einen wesentlichen Anteil in einer regenerativen Energieversorgung übernehmen. Zur Deckung des Gesamtenergiebedarfs von Deutschland wäre etwa eine Fläche von 50 km x 50 km an PV-Anlagen nötig. Hauptschwierigkeit sind die Kosten und die Energieübertragung.

• Müll

Der Hauptteil der in Müllkraftwerken verbrannten Stoffe ist fossilen Ursprungs. Daher ist Müll genaugenommen keine regenerative Energiequelle, wird aber meistens trotzdem dazu gerechnet. Der derzeitige Anteil in Deutschland beträgt 0,3% [1] (bzgl. PEV). Da die stoffliche Verwertung (Recycling) Vorrang vor der energetischen Nutzung haben sollte, wird das Potenzial der Müllverbrennung in den nächsten Jahren eher stagnieren.

3. Energieträger

Die Energie sowohl aus fossilen als auch regenerativen Quellen muss in geeigneten Energieträgern gespeichert und transportiert werden. Dabei sollte die Umwandlungskette aber allgemein immer möglichst kurz gehalten werden. Eine Umwandlung fossiler Energiequellen in „moderne, saubere“ Energieträger wie Wasserstoff oder Methanol ist aus Effizienzgründen möglichst zu vermeiden.

Da der Ertrag aus regenerativen Energiequellen (Wind, Sonne, Wasser) oft zeitlich stark schwankt und räumlich weit vom Energieverbraucher entfernt ist, müssen geeignete Wege für Speicherung und Transport gefunden werden. Dabei konzentriert sich die Forschung hauptsächlich auf die Speicherung in Wasserstoff und Metha-

nol. Auch hier ist aber die direkte Nutzung einer Umwandlungskette vorzuziehen. Die weltweite Vernetzung der Stromwirtschaft beispielsweise erlaubt es ja grundsätzlich, lokale Spitzen in Bedarf und Angebot auszugleichen und so Speicher unnötig zu machen. Solar oder durch Wind oder Wasser erzeugter Strom sollte also vorrangig als Strom verteilt werden und nicht in beispielsweise Wasserstoff gespeichert werden.

Anders beurteilen wir die Verstromung von Biomasse; hier ist bei den heutigen Techniken eine Umwandlung in Alkohole, Biogas etc. vorteilhaft. Auch für mobile Anwendungen kann eine Umwandlung der regenerativen Energie in einen sekundären Energieträger günstig sein. In Tabelle 2 sind beispielhaft wichtige Verfahren zur Umwandlung der einzelnen Energiequellen in geeignete Energieträger aufgelistet.

Tabelle 2: Beispielhafte Verfahren zur Energierumwandlung

Energiequelle	Energieträger	Umwandlung
Erdgas	Erdgas	--
Erdgas	Wasserstoff	Reformierung
Erdgas	Benzin	Fischer-Tropsch-Synthese
Erdöl	Benzin, Diesel	Reformierung, Entschwefelung
Kohle	Kohle	--
Kohle	Methan	Vergasung
Reg. Strom	Strom	--
Reg. Strom	Wasserstoff	Elektrolyse
Biomasse	Hackschnitzel	--
Biomasse	Biogas	Vergärung

• Wasserstoff

Wasserstoff wird heutzutage noch zu ca. 99% aus fossilen Quellen erzeugt, Langfristig kann davon ausgegangen werden, dass Wasserstoff zunehmend aus regenerativen Quellen (Solarstrom, Biomassevergärung) hergestellt werden wird. Die Gewinnung von Wasserstoff aus Wasser auf elektrolytischem Wege macht energetisch und ökologisch nur dann Sinn, wenn der dazu benötigte Strom aus erneuerbaren Energiequellen hergestellt wird. Wasserstoff ist von allen Energieträgern der sauberste, da bei der Umsetzung mit Sauerstoff neben Wasserdampf keinerlei weitere Emissionen anfallen. Hauptproblem bei Wasserstoff ist die Speicherung des Gases. Heute verwendete Techniken (Druckgasflaschen, Metallhydride, flüssiger Wasserstoff) bieten noch keine unter allen Aspekten (Volumen, Gewicht, Standzeiten, Kosten) befriedigende Lösung.

• Methanol

Methanol bietet als alternativer Kraftstoff für den Verkehrsbereich mehrere Vorteile: Im Ge-

gensatz zu Wasserstoff ist es bei Normalbedingungen flüssig und damit leicht speicherbar; die vorhandene Tankstelleninfrastruktur könnte weitgehend genutzt werden. Es wird heute fast ausschließlich auf fossiler Basis bereitgestellt, bietet jedoch den großen Vorteil, auch aus nicht-fossilen Quellen zugänglich zu sein. Primärenergetisch ist die Bereitstellung von Methanol etwa vergleichbar mit der von Benzin bzw. Dieseltreibstoffen. Darüber hinaus ist es bei relativ niedrigen Temperaturen zu Wasserstoff reformierbar.

Da Methanol Kohlenstoff enthält, kann prinzipiell auch Kohlenmonoxid im Abgas enthalten sein, wobei der Kohlenmonoxid-Gehalt je nach Art des Wandlers unterschiedlich sein kann und durch weitere, der Brennstoffzelle vor- oder nachgeschaltete Komponenten, reduziert werden kann.

• Biogas

Hierbei handelt es sich im wesentlichen um mehr oder weniger stark verunreinigtes Methan. Es kann daher (nach Reinigung) in Erdgasmotoren verbrannt werden. Vor einer alter-

nativen Verwendung in Brennstoffzellen muss es jedoch noch aufwändige Reinigungs- und Filterungsprozeduren durchlaufen, da vor allem die Katalysatoren in Niedertemperaturbrennstoffzellen sehr empfindlich auf Verunreinigungen reagieren. Bei Verwendung in Hochtemperatur (SOFC)-Brennstoffzellen entfallen diese Beschränkungen weitgehend.

- **Erdgas, Benzin, Diesel**

Solange sich die Energieversorgung noch weitgehend auf fossile Quellen stützt, werden weiterhin die klassischen Energieträger Diesel(-öl), Benzin und Erdgas verwendet werden.

4. Brennstoffzellensysteme

Wasserstoff kann in allen Brennstoffzellen-Typen als Brennstoff eingesetzt werden, wobei aufgrund der hohen Leistungsdichte und geringer Betriebstemperatur gerade für den mobilen Bereich der Einsatz einer Polymer-Elektrolyt-BZ

(PEM) ideal ist. Außer Wasser und Wärme entstehen keine Emissionen, Probleme mit CO, Benzol, Methan und anderen unverbrannten Kohlenwasserstoffen, Ruß, Staub und SO₂ tauchen gar nicht erst auf. Eine mit Wasserstoff betriebene PEM-Brennstoffzelle ist damit prinzipiell frei von Schadstoffemissionen (anders als in Verbrennungskraftmaschinen entstehen aufgrund der niedrigen Temperaturen auch keine Stickoxide). Entscheidend für die Umweltverträglichkeit der Verwendung von Wasserstoff ist also die Umweltverträglichkeit der Primärenergie. Durch den Wasserstoff kommen keine nennenswerten Umweltbelastungen hinzu.

Bei der Verwendung von Methanol als Energieträger für Brennstoffzellen wird zwischen zwei Arten der Brennstoffzellen unterschieden: DMFC (Direktmethanol Brennstoffzelle) und PEM. Für den Einsatz von Methanol in einer PEM wird jedoch eine zusätzliche, vorgeschaltete Systemkomponente benötigt, den Reformier, um den Wasserstoff extern aus Methanol zu gewinnen.

Tabelle 3: Brennstoffzellensysteme

System	T[°C]	Anode	Kathode	Anforderung an Gase	Anbindung
AFC	80 °C	H ₂	O ₂	reinste Gase	
PEM	80 °C	H ₂	Luft	< 100 ppm CO	reg. Strom
DMFC	110 °C	Methanol	Luft	Unkritisch	reg. Strom
PAFC	200 °C	H ₂ / Kohlenwas.	Luft	< 0,2% CO	
MCFC	600 °C	H ₂ / Kohlenwas.	Luft	kein Staub, kein Teer	Biomasse
SOFC	900 °C	H ₂ / Kohlenwas.	Luft	kein Staub, kein Teer	Biomasse

Anm.: AFC = alkalische BZ, PEM = Polymer-Elektrolyt BZ (auch als PEFC bezeichnet), DMFC = Direktmethanol BZ, PAFC = Phosphorsäure BZ, MCFC = Schmelzkarbonat BZ, SOFC = Oxidkeramische BZ (Eine Übersicht und Erläuterung der verschiedenen BZ-Systeme findet sich in der Studie von Theenhaus/Bonhoff in Teil III)

H₂ = Wasserstoff, O₂ = Sauerstoff, CO = Kohlenmonoxid, reg. Strom = regenerativer Strom

Quelle: Eigene Zusammenstellung der Autoren

Allgemein gilt: Je höher die Betriebstemperatur, desto unkritischer reagieren die Brennstoffzellensysteme auf Verunreinigungen in den Brenngasen. Während die AFC (alkalische Brennstoffzelle) sogar auf der Anodenseite Reinst-Sauerstoff benötigt, kann in der Hochtemperatur-SOFC sogar direkt Methan ohne vorherige Reformierung umgesetzt werden.

Aufgrund der hohen Betriebstemperaturen in SOFC-Anlagen (oxidkeramische BZ-Anlagen) können die Abgase in nachgeschalteten Gasturbinen weiter verwertet werden, was den Wir-

kungsgrad des Gesamtsystems sogar gegenüber Gas und Dampfturbinen-Kraftwerken (GUD-Kraftwerken) deutlich erhöht und zwar für deutlich kleinere Einheiten und bei geringeren Emissionen.

5. Energieverbrauch

Es wird nun anhand eines Gesamtsystemvergleichs der Energiebedarf von Brennstoffzellensystemen mit herkömmlichen Verbrennungsmaschinen verglichen. Dabei sollen die Rand-

bedingungen jedoch gleich sein, d.h. für alle Systeme wird als Primärenergieträger (fossiles) Erdgas gewählt. Werden in Zukunft Energieträger aus regenerativen Quellen in ausreichendem Maße vorhanden sein, so würde die Betrachtung sicher anders aussehen. Da Brennstoffzellensysteme jedoch ideale Wandler für Wasserstoff bzw. Methanol darstellen, wird sich der Vorteil beim Übergang vom fossilen ins regenerative Zeitalter mit Sicherheit in Richtung Brennstoffzellen verschieben.

• Stationärer Bereich

In stationären Kraftwerken kann die entstehende Abwärme als industrielle Prozesswärme bzw. in Nahwärmenetzen energetisch genutzt werden. Es wird daher bei der Bewertung des Energiebedarfs der thermische und elektrische Gesamtwirkungsgrad berücksichtigt. Außerdem

wird davon ausgegangen, dass die Kraftwerke konstant im optimalen Betriebspunkt gefahren werden. Werden Kraftwerke auch in Teillast gefahren, so schneiden konventionelle Kraftwerke deutlich schlechter ab, da deren Wirkungsgrad in Teillast typischerweise deutlich abnimmt.

Für den Systemvergleich werden folgende 3 Varianten herangezogen:

- Modernes, gasbefeuetes GUD-Kraftwerk (HKW Linden, Hannover [2])
- Mit Erdgas befeuetes SOFC-Kraftwerk (Siemens Westinghouse [3])
- Mit Erdgas befeuetes SOFC-Kraftwerk mit nachgeschalteter Mikroturbine (Siemens Westinghouse [3])

Das Ergebnis ist in Tabelle 4 zu sehen.

Tabelle 4: Wirkungsgrade von Kraftwerken

	thermisch	elektrisch	gesamt
GUD	34%	53%	87%
SOFC	35%	50%	85%
SOFC + Mikroturbine		60%	

SOFC-Kraftwerke sind daher vom Energieverbrauch in etwa vergleichbar mit herkömmlichen GUD-Kraftwerken. Dies gilt insbesondere auch für den elektrischen Wirkungsgrad, und das schon bei wesentlich kleineren Kraftwerksleistungen (SOFC: 100 kW, GUD: 100 MW). Vergleichbare konventionelle Anlagen im Bereich um 1 MW (Motoren-BHKW) erreichen dagegen nur elektrische Wirkungsgrade unter 40%.

Bei fossil befeuerten Anlagen ergibt sich in etwa derselbe CO₂-Ausstoß für konventionelle und Brennstoffzellen-Kraftwerke bei Einsatz des gleichen Energieträgers und bei gleichem elektrischen Wirkungsgrad. Im Gegensatz zu GUD-Anlagen kann das Kohlendioxid aber in SOFC-Anlagen relativ leicht abgetrennt werden [3], da es nicht mit dem Luftsauerstoff und Luftstickstoff vermischt ist. Es ist daher prinzipiell möglich, auch die CO₂-Emissionen drastisch zu senken.

• Mobiler Bereich:

Der wesentliche Anteil am Verkehrsaufkommen wird durch Pkws verursacht, hier ist der Wärmebedarf (zumindest an den meisten Tagen im Jahr) kleiner als die im Antriebsaggregat entstehende Abwärme. Bei der Bewertung des Energiebedarfs sollte daher nur die mechanische Antriebsenergie berücksichtigt werden. Die Deckung des Wärmebedarfs im Winter wäre ein gesondert zu diskutierendes Problem.

Es werden folgende 4 Systeme verglichen:

- moderner Erdgasmotor
- PEM-Brennstoffzelle mit Reformer
- DMFC
- Direkt mit Erdgas betriebene SOFC

Allgemein gilt: Im mobilen Einsatz werden die Wandler in unterschiedlichen, schnell wechseln-

den Lastbereichen betrieben. Dabei haben Brennstoffzellen-Fahrzeuge gegenüber Verbrennungskraftmaschinen einen prinzipiellen Vorteil, da der Stack-Wirkungsgrad bei Teillast ansteigt. Es sind Stack-Wirkungsgrade über 50% erreichbar. Dem gegenüber erreicht z.B. der BMW-Gasmotor im Bestpunkt nur einen Wirkungsgrad von etwa 37%. Ein sinnvoller Systemvergleich ist erst auf Grundlage eines angenommenen Fahrzyklus möglich. Soweit die entsprechenden

Daten vorliegen, wird hier auf den Neuen Europäischen Fahrzyklus zurückgegriffen.

Beim Einsatz von Methanol in PEM-Brennstoffzellen muss in einer vorgeschalteten Reformereinheit unter Energiezufuhr Wasserstoff erzeugt werden. Mit einem hohen System-Wirkungsgrad ist dabei die mit externer Energiezufuhr arbeitende Dampfreformierung Stand der Technik. Tabelle 5 zeigt das Ergebnis des Vergleiches.

Tabelle 5: Wirkungsgrade von Gas- und Brennstoffzellenmotoren

	Methanol-Synthese	Reformierung	Stack Fahrzyklus	Motor Fahrzyklus	Gesamt
Erdgasmotor	–	–	–	25% [4]	25%
PEM	65% [2]	90% [5]	44%	–	25%
DMFC	65% [2]	–	40% (geschätzt)	–	25%
SOFC	–	–	40% (geschätzt)	–	40%

Bei einem mit Erdgas versorgten SOFC-Brennstoffzellenantrieb entfällt die energetisch ungünstige Methanol-Synthese. Dadurch wird die Gesamteffizienz des Systems nur noch durch das Teillastverhalten der Brennstoffzelle im Fahrzyklus bestimmt. Darüber liegen noch keine Messwerte vor, sie sollte jedoch in etwa vergleichbar mit einem PEM-Stack sein. Vom Gesamtwirkungsgrad ist daher ein SOFC-System für den Fahrzeugantrieb sehr günstig einzuschätzen. Aufgrund der hohen Betriebstemperaturen ergeben sich jedoch Probleme im Startverhalten und durch Wärmeverluste in den Stillstandszeiten.

6. Schadstoffemissionen

Bei der Emission von Schadstoffen muss zwischen Emissionen vor Ort und vorgelagerten Emissionen, die bei Energieumwandlung, -speicherung und -transport entstehen, unterschieden werden. Bei den Emissionen vor Ort hat die Brennstoffzelle einen eindeutigen Vorsprung aufgrund der niedrigen und gleichmäßigen Arbeitstemperaturen des elektrochemischen Prozesses. Beim Betrieb mit Wasserstoff treten praktisch keine Emissionen von CO, NO_x, SO₂, unverbrannten Kohlenwasserstoffen oder Rußpartikeln auf. Auch mit Methanol betriebene BZ-Fahrzeuge erreichen noch den Standard „near zero emission“.

Stickoxide NO_x: Nebenprodukt bei Reaktion mit Luft (Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch), der Anteil ist abhängig von der Temperatur des Verbrennungsprozesses, unter 600 °C können sich praktisch keine Stickoxide bilden. Aber auch bei Hochtemperatur-Brennstoffzellen (z.B. SOFC) ist der Anteil an Stickoxiden im Abgas verschwindend gering. Die bei den sehr viel höheren Temperaturen im Brennraum herkömmlicher Verbrennungskraftmaschinen entstandenen Stickoxide müssen in nachgeschalteten Komponenten (z.B. 3-Wege-Kat) aus dem Abgas entfernt werden.

Schwefeldioxid (SO₂): In Diesel, Benzin und Heizöl befinden sich Schwefelreste des Erdöls. Diese verbrennen im Motor zu Schwefeldioxid. Dieses löst sich in der Feuchtigkeit der Luft zu einer Säure, welche Bauwerke aus Naturstein zerfrisst. Diese Säure ist auch der Hauptverursacher für den sauren Regen und für das Waldsterben. Der Schwefelgehalt derzeitiger Kraftstoffe darf 100 ppm nicht übersteigen, geeignete Verfahren zur Reduzierung des Schwefelgehalts sind großtechnisch verfügbar.

Kohlenmonoxid (CO): Bei unvollständiger Verbrennung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe entsteht neben Kohlendioxid auch das giftige Kohlenmonoxid. Reduzierung durch nachgeschalteten katalytischen Konverter ist möglich und üblich. In beiden Methanol-Reformierungspro-

zessen entsteht neben Wasserstoff auch CO, das zu einer starken Vergiftung des Anodenkatalysators in einer PEMFC führt. Es muss daher in einem aufwändigen, mehrstufigen Reinigungsverfahren (Shift-Reaktoren, selektive CO-Oxidation bzw. Membrantrennverfahren) aus dem Brenngas entfernt werden. Dies hat jedoch den Vorteil, dass im Abgas des BZ-Systems nur sehr geringe Mengen an CO und anderen Schadstoffen enthalten sind. Sowohl für CO als auch für Stickoxide liegen die Werte bei etwa 1 Promille der Werte für ein Auto mit Verbrennungsmotor [6].

Edelmetall-Emissionen: Praktisch alle Prozesse, die in einem Brennstoffzellensystem ablaufen, sind katalytische Oberflächenprozesse. Dies bedeutet in der Regel eine reduzierte volumenbezogene Leistungsdichte, jedoch lassen sich die einzelnen chemischen Prozesse sehr viel besser steuern. Es entstehen daher deutlich weniger unerwünschte Nebenprodukte (= Schadstoff-Emissionen) als bei den unkontrolliert im Reaktionsvolumen ablaufenden Verbrennungsprozessen in einer herkömmlichen Verbrennungskraftmaschine (VKM). Abhilfe schafft hier nur eine auch katalytisch arbeitende Systemkomponente, die den VKM nachgeschaltet ist, der sog.

„3-Wege-Kat“, da die drei Schadstoffe NO_x, CO und unverbrannte Kohlenwasserstoffe zu Stickstoff und Kohlendioxid reduziert bzw. oxidiert werden. Der 3-Wege-Kat stellt jedoch selbst ein Umweltproblem dar, da über die Lebenszeit des Katalysators erhebliche Mengen des Edelmetalls Platin an die Umwelt abgegeben wird. Die jährliche Platin-Emission des PKW-Bestandes von Deutschland beträgt zur Zeit etwa 250 kg [7]. Neuere Untersuchungen zeigen, dass der Platingehalt im Straßenstaub in den letzten 6 Jahren auf das 20-fache gestiegen ist. Im Vergleich zum Platingehalt von normalen Böden beträgt die Konzentration sogar das 1000-fache. Platin steht im Verdacht, krebserregend zu sein. Viele Platinverbindungen können Allergien auslösen und sind sehr giftig.

Benzol und andere Additive: Zur Erhöhung der Klopfestigkeit müssen dem Brennstoff für Verbrennungskraftmaschinen verschiedene Additive beigemischt werden. Diese werden nach dem Verbrennungsprozess als zusätzliche Schadstoffe an die Umwelt abgegeben.

Tabelle 6 zeigt einige typische Emissionen bei Verwendung fossiler Brennstoffe in herkömmlichen Kraftwerken sowie in einem SOFC-Brennstoffzellenkraftwerk.

Tabelle 6: Emissionen in Kraftwerken (mg/kWh)

	SO ₂	NO _x	CO	Staub
SOFC (Siemens Westinghouse) [2,3]	~ 0	5	< 10	~ 0
Kohlekraftwerk [2]	500	300	100	50
Gas-GUD [2]	2	200	50	1

Trotz drastisch reduzierter Schadstoffemissionen seit Einführung des 3-Wege-Katalysators ist die Umweltbelastung durch den Autoverkehr noch erheblich. Vor allem die Emissionen von Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen werden noch zum größten Teil vom Verkehrssektor verursacht. Dies sind die wichtigsten Vorläufersubstanzen für die bodennahe Ozonbildung („Sommersmog“). Noch 1996 lag die innerhalb Deutschlands im Sommer gemessene maximale Ozonkonzentration mehr als doppelt so hoch als der von der VDI-Kommission festgesetzte MIK-Wert (Maximale Immissions-Konzentration).

7. Schlussfolgerungen

Brennstoffzellen sind eine Technologie, die sowohl im stationären wie mobilen Bereich mit hohem Wirkungsgrad und – im Vergleich zu Verbrennungskraftmaschinen – sehr niedrigen Schadstoffemissionen eingesetzt werden können. Je nach Art des Primär- bzw. Sekundärenergieträgers stehen dabei verschiedene Brennstoffzellensysteme zur Verfügung (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Brennstoffzellensysteme in Abhängigkeit von Primär- bzw. Sekundärenergieträgern

regenerativer Wasserstoff	PEM
Methanol	PEM, DMFC
Erdgas	SOFC, MCFC
Biogas	SOFC, MCFC

Voraussetzung für den Betrieb von Brennstoffzellen ist meist ein (im Vergleich zu Verbrennungskraftmaschinen) sehr viel saubererer Kraftstoff. Dies erfordert mehr Aufwand in der Brennstoffbereitstellung, reduziert jedoch gleichzeitig die Schadstoffemissionen. Auch in Verbrennungskraftmaschinen würde ein saubererer Kraftstoff natürlich zu geringeren Emissionen führen; Additive zur Erhöhung der Klopfestigkeit (z.B. Benzol) sind jedoch unvermeidbar. Stickoxidemissionen von Brennstoffzellen sind aufgrund der niedrigen Reaktionstemperaturen deutlich erniedrigt bzw. nicht mehr nachweisbar.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Energiedaten 2000
- [2] Dienhart, H. / Pehnt, M. / Nitsch, J.: Analyse von Einsatzmöglichkeiten und Rahmenbedingungen verschiedener Brennstoffzellensysteme in Industrie und zent-

raler öffentlicher Stromversorgung (Gutachten im Auftrag des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag), DLR, Stuttgart, November 1999

- [3] Brennstoff Wärme Kraft, Bd. 51 (1999) Nr. 11/12
- [4] BMW 523g
- [5] Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Abschlussbericht zur Brennstoffzellen-Studie „Ganzheitliche Systemuntersuchung zur Energiewandlung durch Brennstoffzellen“, Frankfurt/Main, Heft 657 (1998)
- [6] Theenhaus, R. / Bonhoff, K.: „Brennstoffzellensysteme – ein Überblick“, in „Forschungsverbund Sonnenenergie, Themen 1999/2000“ (Köln, Februar 2000)
- [7] GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, mensch + umwelt Heft 1 (Mai 1998)

2.

WIE BALD UND WIE BILLIG:

WIE WIRTSCHAFTLICH WIRD DIE BRENNSTOFFZELLE?

Georg **Erdmann**, Technische Universität Berlin

1. Gegenstand

Im folgenden geht es um die perspektivische Wirtschaftlichkeit von Niedertemperatur-Brennstoffzellen (*Polymer Electrolyte Membrane* oder *PEM-Brennstoffzelle*), und zwar für

- Anwendungen in Straßenverkehrsfahrzeugen (Pkw und Busse)
- Anwendungen in der Hausenergieversorgung (Wohngebäude)

Es handelt sich hierbei um potentielle Massenmärkte mit Stückzahlen von mehreren Hunderttausend verkauften Einheiten pro Jahr.

Nicht berücksichtigt werden

- Anwendungen jenseits von 250 kW elektrischer Leistung (Kraftwerke, Schiffe, U-Boote, Satelliten, Lokomotiven), da hier keine Massenmärkte erkennbar sind. Ein wirtschaftlicher Einsatz ist nicht ausgeschlossen, doch beruhen die Vorteile von Brennstoffzellen nicht unmittelbar auf den energietechnischen Anforderungen.
- Anwendungen für portable elektrische Geräte (inkl. militärische Anwendungen). Da die Energiekosten hier eine untergeordnete Rolle spielen, ist ein wirtschaftlicher Einsatz absehbar, aber dies hat – abgesehen von Innovationseffekten – keine energiewirtschaftliche Bedeutung.

In beiden Fällen ist ein wirtschaftlicher Einsatz in Nischenmärkten erreicht oder steht unmittelbar bevor, so dass die eingangs gestellte Frage nach der Wirtschaftlichkeit der Brennstoffzelle positiv beantwortet werden kann.

2. Treibende Faktoren

Es gibt zwei treibende Faktoren für die Einführung der Brennstoffzellen-Technologie:

- Aus amerikanischer Sicht spielt die Luftreinhaltepolitik des *California Air Resources Board* (CARB) eine Schlüsselrolle. Der kalifornische Fahrzeugmarkt eignet sich hervorragend als Pilotmarkt für die Einführung neuer Kraftstoffe und Antriebe. Zentral sind die Konzepte des *Zero Emission Vehicle* (ZEV) bzw. des *Equivalent Zero Emission Vehicle* (EZEV). Im Prinzip verspricht die Regulierungsbehörde den künftigen Anbietern von entsprechend lizenzierten Fahrzeugen einen (letztendlich durch administrative Eingriffe zu sichernden) Marktanteil im kalifornischen Neugeschäft von anfänglich mindestens 10 Prozent. Dieser „Kuchen“ ist genügend groß, um die Forschungs- und Entwicklungsbemühungen der Fahrzeugindustrie in einem bislang ungeahnten Ausmaß auf saubere Antriebe zu lenken. Ergänzend spielen dabei auch Image- und Marketing-Vorteile (Technologiekompetenz), Erwerb von First Mover Advantages und Erwartungen im Rahmen der sog. *New Economy* eine Rolle.
- Aus europäischer Perspektive ist die praktisch vollständige strategische Abhängigkeit der Fahrzeugindustrie vom Rohöl die treibende Kraft. Es geht um die Suche nach einer nachhaltigen Alternative zu Erdöl-basierten Treibstoffen für die Zeit nach 2020. Mit der Einführung der EURO IV-Norm gelten die lokalen limitierten Emissionen als ein gelöstes Problem – auch wenn es noch einige Jahre dauern wird, bis sich diese Lösung in den Emissionsbilanzen niederschlägt. Sofern sich dabei Wasserstoff als die von allen wesentlichen Akteuren mitgetragene Alternative herauskristallisiert, wird es zwangsläufig zu einer Ablösung des Verbrennungsmotors durch Brennstoffzellen und Elektromotoren kommen.

Für stationäre Anwendungen spielt die Möglichkeit der Brenngeräte-Hersteller eine Rolle, „auf einen von anderen angetriebenen Zug auf-

zuspringen“. Aus Sicht der Energiewirtschaft (Strom und Gas) ist die Kundenbindung wesentlich für den künftigen Geschäftserfolg. Hierzu könnte die in *Contracting*-Modellen vermarktete stationäre Brennstoffzelle eine wichtige Funktion übernehmen.

Im Unterschied zum mobilen Einsatz ist bei stationären Brennstoffzellen-Anwendungen eine „strategische Partnerschaft“ zwischen Herstellern und Betreibern in Sicht.

3. Hemmende Faktoren

Man kann die Markteinführung von Brennstoffzellen als einen technischen Wettlauf mit konventionellen Motoren sehen. Der hohe technische Stand (tiefe Herstell- und Betriebskosten, attraktive Zuverlässigkeit, Fortschritte bei der Emissionsminderungen) sowie der Umfang von finanziellen Ressourcen zur „Verteidigung der bestehenden Positionen“ könnte der konventionellen Technologie einen mittelfristig uneinholbaren Vorsprung verschaffen.

Die mobile Einführung von Brennstoffzellen setzt (aus heutiger Sicht) die flächendeckende Einführung eines neuen Kraftstoffs voraus. Dies wiederum erfordert eine „strategische Partnerschaft“ zwischen der Fahrzeugindustrie und der Mineralölwirtschaft. Doch es ist noch nicht erkennbar, ob und in welcher Form es dazu kommen wird, und ob allenfalls die Fahrzeugindustrie ein eigenes Infrastruktur-Konzept verwirklicht (wie von der BMW AG angekündigt). Aus Sicht der Mineralölwirtschaft spielt eine Rolle, dass sie mit den sog. *Gas to Liquid*-Technologien (GTL) an einer Antwort auf die Erdölabhängigkeit des Verkehrs arbeitet, die ohne die Brennstoffzellen-Technologie auskommt.

Eine große Unbekannte ist der „Verbraucher“, der es gewohnt ist, Hochleistungsfahrzeuge mit einem hervorragenden Niveau an Langlebigkeit, Zuverlässigkeit, Wartungs- und Nutzerfreundlichkeit zu kaufen. Vielleicht können Brennstoffzellen vorerst nur als *Auxiliary Power Units* (APU) erfolgreich am Markt eingeführt werden.

4. Neutrale Faktoren

Eine neutrale Rolle dürften die Erdölpreise spielen – hier vertrete ich eine andere Ansicht

als viele andere. Sie wird durch unsere Marktsimulationen nachhaltig bestätigt. Zwar wird die neue Brennstoffzellen-Technologie durch das gestiegene Rohölpreisniveau an Attraktivität gewinnen, doch ist dies zumeist psychologischer Natur. Einerseits steigen mit den Ölpreisen auch die Erdgaspreise, und damit ist kein preisgetriebener Substitutionseffekt zu Treibstoffen zu erwarten, die aus Erdgas hergestellt werden. Dies wird für die neuen Treibstoffe in der Einführungsphase überwiegend der Fall sein. Außerdem wird durch die höheren Energiepreise Finanzierungskraft von den Entwicklern der Brennstoffzellen-Technologie abgezogen – weniger Fahrzeugumsatz, weniger Kilometerleistung, damit veränderte TCO von Pkw, mehr Investitionen in die Erschließung von Erdölquellen).

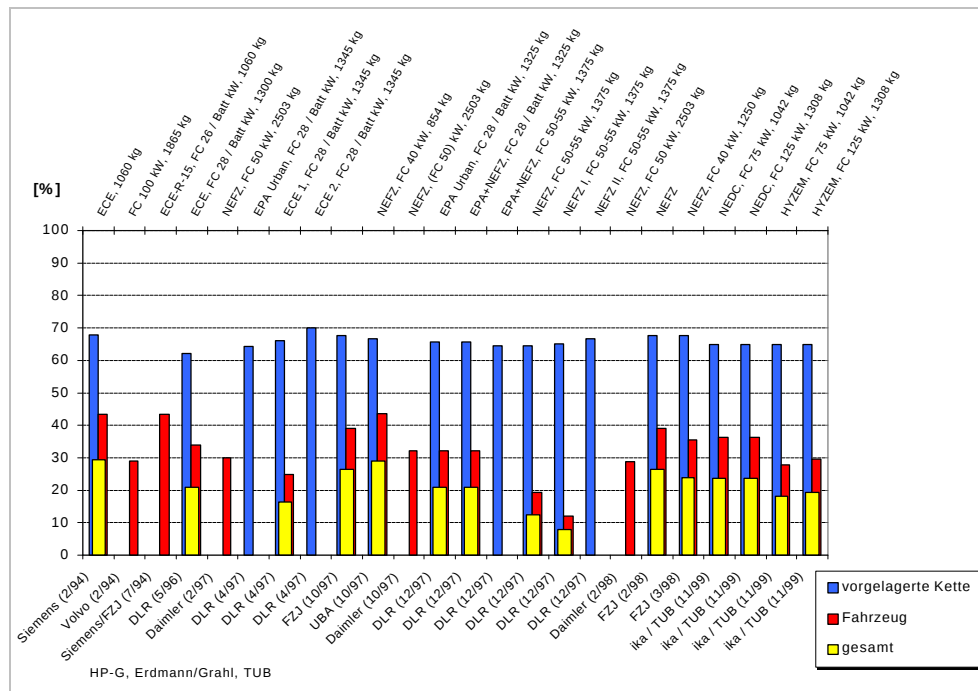
5. Zielkosten der mobilen PEM-Anwendung

Abb. 1 präsentiert eine Literaturlauswertung zu den Primärenergie-Nutzungsgraden von Pkw mit Brennstoffzellen-Antrieben. Diese hängen ab von den sonstigen Fahrzeugeigenschaften sowie dem zugrundeliegenden Fahrzyklus. Die Angaben sind nur zum Teil harmonisiert und geben nur Größenordnungen wider. Es gibt optimistische und pessimistische Einschätzungen, die bislang noch nicht konvergiert sind.

Hinsichtlich der erreichbaren Kosten von Brennstoffzellen-Aggregaten sind die Unsicherheiten noch weitaus größer. In Abb. 2 sind Zielkosten angegeben. Sie beruhen auf einer umfangreichen Literaturlauswertung (rd. 1500 Quellen), wobei es sich um die jeweiligen Mittelwerte unter Vernachlässigung von Extremwerten handelt. Die genannten Kosten sind nur bei Serienfertigung von Brennstoffzellen-Aggregaten erreichbar und setzen weitere Entwicklungserfolge voraus.

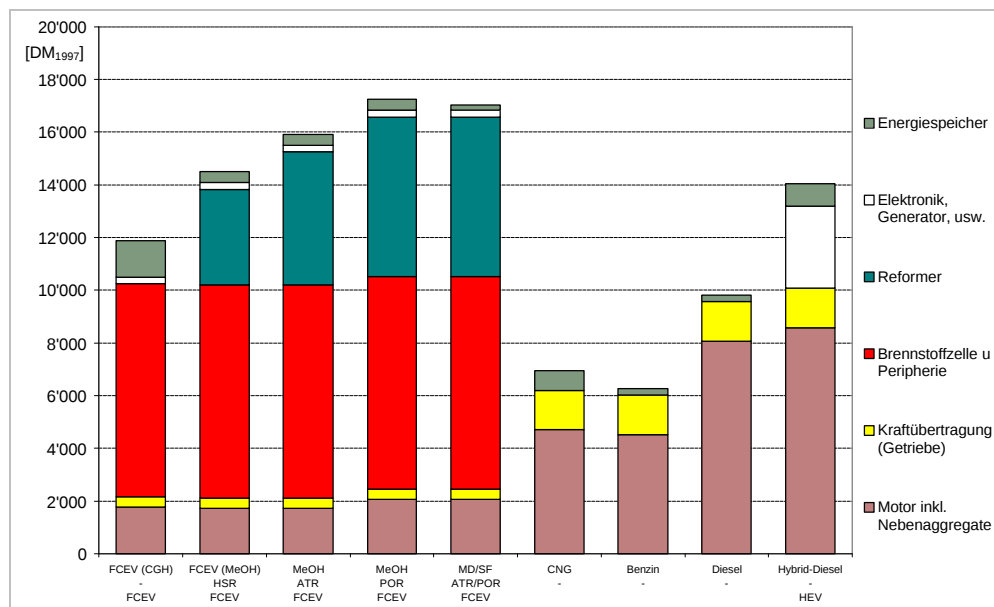
Sofern sich diese Zielkosten verwirklichen lassen, werden Fahrzeuge mit Brennstoffzellen-Antrieben künftig rund 6.000 bis 8.000 DM höhere Herstellkosten aufweisen als Benzin-Aggregate.

Abb. 1: Kettennutzungsgrade von Brennstoffzellen-Fahrzeugen mit komprimiertem Wasserstoff als Treibstoff



Quelle: Grahl 2000, Erläuterung siehe Text

Abb. 2: Zielkosten in der oberen Mittelklasse



Anm.: Bei den fünf Balken links handelt es sich um Brennstoffzellenfahrzeuge mit unterschiedlichen Brennstoffzellensystemen, bei den vier Balken rechts um Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren.
 CGH: komprimierter Wasserstoff; HSR, ATR, POR: Typen von Methanol-Reformern; FCEV: Brennstoffzellen-Fahrzeug; MD/SF: Synthetischer flüssiger Kraftstoff; MeOH: Methanol.

Quelle: Grahl 2000

6. Infrastrukturkosten für die Treibstoffversorgung

In Deutschland wird es künftig rund 12.000 öffentliche Straßentankstellen geben, in Europa etwa 50.000. Sofern Brennstoffzellen-Fahrzeuge neue Treibstoffe (flüssiger oder komprimierter Wasserstoff LH₂ bzw. CGH oder Methanol MeOH) erfordern, muss eine große Zahl dieser Tankstellen nachgerüstet werden. Dafür sind pro Tankstelle etwa 400.000 bis 800.000 DM an Investitionen erforderlich.

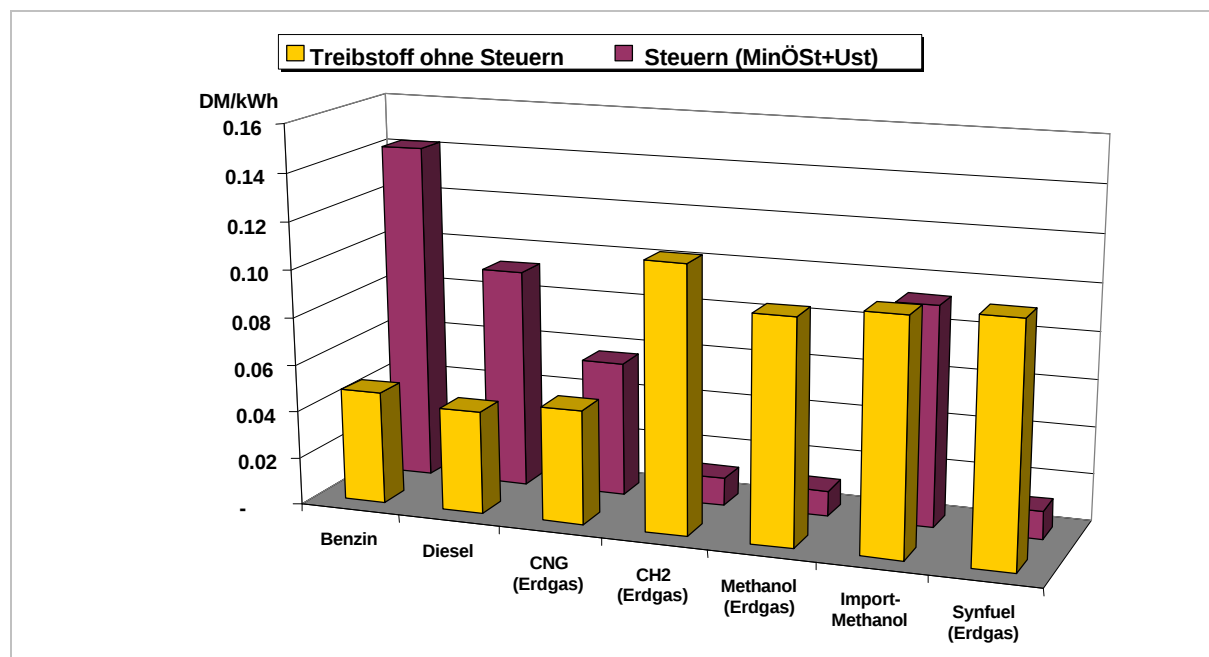
Weitere Investitionen werden für die Herstellung und die Verteilung der neuen Treibstoffe notwendig. Im Unterschied zu den Tankstellen können diese Investitionen allerdings in zeitlichen Etappen getätigt werden und teilweise durch geringere Erneuerungs-Investitionen in die konventionelle Kraftstoffherzeugung (Raffinerien) finanziert werden.

Bei den Tankstellen muss allerdings schon in relativ unmittelbarem zeitlichen Zusammenhang mit der Einführung erster Brennstoffzellen-Serienfahrzeuge eine weitgehend flächendeckende Versorgung mit entsprechenden Tankstellen

vorhanden sein. Ohne diese Infrastruktur kämen zunächst nur Flottenbetreiber als Käufer von Brennstoffzellen-Fahrzeugen in Frage. Doch dieses Marktsegment ist aus Sicht der Fahrzeugindustrie zu marginal, um die Entwicklung eigener Aggregate zu rechtfertigen, und außerdem würde den Flottenbetreibern der Gebrauchtwagenmarkt verschlossen bleiben. Wie schon die Erfahrung mit Erdgasfahrzeugen gezeigt hat, müssten Brennstoffzellen-Fahrzeuge am Markt scheitern, wenn mit der Lancierung entsprechender Serienfahrzeuge nicht eine zügige und – aus Kundensicht – glaubwürdige flächendeckende Nachrüstung von Tankstellen erfolgt.

Unter der Annahme, dass im Jahr 2010 schon 25 Prozent der Tankstellen in Deutschland den ausgewählten neuen Treibstoff zu kostendeckenden Preisen abgeben und die Brennstoffzellen-Fahrzeuge zu diesem Zeitpunkt einen Marktanteil von 2,5 Prozent halten, ergeben sich die in Abb. 3 skizzierten Kosten. Ohne Mineralölsteuern sind die alternativen Kraftstoffe etwa 5 bis 6 Pf/kWh (entspricht rund 50 Pf pro Liter Benzinäquivalent) teurer als Benzin oder Diesel – mit Ausnahme von Erdgas.

Abb. 3: Extrapolierte Treibstoffkosten ab 2010



Anm.: CNG = komprimiertes Erdgas, CH₂ = komprimierter Wasserstoff, Synfuel = synthetischer flüssiger Kraftstoff

Quelle: Erdmann / Grahl 2000

In der Einführungsphase wird sich daher für alternative Kraftstoffe die Kostenäquivalenz nur erreichen lassen, wenn die neuen Treibstoffe – ähnlich wie heute Erdgas – teilweise von der Mineralölsteuer befreit werden.

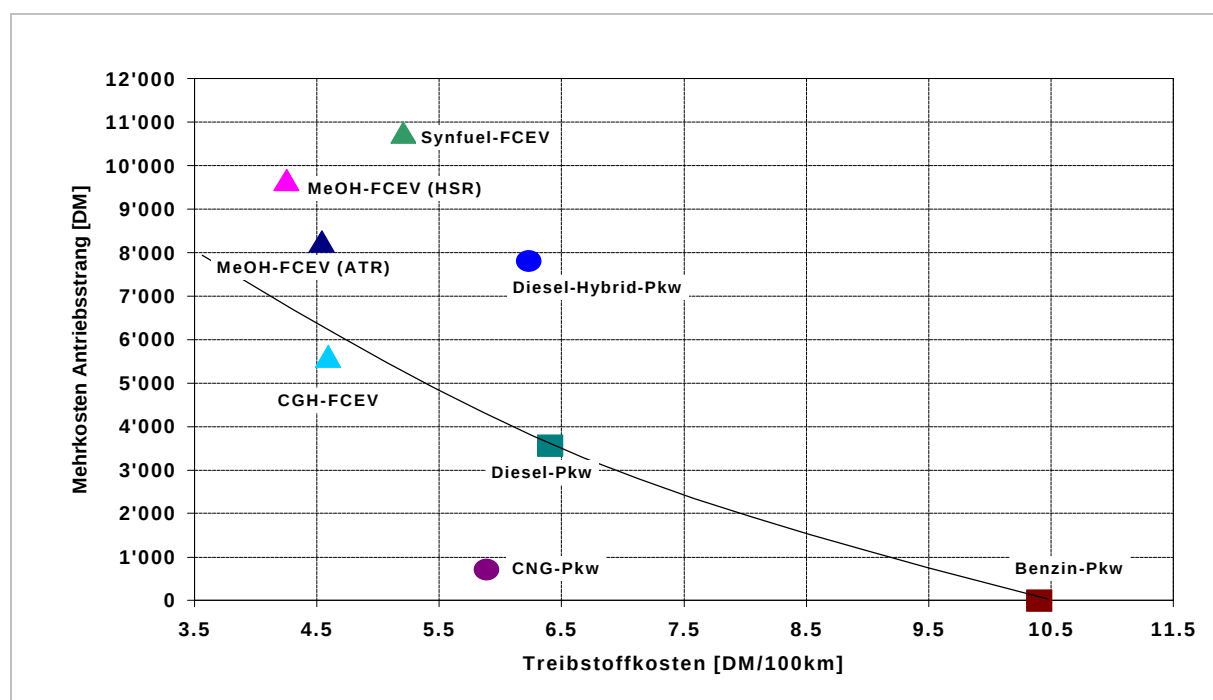
7. Erwartete Marktchancen für PKW der oberen Mittelklasse in Deutschland

Unter der Annahme, dass eine Mineralölsteuerbefreiung analog Abb. 3 erfolgt und sich bis 2010 die Rohölpreise – und im Gefolge auch die Erdgaspreise – zurückbilden, lassen sich die *Total Cost of Ownership (TCO)* der verschiedenen Antriebskonzepte vergleichen. Abb. 4 vergleicht die wesentlichen Kostenkomponenten, die Mehrkosten des Antriebsstrangs sowie die Treibstoff-

Treibstoffkosten, für unterschiedliche Antriebskonzepte und das Jahr 2010.

Hier erweisen sich Brennstoffzellen-Fahrzeuge aus wirtschaftlicher Sicht als „Super-Diesel“: Wegen der verbesserten Energienutzungsgrade von Fahrzeugen mit Brennstoffzellen-Antrieben sowie den tieferen spezifischen Treibstoffkosten sind die Treibstoffkosten pro 100 km geringer als bei vergleichbaren Diesel-Pkw, während die entsprechenden Anschaffungskosten zwischen 1.000 und 4.000 DM höher sind. Dies wirft die Frage auf, ob die Brennstoffzellen-Pkw von ihren technischen Eigenschaften her Diesel-Pkw ersetzt werden können: hohe Jahresfahrleistungen bei tiefen Betriebskosten. Dabei gilt es zu bedenken, dass Brennstoffzellenfahrzeuge ihre Vorzüge vor allem im innerstädtischen Verkehr, nicht aber auf der Autobahn ausspielen können.

Abb. 4: Kosten unterschiedlicher Fahrzeugantriebe für Pkw der oberen Mittelklasse



Anm.: CGH: komprimierter Wasserstoff; CNG: komprimiertes Erdgas; FCEV: Brennstoffzellen-Fahrzeug; HSR, ATR, POR: Typen von Methanol-Reformern; ICEV: Fahrzeug mit Verbrennungsmotor; MD/SF: Synthetischer flüssiger Kraftstoff; MeOH: Methanol.

Quelle: Grahl 2000

Unter den Brennstoffzellen-Fahrzeugen scheinen Wasserstoff-Pkw (CGH: *Compressed Gaseous Hydrogen*) und Methanol-Fahrzeuge mit HSR (*Heated Steam Reformer*) besonders attraktiv.

Synfuel-Brennstoffzellen-Pkw und Hybrid-Pkw (Diesel- und Elektromotor) sind aus einer Gegenüberstellung mit den vorgenannten Konzepten abgeschlagen.

Erdgasfahrzeuge auf der Basis von CNG (*Compressed Natural Gas*) erscheinen aus TCO-Sicht besonders attraktiv. Dies liegt an der Annahme, dass diese Fahrzeuge mit sehr geringen Zusatzkosten gegenüber vergleichbaren Benzin-Pkw angeboten werden (dies ist heute in Deutschland nicht der Fall, weil es noch keine Serienfertigung von Erdgasfahrzeugen gibt).

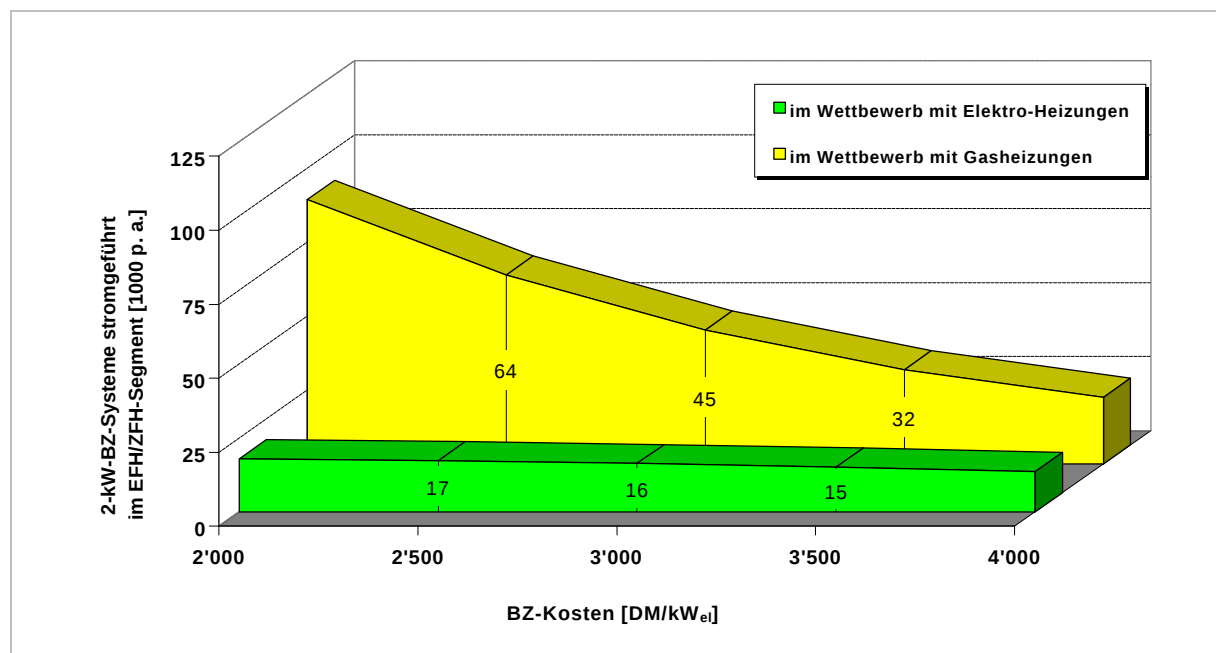
Insgesamt zeigen die Ergebnisse von Abb. 4, dass ein Markterfolg von Brennstoffzellen-Fahrzeugen bis zum Jahr 2010 noch nicht garantiert ist, sofern bis dahin die Zielkosten der Brennstoffzellen-Aggregate von bis zu 140 DM/kW nicht erreicht werden. Umgekehrt besagt Abb. 4, dass ein Markterfolg in diesem Fall durchaus möglich ist. Voraussetzung dafür ist die technische Zuverlässigkeit des Brennstoffzellen-Aggregats, die nach den vorliegenden Berichten von Pilotprojekten noch nicht unter Beweis gestellt worden ist.

8. Zielkosten und Marktchancen der stationären PEM-Anwendung

Die Zielkosten der stationären Brennstoffzellen-Anwendung für die Hausenergieversorgung orientieren sich an den Wärmekosten vergleichbarer Heizsysteme, die bei Ein- und Zweifamilienhäusern bis zu 0,14 DM/kWh Wärme erreichen. In einer 1999 abgeschlossenen Studie legte der Verfasser für den deutschen Markt eine Grob-Abschätzung des wirtschaftlichen Marktpotentials von kleinen Brennstoffzellen-Aggregaten bis zu einer elektrischen Leistung von 30 kW vor.

Die Darstellung in Abb. 5 bezieht sich auf kleine Brennstoffzellen-Systeme mit einer elektrischen Leistung von 2 kW und einem Zusatzkessel, wie man sie im Ein- und Zweifamilienhaus einsetzen könnte. Den Ergebnissen zufolge könnten bis 2010 bereits beträchtliche Jahresverkaufszahlen erreicht werden, sofern die Aggregate inkl. Reformer (Erdgas), Brennstoffzelle und Wechselrichter unter 3.000 DM/kW_{el} am Markt angeboten werden.

Abb. 5: Jahresverkaufszahlen von stromgeführten 2 kW_{el}-Brennstoffzellensystemen für Ein-/Zweifamilienhäuser 2005 – 2010 als Funktion der Brennstoffzellenkosten



Quelle: Erdmann 2000

Unsere Zahlen liegen unterhalb von Studien anderer Autoren, weil wir vergleichsweise konservativ gerechnet haben. Da wir die Verluste durch

das Anfahr- und Abschaltverhalten des Brennstoffzellen-Aggregats nicht berücksichtigen, könnten unsere Zahlen dennoch zu hoch sein.

Selbstverständlich ist auch hier wieder der technisch zuverlässige Betrieb der Brennstoffzellen-Aggregate (sowie der Wechselrichter) unterstellt, was heute noch nicht „Stand der Technik“ ist.

In diesem Zusammenhang zeichnet sich ab, dass mit der Installation eines Brennstoffzellen-Heizsystems in Wohngebäuden Folgetechnologien eine zusätzliche Attraktivität erhalten. Dazu gehören beispielsweise Software-Agenten zur optimalen Steuerung elektrischer Geräte in Abstimmung mit dem Brennstoffzellen-Aggregat sowie – wegen des Vorhandenseins von Gleichstrom – die Photovoltaik.

9. Lern- und Skaleneffekte

Die heute am Markt erhältlichen *PEM*-Brennstoffzellen-Aggregate kosten um 30.000 DM/kW, teilweise mehr. Es handelt sich um die Verkaufspreise von Produkten im Entwicklungsstadium, die nicht verglichen werden können mit den Herstellkosten von ersten Vorserien- und Serienprodukten. Sofern die Hersteller der Brennstoffzellen-Aggregate im Käufer einen strategischen Partner sehen, kommen Kaufverträge unterhalb dieser Preise zustande. Details werden von den Beteiligten allerdings nicht bekannt gegeben.

Über die effektiven Herstellkosten der ersten Serienprodukte gibt es keine öffentlich zugänglichen Informationen. Aber sobald der Startschuss zu Investitionen in Produktionsanlagen gefallen ist, setzen die bekannten Kostensenkungseffekte ein, und zwar durch

- Lerneffekte, die zu einer Kostenreduktion in Abhängigkeit von der kumulierten Produktionsmenge führen
- Skaleneffekte, die zu einer Kostenreduktion in Abhängigkeit von der jährlichen Produktion führen. Wenn sie steigt, können Produktionsanlagen größer und rationeller betrieben werden.

Soweit Edelmetalle (Platin) benötigt werden, können – wegen der mit zunehmenden Herstellvolumina steigenden Knappheiten – langfristige Kostensteigerungen eintreten. Dieser Effekt

hängt wesentlich von der pro Aggregat erforderlichen Menge ab.

Eine seriöse Aussage über den Gesamteffekt ist nur möglich, wenn man genauer in die Produktionsprozesse von Brennstoffzellen-Aggregaten hineinschauen kann, was nur für Hersteller selbst (bzw. für die von ihnen beauftragten Berater) möglich ist.

Angesichts anhaltende Forschungs- und Entwicklungsausgaben der Industrie kann indirekt der Schluss gezogen werden, dass die Entscheidungsgremien der Industrie es für nicht ausgeschlossen halten, beim Übergang zur Serienproduktion die Herstellkosten von Brennstoffzellen-Aggregaten um den Faktor 10 bis 15 (bei stationären Anlagen) oder 200 (im Fahrzeugbereich) zu senken. Dabei spielen sicher auch die außergewöhnlichen Erfahrungen der Fahrzeugindustrie bei der rationellen Herstellung technisch komplexer Produkte eine Rolle.

Im Rahmen einer Modellrechnung lässt sich abschätzen, in welchem Ausmaß die Fertigung von Brennstoffzellen-Aggregaten weltweit ausgeweitet werden muss, um die vorstehend ausgeführten Kostenziele zu erreichen. Das Ergebnis hängt ab vom durchschnittlichen Lernfaktor, der angibt, in welchem Ausmaß die Herstellkosten bei Verdopplung der Produktion sinken.

Sofern man modellhaft unterstellt, dass die heutigen Brennstoffzellen-Systemkosten auf einer kumulierten Produktion von 50 Einheiten beruhen, müssten weltweit betrachtet insgesamt 250.000 bis 1 Mio. Einheiten bis zum Erlangung der Wirtschaftlichkeit im stationären Bereich erreicht werden. Sofern die praxistaugliche technische Leistungsfähigkeit von Seriengeräten erreicht ist, könnten diese Volumina bis 2010 erreicht sein.

Sofern man für den mobilen Bereich etwas höhere Lernraten als im stationären Bereich unterstellt, würden wettbewerbsfähige Kosten bei Stückzahlen von bis zu 2,5 Mio. erreicht werden. Es gibt derzeit keine begründeten Hinweise dafür, dass dies nicht ebenfalls bis zum Jahr 2010 erreichbar sein sollte.

Tabelle 1: Fertigungsvolumen von Brennstoffzellen zur Erreichung von Kostenzielen

	stationäre Anwendung		mobile Anwendung	
Lernfaktor	0,7	0,8	0,65	0,7
Produktionsausweitung	5.000	20.000	10.000	50.000
Kumulierte Produktion	250.000	1 Mio.	500.000	2,5 Mio.

Quelle: Eigene Modellrechnungen

10. Investitionsstrategien und politische Regulierungseingriffe

Die erfolgreiche Markteinführung von Brennstoffzellen-Systemen – und ein rasches Erreichen der vorgenannten Stückzahlen – hängt nicht zuletzt vom richtigen *Timing* der Investitionen ab. Diese Frage ist derzeit Gegenstand mehrerer Forschungsprojekte des Fachgebiets Energiesysteme der TU Berlin und kann hier noch nicht substantiell beantwortet werden.

Das Problem stellt sich wie folgt dar: Für den mobilen Bereich müssen sich mehrere Akteursgruppen mit strukturell asymmetrischen Interessen und Abhängigkeiten koordinieren:

- Fahrzeugindustrie (inkl. Zulieferer)
- Mineralölwirtschaft
- Betreiber von Tankstellen
- andere Energiebranchen (z.B. Gasversorger, Stromwirtschaft)
- Staat und Öffentlichkeit

Zu den Koordinierungsaufgaben gehören Startzeitpunkte sowie zeitliche Optimierung der Investitionskorridore unter Beachtung von Anlaufverlusten wegen anfänglicher Kapazitätsunterauslastungen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Investitionen auf einen Verdrängungswettbewerb auf einem (in absehbarer Zeit) stagnierenden Markt hinauslaufen.

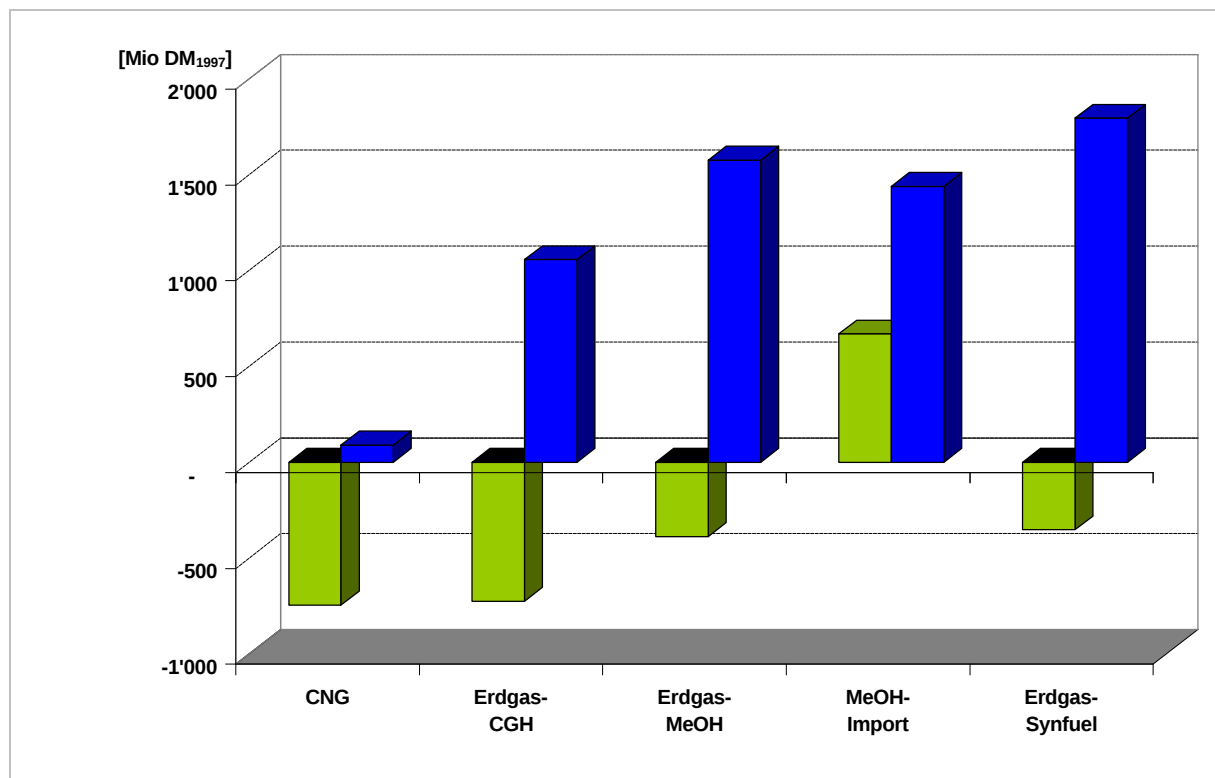
Um zu einem koordinierten Handeln im Sinne einer Brennstoffzellen-Strategie zu gelangen, muss die (implizite) Verteilung von Risiken und Chancen für jede Gruppe akzeptabel sein. Nur bei einer Strategie, die bei *allen* Akteursgruppen einen langfristig positiven Saldo aus Risiken und Chancen bedeutet, lässt sich ein Konsens herbeiführen. Gesucht, aber noch nicht gefun-

den, sind Möglichkeiten und Konzepte, um hier zu einer realisierbaren Lösung zu gelangen.

Vermutlich werden – insbesondere im mobilen Bereich – die Markteinführungshemmnisse nicht zu überwinden sein, sofern nicht parallel zu den privatwirtschaftlichen Initiativen und Projekten öffentliche Entscheidungsträger auf nationaler und internationaler Ebene aktiv werden. Die strategischen Ansatzpunkte für eine zielkonforme Technologiepolitik – darum geht es in der Einführungsphase von Brennstoffzellen-Anwendungen – können hier nicht im Detail besprochen werden (vgl. aber Erdmann, Nill, Zundel 2000).

Doch gibt es Anzeichen dafür, dass die Markteinführung stationärer und mobiler Brennstoffzellen-Anwendungen durchaus im öffentlichen Interesse ist. Hier ist nicht nur an die Nachhaltigkeit der Energieversorgung zu denken – Brennstoffzellen können im Prinzip flexibel von konventionellen oder auch regenerativen Energieträgern versorgt werden. Auch aus wirtschaftlicher Sicht sind Vorteile in Bezug auf Wertschöpfung, Arbeitsplätze und Fiskaleinnahmen zu erkennen.

Für die Deutschen öffentlichen Haushalte (Bund, Länder, Gemeinden, Sozialversicherungen) zeigt Abb. 6 die Verhältnisse unter den Prämissen der Modellrechnung für das Jahr 2010 (vgl. Abb. 3 und 4): Bei weitgehendem Verzicht auf die Mineralöl-Besteuerung der neuen Kraftstoffe ist *per saldo* mit deutlichen Haushaltsentlastungen zu rechnen. Auslöser sind die mit der Brennstoffzellen-Technologie sowie den damit verbundenen Infrastruktur-Investitionen ausgelösten Wertschöpfungs-, Arbeitsplatz- und Konsumeffekte, die auf höhere Steuer- und Sozialabgaben hinauslaufen und die Mineralölsteuer-Minder-einnahmen mehr als nur kompensieren.

Abb. 6: Netto-Auswirkungen alternativer Fahrzeugantriebe auf die öffentlichen Haushalte in Deutschland in 2010

Legende: Schwarze Balken: Steuermehreinnahmen durch alternative Fahrzeugantriebe
 Graue Balken: Veränderung der Mineralölsteuereinnahmen.

Anm.: Zu den Annahmen der Berechnungen siehe Text.

CGH: komprimierter Wasserstoff; CNG: komprimiertes Erdgas; MeOH: Methanol

Quelle: Nach Erdmann / Moos / Storchmann 2000

Referenzen

Bokemper, S. (2001) Marktpotential von Brennstoffzellen zur Hausenergieversorgung im liberalisierten Energiemarkt in Deutschland. Dissertation. TU Berlin

Erdmann, G. (2000) Marktpotential der Brennstoffzellentechnik für die Wärmeversorgung in Deutschland. In: Forschungszentrum Jülich (Hrsg.) *Brennstoffzellentechnik und -anwendung im Kraft-/Wärmemarkt*. Jülich

Erdmann, G. / Grahl, M. (2000) *Competitiveness and Economic Impacts of Fuel Cell Electric Vehicles on Future German Markets*. Proceedings der Internationalen Tagung „Hyforum 2000“. 11.–15. September 2000. München

Erdmann, G. / Moos, W. / Storchmann, K.H. (1999) Volkswirtschaftliche Auswirkungen einer flächendeckenden Einführung neuer Kraft-

stoffe in Deutschland. Potsdam (unveröffentlicht)

Erdmann, G. / Nill, J. / Zundel, S. (2000) Innovationen, Zeit und Nachhaltigkeit. Zeitstrategien ökologischer Regulation. Projektantrag beim BMBF. Berlin

Grahl, M. (2000) Ökonomische Systemanalyse zum Antrieb von Personenwagen mit Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen unter Verwendung neuer Kraftstoffe. Dissertation. TU Berlin

Wallentowitz, H. / Biermann, J. / Gossen, F. / Erdmann, G. / Grahl, M. (2000). *Vergleichende Systemanalyse der mobilen Anwendung von Brennstoffzellen*. Berlin und Aachen: RWTH Aachen; TU Berlin

3.

STROM UND WÄRME AUS DER HEIZUNG: DAS VAILLANT BRENNSTOFFZELLEN-HEIZGERÄT

Thomas **Behringer**, Joh. Vaillant GmbH & Co., Remscheid

Ausgangssituation

Weltweit wird die Lösung der Fragen nach der

- Sicherung der Energieversorgung für künftige Generationen,
- Konversion fossiler Energieerzeugungsanlagen in regenerative,
- Reduzierung des Primärenergiebedarfs,
- Erhöhung der Effektivität bei Transport und Umwandlung von Energie,
- Reduzierung von Klimagasen, insbesondere Kohlendioxid in der Atmosphäre zur Vermeidung einer globalen Klimakatastrophe,

immer dringlicher. Von der praktischen Lösung dieses Globalproblems hängt die Zukunft weiterer Teile der Menschheit ab. Über 50% der Endenergie wird in privaten Haushalten verbraucht, davon etwa 60% für die Raumheizung und Warmwasser. Es ist deshalb folgerichtig, hier zuerst den Hebel anzusetzen.

Vaillant als namhafter Hersteller von Heiztechnik stellt sich dieser Herausforderung. Seit zwei Jahren arbeitet *Vaillant* an der Integration der Brennstoffzellentechnik in häusliche Heizsysteme zur simultanen Produktion von Strom und Wärme.

These 1:

Dezentrale Wärme- und Stromversorgung mit Brennstoffzellen vermeidet die hohen Verluste konventioneller Kraftwerke

Heutige Großkraftwerke produzieren zu günstigen Kosten Strom für Industrie und Haushalte und bilden das Rückrat einer sicheren Energieversorgung. Allerdings verursacht die Stromverteilung – weltweit betrachtet – Verluste bis zu 7%. Die Nutzung der Kraftwerksabwärme – immerhin zwischen 50% bis 70% der Primärenergie – ist eng mit der Frage nach den jahreszeitlichen Lastgängen und der Standortfrage verknüpft und ist insbesondere bei siedlungs-

fernen Standorten selten wirtschaftlich zu realisieren. Um eine wirtschaftliche Wärmeverteilung zu realisieren und Verteilungsverluste zu minimieren, sollte die Endenergie möglichst dort erzeugt werden, wo sie auch verbraucht wird.

Einen Zwischenschritt auf diesem Weg stellen Blockheizkraftwerke mittlerer Leistung (BHKW's) dar, erste Prototypen werden bereits mit Brennstoffzellen ausgerüstet. BHKW's erfordern zur Wärmeauskopplung aufwendige Nahwärmenetze und sind auf spezifische Marktnischen beschränkt wie Neubaugebiete, Großgebäude mit gekoppelter Klimatechnik als Wärmesenke im Sommer oder beispielsweise Kliniken.

Das *Vaillant* Brennstoffzellen-Heizgerät (BZH) geht einen entscheidenden Schritt weiter und erzeugt unmittelbar in den Gebäuden Strom und Wärme im Koppelprozess und ist damit für nahezu jedes Gebäude mit Gasversorgung geeignet.

Die Brennstoffzelle kann – integriert in ein BZH – den Löwenanteil des Wärme- und Strombedarfes eines Objektes decken. Den Wärmemehrbedarf an besonders kalten Tagen deckt ein integrierter konventioneller Brenner.

Bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 35%–40% und einem Gesamtwirkungsgrad von über 80% kann mit der BZH Kraft-Wärme-Kopplung in nahezu idealer Weise in Einzelobjekten realisiert werden. Wärme-Verteilungsverluste sind vermieden, Strom-Verteilungsverluste weitgehend reduziert.

Da es aufgrund des üblicherweise stark schwankenden, in den Kurzzeitspitzen sehr hohen Strombedarfes und der zumindest in den ersten Jahren zu erwartenden hohen Kosten eines Brennstoffzellensystems wenig Sinn macht, die Zellen an der Bedarfsspitze auszulegen oder aufwendige Batteriespeicher zu installieren, ist der Betrieb parallel zum bestehenden Stromnetz die wirtschaftlichste Alternative.

These 2:

Die Brennstoffzelle ist Kern einer neuen Technologie zur Nutzung von Erdgas

Das Funktionsprinzip der Brennstoffzelle ist relativ einfach: Es handelt sich um einen elektrochemischen Prozess, der der umgekehrten Elektrolyse entspricht und – vereinfacht ausgedrückt – Wasserstoff und Sauerstoff – getrennt durch eine für positiv geladene Wasserstoffprotonen durchlässige Wand (den Elektrolyten) – kontrolliert reagieren lässt. An der Anode bewirken katalytische Oberflächen eine Herauslösung von Elektronen aus den Wasserstoffmolekülen. Die Elektronen gelangen über einen Stromleiter zur anderen Seite und ionisieren dort unter Einfluss katalytischer Schichten die Sauerstoffmoleküle. Die ionisierten Sauerstoffatome reagieren anschließend mit den Wasserstoffprotonen zu reinem Wasser.

Die Elektronenbewegung kann als elektrischer Gleichstrom nutzbar gemacht werden. Zusätzlich entsteht aus der Reaktion Wärme, die zu Heizzwecken genutzt werden kann.

Die von *Vaillant* favorisierten Niedertemperatur-Brennstoffzellen eignen sich sehr gut für die mobile Anwendung, aber auch für den Bereich der Strom- und Wärmeversorgung im Wohn- und Gewerbebereich. Der aussichtsreichste Kandidat ist hier die PEM-Brennstoffzelle. Ihr Elektrolyt besteht aus einer protonenleitenden Kunststoffmembran. Sie kann mit Temperaturen bis 90 Grad Celsius betrieben werden und bietet damit die Möglichkeit zum Einsatz preiswerter Werkstoffe bei einem für die Anwendung im Haushalt ausreichendem Temperaturniveau. Eine noch fertig zu entwickelnde Komponente ist die hier notwendige Gasaufbereitung. PEM-Zellen benötigen ein sehr reines, CO-freies Wasserstoffgas, welches in einem vorgeschalteten Reformers aus Erdgas erzeugt werden muss.

These 3:

***Vaillant* wird mit starken Partnern die technologische Herausforderung der Entwicklung von Brennstoffzellenheizgeräten meistern**

Gemeinsam mit dem Brennstoffzellenentwickler *Plug Power* (USA) entwickelt *Vaillant* ein Brennstoffzellen-Heizgerät für den europäischen Markt. In den USA wurde die Entwicklung von praktisch einsetzbaren Brennstoffzellen-Kom-

ponenten besonders konsequent vorangetrieben. Unter anderem sind *an Plug Power* die global agierende Firma *General Electric Power Systems*, der Gasversorger *Southern California Gas Co.* (eine Tochter des größten US-Gasversorgers *SEMPRA*), sowie der Stromversorger *DTE Energy Co.* beteiligt, ein sicheres Zeichen, dass sowohl die amerikanische Versorgungsindustrie als auch die Ausrüster die Zeichen der Zeit erkannt haben.

Plug Power war das erste Unternehmen weltweit, das erfolgreich im praktischen Einsatz die Brennstoffzelle zur Versorgung eines Einfamilienhauses demonstrieren konnte. Die Anlage steht in Latham, New York, und ist bis dato in Betrieb. Die Ergebnisse dieser Tests zeigen, dass bereits heute im Kurzzeitbetrieb die prinzipielle Machbarkeit dieser Konzeption nachweisbar ist, allerdings sind diese Systeme von der Marktreife noch Jahre entfernt.

Das mit *Vaillant* entwickelte Europa-BZH setzt konsequent auf Abwärmenutzung und hohen Wirkungsgrad. Anders als bei manchem US-System ist die Abwärmeauskopplung integrierter Bestandteil des Systems. Die hydraulische Ankopplung an alle heute üblichen Systeme ist Voraussetzung und wird sowohl den Neubau wie auch die Ersatzinvestition abdecken.

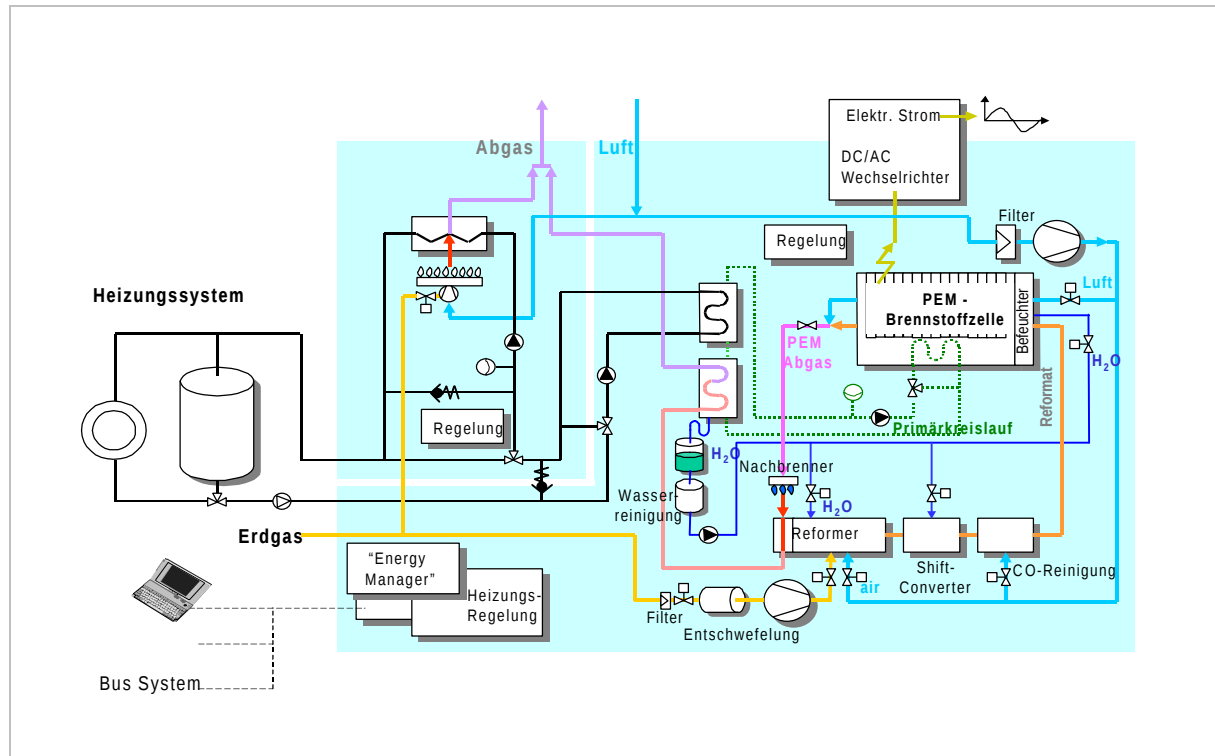
Vaillant hat sich im Rahmen einer Entwicklungspartnerschaft mit der Firma *Plug Power*, USA, für den Einsatz der PEM-Zelle entschieden. Auf Basis einer zweijährigen Evaluierung musste *Vaillant* feststellen, dass in Europa kein Brennstoffzellen-Entwickler in der Lage oder bereit war, im Rahmen eines stringent durchgezogenen Projekts ein Submodul (bestehend aus Brennstoffzelle, Gasaufbereitung, Wasseraufbereitung und zugehörige Elektronik) zu entwickeln und für die Massenproduktion marktreif zu machen. Die Marktstrategie von *Plug Power* hingegen ist massiv unterstützt von der amerikanischen Versorgungs- und Geräteindustrie und entspricht optimal den Zielsetzungen von *Vaillant*.

Aktuelles Ziel der Entwicklungspartner *Vaillant* und *Plug Power* ist es, die bisher bekannten Komponenten

- für den langjährigen Dauerbetrieb weiter zu entwickeln und in ein integriertes System einzubinden,

- mit wirtschaftlichen Produktionsverfahren herzustellen, und
- an die europäischen Rahmenbedingungen wie Gasqualität, Netzanbindung und hydraulische Heizsysteme anzupassen.

Abb. 1: Prozessflussdiagramm des Vaillant Brennstoffzellen-Heizgerätes



Bei Vaillant und Plug Power arbeiten zwei Entwicklungsteams Hand in Hand mit den gleichen Entwicklungstools. Anhand eines digitalen Modells (CAD, Prozess-Simulation) werden alle wesentlichen Fragestellungen weitgehend theoretisch abgeklärt und in einer möglichst späten Phase in *Hardware* umgesetzt. Parallel zum Digitalmodell werden potentielle Komponenten isoliert getestet und auf Verschleiß, Korrosion, Wirkungsgraddegression usw. untersucht. Laufend im Prozess findet ein intensiver Austausch der Ergebnisse statt. Der Entwicklungsprozess kann hiermit erheblich verkürzt und in Hinsicht auf Qualität bedeutend verbessert werden.

These 4:

Wettbewerbsfähige Kosten werden stationäre Brennstoffzellen-Anlagen weit eher erreichen als Brennstoffzellen-Automobilantriebe

Neben der technischen Realisierung stellt die Erreichung niedriger Kosten für ein solches System die größte Herausforderung dar. Massen-

produktion ist hier eine entscheidende Voraussetzung für niedrige Herstellungskosten bei hoher Qualität. Daher spricht einiges dafür, für die Energieversorgung auf das gleiche Brennstoffzellenprinzip zu bauen, das auch die Automobilindustrie mit ihren immensen Stückzahlen einsetzen will. Die spezifischen Kosten für ein BZ-KWK-System liegen z.Z. um die 100.000 DM/kW. Mit steigenden Stückzahlen können diese Kosten stark gesenkt werden. Nach Henderson reduzieren sich die Kosten eines Massenprodukts im Bereich zwischen 15% und 25% bei jeder Verdoppelung der hergestellten Menge. In unserem Beispiel ist die wettbewerbsfähige Wirtschaftlichkeitsgrenze bei etwa 3000 DM/kW erreicht, was einer kumulierten Produktionsmenge von etwa 100.000 Einheiten entspricht. Im Vergleich dazu müssen sich Brennstoffzellen für Automobilantriebe mit Werten von ca. 100 DM/kW für Verbrennungsmotoren messen.

Tabelle 1: Staatliche Förderung für stationäre Brennstoffzellensysteme

Förderung für		Status quo, Zeitraum
1. Stufe	Forschung & Entwicklung	Weitgehend abgeschlossen, 90er Jahre
2. Stufe	Demonstrationsvorhaben „Aus dem Labor in die Praxis“	Z.Zt. in Planung bzw. in Vorbereitung; EU-Förderung: 35 % Zuschuss für 50 Geräte im Demoprojekt, 2000 – 2004
3. Stufe	Markteinstieg, Pilot-Serienfertigung: 100.000 Kellerprogramm, direkte Förderung Markteinstieg bei hohen Kosten, z. T. unklare Installationsbedingungen und hohem Trainingsaufwand	Z.Zt. Wunsch an die Politik für 2004 bis 2008
4. Stufe	Markttöffnung, Investoren	Z.Zt. Forderung an die Politik „Gesicherte Rahmenbedingungen“; ab 2008 auf Zeit

Diese 100.000 Einheiten müssen aber vorher zu höheren als den im Markt als wirtschaftlich akzeptierten Preisen abgesetzt werden. Ein finanzieller Kraftakt, der von einem Mittelständler wie *Vaillant* nur unter Aufbieten aller Kräfte geschultert werden kann und zudem einiger direkter und indirekter, jedoch zeitlich begrenzter, politischer Hilfen bedarf:

Vaillant und seine Projektpartner sind sich allerdings sicher, dass sich diese Investitionen langfristig um ein Mehrfaches bezahlt machen werden durch neue Arbeitsplätze und Sicherung der heutigen Lebensqualität.

These 5:

Das Brennstoffzellenheizgerät lässt sich ideal an die Verbrauchssituation und Betriebsweise im Haus anpassen

Ein deutscher 3-Personenhaushalt verbraucht im Jahr durchschnittlich 3.500 kWh und hat damit eine Durchschnittsdauerleistung von nur 0,4 kW. Im Tagesgang sind 36-Sekunden-Spitzen bis 3 kW und Nachtverbräuche um 0,1 kW normal. Im Mehrfamilienhaus gleichen sich die Spitzen bereits deutlich aus und liegen im Mehrfamilienhaus mit 10 Parteien (10-MFH) bei 10 kW, der Nachtverbrauch unter 0,4 kW.

Abb. 2 macht ebenfalls deutlich, dass der individuelle Stromverbrauch im Haushalt (schwarze Linie) wesentlich an den Spitzenlasten im Netz (obere dunkelgraue Linie = Netzlast) beteiligt sind. Ebenfalls deutlich wird beim Vergleich des Wärmebedarfs des Objekts (graue Linie), dass dieser mit dem Stromverbrauch (schwarze Li-

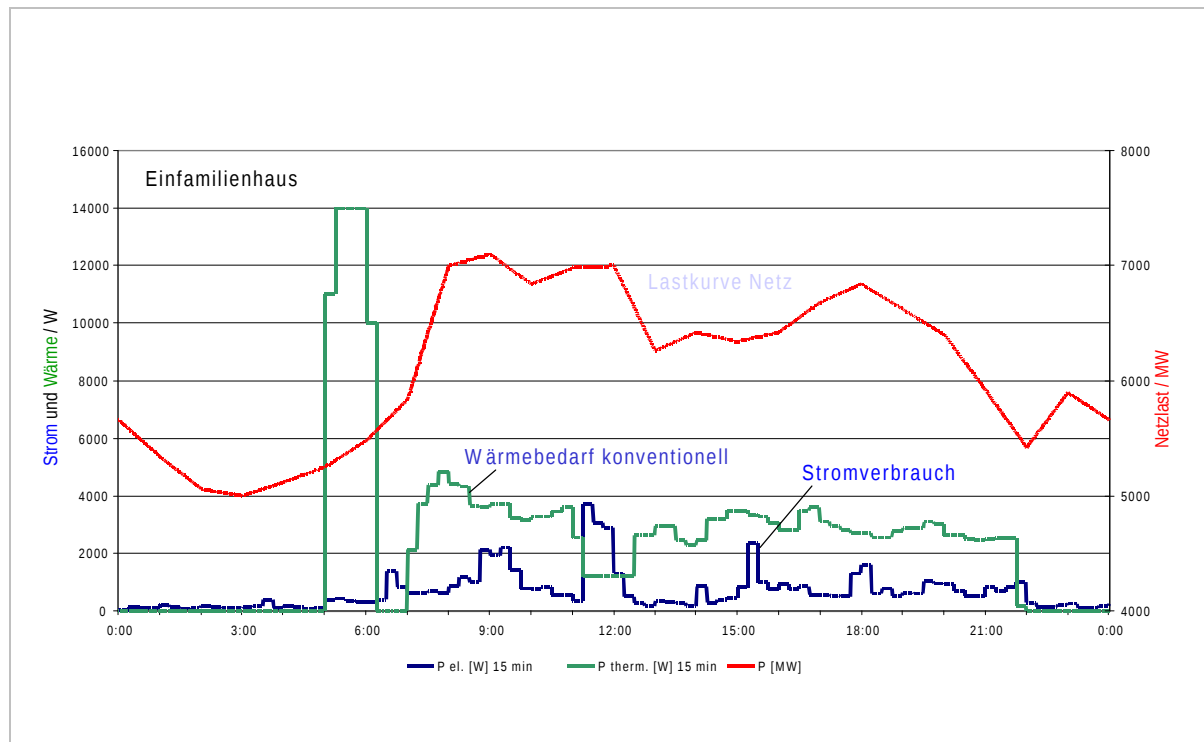
nie) weitgehend übereinstimmt. Im großen und ganzen stimmen in Wohnobjekten der Wärme- und Strombedarf über den Tagesgang recht gut überein. Nachts ist der Strombedarf minimal und in der Regel die Heizleistung abgesenkt. In den Morgen- und Abendstunden zeigen dagegen üblicherweise Wärme- und Strombedarf nahezu im Gleichklang Spitzenwerte. Daher ist der wärmegeführte Betrieb (Führungsgröße Wärmebedarf, Folgegröße Stromproduktion) bei vernünftiger Anpassung der elektrischen und thermischen Leistungen an die Bedarfssituation wirtschaftlicher als der stromgeführte Betrieb (Führungsgröße Strombedarf, Folgegröße Heizwärme).

Die Brennstoffzelle des ersten *Vaillant* BZH produziert 4,6 kW Strom und ca. 7 kW Wärme, die im Bereich von 20% bis 100% modulierbar sind. Das integrierte Zusatzheizgerät lässt sich in der Leistung anpassen und bietet zusätzlich bis zu 50 kW modulierbare thermische Leistung. Ein BZH kann somit den Bedarf von zwischen 4 bis 10 Wohneinheiten abdecken.

These 6:

Mit häuslichen Brennstoffzellenheizgeräten lässt sich das „Virtuelle Kraftwerk“ realisieren

Es gibt einige technische und wirtschaftliche Beweggründe, Strom und Wärme direkt beim Verbraucher im wärmegeführten Betrieb zu erzeugen. Verfeinert man die Betriebsweise, indem das BZH zu bestimmten Zeiten, in denen die Netzlast steil ansteigt und der Strombedarf im Netz Spitzen zeigt, auf Volllast schaltet und die

Abb. 2: Netzlast und Strom- und Wärmeverbrauch im Einfamilienhaus bei konventioneller Versorgung

Quelle: Vaillant Forschung und Entwicklung

Maximalmenge an Strom einspeist, kann das BZH aus Sicht der Netzbetreiber teuren Spitzenstrom substituieren, den Lastgang glätten (Peak Shaving) und aus Sicht der Privatbetreiber wertvollen Spitzenstrom produzieren. Die parallel überproduzierte Wärme geht in einen Wärmespeicher. Es liegt auf der Hand, dass diese Hybrid-Fahrweise besonders wirtschaftlich ist und gegenüber voll regenerativen Stromerzeugern wie Wind oder Photovoltaik, bei denen die Stromproduktion von den Wetterbedingungen abhängt, einen deutlichen Fortschritt darstellen.

Doch sollte man sich hüten, die Systemgrenzen zu eng um ein Wohnobjekt zu ziehen. Bildet man aus einer Vielzahl BZHs, die über eine Kommunikations-Schnittstelle direkt in das zentrale Lastmanagement integriert sind, eine virtuelle Erzeugungseinheit, kann man dieses wie ein lokales Kraftwerk ansehen – das „Virtuelle Kraftwerk“.

Beispielsweise könnten innerhalb eines Stadtviertels in 1.200 Gebäuden etwa 5,5 MW Leistung installiert werden, um damit ca. 7.000 Kunden zu versorgen. Ein zentrales Netzmanage-

ment-System steuert die BZHs in Spitzenlastzeiten an. Der im BZH integrierte Energiemanager erkennt die lokale Verbrauchssituation, die Kapazität des Wärmespeichers und berechnet daraus die zur Verfügung stehende Spitzenlast. Das Virtuelle Kraftwerk verbindet so die individuelle Verbrauchssituation vieler Wohnobjekte mit dem übergeordneten Lastmanagement des Netzbetreibers und könnte dazu beitragen, die Spitzenbezugskosten spürbar zu reduzieren.

Noch interessanter wird das System, wenn sich künftig die Verbrauchstarife an Angebot und Nachfrage ausrichten und beispielsweise in Spitzenlastzeiten erheblich höhere Strompreise verlangt werden. Der Energiemanager wird dann in Spitzentarifzeiten den Strombedarf im Objekt möglichst vollständig vom BZH decken lassen. Auch hier ergeben sich positive Effekte auf die Netzcharakteristik. Je mehr individuelle Spitzenverbräuche gekappt werden, umso niedriger sind Gradienten und Top-Levels im Netz, desto niedriger sind die zusätzlichen Primärenergieaufwände und umso höher fallen Kostensenkungen aus.

Hier wird deutlich, welche Wichtigkeit die für diese übergeordnete Steuerung des Virtuellen Kraftwerks benötigte Kommunikationsschnittstelle hat. Integriert in das Internet-Protokoll werden die einzelnen BZHs wie Internetseiten angesprochen und gesteuert.

Hinsichtlich der Versorgungssicherheit bietet das Virtuelle Kraftwerk erhebliches Redundanzpotenzial. Es ist unwahrscheinlich, dass gleichzeitig alle Einheiten ausfallen und wie bei Ausfall eines einzelnen Kraftwerksblocks die gesamte Leistung aus der *Stand-by-Reserve* substituiert werden muss. Für ein Gesamtnetz bedeutet dies, dass mit zunehmender Verbreitung dezentraler Einheiten die *Stand-by-Kapazität* reduziert werden kann.

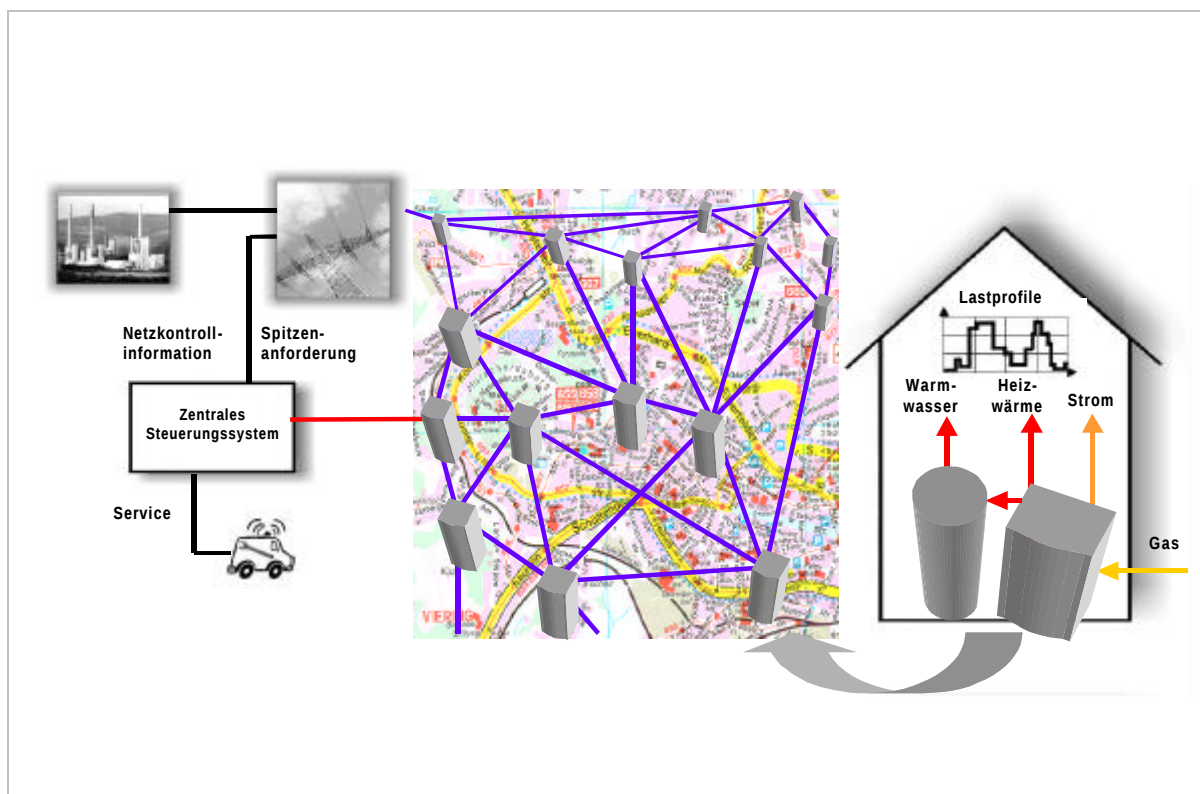
Auch die Netzqualität wird aus heutiger Sicht verbessert. Strom aus BZHs ist aus dem Brennstoffzellen-Gleichstrom generierter sauberer „Synthetischer Strom“. *Vaillant* setzt besonders hochwertige Invertertechnik ein, deren wesentliche Bauelemente seit mehreren Jahren in der

Photovoltaik (PV) eingesetzt werden und hohe Entwicklungsreife zeigen. Aus PV-Projekten (u.a. München-Messe) ist bekannt, dass moderne Inverter auf unerwünschte Netz-Oberwellen ausgleichend wirken und selbst keine nennenswerten Beeinflussungen ausüben. Wie sich der massenhafte Einsatz von BZHs auswirkt, wird *Vaillant* zusammen mit *PreussenElektra* in Simulationen und Labortests prüfen und anschließend in Feldtests mit mehr als 50 parallel eingesetzten BZHs verifizieren.

Nicht zuletzt ist auch die aktive Blindstrombeeinflussung möglich. Der *Vaillant* Inverter lässt bei entsprechendem Ausbau eine 20-prozentige Phasen-Anpassung zu.

In welcher Höhe hier Einsparungen im Netzbetrieb möglich sind, oder wie diese Leistungen des Virtuellen Kraftwerks zu entgelten sind, werden künftige theoretische und praktische Untersuchungen in Zusammenarbeit mit der Stromwirtschaft zeigen.

Abb. 3: Virtuelles Kraftwerk mit Brennstoffzellen



These 7:**Brennstoffzellenheizgeräte werden sich zum Nukleus eines innovativen Energiedienstleistungsgeschäfts entwickeln**

Bisherige Versorgungsangebote liefern die *Commodities* Strom, Gas und Wasser oder übernehmen bekannte Entsorgungsaufgaben. Weitergehende Konzepte hin zu multifunktionalen Energiedienstleistungen und Home Services werden zwar derzeit diskutiert, sind aber heute Randerscheinungen. Die zunehmende Liberalisierung wird hier allerdings den Markt kräftig in Bewegung bringen. Als Beispiel soll der Telekommunikationsmarkt dienen, der als weitgehend liberalisiert gelten kann und dessen Angebote sich heute im *Cross-Selling-Portfolio* einiger Versorger wiederfinden.

Es ist davon auszugehen, dass auch im Bereich konventioneller Versorgung neue Märkte, neue Produkte und auch neue Marktteilnehmer in Erscheinung treten werden. Neue Dienstleistungen rund um das Stichwort Komfort tragen der Erkenntnis Rechnung, dass ein Großteil der Verbraucher von Strom und Wärme sich nicht länger im Detail um die Technik kümmern möchte. Der Markt ist reif für *Full-Service*-Angebote, die neben der Energielieferung die kompetente Beratung, Finanzierung, Installation, Betrieb, Wartung, Instandhaltung sowie Abrechnung umfassen. Dies gilt sowohl für gewerbliche Objektbetreiber (Wohnungsbaugesellschaften, Hausverwaltungen, Behörden) wie auch für ein noch unangetastetes Marktpotential an privaten Investoren aus dem Ein- und Mehrfamilienhausbereich. Auch erwähnt sei, dass sich die Altersstruktur der Kunden in den nächsten Jahren massiv verschieben wird: immer mehr Senioren werden verstärkt auf externe Dienstleistungen angewiesen sein.

Bisher fehlte es aber an wirklich attraktiven Gesamtkonzepten. *Contracting*-Projekte sind bis dato planungsintensiv, häufig komplex und sind in der Regel nur bei größeren Projekten wirtschaftlich.

Anders beim BZH. Das technische Produkt BZH ist Serie, die zugehörigen Dienstleistungen sind inhaltlich standardisierbar. Genau wie bei der heutigen Stromrechnung bezahlt der Kunde mo-

natliche Abschlagszahlungen, erhält dafür aber ein umfangreiches Leistungspaket. Somit könnte sich das BZH zum Nukleus eines innovativen Energiedienstleistungsgeschäfts entwickeln, attraktiv für den Kunden, wirtschaftlich interessant für Energiedienstleister und Fachhandwerker und zudem ökologisch gut vertretbar.

Es bietet sowohl dem Strom- als auch dem Gasversorger – und damit nahezu ideal dem Verbundunternehmen – die Chance, sich vom bloßen *Commodity-Supplier* zum *Full-Service*-Dienstleister zu entwickeln. Für Gasversorger bietet sich zusätzlich die Möglichkeit der Erhöhung des Gasabsatzes, was insbesondere in Neubaugebieten bei sinkenden spezifischen Energieverbräuchen zur Verbesserung der Netzprofitabilität beitragen kann. Aber letztendlich überwiegen die Zusatzerlöse aus kombiniertem Strom- und Wärmeverkauf und Dienstleistungen die konventionellen Erlöse aus dem *Commodity*-Geschäft bei weitem. Nach internen Berechnungen liegen mögliche Verbesserungen des Deckungsbeitrags gegenüber dem konventionellen Absatz von Strom und Gas zwischen 15% und 30%. Welche Branche bietet ähnliche Wachstumspotentiale bei sinkenden Verkaufspreisen und massiv härter werdendem Wettbewerb?

Ein weiterer Vorteil ist die hohe erreichbare Kundenbindung. Wer ein ökologisch akzeptiertes BZH im Keller stehen hat und bei seinen monatlichen Energiekosten sparen kann, wird wenig Anlass haben, kurzfristig andere *Provider* zu suchen.

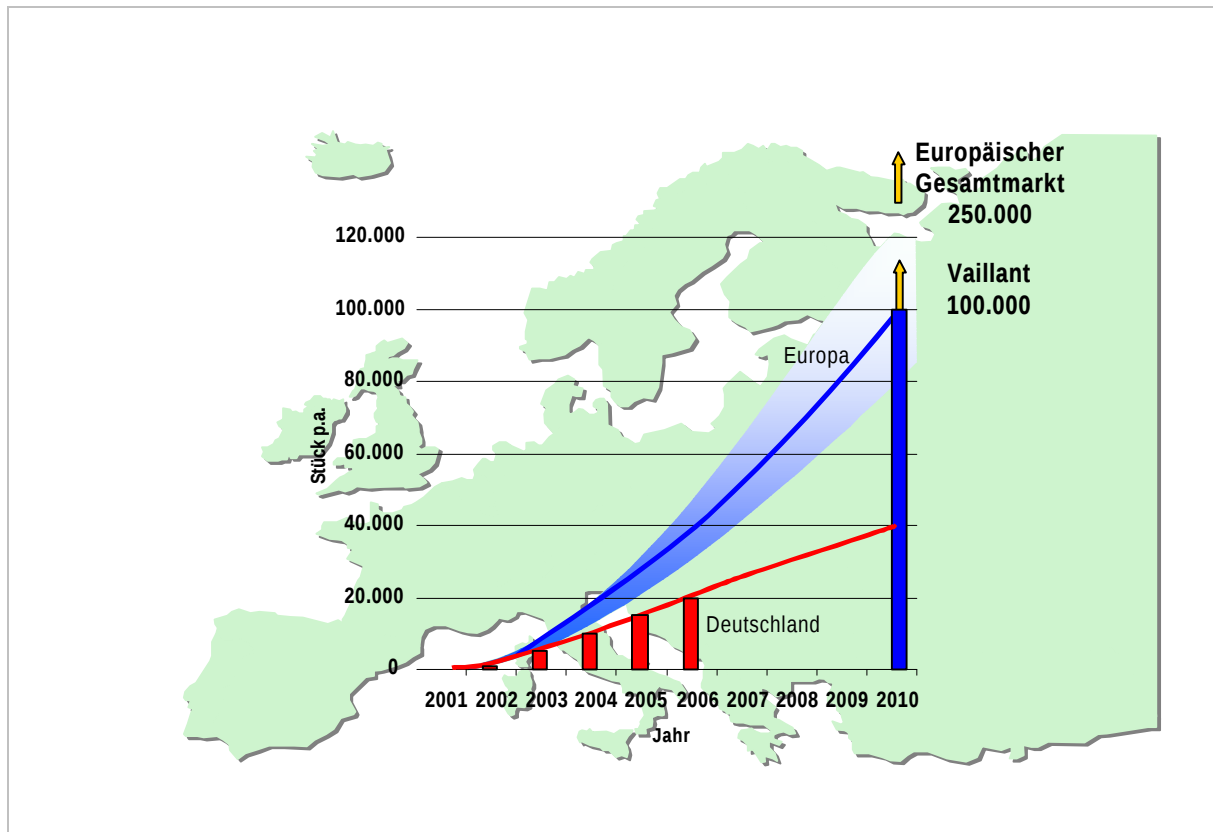
Dem progressiven Fachhandwerk bieten sich ebenfalls interessante Möglichkeiten: Zum einen kann es ebenso als Energie-Dienstleister auftreten und das komplette Dienstleistungspaket rund um das BZH anbieten. Zum anderen bietet sich ihm der Einstieg in umfangreiche technische Dienstleistungen, unter anderem Inspektion und Wartung. Auch die Versorgungsindustrie wird auf kompetente Vertragspartner angewiesen sein und wird künftig dem Fachhandwerk attraktive neue Geschäftsfelder anbieten. Wer hier bereit ist, sich weiter zu qualifizieren, neue Wege zu beschreiten und sich noch stärker am Endkunden auszurichten (z.B. mit 24-h-Störungsservice), könnte in Zukunft die Nase vorn behalten.

Abb. 4: Energiedienstleistungen rund um das Brennstoffzellen-Heizgerät



Zusammengefasst bietet das Dienstleistungsangebot rund um das BZH für alle Beteiligten Vorteile: Komfort und geringere Energiekosten für den Endnutzer, verbesserte Deckungsbeiträge und erhöhte Kundenbindung für Versorger und Fachhandwerk, und letzterem zusätzlich neue profitable Geschäftsfelder.

Die Auswirkungen dieser neuen Dienstleistungsprodukte im Energiemarkt werden beträchtlich sein. Es ist mit großer Sicherheit davon auszugehen, dass ein marktfähiges und professionell in den Markt eingeführtes BZH Arbeitsplätze in der Energie- und Heizungsbranche sichern und zahlreiche neue entstehen lassen wird.

Abb. 5: Marktpotenzial für Brennstoffzellen-Heizgeräte

Quelle: Vaillant

These 8: Brennstoffzellenheizgeräte bieten herausragende ökologische Vorteile

Wenn die ehrgeizigen Einsparversprechen der europäischen Regierungen eingehalten werden sollten, muss massiv in innovative CO₂-reduzierende Technik investiert werden. Vaillant BZH nutzen den sauberen kohlenstoffarmen Energieträger Erdgas und die anfallende Wärme und reduzieren den CO₂-Ausstoß eines Gebäudes im Vergleich zur konventionellen Versorgung aus dem öffentlichen Stromnetz und einem Nieder temperatur-Heizkessel um bis zu 50%.

Simulationsrechnungen für ein Mehrfamilienhaus, basierend auf gemessenen Lastgangkurven für Strom und Wärme, ergaben eine Reduzierung um 47%. Das hängt im wesentlichen damit zusammen, dass zum einen die bei der Stromproduktion anfallende Abwärme nahezu vollständig genutzt wird und zusätzliche Primärenergie substituiert, zum anderen das koh-

lenstoffarme Erdgas anderen fossilen Energieträgern, wie Kohle und Öl, hinsichtlich seiner spezifischen CO₂-Rate weit überlegen ist. Auch andere Luftschadstoffe, wie z.B. NO_x liegen weit unter denen heute verfügbarer KWK-Anlagen.

These 9: Mit dem Brennstoffzellenheizgerät gelingt der Einstieg in die regenerative Wasserstoff-Energiewirtschaft

Der sicherlich noch weit in der Zukunft liegende Ansatz, Wasserstoff per Elektrolyse unter Einsatz von regenerativer Technik aus Photovoltaik, Wind- und Wasserkraft zu erzeugen und unter Verzicht auf den Reformer direkt der Brennstoffzelle zuzuführen, ist es wert, ebenfalls mit Nachdruck verfolgt zu werden. Damit wäre eine fast ideale, emissionsfreie und jederzeit verfügbare Versorgung zu erreichen. Doch das ist noch Zukunftsmusik.

Heute verfügen wir über eine fast flächendeckende Infrastruktur für Erdgas, dem Energieträger mit den günstigsten CO₂-Faktoren. Ziel muss es also sein, neben dem Ausbau der regenerativen Systeme, den auch weiterhin notwendigen Bedarf an fossiler Energie mit solchen Systemen zu decken, die im höchsten Maße umweltfreundlich und sparsam mit diesem wertvollen Rohstoff umgehen, der bei Fortschreibung des bisherigen Verbrauchs nur etwa 120 Jahre verfügbar sein wird.

Schon in naher Zukunft könnten Brennstoffzellen-Heizgeräte hierzu einen wichtigen Beitrag liefern und eine Brücke bauen zur voll-regenerativen Energieversorgung der fernen Zukunft. Eine Zukunft, die unseren heute geborenen Kindern eine ebenso gute Lebensqualität bieten kann, die wir heute für uns noch als selbstverständlich erachten.

4.

BRENNSTOFFZELLE UND MOBILITÄT

WELCHE VERKEHRSWIRTSCHAFTLICHE ENERGIE-STRATEGIE

Gerhard **Isenberg**, DaimlerChrysler AG, Ulm

Die Energie- und Umwelt-/CO₂-Entwicklung der nahen Zukunft lässt einen stark wachsenden Energiebedarf, vor allem im Transportwesen erwarten. Insbesondere der Straßen- und Lufttransport von Personen und Gütern wird zunehmen. Der Kraftstoffbedarf hierfür wird überwiegend durch Nutzung von Öl gedeckt.

Mobilität zeichnet sich durch zum Teil gegensätzliche Eigenschaften aus:

- Mobilität ist Grundbedürfnis des Menschen
- Mobilität ist Schlüsselfaktor der wirtschaftlichen Entwicklung
- Mobilität ist Ursache von Umweltbelastungen (u.a. Emissionen, Ressourcen- und Flächenverbrauch)

Die zukünftige Kraftstoffversorgung lässt Instabilitäten in ökologischer, ökonomischer und politischer Hinsicht erwarten (u.a. OPEC-Situation, verstärkte Nutzung von Ölsanden/-teeren). Trotzdem wird Öl Rückgrat der Kraftstoffversorgung bleiben.

Während es in den Industriestaaten gelungen ist, in nahezu allen übrigen Energieverbrauchssektoren, die Energieverbrauchs- und Emissionstrends umzukehren, weist der Verkehrsbereich Wachstumsraten auf.

Dem Verkehr kommt eine Schlüsselrolle in der Diskussion um den anthropogenen Treibhauseffekt zu. Die Klimadiskussion wird daher im Verkehr an Dringlichkeit zunehmen, der politische Druck bezüglich Verbrauchs- und Emissionsreduktion wird wachsen. Wesentliche Beweggründe sind:

- Verbesserung der Luftqualität (Reduktion der Schadstoffe)
- Einschränkung der globalen Erwärmung (Reduktion der CO₂-Emissionen)
- Lockerung der Öl-Abhängigkeit

Als Lösungswege kommen insbesondere in Frage:

- Effizienzsteigerung des Antriebs:
Verbesserung konventioneller Antriebe (z.B. Direkteinspritzung, Hybride, Leichtbau) und Entwicklung neuer Antriebskonzepte (z.B. Elektroantrieb mit Brennstoffzellen, s.u.);
- Markteinführung CO₂-freier bzw. -armer Kraftstoffe, langfristig Einführung regenerativ erzeugter Kraftstoffe.

Kurz- und mittelfristig muss der Schwerpunkt auf der Verbesserung konventioneller Antriebe liegen. Neue Antriebskonzepte, z.B. auf Basis von Brennstoffzellen werden erst nach 2010 signifikante Beiträge leisten.

Das *DaimlerChrysler*-Brennstoffzellen-Programm wurde 1994 mit Nekar1 (Druckwasserstoffversorgung) begonnen. Jüngste Fahrzeuge sind u.a. Nekar5 (Kompaktwagen der A-Klasse mit on-board-Methanol-Reformierung) und ein *Go-Cart* (Forschungsfahrzeug mit Direkt-Methanol-Brennstoffzelle / DMFC), die im November 2000 vorgestellt wurden.

Erprobungsprogramme werden z.Zt. in Kalifornien, 2001 in Japan, 2002/3 in Europa (u.a. 30 H₂-betriebene Busse) durchgeführt.

Es werden dabei 2 Kraftstoffpfade verfolgt:

- Wasserstoff vor allem für zentral versorgte Fahrzeuge
- Methanol (unter Atmosphärenbedingungen flüssiger Energieträger mit hohem Wasserstoffanteil) für flächendeckende Versorgung

Mittel- und langfristig müssen innovative Kraftstoffe auf Erdgasbasis und aus regenerativen Energiequellen eingeführt werden, um

- die Versorgungsbasis zu erweitern und die Abhängigkeit vom Öl zu lockern, und

- die verkehrsrelevanten Emissionen durch CO₂-arme / -freie Kraftstoffe zu reduzieren.

Die Industrieinitiative „VES“ (Verkehrswirtschaftliche Energieträger) verfolgt das Ziel, im Rahmen eines Konsensprozesses ein bis max. zwei alternative Kraftstoffe auszuwählen und deren Markteinführung vorzubereiten. Unterschiedliche alternative Kraftstoffe wurden bzgl. technischem Stand der Erzeugung, Nutzungsgrad, Kosten, CO₂-Emission und Versorgungspotential analysiert und bewertet. Wasserstoff, Methanol und Erdgas wurden vorausgewählt, z.Zt. werden gasförmiger und flüssiger Wasserstoff detailliert untersucht.

5.

INDUSTRIELLE KERNKOMPETENZEN UND BESCHÄFTIGUNG:

BRAUCHEN WIR DIE BRENNSTOFFZELLE FÜR DIE WETTBEWERBSFÄHIGKEIT DES INDUSTRIESTANDORTS DEUTSCHLAND?¹

Jürgen **Wengel**, Elna **Schirrmeister**, Frank **Marscheider-Weidemann**
Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe

1. Einleitung

In der Innovationsforschung ist unumstritten, dass Innovationsprozesse in der Regel nicht linear ablaufen, sondern vielfältigen Rückkopplungsschleifen unterliegen. Es gibt parallel verlaufende Entwicklungsbahnen und auch Sackgassen.

Die Brennstoffzellenentwicklung ist dafür ein typisches Beispiel. Vor über 150 Jahren entwickelt, fand die Brennstoffzelle in den 60er und 70er Jahren Anwendung in der Militär- und Raumfahrttechnik. Erst nachdem die Automobilindustrie sich in den 90er Jahren massiv engagiert hat, eröffnen sich breitere kommerzielle Einsatzmöglichkeiten. Systeme der stationären, dezentralen Energieversorgung scheinen im Moment die ersten Produkte zu sein, die im Alltag mit Brennstoffzellen funktionieren werden.

Die Breite der Anwendungsbereiche, die Vielfalt der relevanten Technologien, das notwendige Zusammenspiel von Infrastrukturinnovationen und regulativen Rahmenbedingungen sowie ihre Brückenfunktion für eine zukünftige Energiewirtschaft machen die Brennstoffzelle zu einer Systeminnovation.

Ausgehend von den Leitfragen:

- Ist die Brennstoffzelle eine zukünftige Querschnittstechnologie für den Industriestandort Deutschland?
- Ist eine „Industriepolitik“ für die Brennstoffzelle gerechtfertigt?
- Wie könnte eine Politik für die Brennstoffzelle aussehen und wo sollte sie ansetzen?

werden im Folgenden unter Rückgriff auf aktuelle Forschungsprojekte des Fraunhofer ISI die Bedeutung der Brennstoffzellentechnologie und die deutsche Position im internationalen Wettbewerb, mögliche Auswirkungen auf Industriestruktur und Beschäftigung sowie Potentiale Deutschlands als Vorreitermarkt für Brennstoffzellenanwendungen diskutiert und innovationspolitische Optionen aufgezeigt.

2. Die Bedeutung der Brennstoffzellentechnologie und die Position der Bundesrepublik

Die potentielle zukünftige Bedeutung der Brennstoffzelle lässt sich am Besten anhand der oftmals beschriebenen Zukunftsbilder für die unterschiedlichen Anwendungen veranschaulichen. Für den Verkehrssektor beinhalten diese Bilder eine Betankungsinfrastruktur für Wasserstoff, die sowohl von PKW als auch von Bussen für den Betrieb von Brennstoffzellen genutzt wird. Für den stationären Bereich stellt man sich Brennstoffzellen im Keller der Einfamilienhäuser vor, die nicht nur die Bewohner mit Strom und Wärme versorgen, sondern gemeinsam ein virtuelles Kraftwerk bilden, das verlässlich das Stromnetz speist. Auch bei den portablen Anwendungen verspricht man sich durch eine größere Energiedichte im Vergleich zu Batterien große Vorteile.

Die Frage, ob dies alles kommen wird und an welcher Stelle Deutschland im Technologiewettbewerb um die Brennstoffzelle steht, soll anhand von einigen Indizien auf der Basis von aktuellen Studien des Fraunhofer ISI untersucht werden.

¹ Das Thesenpapier wurde von Jürgen Wengel präsentiert.

Die Delphi-Experten¹, 1997 an Hand von 9 Thesen zur Brennstoffzelle befragt, vermuteten den breiten Einsatz in der Energieversorgung und auf der Straße ungefähr im Jahr 2015. Dabei billigten sie dieser Technologie sowohl hohe Bedeutung für die wirtschaftliche Entwicklung als auch in Bezug auf die Lösung von Umweltproblemen zu (Abb. 1). Und sie sahen Deutschland gemeinsam mit den Vereinigten Staaten und – etwas weniger häufig – Japan bei Forschung und Entwicklung in Führung (Abb. 2).

Die optimistischen Ansichten der Delphi-Experten über die FuE-Position Deutschlands werden etwas relativiert, wenn man auf die Zahl der Brennstoffzellenentwickler in verschiedenen Ländern und auf die Patentanmeldungen schaut (Abb. 3 u. 4). Die Brennstoffzellenentwickler wurden von *Fuel Cell 2000* erfasst, ein öffentlicher, amerikanischer Informationsdienst zum Thema Brennstoffzelle. Auch wenn Lücken in der Erfassung eher nicht in den USA, sondern vielmehr in anderen Ländern zu vermuten sind (und dies belegen die Fehlposten bei den aufgelisteten deutschen Einrichtungen), dürfte die Grundaussage, dass die Mehrzahl der Entwickler in den USA einen Standort hat, richtig sein. Insbesondere gibt es in Deutschland bisher kein Unternehmen, das Brennstoffzellen-Stacks in größeren Stückzahlen produziert.

Die Patentaktivitäten zur Brennstoffzelle (Patentklasse B01M-0081C beim Europäischen Patentamt) in den letzten Jahren weisen ebenfalls Japan, USA und Deutschland als die Hauptakteure bei der Brennstoffzellenentwicklung aus, wobei die Anzahl der Patentanmeldungen insbesondere in den USA in den letzten Jahren stärker gestiegen ist.

Nun speist sich Innovationserfolg nicht nur aus Stärken in Forschung und Entwicklung, sondern er braucht auch eine ökonomische Basis. In den Untersuchungen zur technologischen Leistungsfähigkeit Deutschlands wird dies auf-

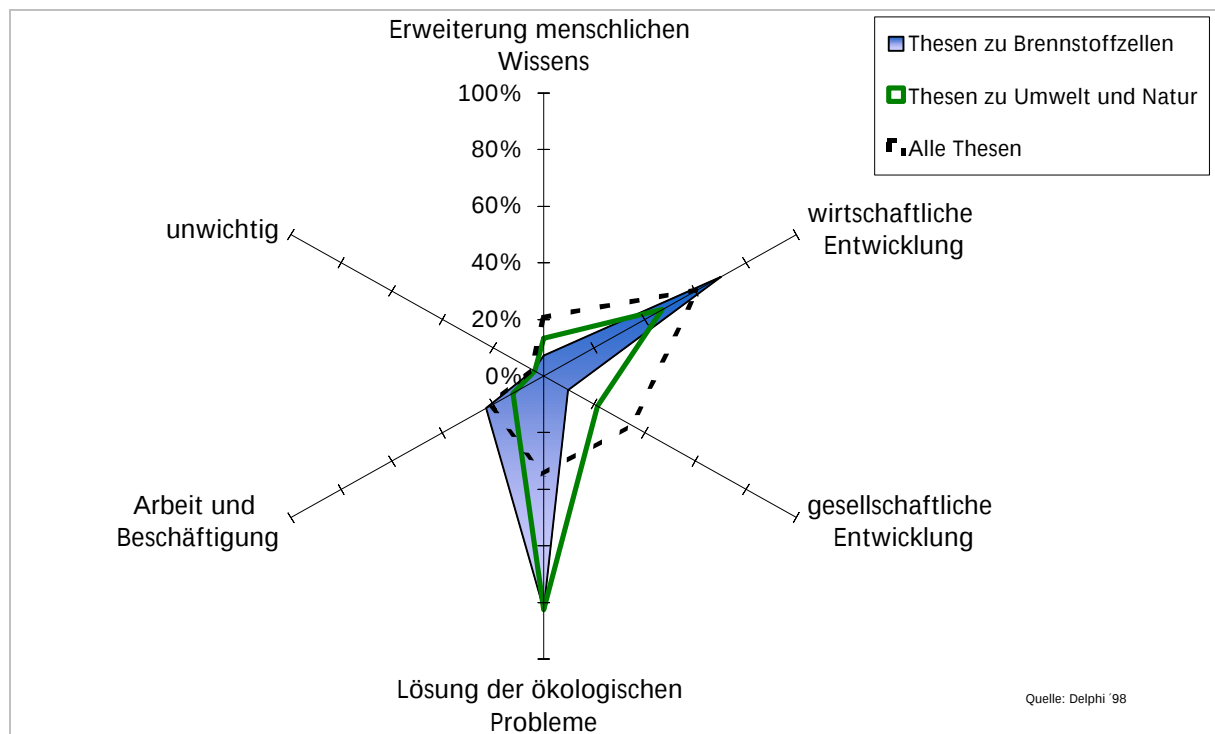
gegriffen². Verortet man die Brennstoffzelle an Hand für sie wichtiger Basistechnologien, Trägerindustrien der Entwicklung und potentieller Anwendungsbereiche im deutschen Technologie- und Handelsportfolio (Abb. 5), so wird deutlich, in wie weit die Brennstoffzelle zu den bundesdeutschen Stärken passt und welche Risiken für wichtige Marktbereiche entstehen, wenn es Wettbewerbern gelänge, über die Brennstoffzellentechnologie in diesen Märkten verstärkt Fuß zu fassen.

Überdurchschnittliche Patentaktivitäten (RPA) in den Technologiefeldern bzw. Produktgruppen, die als Grundlagen und Treiber für die Entwicklung von Brennstoffzellensystemen angesehen werden können, signalisieren Technologiekompetenz. Überdurchschnittliche Außenhandelsüberschüsse (RCA) verweisen auf ökonomische Stärken und Absatzmöglichkeiten, namentlich natürlich besonders im mobilen Bereich mit einem Außenhandelsvolumen von über 150 Mrd. DM. Bei Technologiefeldern mit unterdurchschnittlichen Export-/Import-Relationen kann die Brennstoffzellentechnologie als eine Chance gesehen werden, um die Außenhandelsposition zu verbessern.

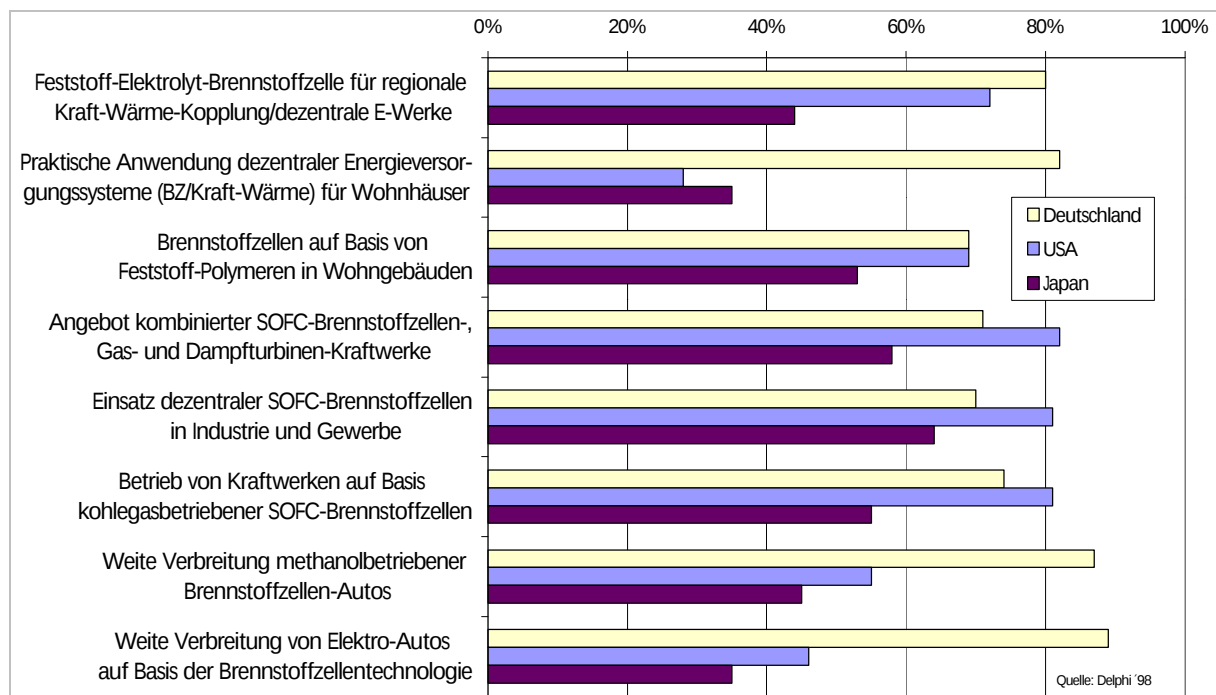
Fazit: Die Bundesrepublik teilt sich bei Forschung und Entwicklung die Spitzenposition mit den USA und Japan. Die Brennstoffzelle passt sowohl von den Anwendungsfeldern als auch von den notwendigen Technologiekompetenzen her sehr gut in das technisch-ökonomische Leistungsprofil Deutschlands.

1 Cuhls, K.; Blind, K.; Grupp, H. (Hrsg.): Zukunft nachgefragt – Studie zur globalen Entwicklung von Wissenschaft und Technik. Karlsruhe, 1998.

2 Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung; Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung (Hannover); Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung; Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Wissenschaftsstatistik GmbH im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft: *Zur technologischen Leistungsfähigkeit Deutschlands. Zusammenfassender Endbericht 1999*. Bonn, 1999.

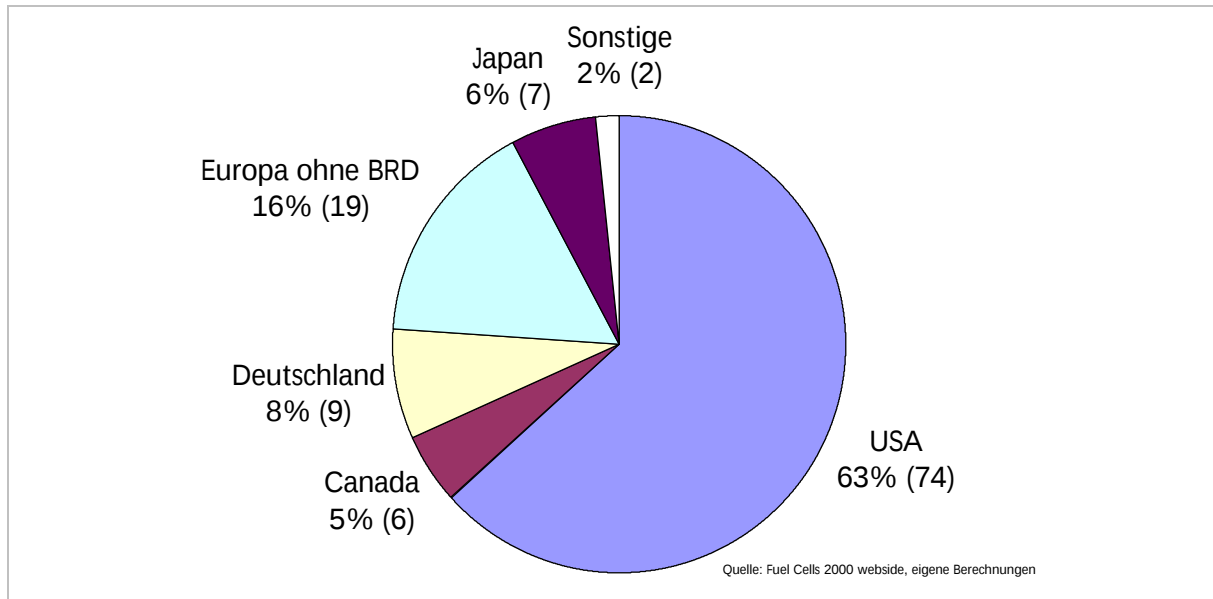
Abbildung 1: Delphi: Bedeutung der Brennstoffzellentechnologie

Quelle: Delphi '98

Abbildung 2: Delphi: FuE-Führung bei der Brennstoffzellentechnologie

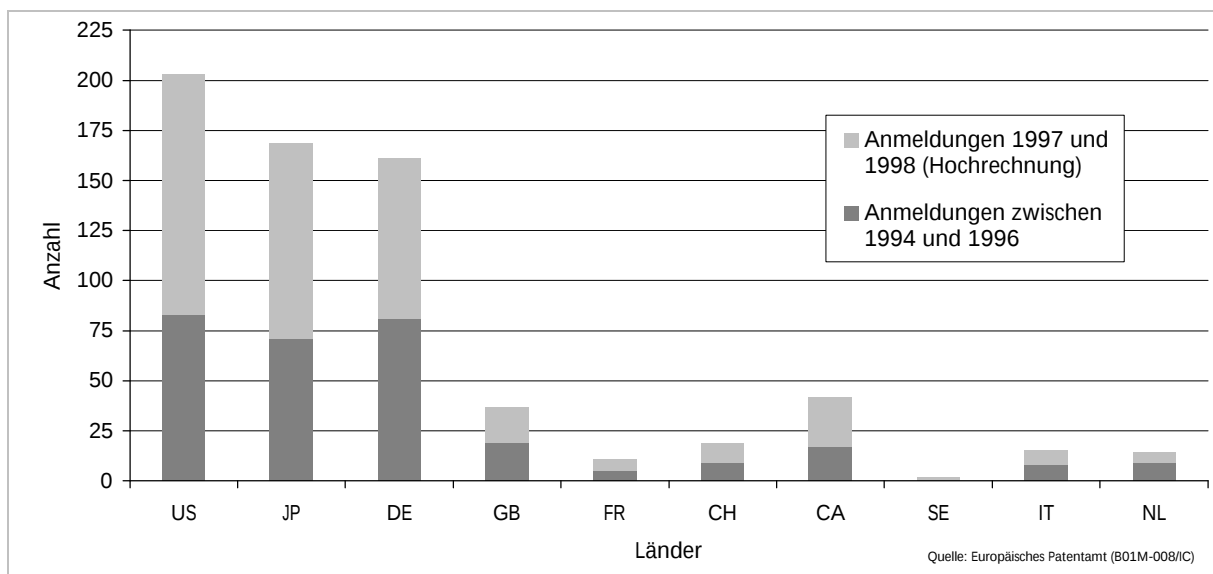
Quelle: Delphi '98

Abbildung 3: Verteilung der Entwickler von Brennstoffzellen auf Länder

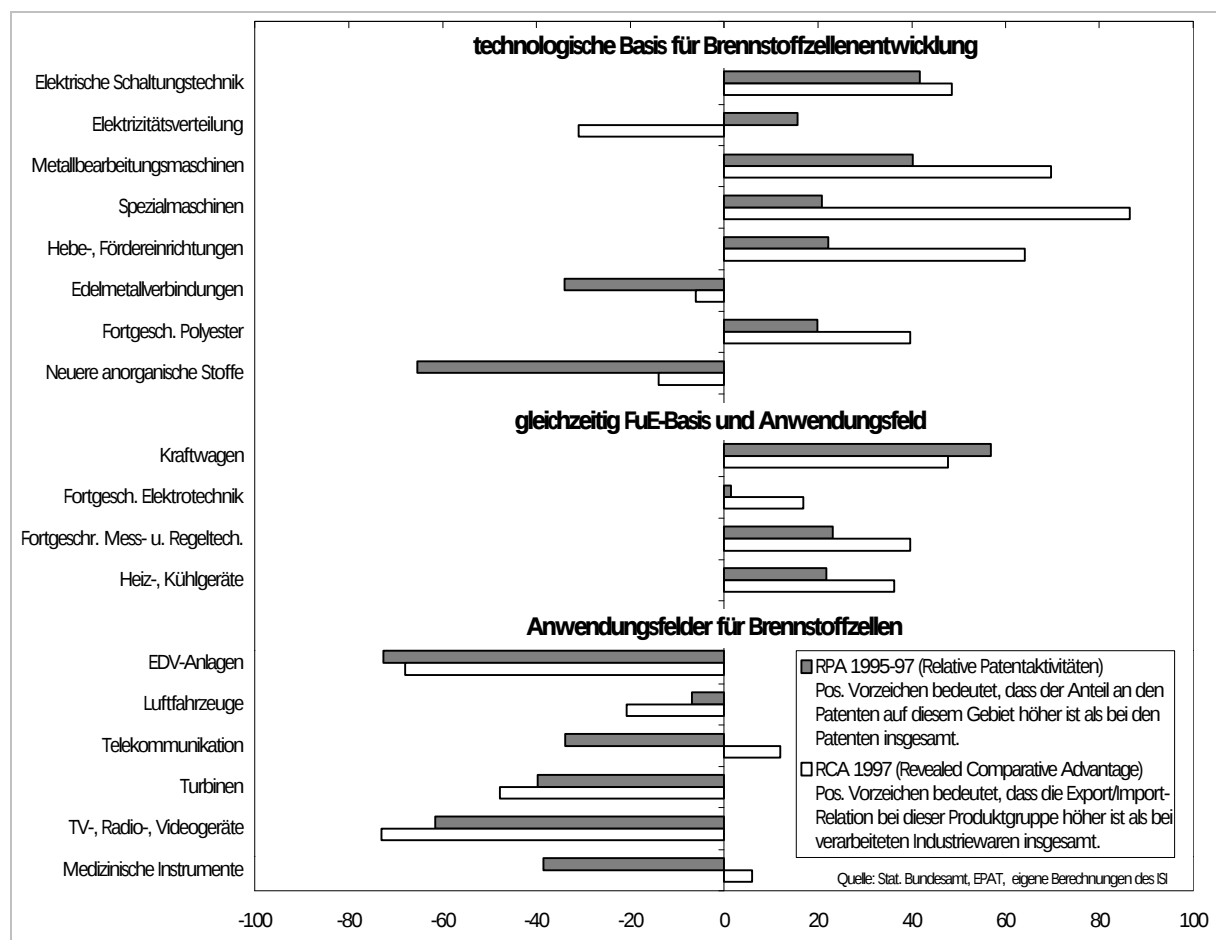


Quelle: FuelCell 2000 Website, eigene Berechnungen

Abbildung 4: Brennstoffzellenpatente 1996–1998 nach Herkunft der Anmelder



Quelle: Europäisches Patentamt (B01M-008/IC)

Abbildung 5: Brennstoffzellenrelevantes Technologie- und Handelsportfolio der Bundesrepublik (1997)

Quelle: Stat. Bundesamt, EPAT, eigene Berechnungen des Fraunhofer ISI

3. Auswirkungen auf Industrie- struktur und Beschäftigung

Basis der folgenden Ausführungen sind die Ergebnisse eines Projekts, das mit Mitteln aus der Zukunftsinitiative „Junge Generation“ in Baden-Württemberg die Auswirkungen einer Ablösung des Verbrennungsmotors im Kraftfahrzeug auf die Industrie dieses Bundeslandes untersuchte¹. Das Forscherteam aus fünf Instituten fragte nach der künftigen Marktdurchdringung, den technologischen Unterschieden sowie sektoralen und regionalen Veränderungen der Zulieferstruktur. Die Analysen stützten sich auf Daten der

Fahrzeuge der A-Klasse, die DaimlerChrysler zur Verfügung gestellt hat.

Auf Komponenten des herkömmlichen Antriebsstrangs, die für den Brennstoffzellen-Antrieb vollständig ersetzt oder angepasst werden müssen, entfallen heute ca. 30 Prozent der Wertschöpfung eines Pkw. Komponenten wie der Verbrennungsmotor, die konventionelle Motorelektronik und Motorelektrik werden substituiert, das Getriebe, die Abgasanlage, das Kühlsystem und die Tankanlage verändert. Die Preise für die neuen Komponenten liegen, nicht zuletzt wegen der kleinen Produktionsserien, derzeit noch um ein Vielfaches über den angestrebten Kosten. Für die Untersuchung der Wertschöpfungsverschiebungen in den Zulieferstrukturen wurde angenommen, dass der Brennstoffzellen-Antriebsstrang, um wettbewerbsfähig zu

1 Wengel, J.; Schirrmeister, E. (Hrsg.): *Innovationsprozess vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle – Chancen und Risiken für die baden-württembergische Industrie*. Karlsruhe, 2000.

sein, maximal das Kostenniveau eines Dieselmotors erreichen darf, also einen Wertschöpfungsanteil von etwa 35 Prozent bei entsprechend erhöhtem Fahrzeugpreis.

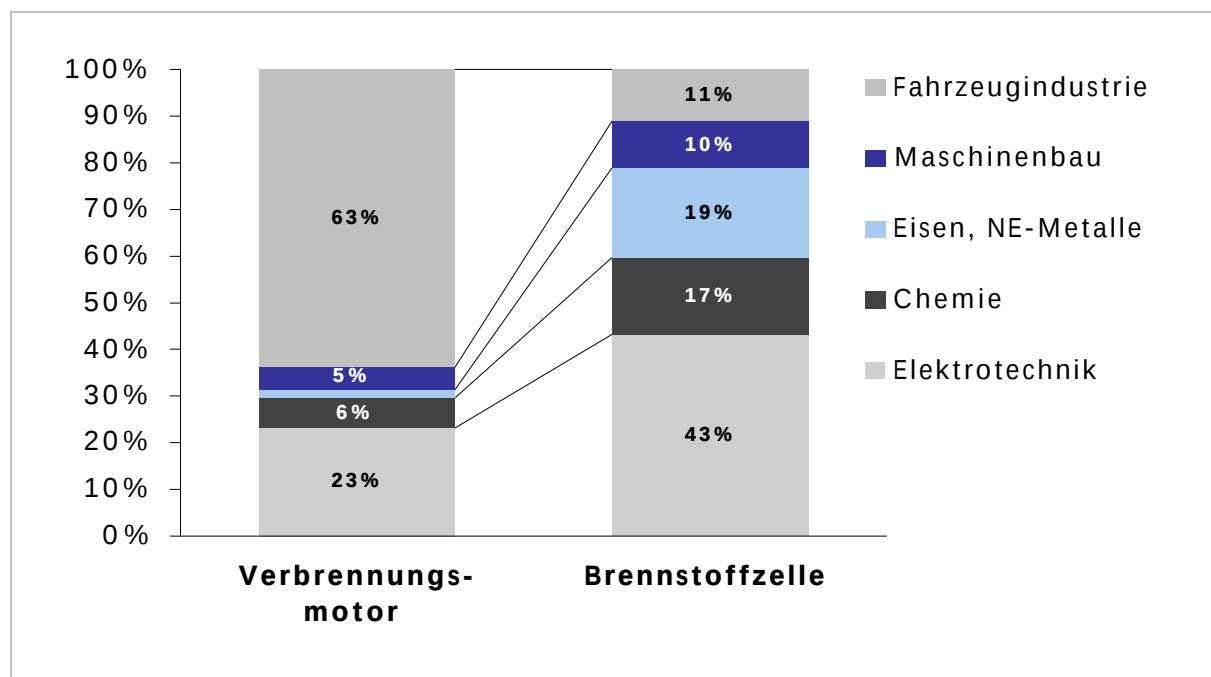
Die Einführung der Brennstoffzelle als Fahrzeugantrieb wird – wenn sie auch langsam vonstatten geht – erheblichen Einfluss auf die Zuliefer- und Ausrüsterindustrie haben. Tendenziell verschiebt sich der Bedarf von mechanischen Teilen wie Kurbelwellen, Zylinder oder Kolben hin zu prozess- und elektrotechnischen Komponenten wie Elektromotoren oder Aggregaten zur Gaserzeugung.

Die Veränderungen der Komponenten wirken sich auch auf die eingesetzten Fertigungsverfahren und damit auf die Ausrüsterindustrie aus. Insbesondere Fertigungsverfahren, die auf Grund der hohen Belastungen durch Tempera-

tur und Rotation im Verbrennungsmotor erforderlich sind (z.B. die Gesenkschmiede-, die Schleif- und Hon-Technologie), werden zur Herstellung eines Brennstoffzellenantriebsstrangs in geringerem Umfang benötigt. Andere gewinnen an Bedeutung. Stanz- und Prägetechnologien könnten beispielsweise bei der Herstellung der Stacks für die Brennstoffzelle und der Aggregate zur Gasaufbereitung genutzt werden.

Entscheidend wird sein, in welchem Umfang die Automobilindustrie von den *Outsourcing*-Potenzialen des Technologiewechsels Gebrauch macht und inwieweit sie dabei auf Kfz-Zulieferspezialisten oder auf spezielles Technologie-*Know-how* setzt. Abbildung 6 zeigt die potentiellen Verschiebungen in einer groben Differenzierung nach Branchen, würden die Automobilhersteller tatsächlich weitgehend auf eine Eigenfertigung verzichten.

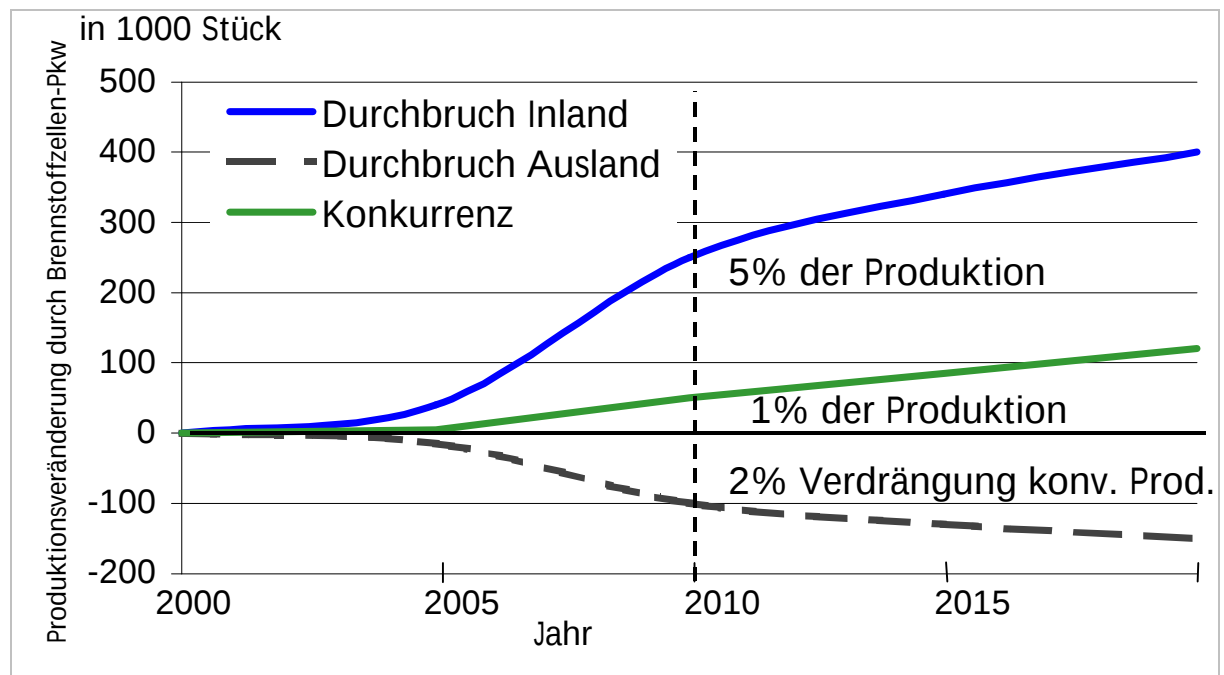
Abbildung 6: Veränderung der erforderlichen Fertigungskompetenzen für den Antriebsstrang



Quelle: Fraunhofer ISI

Neben den Systemkosten, der technologischen Entwicklungen der Brennstoffzelle und konkurrierender Technologien wie dem Wasserstoff-Verbrennungsmotor oder weiter verbesserten Diesel- und Ottomotoren wirken gesellschaftliche Rahmenbedingungen entscheidend auf den Innovationsprozess zur mobilen Brennstoffzelle

ein: die Umweltpolitik für Ballungszentren, die Entwicklung der Energiepreise, die Akzeptanz durch die Kunden und die Tankstellen-Infrastruktur. Die Entwicklung dieser Einflussfaktoren kann nicht eindeutig vorausgesagt werden. Daher zeigt die Studie drei Szenarien auf (s.a. Abb. 7):

Abbildung 7: Entwicklungspfade der Produktion von Pkw mit Brennstoffzellenantrieb

Quelle: Fraunhofer ISI

Ein optimistisches Szenario „Durchbruch Inland“ unterstellt entscheidende technische Fortschritte und positive Rahmenbedingungen für die Einführung der mobilen Brennstoffzelle, so dass die Serienfertigung in Deutschland im Jahre 2010 auf ca. 250.000 Brennstoffzellen-Pkws pro Jahr ansteigen könnte.

Ein alternatives Szenario „Durchbruch Ausland“ geht von günstigen Produktionsbedingungen im Ausland aus, so dass dort die erste Serienfertigung entstünde und damit Fahrzeuge aus deutscher Produktion verdrängt würden.

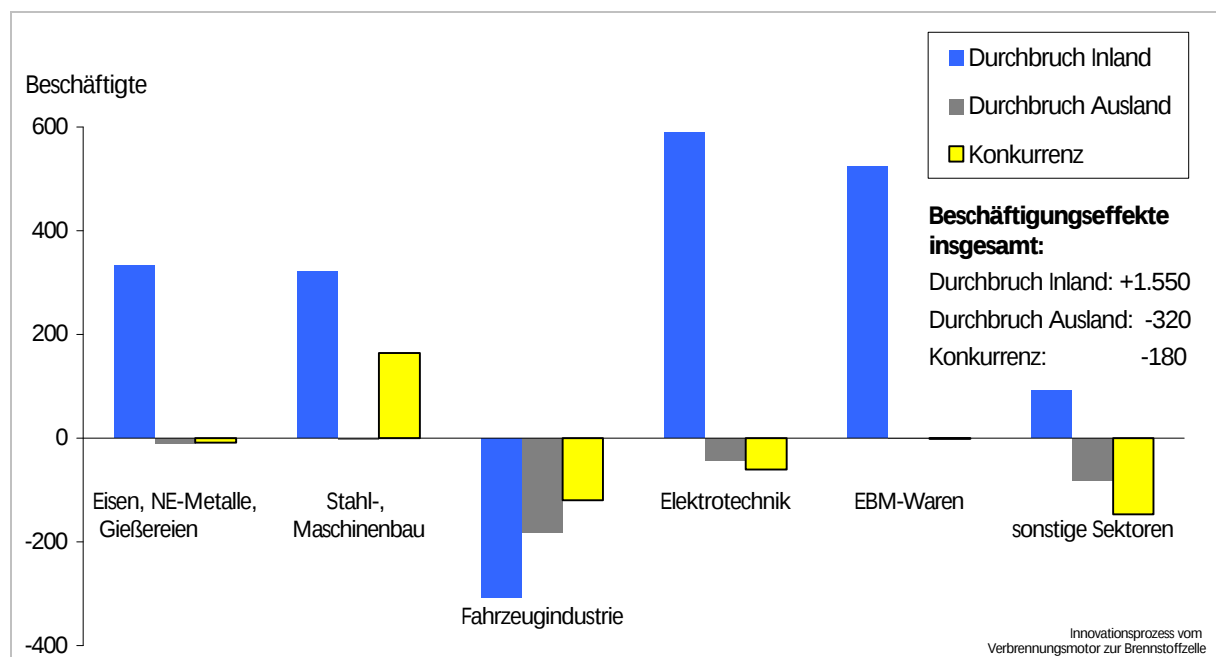
Ein drittes Szenarium „Konkurrenz“ sieht die Brennstoffzellen-Technologie vorerst auf Marktnischen oder Flottenfahrzeuge begrenzt. Die Produktion der meisten Komponenten würde zur Erzielung wirtschaftlicher Seriengrößen weltweit im Ausland gebündelt. In Deutschland würden in ca. 50.000 Fahrzeugen Brennstoffzellenantriebe eingebaut.

Da kein plötzlicher Umbruch zur Brennstoffzelle zu erwarten ist, weisen alle Szenarien einen langsam steigenden Anteil von Brennstoffzellenfahrzeugen an der Automobilproduktion aus. Dementsprechend sind auch die Auswirkungen auf die Beschäftigung insgesamt nicht spektakulär. Die Input-Output-Analyse für Baden-

Württemberg und das Jahr 2010 bezogen auf den Antriebsstrang, also ohne Berücksichtigung der anderen Wertschöpfungsanteile am Pkw auf Grund eventueller Marktanteilsgewinne oder -verluste, weist lediglich Unterschiede von einigen hundert Beschäftigten auf (Abb. 8). Die Tendenzen der Beschäftigungsentwicklung sind jedoch deutlich zu erkennen. Nur ein Durchbruch (zumindest auch) im Inland bedeutet einen langfristig positiven Trend. Auch das Konkurrenzszenario könnte den Einstieg in stetige Beschäftigungsverluste bedeuten. Zudem sollte der qualitative Aspekt möglicher Verschiebungen in den Qualifikationsanforderungen nicht unterschätzt werden.

Fazit: Die Brennstoffzelle kommt langsam und nicht gewaltig. Dementsprechend sind die Auswirkungen auch zunächst nicht dramatisch. Vielmehr werden sich die Strukturen schleichend anpassen, unter anderem abhängig von der Ausnutzung der Outsourcing-Spielräume durch die großen Automobilhersteller. Die quantitativen Beschäftigungswirkungen insgesamt sind stark unterschiedlich, je nach Szenario. Die Bundesrepublik könnte von einer Führungsrolle erheblich profitieren. Qualitative Veränderungen der Anforderungen an die Qualifikationen der Beschäftigten in der Industrie wie im Hand-

Abbildung 8: Beschäftigungseffekte in Baden-Württemberg
(nur Antriebsstrang)



Quelle: Fraunhofer ISI

werk von der mechanischen Bearbeitung zu elektrotechnisch-chemischen Kompetenzen sind offensichtlich, bisher aber nicht detailliert untersucht worden.

4. Innovationspolitische Optionen: Die Systeminnovation Brennstoffzelle und Deutschland/Europa als Leadmarkt

Das Anwendungsspektrum der Brennstoffzelle reicht von sehr geringen Leistungen im portablen Bereich über die mobile Anwendung im Automobil bis hin zu Kraftwärmanlagen mit sehr großen Leistungen. Auf Grund dieser breiten Einsatzmöglichkeiten und dem hohen Wirkungsgrad verbinden sich mit der Brennstoffzellentechnologie sowohl ökonomische als auch ökologische Chancen. Die Brennstoffzellentechnologie stellt damit eine Option für eine neue Energiewirtschaft dar. Dezentrale Lösungen eröffnen dabei Optionen für kombinierte, beschäftigungsintensive Produkt-/Dienstleistungsangebote.

Bevor es zu einer grundlegenden Umstrukturierung der Industrie kommt, muss jedoch noch

eine Vielzahl technologischer Probleme in unterschiedlichen Disziplinen gelöst werden. Und schließlich müssten die Weichen für eine Anpassung der Infrastruktur gestellt werden. Die Überwindung dieser Herausforderungen kann durch ein kreatives, strategisches Innovationsmanagement in den Unternehmen und eine ganzheitliche Innovationspolitik unterstützt werden.

Für die Gestaltung von innovations- und technologiepolitischen Maßnahmen zur Förderung der Brennstoffzelle kann das Konzept der *Leadmärkte* einen guten Hintergrund bieten. Dieses Konzept geht von der Annahme aus, dass Vorreitermärkte, bei denen neue Technologien besonders frühzeitig zum Einsatz kommen, einen großen Einfluss auf die Ansiedlung von Forschungs- und Produktionsstätten haben. Da solche *Leadmärkte* für Standortentscheidungen von Unternehmen, insbesondere für ihre Innovationsaktivitäten, von großer Bedeutung¹ sind, ist zu fragen, ob in Deutschland ein *Leadmarkt* für Brennstoffzellen entstehen kann. Tabelle 1 stellt

¹ Gerybadze, A.; Meyer-Krahmer, F.; Reger, G.: Globales Management von Forschung und Innovation. Stuttgart, 1997.

Für und Wider der deutschen Rahmenbedingungen für eine Rolle als *Leadmarkt* in den drei

Anwendungsbereichen mobil, stationär und portabel gegenüber.

Tabelle 1: Deutschland als Leadmarkt für Brennstoffzellen

Anwendung	fördernde Aspekte	Hemmnisse
mobil	• zeitweise Umweltprobleme in Ballungsräumen • innovationsbereite Verbraucher und Hersteller • gute (Anpassungsfähigkeit der) Infrastruktur • hohe Flexibilität/Kompetenz des Kfz-Handwerks • günstige Kfz-Nachfragestruktur (<i>High-end</i>)	• kein unmittelbarer Umweltdruck (positive Umweltwirkung umstritten) • starke Konkurrenztechnologien (z.B. 3l-Auto, Erdgasantrieb) • Marktgröße (kritische Masse nur in Europa erreichbar)
stationär	• Erfahrungen mit breitenwirksamen Fördermaßnahmen (z.B. Einspeisungsvergütungen) • Investitionsbereitschaft der Verbraucher für Umwelt und Werterhalt von Immobilien • gute Hersteller- und Handwerker-Infrastruktur • tendenziell günstiger Kraft-Wärme-Mix • Sanierungsbedarf dezentraler Heizungsanlagen	• liberalisierter Markt: Kraftwerksüberkapazitäten und große Anbieter (kurzfristig hemmend, langfristig evtl. positiv für BZ) • dichtes, stabiles und relativ kostengünstiges Stromnetz
portabel	• strenge Umweltvorschriften (Rücknahmepflicht) • Akku-/Batteriekompetenz (noch) stark	• vergleichsweise geringe Nutzung mobiler Geräte (nicht so Europa insgesamt) • Mehrzahl der Endgeräte nicht in Deutschland/Europa produziert

Fazit: Die Brennstoffzelle sollte als Systeminnovation begriffen werden, auf die man nicht verzichten sollte und die eine ganzheitliche Innovationspolitik erfordert. Das *Leadmarkt*-Konzept bietet dabei einen möglichen Hintergrund für die Politikgestaltung. Nach unseren ersten Einschätzungen kann die Bundesrepublik ein *Leadmarkt* für mobile Anwendungen sein, wobei eventuell eine gemeinsame Betrachtung mehrerer europäischer Länder sinnvoll erscheint. Im stationären Einsatzbereich der Wärme- und Energieversorgung hat die Entwicklung zum *Leadmarkt* möglicherweise sogar schon begonnen. Für portable Geräte erscheint die Bundesrepublik als Pilot- und *Leadmarkt* zumindest auf den ersten Blick weniger geeignet.

5. Schlussbetrachtung

Die am Anfang gestellten Fragen können nun auf Grund der dargestellten Ergebnisse beantwortet werden.

- **Die Brennstoffzelle ist eine Querschnittstechnologie, mehr noch, sie stellt eine Systeminnovation dar.**

Das breite Einsatzfeld der Brennstoffzelle im portablen, mobilen und stationären Bereich und ihre hoch eingeschätzte Bedeutung für die ökonomische und ökologische Entwicklung in Deutschland weisen die Brennstoffzelle als eine zukünftige Querschnittstechnik aus. Auf Grund der notwendigen infrastrukturellen und regula-

tiven Anpassungen und der Funktion der Brennstoffzelle als Brücke zu einer neuen Energiewirtschaft auf der Basis von Wasserstoff hat die Brennstoffzellentechnologie darüber hinaus den Charakter einer Systeminnovation. Nach dem heutigen Stand des Wissens sollten wir diese Systeminnovation wollen.

- **Innovations-, nicht Industriepolitik, für die Brennstoffzelle ist wünschenswert.**

Eine Industriepolitik alter Prägung auf der Basis einer dauerhaft verlorenen Subventionierung ist für die Brennstoffzelle nicht anzustreben. Insbesondere geht es nicht darum, dramatische Strukturveränderungen, mit denen die betroffenen Unternehmen überfordert wären, zu begleiten. Vielmehr ist ein Prozess innovationspolitisch zu fördern, von dem die Bundesrepublik profitieren kann, da Deutschland (noch) zur Spitzengruppe bei der Entwicklung der Brennstoffzelle gehört und die Entstehung eines *Leadmarkts* in Deutschland bzw. Europa möglich erscheint. Die skizzierten Szenarien zeigen, dass bei der Entstehung eines *Leadmarkts* in Deutschland mit positiven Auswirkungen auf die Beschäftigung zu rechnen ist. Um diesen *Leadmarkt* zu fördern, müssen jedoch die Rahmenbedingungen durch staatliche Maßnahmen vorteilhaft gestaltet werden.

Eine Innovationspolitik muss parallel in verschiedenen Politikfeldern ansetzen.

- (Öffentlich geförderte) Forschung und Entwicklung wird noch lange sinnvoll und notwendig sein, dabei sollten „viele Blumen blühen“ dürfen.

- Demonstrations- und Modellvorhaben sind bereits heute in zahlreichen Feldern möglich und zur Sammlung von Anwendungserfahrungen wünschenswert. Dazu könnte auch eine Pilot-Stackfertigung zählen.
- Schon jetzt muss – abgestimmt mit den betroffenen Politikfeldern wie der Umweltpolitik – über den Abbau von regulativen Hemmnissen, Art und Ausmaß positiver Diskriminierung (z.B. Abgabenfreiheit des Brennstoffs) oder auch die Möglichkeit der Organisation öffentlicher Nachfrage (ÖPNV, Bundeswehr) nachgedacht werden, um verlässliche Rahmenbedingungen für private Investitionen zu schaffen.
- Es muss eine langfristige Strategie zur Anpassung der Infrastruktur entwickelt werden, die neben der „*Hardware*“ (Betankung, Gas- und Stromnetz ...) auch die Qualifikationsaspekte berücksichtigt.
- Ohne begleitende strategische Forschung kann eine solche systemische Innovationspolitik nicht erfolgen (Marktentwicklungen, Forschungsrichtungen und Politikstrategien im internationalen Vergleich, ökologische, ökonomische und soziale Auswirkungen, Lernkurven, Organisation und Fundierung von Diskursen wären wichtige Themen.)

Es wäre eine Illusion, ein solches Politikbündel, das auf eine Vielfalt von Akteuren und Arenen angewiesen ist, zentral koordinieren zu wollen. Wichtig ist allerdings ein hohes Maß an Kommunikation und Austausch. Dabei sollte die Brennstoffzelle aber nicht als einzige Option angesehen werden.

TEIL I: FACHGESPRÄCH

B. DISKUSSIONSBEITRÄGE¹

Referenten:

Thomas **Behringer**, Joh. Vaillant GmbH & Co., Remscheid
Georg **Erdmann**, TU Berlin
Gerhard **Isenberg**, DaimlerChrysler AG, Ulm
Ulrich **Stimming**, TU München
Jürgen **Wengel**, Fraunhofer ISI, Karlsruhe

Moderation:

Karl-Heinz **Karisch**, Frankfurter Rundschau

¹ Die Wortbeiträge des Fachgesprächs wurden zum besseren Leseverständnis redaktionell bearbeitet.

Karl-Heinz Karisch, Frankfurter Rundschau:

Wir haben jetzt gehört, dass die Brennstoffzelle ein enormes Potenzial in sich trägt, aber es auch eine Menge offener Fragen gibt. Wird man in absehbarer Zeit die Katalysatormenge so herabsenken können, dass die Brennstoffzelle auch zu verkaufen ist? Welche Bedeutung hat der Streit zwischen *General Motors* und *Daimler-Chrysler* um Methanol vs. Benzin? Einen guten und effektiven Methanolreformer gibt es schon. Die Mineralölindustrie favorisiert jedoch einen Benzinreformer, der aber noch nicht praxisreif ist. Er würde im gesamten Tankstellennetz erhebliche Vereinfachungen mit sich bringen, wäre im Wirkungsgrad aber schlechter.

Oliver Weinhold, Hamburgische Elektrizitätswerke:

Wir als Energieversorger sind auch der Auffassung, dass die Brennstoffzelle eine Zukunft hat. Gerade im liberalisierten Strommarkt wird die Brennstoffzelle meiner Ansicht nach ihre Vorteile ausspielen können: Dezentrale Technologien haben insofern Vorteile als mit Investitionen in neue Kraftwerksanlagen ein hohes Risiko verbunden ist. Was mir aber noch nicht klar ist, betrifft gerade die kleinen Brennstoffzellen: Wer soll die eigentlich kaufen? Wenn wir uns den Markt von kleinen Hausanlagen ansehen, ist das ein sehr konservativer Markt. Bei der Entwicklung von den herkömmlichen Kesseln zum Brennwertkessel, wo der technologische Schritt viel kleiner war, hat es 15 Jahre gedauert, bis die Marktanteile sich halbwegs etabliert hatten. Ich sehe die Lösung eher im sogenannten *Contracting*, d.h. das Energieunternehmen stellt die Brennstoffzelle in den Keller und sorgt auch für alles weitere, bietet also ein „Rundum-Sorglos-Paket“ an. Der Kunde will ja im Prinzip nicht unbedingt eine Brennstoffzelle, sondern er will es warm und hell haben und sein Computer soll laufen. Wie das gewährleistet wird, ist ihm relativ egal. Wir müssen von der Versorgerseite die Initiative ergreifen und dem Kunden etwas anbieten. Wir könnten als Versorger auch den Mehrwert nutzen, indem wir auf der Niederspannungsseite des Netzes Lastmanagement betreiben. Der individuelle Kunde möchte nur, dass das Netz mit relativ hoher Zuverlässigkeit läuft, den Mehrwertnutzen wird er jedoch gar nicht ausschöpfen können. Des-

halb meine ich, dass es in diesem ganz traditionellen Geschäft eine Verschiebung der Marktstrukturen geben wird. Ein bisschen ähnlich ist das bei den Fahrzeugen. Es gibt sicherlich ein paar Technikbegeisterte, die sich ein Brennstoffzellenauto kaufen. Was sollte die breite Masse aber wirklich dazu treiben, ein Brennstoffzellenauto zu kaufen?

Thomas Behringer, Vaillant:

Auf der Grundlage unserer Marktrecherchen und Abschätzungen im technischen Bereich behaupte ich, dass die Brennstoffzelle, wenn sie bis zum Jahre 2010 in den Stückzahlbereich von 100.000 kommt, auch als relativ kleiner Markt – im Gegensatz zu 1 Mio. Kesseln pro Jahr alleine in Deutschland – wirtschaftlich sein wird. Man sollte den vorhin bereits erwähnten „Sowieso-Effekt“ nicht unterschätzen: Wenn sowieso getauscht werden muss, und wir dann zusätzlich im Paket noch einen Stromerzeuger anbieten, lässt sich das auch wirtschaftlich darstellen. Aber auch wenn die Wirtschaftlichkeit nicht gegeben wäre – nehmen wir das Beispiel Solaranlagen: thermische Solarkollektoren, die auf den Dächern installiert sind und im wesentlichen im Sommer Warmwasser produzieren. Keine einzige Solaranlage in Deutschland arbeitet wirtschaftlich, das ist ein Faktum. Und davon verkauft die Branche über 100.000 Stück pro Jahr mit exponentiellem Wachstum.

Oliver Weinhold, Hamburgische Elektrizitätswerke:

Diese Solaranlagen gibt es seit 20 Jahren. Mir geht es aber darum, wie man die Brennstoffzellen schneller in den Markt bekommt, nicht erst in 20 Jahren. Sie wollen selbst früher auf den Markt, und Sie werden wahrscheinlich nicht die Einzigen sein. Außerdem werden sich die Marktstrukturen verändern müssen: so ein hochkomplexes Gerät kann nicht mehr vom Installateur um die Ecke bedient werden.

Thomas Behringer, Vaillant:

Unser Brennstoffzellenheizgerät hat als wichtigsten Punkt im Pflichtenheft stehen, dass es so einfach zu bedienen und zu installieren sein muss wie ein Heizkessel, sonst wird es keiner kaufen und kein Fachhandwerker installieren.

Gerhard Isenberg, DaimlerChrysler:

Bei der Frage, wie wir die Brennstoffzelle dezentral in den Markt bringen können und wer sie kauft, müssen wir meiner Meinung nach umdenken. Ich zum Beispiel, ich habe ein Haus und gar kein Bedürfnis nach einer Brennstoffzelle oder einem Heizkessel. Den muss ich aber heute kaufen. Und jetzt schauen Sie mal in das Pflichten- und Leistungsheft von Ihrem Nachbarn, was die RWE anbietet: Als Dienstleister werden sie versorgen und entsorgen, d.h. ich mache in Zukunft einen Ver- und Entsorgungsvertrag und stelle mein Haus zur Verfügung, bzw. meinen Kellerraum. Die Brennstoffzelle aber, die gehört mir gar nicht. Was soll ich auch damit? Ich will nur, dass meine Bedürfnisse gedeckt werden. Und genau das werden EVU's¹ mit zehntausend, zwanzigtausend und mehr solcher kleinen Kraftwerke tun.

Zum Thema Fahrzeuge: Erstens ist ein Brennstoffzellenfahrzeug ein Elektrofahrzeug mit allen Vorteilen. Zweitens müssen wir kostenmäßig gleichwertig, konkurrenzfähig sein mit dem Verbrennungsmotor: Der Markt ist nicht bereit, auch nur eine müde Mark für umweltfreundliche Technik zu bezahlen. Gemäß einer GfK-Umfrage anlässlich der Automechanika 1998 sind 73% der Befragten bereit, Mehrkosten für den Umweltschutz bis unter DM 250 zu akzeptieren. Für Aluminiumfelgen und Breitwandreifen geht beim Autokauf insofern ein Vielfaches mehr an Geld drauf. Gekauft wird etwas dann, wenn es Vorteile hat. Das Antriebsmodell Brennstoffzelle ist kostenneutral, hat auf der Schadstoffseite Vorteile und auch im Fahrkomfort. Ich glaube, nur so können wir es verkaufen. Und wenn wir das nicht erreichen, wird die Brennstoffzelle sich nicht durchsetzen.

Jörg Hein, RWE:

Herr Dr. Behringer, Sie nannten zwei Förderinstrumente für Brennstoffzellen, die Einspeisevergütung für Brennstoffzellenstrom aus Klein-KWK²-Anlagen und Quoten. Wir halten Quoten auch für das falsche Instrument, um diese Anlagen zu fördern. Insbesondere dann, wenn

sie keine weiteren Qualitätseigenschaften haben. Sie bedeuten dann ganz im Gegenteil das Aus für diese Technologie. Im Hinblick auf die Einspeisevergütung für Brennstoffzellenstrom bin ich jedoch anderer Meinung: Vergleichen wir Ihre Aggregate mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 40%, in der Perspektive vielleicht von 45%, mit einem GUD³-Kraftwerk mit einem Wirkungsgrad von 55%, abzüglich der Netzverluste vielleicht von 51%, der gleiche Energieträger vorausgesetzt, nämlich Erdgas. Wenn Sie jetzt eine Förderung verlangen, analog zum EEG⁴, dann ist das ein Vorranggesetz, d.h. Sie verdrängen mit dem eingespeisten Brennstoffzellenstrom eine andere Erzeugungsmethode. Gefördert wird im Rahmen des EEG aus Umweltgründen. Wenn ich aber einen schlechteren oder nur vergleichbaren Wirkungsgrad habe, warum sollte der Staat diesen Fördermechanismus dann anwenden?

Thomas Behringer, Vaillant:

Sie vergleichen meines Erachtens jetzt Äpfel mit Birnen. Ich hoffe, ich habe es vorhin gesagt: Wir haben einen Gesamtwirkungsgrad von mindestens 80%, d.h. wir machen Kraft-Wärme-Kopplung, und Sie reden hier jetzt nur über elektrische Wirkungsgrade. Und meinen Sie mit GUD immer Kraft-Wärme-Kopplung? Wird die Überschusswärme genutzt? Und wie viele GUD-Anlagen gibt es und wie ist die Perspektive dort?

Jörg Hein, RWE:

Da wird es massive Zuwächse geben, da können Sie sich jedes Energieszenario anschauen. Wir machen auch GUD-Kraftwerke für Industriekunden im großen Stil. Und dann müssten Sie, wenn Sie solch ein Förderinstrument verlangen, im Prinzip das gleiche bei den GUD-Sachen machen, d.h. auch eine Einspeisevergütung für GUD-Strom. Ich glaube, dass das einen Verdrängungswettbewerb in Gang setzt. Das sollte sich der Staat genau überlegen, wenn keine Umweltvorteile erzielt werden.

1 EVU = Energieversorgungsunternehmen (Anm. der Herausgeber)

2 KWK = Kraft-Wärme-Kopplung (Anm. der Herausgeber)

3 GUD = Gas und Dampfturbinen (Anm. der Herausgeber)

4 EEG = Energieeinspeisungsgesetz (Anm. der Herausgeber)

Thomas Behringer, Vaillant:

Ich erlaube mir, hier noch einmal nachzuhaken: Ich bezweifle, dass Sie mit Ihren GUD-Anlagen – die Leistungsgrößen wurden vorhin genannt: 100 MW sind es ja wohl mindestens, Ihre Wärme abgesetzt bekommen. Denn Kraft-Wärme-Kopplung in der Industrie findet schon statt, dort baut man ja Kapazitäten ab. Wie wollen Sie die Wärme denn absetzen? Sie haben einen sehr guten elektrischen Wirkungsgrad, das stimmt, aber die Wärme kriegen Sie nicht los. Und zur Einspeisevergütung: was wir wollen ist eine Einspeisevergütung für nicht eigengenutzten Strom. Natürlich soll die Brennstoffzelle Strom produzieren, der im Haushalt verbraucht wird, sonst macht das ja keinen Sinn, wir wollen ja die Netzverluste vermeiden. Aber es kann auch noch überschüssiger Strom produziert werden, und dafür wäre es sinnvoll, eine garantierte Einspeisevergütung zu geben. Das soll auch nur eine Anlaufhilfe sein. Wir sind nicht hier, um Subventionen zu fordern.

Detlef Stolten, Forschungszentrum Jülich:

Ich wollte anknüpfen an die Frage von Herrn Weinhold: Die Brennstoffzelle ist nicht kundengetrieben, zumindest im stationären Bereich, sondern wird von Industrieunternehmen vorangebracht. Die RWE ist ein Beispiel dafür, dass die Brennstoffzelle in Betreibermodellen betrieben werden kann, und Hersteller wie Vaillant treiben das voran, aber sicher nicht der Kunde. Im Gegensatz zu einer Solaranlage, die er wenigstens aufs Dach montieren kann, stellt er das Ding in den dunklen Keller. Beim Auto hingegen sieht das anders aus: Der Antrieb muss direkte Performance-Vorteile für den Kunden haben, denn die gesellschaftlichen Vorteile werden vom Individualkunden nicht bezahlt. Und dafür müssen Förderinstrumente her, z.B. eine KWK-Förderung. Ich persönlich habe Schwierigkeiten zu verstehen, warum der jetzige Ansatz schlecht ist, wo man es zwar quotiert, aber dann innerhalb dieser Quote durchaus Konkurrenz über Zertifikatshandel zulässt. Schlecht kann höchstens die Quotierung an sich sein; innerhalb dieser Quote finde ich den Ansatz sehr gut. Und der zweite Punkt: wenn man KWK fördert, muss man das auch auf das CO₂ beziehen, d.h. die Jahresnutzungsdauer mit einbeziehen. Die

Frage, ob die Wärme abgesetzt wird, muss in die Vergütung mit eingehen.

Ulrich Stimming, TU München:

Kraft-Wärme-Kopplung ist wichtig. Wir müssen mit Kraft-Wärme-Kopplung arbeiten, wo immer wir können, um Primärenergie einzusparen. Gleichzeitig sollte man versuchen, aus der Frage konventionelle Systeme vs. Brennstoffzellen keinen ideologischen Streit zu machen, sondern sehen, wo man welches System am vorteilhaftesten einsetzen kann. An der Stelle, wo ich wirklich in der Lage bin, in einem GUD-Kraftwerk die Wärme abzusetzen, ist das sicher gut. Es hat heute einen höheren elektrischen Wirkungsgrad als ein Kleinsystem.

Es geht aber hier nicht um die elektrischen Wirkungsgrade, sondern um ein Konzept. Außer an einigen zentralen Standorten, wo wir die Wärme auch wirklich absetzen können, haben wir ein Problem damit. Und da sind die kleineren Anlagen dann in der Tat sinnvoller. Man muss das ganz klar an der Verbrauchssituation an verschiedenen Standorten – Großstädten, kleinere Städte, im ländlichen Bereich – orientieren und kommt dabei zu unterschiedlichen Aussagen darüber, was die günstigere Situation wäre.

Stefan Ramesohl, Wuppertal-Institut:

Wir sind uns wohl alle einig, dass die Brennstoffzelle in den verschiedensten Anwendungen ein sehr effizienter Energiewandler ist. Dies sollte uns natürlich nicht der Aufgabe entheben, über die Energienutzung nachzudenken. Und insofern finde ich einen Jeep Commander nicht das geeignete Demonstrationsobjekt für die Brennstoffzelle, weil das Fahrzeug als solches hinterfragt werden kann. Jetzt aber wieder zurück zum stationären Bereich: Wir haben sehr viel über Einzelhausgeräte diskutiert. Da stellt sich die Frage, wie entwickelt sich denn dieser Markt, wenn ich mit Passivhäusern, Niedrig-Energie-Häusern, Wärmedämmung etc. den Wärmebedarf reduziere bzw. mit Solarsiedlungen, Solarthermie, solaren Wärmespeichern etc. agiere? Wie lässt sich die Brennstoffzelle in solch ein Gesamtsystem einbinden? Wird Ihnen der Markt durch die Energiesparverordnung „weggedämmt“? Welche Rolle hat die Brennstoffzelle z.B. als nahwärmeversorgendes Aggregat ge-

genüber einem Motor-BHKW oder auch einer Mikro-Gasturbine?

Georg Erdmann, TU Berlin:

Die Brennstoffzelle ist gerade mit einem Niedrig-Energie-Haus sehr kompatibel – im Unterschied zu den sogenannten Nahwärmesystemen. Damit pumpen Sie warmes Wasser durch ein Leitungssystem und das kommt warm wieder zurück, weil der Kunde nicht mehr so viel Wärme braucht. Damit ist das Ganze relativ unwirtschaftlich. Die dezentral eingesetzte Brennstoffzelle hingegen ist stromgeführt. Das bedeutet, dass ich zunächst einmal meinen lokalen Strombedarf decke. Was dabei an Wärme produziert wird, kommt in den Speicher. Und man benötigt auch im Niedrig-Energie-Haus immer ein wenig Wärme für Warmwasser, zum Spülen usw., d.h., das System wäre die ideale Technologie. Das Problem dabei ist, dass man zweimal hohe Kapitalkosten hat. Deswegen muss es Lösungen wie z.B. das *Contracting* oder ähnliches geben. Aber noch mal zurück zu der Frage nach dem Qualifikationsniveau: Angenommen, eine Brennstoffzelle geht kaputt. Das könnte am thermischen Teil liegen, dann müsste der bisherige Heizungstechniker her. Oder am elektrischen Teil, dann brauche ich einen Elektriker. Oder es könnte am chemischen Teil liegen, dann brauche ich noch einen Dritten. Oder einen, der alle drei Dinge beherrscht. Wir sollten dieses Problem nicht unterschätzen.

Jürgen Wengel, Fraunhofer ISI, Karlsruhe:

Darauf wollte ich auch eingehen: Wir müssen den Innovationsprozess nachvollziehen, wie der läuft und was dort passiert. Leider gibt es keinen Vertreter des Handwerks hier. Es gibt unterschiedliche Interessen, und alle können eine Rolle spielen und sich unter Umständen im Endeffekt gegenseitig behindern. Der Handwerker wird seinem Kunden sagen: „Kauf bloß dieses Ding nicht, das funktioniert auf keinen Fall.“ Außerdem kennt er sich nicht aus damit, aber das wird er seinem Kunden nicht sagen. Andere denken als Energieversorger daran, im Markt zu bleiben und möglichst anderen – ich sag’ das jetzt sehr deutlich –, die mit dezentralen Geräten rein wollen, den Zugang zu verwehren. Ein solcher Konkurrent wäre z.B. *Vaillant*, insbe-

sondere dann, wenn er das über *Contracting* machen würde und auch steuern könnte. An dieser Stelle gibt es mehrere Fragen: Wie löst man das Ausbildungsdefizit? Wer trägt die Kosten? Und wie kommt man zu Kooperationen? Ich denke, es ist für *Vaillant* nicht besonders interessant, einen Handwerkerstamm aufzubauen, aber es wäre außerordentlich attraktiv, mit den lokalen Handwerkern zusammenzuarbeiten und das müsste auch *RWE* können. Wir machen in verschiedenen Bereichen Kooperationsprojekte, aber gerade mit dem Handwerk ist das oft schwierig. In genau diese Richtung müssen innovationspolitische Überlegungen aber unter anderem gehen. Da sind dann das Wirtschaftsministerium, die lokalen Industrie- und Handelskammern sowie die Handwerkskammern gefragt.

Thomas Behringer, Vaillant:

Ich nehme mir jetzt mal heraus für das Fachhandwerk zu sprechen, denn erstens sind das unsere Kunden, zweitens sehe ich sie mindestens einmal pro Woche, und drittens, weil das Thema Brennstoffzelle dort im Moment ein zentrales Thema ist. Die Fachhandwerker rennen uns jetzt schon die Türen ein, um Brennstoffzellen zu bekommen, und machen sich ganz verstärkt Gedanken über ihre Ausbildung. Es gibt zudem einen klar erkennbaren Trend, dass verschiedene Gewerbe zusammen gehen, z.B. der klassische Heizungsbauer und das Elektrogewerbe, zumal zusätzlich eine gewisse Konzentration stattfindet. Es sind zunehmend die späteren Generationen am Werk, d.h. die Erben der Gründer. Die haben oft eine Ingenieurausbildung und führen ein Unternehmen auch ganz anders. Der Nachholbedarf in professioneller Unternehmensführung und Technikbeherrschung ist sehr groß. *Vaillant* unterstützt diesen Prozess, denn wenn wir die Technik an unsere Kunden bringen wollen, dann müssen wir auch in diesem Bereich aktiv sein.

Ulrich Stimming, TU München:

Sie hören immer, dass bei Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen, über wärmegeführte Anlagen geredet wird. Es ist aber wichtig, sich bewusst zu machen, dass die Brennstoffzelle eine Strom-

kennzahl¹ von deutlich über 1 hat. Und dann kann ich nicht den Strom sozusagen als Sekundärprodukt meiner Anlage betrachten, sondern muss es als Primärprodukt betrachten und die Anlage stromgeführt fahren. Und das hat Konsequenzen für das ganze *Engineering* des Systems. Und greift natürlich auch ein in die Frage der Wärmedämmung und damit die Frage nach der Zukunft dieser Hausenergiesysteme überhaupt. Wenn wir eine Stromkennzahl haben, die deutlich über 1 liegt, und wir haben im Augenblick ein Verhältnis Elektrizitäts- gegenüber Wärmebedarf von etwa 1:2, dann kommt die angestrebte Reduktion von Wärmeenergie, die ja notwendig ist, der Brennstoffzelle entgegen, die hier Optimales leisten kann. Und dann stellt sich die Frage, ob die Brennstoffzelle dafür geeignet ist, gar nicht mehr. Wir haben einen immer höheren Strombedarf und einen immer geringeren thermischen Bedarf, und 50 Prozent elektrischer Wirkungsgrad und 35 Prozent thermischer Wirkungsgrad z.B. eines Brennstoffzellensystems ist damit ideal für die Zukunft geeignet.

Klaus Thiessen, WISTA solar, Berlin-Adlershof:

Ich habe dem Vortrag von Herrn Stimming entnommen, dass Wasserstoff derzeit zu 99 Prozent aus fossilen Brennstoffen gewonnen wird, während man Methanol auch mit regenerativen Energien gewinnen kann. Ich war eigentlich immer davon ausgegangen, dass die ganze Brennstoffzellenidee überhaupt nur dann möglich ist, wenn man Wasserstoff regenerativ erzeugt, z.B. aus Photovoltaik oder anderen alternativen stromerzeugenden Mechanismen. Wasserstoff kann man in großem Umfang ganz hervorragend transportieren, so dass es meiner Ansicht nach überhaupt nur dann sinnvoll ist, wenn man den Wasserstoff regenerativ erzeugt. Zum anderen finde ich die Idee für ein EEG-ähnliches Gesetz für mit Brennstoffzellen erzeugten Strom hervorragend, aber nicht, wenn man nur den Überschussstrom bezahlt bekommt. Bei dem Photovoltaik-EEG ist dies ja ganz anders: Ich lasse mir gerade eine 1 kW-PV-Anlage auf meinem Dach installieren, und da wäre ich schön blöd, wenn

ich den Strom selber verbrauchen würde. Denn 1/3 der Elektroenergie, die ich im Jahr brauche, die erzeuge ich mit Photovoltaik, bekomme aber 3/3 bezahlt. Bei 0,99 DM bekomme ich mehr raus als ich sonst für Elektroenergie bezahlt hätte. D.h. der gesamte Strom, den Ihre Kleinkraftwerke im Keller erzeugen, sollte dann auch eingespeist werden. Warum sollten die, die ihre Therme im Keller haben, schlechter dastehen als die, die ihre Photovoltaik-Anlage auf dem Dach haben?

Georg Erdmann, TU Berlin:

Eine stationäre Brennstoffzelle enthält u.a. einen Wechselrichter, weil in der Zelle zunächst nur Gleichstrom erzeugt wird. Wenn wir ein Photovoltaik-Modul auf das Dach setzen, produzieren wir auch zunächst nur Gleichstrom. D.h., da könnte es technische Synergien geben. Wir müssen einfach über das enge Technogedanken hinaus zu einem Systemdenken kommen. Bei einer solchen Systemsicht könnte das Ergebnis sein, dass eine stationäre Brennstoffzelle die Eintrittskarte in die Photovoltaik auf dem eigenen Dach ist.

Frage an Gerhard Isenberg:

Sie sagten gerade, Sie wollen ab 2002 30 Brennstoffzellen-Busse in 10 europäischen Städten einsetzen. Soweit ich weiß, ist man in den USA in einigen Staaten, z.B. besonders in Florida, ganz wild auf die Brennstoffzelle, und Konzerne wie Disney World würden sich lieber heute als morgen mehrere Busse da hinstellen, wenn es sie gibt. Also, warum nur in Europa, warum nur 30 Stück? Werden auch reine Wasserstoff-Fahrzeuge mit dabei sein?

Gerhard Isenberg, DaimlerChrysler:

Busse sind Wasserstoff-Fahrzeuge. Einerseits komprimierter Wasserstoff, der auf dem Dach in Druckflaschen gespeichert ist und eine Reichweite von 200 bis 300 Kilometer ermöglicht. Also ausreichend für eine Tagestour. Die zentrale Versorgung erfolgt von einem Betriebshof aus. In Florida kenne ich keine Programme für Brennstoffzellen, vielleicht verwechseln Sie das mit Kalifornien. Dort wurde am 1. November 2000 das *California Fuel Cell Partnership Program* gestartet, an dem wir neben General Motors, Toyota, Volkswagen, Hyundai u.a. beteiligt sind. Dort

1 Anm.: Die Stromkennzahl gibt das Verhältnis von elektrischer zu thermischer Energie an, die in einer Wärme-Kraftanlage produziert wird.

sollen bis 2004 etwa 70 bis 90 unterschiedliche Brennstoffzellen-Fahrzeuge im Endausbau getestet werden. Zunächst mit Methanol-Wasserstoff, später – sofern verfügbar – auch die Benzin-Reformierung. Außer diesem Test sind wir auch noch zusammen mit Mazda und dem japanischen *Ministry of International Trade and Industry* ab 2001 beteiligt an der Erprobung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen mit Methanol in Tokio. Und dann eben noch dazu der große Feldtest hier in Europa. Wir können nicht flächendeckend weltweit Feldtests machen, sondern haben drei Schlüsselmärkte ausgewählt. Warum nur 30? Wir müssen zunächst mal die Technik erproben und demonstrieren, dass sie voll funktionsfähig ist, alltagstauglich und auf dem Stand der heutigen Technik. Die geringe Zahl ist aber auch vorgegeben durch die begrenzten Mittel. Das Testfeld-Programm läuft von Reykjavik über Stockholm bis hin zu Städten in Portugal, Spanien und Italien, so dass wir wirklich unterschiedliche atmosphärische Betriebsbedingungen testen können. Und wenn der Test erfolgreich ist, folgen weitere. Z.B. der Betrieb von schadstofffreien Brennstoffzellen-Bussen in Ballungsgebieten vor allem in der Dritten Welt, so wie es die *Clean-Air-Initiative* der Weltbank in Südamerika anstrebt.

Karl-Heinz Karisch, Frankfurter Rundschau:

Wasserstoff ist sicherlich der günstigste Treibstoff, aber von der Infrastruktur her gleichzeitig auch der schwierigste. Er lässt im Grunde in der Anfangsphase nur den Flottenbetrieb zu. Genau deshalb will die Industrie ja auch für die normalen Kraftfahrzeuge Methanol-Benzin einsetzen. Wird das der Treibstoff der Zukunft?

Ulrich Stimming, TU München:

Ich glaube nicht, dass ich die Frage beantworten kann. Aber ich kann ein Bild von der Diskussion geben, die im Augenblick geführt wird: Es gibt einerseits die Mineralölindustrie, die sagt, entweder Benzin oder Wasserstoff, und keine Zwischenlösung haben will, also kein Methanol. Dieser Aussage steht die technologische Seite gegenüber. Methanol ist ein Energieträger, der über eine hohe Energiedichte verfügt, sich im Fahrzeug einfach zu Wasserstoff reformieren lässt und der unter Umständen sogar direkt in der Brennstoffzelle umgesetzt werden kann.

Außerdem hat er noch das Potenzial, regenerativ erzeugbar zu sein. D.h. Methanol hat ein sehr hohes Potenzial für die derzeitige wie die zukünftige Energiewirtschaft. Ich höre gerade, es sei giftig. Trinken Sie ein Glas Methanol und trinken Sie ein Glas Benzin. Ich glaube, es geht Ihnen in beiden Fällen sehr schlecht dabei, aber das kann nicht das Argument sein. Wir sollten versuchen, eine technische Diskussion zu führen, keine politische. Noch einmal zur Brennstoffzelle: In der Tat wäre Wasserstoff ideal. Er verfügt aber über eine geringe Energiedichte. Wenn ich flüssigen Wasserstoff nehme, muss ich ungefähr ein Drittel der Energie für die Verflüssigung aufwenden. Dazu kommen noch die Abdampfverluste. Vom energetischen Standpunkt aus ist dies nicht tolerierbar. Trotzdem wird es gemacht, weil es dem Kunden die relativ gute Reichweite von etwa 400–500 km für Pkw gewährleistet und der komprimierte Wasserstoff im Grunde nur für den Busbereich mit 200–300 km akzeptabel ist. Eine Herausforderung für die Forschung.

Aber noch einmal zurück zu der Frage: Wie sieht es aus mit dem Edelmetallgehalt? Ich glaube, in der heutigen Entwicklung ist das kein Problem mehr. Wir liegen bei unter 1 mg/cm² pro Zelle bei der Brennstoffzelle. Wir gehen davon aus, dass über 80 Prozent des Edelmetalls recycelt werden können.

Der Konflikt *General Motors* – *Daimler-Chrysler* liegt nicht im Bereich Benzin vs. Methanol. *Daimler-Chrysler* hat einen guten Benzin-Reformer, *General Motors* auch, und ich glaube nicht, dass *General Motors* auf Benzin setzt. Das Problem liegt an einer anderen Stelle: Wenn Sie Kohlenwasserstoff reformieren, haben Sie ein Reformat bei ungefähr 800°C. Aber bei 800°C haben Sie ungefähr 20 Prozent CO. Dies müssen Sie überführen in ein PEM-tolerables Gas mit 100 PPM (*parts per million*) CO. D.h., Sie brauchen drei Reaktoren, die Sie nacheinander schalten müssen, Hochtemperaturshift, Niedertemperaturshift und eine selektive Oxydation oder irgendeine andere Feinreinigung. Und das macht die gesamte Energiekette kaputt und gibt ein enormes Regelungsproblem, was Sie einfach in einem Fahrzeug nicht lösen können. Deshalb wird es meines Erachtens nach nie ein Fahrzeug auf der Basis Benzin und PEM-Brennstoffzelle für den Antrieb geben. Es ist zu kompliziert und zu we-

nig effizient. Also entweder gleich den Wasserstoff oder eben Methanol.

Gerhard Isenberg, DaimlerChrysler:

Langfristig erstrebenswert wäre es, dass ein Kraftstoff direkt auf die Brennstoffzelle geht, der regenerativ erzeugt, gespeichert, transportiert, unter Atmosphärenbedingungen flüssig getankt und mit heutiger Technik gehandelt werden kann. Und die Brennstoffzelle versorgt den Elektroantrieb. Ein einfacheres Konzept gibt es nicht. Wir gehen zweigleisig vor, Wasserstoff und Methanol, wobei Methanol keine Übergangslösung zum Wasserstoff ist. Wenn Methanol nicht auch ein finaler Kraftstoff ist, dann müssen wir meiner Ansicht nach heute damit aufhören; die Aufwendungen sind viel zu hoch. Dann sollten wir uns wirklich auf Wasserstoff konzentrieren. Wir gehen von einer Zweistoff-Strategie aus und verfolgen sie konsequent. Und da spielt die Direkt-Methanol-Zelle langfristig als einfaches Gesamtsystem eine ganz entscheidende Rolle.

Frage:

Ist das marktabhängig? Heißt das z.B. Verfolgung der Zwei-Quellen-Strategie parallel in Deutschland? Oder heißt das, wir setzen z.B. für Brasilien auf Methanol und in Deutschland auf Wasserstoff, weil die Infrastruktur so dicht ist, dass wir langfristig damit auskommen?

Gerhard Isenberg, DaimlerChrysler:

Auf jeden Fall werden wir regionale Marktunterschiede haben. In Brasilien beispielsweise brauchen Sie mit Methanol gar nicht erst anzutreten. Da geht man ganz selbstverständlich davon aus, dass langfristig Ethanol auf der Basis von Biomasse im Markt ist, d.h. die Brennstoffzelle dort damit laufen muss. Und dann sehe ich auch langfristig lokal unterschiedliche Marktanforderungen, die durch unterschiedliche Kraftstoffe bedient werden.

Holger Grubel, Hamburgische Elektrizitätswerke:

Ich möchte noch einmal auf die stationären Anlagen zurückkommen und die mögliche Förderung für Strom aus Brennstoffzellen. Die derzeitige Erfahrung mit dem KWK-Gesetz zeigt

doch, dass das sehr problematisch ist. Das verleitet dann doch dazu, dass man nicht mehr darauf achtet, wie man Strom als auch Wärme sinnvoll nutzen kann. Ich denke, es kommt nicht so sehr darauf an, dass wir den hohen Stromwirkungsgrad einer Brennstoffzelle nutzen, sondern vielmehr darauf, CO₂ zu vermeiden. Und da kann man deutlich mehr erreichen, indem man Häuser besser isoliert und versucht, den Energieeinsatz zu reduzieren. Deswegen sollte die eigentliche Förderung für effiziente Energieerzeugungsanlagen gelten, d.h. wenn sowohl Strom als auch Wärme genutzt werden. Dennoch ist eine Förderung von Brennstoffzellen im ersten Schritt sehr wichtig, sonst gehen die Produktionskosten nie runter. Der 100.000-Keller-Gedanke ist schön, aber es darf nicht darum gehen, so etwas wie das EEG zu bekommen, denn Brennstoffzellen sind nicht primär regenerativ. Sie können nur effizient mit dem Brennstoff umgehen.

Esther Hoffmann, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung:

Es sind wiederholt die ökologischen Vorteile der Brennstoffzelle angesprochen worden. Was mich ein wenig irritiert dabei, ist, dass im wesentlichen auf die Emissionen gesetzt wird, dass aber der Energieaufwand, der mit der Brennstoffaufbereitung usw. verbunden ist, kaum betrachtet wird. Meine Frage daher: Haben Sie schon Lebenszyklus-Betrachtungen für Ihre Brennstoffzellen gemacht und wie hoch ist der Aufwand für die Herstellung und dann in der Nutzung für die Brennstoffaufbereitung? Wie sieht es mit der Entsorgung aus?

Thomas Behringer, Vaillant:

Die klassischen Schadstoffe NO_x, CO, Kohlenwasserstoffe werden kaum emittiert. Und primärenergetisch können wir im Idealfall die Hälfte CO₂ einsparen. Bezüglich einer Energiebilanz einschließlich Energieaufwand für die Herstellung der Geräte ist es so, dass wir – zumindest bei den stationären Brennstoffzellen – da die gleichen Werte haben wie die klassischen Gasgeräte oder Heizkessel. D.h. deren Energieaufwand ist quasi zu vernachlässigen im Gegensatz zu den Energieumsätzen, die mit solch einer Anlage über die Lebensdauer gemacht werden. Und wenn ich für die Branche der

Heiztechnikhersteller sprechen darf, kann ich sagen, dass von der Verpackung bis zu den Geräten eigentlich in großem Umfang recycelt wird. Und das gilt genauso für die Brennstoffzelle.

TEIL II: PODIUMSDISKUSSION

A. IMPULSREFERAT

Die Brennstoffzelle:

Querschnittstechnologie für den Industriestandort Deutschland?

Detlef **Stolten**, Bernd **Höhlein**

DIE BRENNSTOFFZELLE:

QUERSCHNITTSTECHNOLOGIE FÜR DEN INDUSTRIESTANDORT DEUTSCHLAND

Detlef **Stolten**, Bernd **Höhlein**, Forschungszentrum Jülich¹

1. Einleitung

Die ökologischen Gesichtspunkte der Brennstoffzellentechnik werden hier nur eingangs erwähnt, da sie bereits umfänglich diskutiert werden. Der Schwerpunkt dieses Beitrages liegt auf der Bewertung der Brennstoffzellentechnik als Querschnittstechnologie und auf dem Markteintritt der Brennstoffzellentechnik.

2. Vorteile der Brennstoffzellentechnik

Brennstoffzellen haben einen sehr guten Wirkungsgrad bei der elektrochemischen Umsetzung der Energie der Brenngase in elektrischen Strom. Dieser Vorteil wird durch die bei der Aufbereitung der Brenngase auftretenden Verluste reduziert, aber nicht aufgehoben. Vorteile hinsichtlich der CO₂-Emissionen entstehen durch die Möglichkeit, mit Brennstoffzellen im Kraft-Wärme-Kopplungsbetrieb dezentral Strom zu erzeugen. Die CO₂ Einsparungen bei Anwendung dieser Technik gegenüber dem Bezug von Strom aus dem derzeitigen Strom-Mix plus getrennter Wärmeerzeugung liegt bei etwa 20–30%.

Beim Pkw-Antrieb schöpft die Brennstoffzelle ihre im Vergleich zum Benzin- und Dieselfahrzeug höhere Effizienz im wesentlichen aus dem guten Teillastverhalten. Im Teillastbetrieb bleibt der Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle herunter bis zu etwa 10–15% Auslastung hoch. Erst danach fällt der Wirkungsgrad der Anlage bedingt durch den Verbrauch der Nebenaggregate steil ab. Konventionelle Antriebe zeigen ein schlechteres Teillastverhalten, was die Brennstoffzellenfahrzeuge als Stadtfahrzeuge prädestiniert.

Die limitierten Emissionen von Brennstoffzellenanlagen sind vernachlässigbar. Dies ist in Labor- und Feldtests mehrfach nachgewiesen worden. Die Aussage gilt sowohl für stationäre Anlagen als auch für Fahrzeuge. Ein Brennstoffzellenfahrzeug mit Methanolreformer emittiert beispielsweise im Mittel weniger als 1% der in der zukünftigen Norm Euro IV zugelassenen Werte. Diesem Argument wird – insbesondere seitens des UBA – entgegengehalten, dass bessere Abgaswerte als die in Euro IV vorgesehenen nicht notwendig sind. Allerdings ist nur schwer zu erkennen, warum bessere Abgaswerte nicht realisiert werden sollten, wenn dies technisch möglich ist und von der Industrie sogar vorangetrieben wird. Dies gilt besonders, da Brennstoffzellenfahrzeuge – wie bereits ausgeführt – ihre Stärke im Stadtbetrieb und damit in Ballungsräumen haben.

Die Kraftwerksleistung eines Brennstoffzellenkraftwerkes kann aus mehreren Baugruppen zusammengesetzt werden oder sogar aus mehreren einzelnen Anlagen bestehen (modularer Aufbau). Hierdurch kann Kraftwerksleistung marktgerecht zugebaut werden. Standardisierte Anlagen mit Typenzulassung führen zu kurzen Planungs- und Genehmigungszeiträumen und senken die Kapitalbindung sowie das Investitionsrisiko. Viele kleine Anlagen können leistungsmäßig zusammengeschlossen und im Rahmen von Betreibermodellen als virtuelle Kraftwerke betrieben werden. Zu der bereits erwähnten CO₂-Senkung durch Kraft-Wärme-Kopplung kommen eingesparte Übertragungsverluste im Stromnetz von etwa 2% des produzierten Stromes hinzu. Durch den Wegfall der Hochspannungsübertragung reduzieren sich die Aufwendungen auf den Bau und Unterhalt der lokalen Niederspannungsnetze.

1 Das Impulsreferat wurde von Prof. Stolten gehalten. Grundlage war das hier abgedruckte Papier, das für die Veranstaltung angefertigt wurde.

Übersicht 1: Vorteile von Brennstoffzellensystemen

- **Guter Wirkungsgrad**
 - Geringere CO₂-Emissionen als bei konventionellen Techniken
 - Kraft-Wärme-Kopplung mit hoher Stromkennziffer
 - Vermeidung von Netzverteilungsverlusten bei KWK(K)
- **Niedrige Emissionen**
 - Vernachlässigbare limitierte Emissionen
 - Mechanisch einfacher Aufbau, vibrationsarm und leise
- **Modularer Aufbau der Brennstoffzellenleistung**
 - Schrittweiser Aufbau von Kraftwerksleistung (geringes gebundenes Kapital)
 - Kurze Planungszeiträume durch Anlagen mit Typenzulassung
 - Marktgerechter Zubau
- **Hohe Verfügbarkeit**
 - Wenig statistische Ausfälle durch mehrere kleine Einheiten
 - Geringe Vorhaltekapazitäten
- **Hohe Stromqualität**
- **Geringe Kosten der Stromverteilung durch dezentrale Erzeugung**
 - Investitionen
 - Wartung
 - Netzverluste

Quelle: Eigene Zusammenstellung

3. Die Brennstoffzelle als Querschnittstechnologie

Die Brennstoffzellentechnologie ist potentiell eine Querschnittstechnologie sowohl hinsichtlich der Arten der Anwendung, der Leistungsklassen, für die sich die Technik eignet, als auch hinsichtlich der industriellen Struktur.

3.1 Anwendungsorientierte Sicht

Es liegen heute bereits Pkw und Busse mit Brennstoffzellenantrieb von jeweils mehreren Entwicklern vor. Ebenso werden Prototypen mehrerer Entwickler im Bereich Hausenergieversorgung und dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung getestet. Die wesentlichen Anforderungen an solche Anlagen über den guten Wirkungsgrad hinaus finden sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Vergleich ausgewählter Anforderungen an stationäre und mobile Brennstoffzellensysteme

	Fahrzeugantrieb	Stationär
Zulässige Kosten	ca. 60 DM/kW	500 – 2.000 DM/kW
Dynamik der Leistungsbereitstellung*	< 100 Millisekunden	Sekunden-, Minutenbereich
Lebensdauer	ca. 5.000 Stunden**	ca. 40.000–80.000 Stunden**

Anm.: * 50% Leistungssteigerung

** gemeint sind Betriebsstunden; 8760 Stunden sind 1 Zeitjahr

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Die beiden gewählten Beispiele stellen extreme Anforderungssätze dar. Der Fahrzeugantrieb erfordert eine hohe Dynamik bei der Leistungsbereitstellung und muss niedrige Kosten aufweisen. Er braucht aber dafür nur eine Lebensdauer von 5000 Betriebsstunden zu erfüllen, im Gegensatz zu der extrem hohen Lebensdaueranforderung für stationäre Systeme, die dafür teurer sein dürfen. Von diesen beiden Anforderungsprofilen werden weitere Anwendungsfelder eingeschlossen, wie die Stromversorgungen für Pkw und insbesondere für Lkw, aber auch für Boote und Schiffe. Des weiteren stellen Boots-, Bahn- und Schiffsantrieb solche Anwendungsfelder dar. Ein sehr großes Marktpotential wird den tragbaren (portablen) Anwendungen zugeschrieben. Die Leistungsbereitstellung geht hier vom 10W Bereich bis in den kleinen kW-Bereich. Abb. 1 bietet eine Übersicht.

Damit umfasst die derzeit in der Entwicklung befindliche Brennstoffzellentechnik einen Leistungsbereich von 6 Größenordnungen (10W-1MW). Da die verschiedenen Anwendungen vielfältige Schnittstellen – teilweise sogar über den gesamten Leistungsbereich – aufweisen, ist es gerechtfertigt, von einer Querschnittstechnologie zu sprechen. Als Beispiel seien hier Membran- oder auch Katalysatorentwicklungen genannt, die weitgehend unabhängig vom Leistungsbereich eingesetzt werden können.

3.2 Industrielle Struktur

Brennstoffzellen stellen ein interdisziplinäres Arbeitsfeld dar, was sich in den Industriebranchen widerspiegelt, die in die Entwicklung eingebunden sind. In Tabelle 2 sind wesentliche Industriebranchen mit ihren Tätigkeitsfeldern aufgelistet.

Tabelle 2: Auflistung wesentlicher Industriebranchen, die zur Brennstoffzellentechnik beitragen

Branche	Tätigkeitsfeld in der Brennstoffzellenentwicklung
Chemie* (Polymere)	Membran, Dichtung, Membran-Elektroden-Einheiten
Keramik*	Membran, Elektroden, Membran-Elektroden-Einheiten, Dichtung
Katalysatoren	Katalysatoren für Zellen, Gasaufbereitung, katalytische Nachverbrennung
Metall / Kohlenstoff	Bipolarplatten, Korrosionsschutzschichten, met. Konstruktionswerkstoffe
Verfahrenstechnik	Wärmetauscher, Verdichter, ggf. Druckkessel, Entschwefelungsanlagen, u.a.
Elektrotechnik	Mess-, Steuer- und Regeltechnik, Inverter
Maschinenbau	Zellstapel, Subsysteme, Systeme
Energieanlagenbau	Zellstapel, Subsysteme, Systeme
Elektronikindustrie	Portable Brennstoffzellen für Mobiltelefone, Computer, CamCorder u.a.

Anm.: * je nach Zelltyp

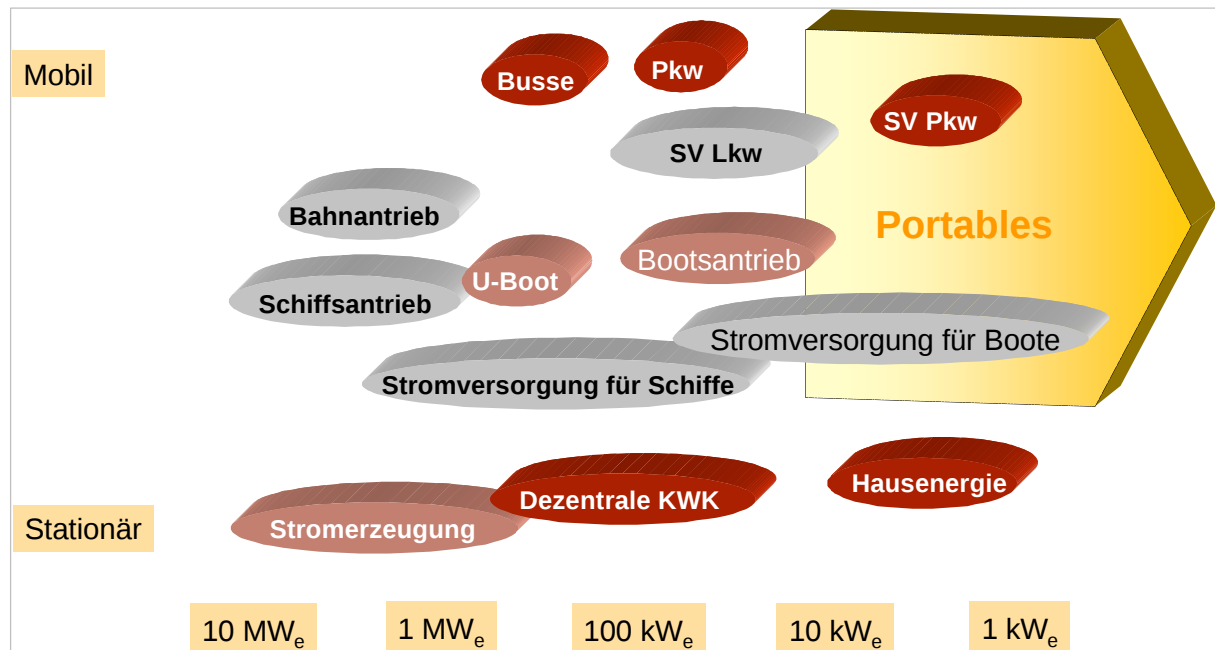
Quelle: Eigene Zusammenstellung

Die deutsche Industrie hat in den aufgelisteten Gebieten mit Ausnahme des Elektronikbereichs, erhebliche Stärken. Es gibt mehrere große Forschungsinstitute und Hochschulen in Deutschland, die sich seit Jahren mit der Technik befassen. Da die Brennstoffzellentechnik bereits heute Studenten und Jungingenieure anzieht, wird in den nächsten Jahren – im Rahmen der allgemeinen Entwicklung, die durch einen starken Studentenrückgang geprägt ist – überdurchschnittlich viel Personal ausgebildet werden. Die Brennstoffzellentechnik wird seit Jahren in nennenswertem Umfang in Deutschland seitens des Bundes und teilweise auch der Länder gefördert.

Für Klein- und Mittelunternehmen sind gute Chancen in den Nischenmärkten in der Anwendungstechnik, also in Systemkonfiguration, Komponentenbau und -adaption, zu sehen. In den USA wurden die wesentlichen Innovationen in Kleinunternehmen gemacht, die oft erst einige Jahre vorher gegründet wurden. Ein hervorstechendes Beispiel ist *Ballard Power*.

Die Brennstoffzellentechnologie ist in mehrfacher Hinsicht als Querschnittstechnologie zu bewerten. Sie besitzt ein hohes Potential für den Standort Deutschland. Sie stützt sich auf mehrere Industriebranchen.

Abb. 1: Entwicklungsträger und Querschnittsoptionen



Anm.: SV = Stromversorgung an Bord der Fahrzeuge

Quelle: Eigene Zusammenstellung

4. Energieträgerauswahl

Bei stationären Anwendungen ist Erdgas ein bevorzugter und unumstrittener Energieträger (Brennstoff). Biogas muss als Energieträger Berücksichtigung finden, wird aber rein mengenmäßig auf eine – durchaus wichtige – Nische beschränkt bleiben.

Für portable Anwendungen kommen bereits aus technischen Gründen nur Wasserstoff und Methanol (Direkt-Methanol-Brennstoffzelle) in Frage. Die energietechnische Bewertung ist hier wegen der geringen Energiemengen von untergeordneter Bedeutung.

Für den mobilen Bereich stellt sich die Situation komplizierter dar. Für den Fahrzeugantrieb mittels der Polymerbrennstoffzelle wird Wasserstoff benötigt. Dieser kann aus verschiedenen Energieträgern erzeugt werden. Wasserstoff und Methanol müssten derzeit aus Erdgas erzeugt werden, um in der geeigneten Menge zur Verfügung gestellt werden zu können. Der Übergang zu erneuerbaren bzw. nicht-fossilen Energien ist bei beiden Energieträgern möglich. Methanol kann aus Biomasse hergestellt werden,

Wasserstoff aus Wind- und Wasserkraft sowie solarer und nuklearer Energie.

Wasserstoff stellt für die meisten Brennstoffzellen zwar den idealen Energieträger dar, ist derzeit aber nur unter Inkaufnahme großer Nachteile zu speichern. Darüber hinaus ist die Sicherheitsfrage für den mobilen Einsatz nicht geklärt. Speicherung, Distribution und Betankung sind bei Methanol einfacher, dafür wird das Brennstoffzellensystem schwerer und teurer. Des Weiteren ist die CO₂-Bilanz ungünstiger als bei Verwendung von gasförmigem Wasserstoff. Im Forschungsstadium befinden sich derzeit Aktivitäten, den Wasserstoff aus Benzin oder Diesel an Bord des Fahrzeugs herzustellen.

Die Brennstoffzelle hat in jedem Fall eine Türöffnerfunktion für Wasserstoff. Wenn die Speicherfrage für Wasserstoff in Zukunft durch neue Entwicklungen gelöst werden könnte, stünde mit der Brennstoffzellentechnik eine für die Verwendung des Wasserstoffs ideal geeignete Technik zur Verfügung.

Gasförmiger Wasserstoff wäre der von der CO₂-Bilanz günstigste Energieträger. Der praktische

Vorteil eines flüssigen Energieträgers (Methanol, Benzin, Diesel) wiegt aber so groß, dass die Energieträgerfrage für den Fahrzeugantrieb derzeit als noch offen angesehen werden muss.

5. Der Zellstapel als Kernkomponente

Für den stationären Bereich werden in Europa derzeit Brennstoffzellenanlagen von den Firmen *Alstom/Ballard* (D, CDN), *Hamburg Gas Consult* (D), *MTU* (D), *Siemens/Westinghouse* (D, USA), *Sulzer* (CH) und *Vaillant* (D) entwickelt. Hierbei konzentriert man sich auf die Entwicklung der Peripherie (Reformer, Gasnachbehandlung) und der Systemtechnik. Der Zellstapel als Kernkomponente der Brennstoffzelle wird nur von *Sulzer* selbst entwickelt sowie hergestellt. Alle anderen Zellstapel sind Importe aus Nordamerika (USA und Kanada). Bei der *MTU* wird derzeit ein eigener Zellstapel entwickelt.

Für die Bus- und Pkw-Anwendung werden außer von *DaimlerChrysler/Ballard* Zellstapel von *ProtonMotor* (D) hergestellt. In einem Prototyp von *MAN* findet ein Zellstapel von *Siemens* aus einer Entwicklung für U-Boote Verwendung.

Insgesamt ist die bemerkenswerte Feststellung zu machen, dass weltweit fast alle derzeit in Prototypen verwendeten Zellstapel aus Kleinunternehmen hervorgegangen sind. Ausnahmen stellen die massiv vom amerikanischen Staat gestützte Entwicklung von *Westinghouse* dar, die von *Siemens* aufgekauft wurde, sowie einige derzeit eher unbedeutendere japanische Entwicklungen.

In Deutschland werden Zellstapel für den zivilen Bereich derzeit nur von *DaimlerChrysler* und *ProtonMotor* hergestellt. Die Systementwicklung stößt derzeit an die Grenzen der Verfügbarkeit von Brennstoffzellenstapeln. Dies gilt insbesondere für Klein- und Mittelunternehmen.

Der Zellstapel ist eine Kernkomponente von Brennstoffzellensystemen. Die Verfügbarkeit ist derzeit beschränkt und liegt in der Hand weniger Firmen, die ihren Sitz überwiegend in Nordamerika haben (siehe Abb. 1). Wenn die Brennstoffzelle als Querschnittstechnologie ausgebaut werden soll, ist die Förderung deutscher/europäischer Technik für den Zellstapel sinnvoll.

6. Entwicklungsschwerpunkte und Zeithorizonte

Derzeit ist das Stadium der Konzepttypen- und Felderprobung erreicht. Es müssen daraus Anlagen der 2. Generation abgeleitet werden, die bezüglich Kosten, Leistungsdichte sowie Lebensdauer beziehungsweise Alterung verbessert werden. Grundlegende Forschung und Entwicklung ist bei Werkstofffragen, Herstellverfahren, der Systemeinbindung und deren Modellierung sowie der Zellstapelentwicklung notwendig. Auch völlig neue Verfahren, z.B. bei der Brenngaserzeugung, sind zu betrachten. Im Hochschulbereich ist die Forschung und Lehre im Bereich der elektrochemischen Methoden- und Grundlagenforschung derzeit unterbesetzt, während sich mehrere Stellen mit der Brennstoffzellenentwicklung selbst befassen.

Die Markteinführung erster Systeme ist nach dem derzeitigen Stand je nach Anwendung in 3–8 Jahren zu erwarten. Hierbei sind zuerst die Hausenergieversorgungsanlagen zusammen mit Bussen und dann Pkw zu erwarten, danach dezentrale Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, die im Falle der keramischen Hochtemperaturbrennstoffzelle dann auch mit Gasturbinen gekoppelt werden können.

7. Antreiber und Hindernisse bei der Markteinführung

7.1 Technologietreiber

Die Markteinführung der Brennstoffzelle wird nur in geringen Maße vom individuellen Kundennutzen des Endverbrauchers getragen werden. Die Brennstoffzelle stellt sehr effizient Strom und Wärme bereit. Beide Energien werden heute bereits mit konventionellen Techniken bereitgestellt; in der Regel preiswert und zuverlässig. Die Brennstoffzelle ist ein Substitutionsprodukt und wird von Anbeginn unter erheblichem Kosten- und Leistungsdruck stehen, da sie nur wenig originär neuen Kundennutzen bringt. Daher wird die Einführung der Brennstoffzellentechnik nicht mit der Einführung von Mobiltelefonen vergleichbar sein werden. Dort konnte eine – vom heutigen Standpunkt aus gesehen – weder sehr leistungsstarke noch zuverlässige Technik zu hohen Preisen an einen kleinen Kundenkreis verkauft werden. Hierbei wurden

Erfahrungen gesammelt, die Kosten konnten gesenkt werden und die Technik wurde einem breiteren Kundenkreis zugänglich gemacht, ohne dass dies alles von den Firmen vorfinanziert werden musste. Diese Möglichkeit gibt es bei der Brennstoffzellentechnik zumindest in den Massenmärkten nicht, da die Märkte von Produkten abgedeckt werden, die wesentliche Kundenbedürfnisse wie Mobilität oder Strom- und Wärmebedarf zur allgemeinen Kundenzufriedenheit decken und daher höhere Preise für die Brennstoffzellentechnik auch am Anfang nur begrenzt zu erzielen sein werden.

Der größere individuelle Kundenanreiz kann noch beim Pkw gesehen werden, da ein Brennstoffzellenfahrzeug leise ist und Fahrzeuge generell einen hohen Stellenwert als Statussymbol

haben. Bei stationären Brennstoffzellen, die im Keller oder auf dem Speicher stehen, wird der individuelle Kundennutzen geringer sein.

Der Nutzen der Technologie ist ein gesellschaftlicher, besonders in Bezug auf die CO₂-Bilanz und die limitierten Emissionen. Daher ist die Markteinführung der Brennstoffzellentechnik stark von den wirtschaftlichen und gesetzlichen Rahmenbedingungen abhängig.

Bei Brennstoffzellenfahrzeugen sind die die Technologie treibenden Faktoren der Wunsch nach einer Reduktion der Abhängigkeit vom Öl seitens der Pkw-Hersteller, nach einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen sowie die Option einer zukunftsgerechten Bordstromversorgung des Fahrzeugs.

Tabelle 3: Individueller Kundennutzen

Technik	Kundennutzen	Individuelle Bedürfnisbefriedigung	Abwehr
Mobiltelefonie	Stete Erreichbarkeit überall	Groß	Gering
Biotechnologie, Gentechnik	Individuelle Lebensverlängerung	sehr groß	sehr groß
Kraftfahrzeuge	Mobilität, Statussymbolik	Groß	Mäßig
Brennstoffzellen mobil	Leises Fahrzeug, Technologische Innovation, Statussymbolik? gesellschaftlich	Mäßig	fast keine
Brennstoffzellen stationär	gesellschaftlich	Gering	Keine
Folgerung:	Der individuelle Kundenanreiz zum Kauf einer Brennstoffzelle ist gering, da sie wenig originär neuen Kundennutzen bringt!		
Konsequenz:	Als Substitutionsprodukt steht die Brennstoffzelle unter starkem Kostendruck		

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Im stationären Bereich sind die hauptsächlichen Treiber das CO₂-Senkungspotential durch Kraft-Wärme-Kopplung, bzw. dessen gesetzliche Anforderung, sowie das Auftreten neuer Energieproduzenten sowohl im Strom- als auch im Gasmarkt durch die Liberalisierung dieser Märkte.

Damit ergeben sich dann auch technische Anforderungen, die neue Anlagenentwicklungen fördern, wie die der Hausenergieanlagen. Durch den Strompreisverfall, der mit der Liberalisie-

rung einher ging, sind andererseits auch erhebliche Nachteile für den Kraft-Wärme-Kopplungsbereich entstanden.

Die Brennstoffzellentechnik wird im mobilen wie im stationären Bereich nicht vom Nutzen des Endkunden getragen, sondern durch die Rahmenbedingungen. Die derzeit existenten bzw. geschaffenen Rahmenbedingungen wirken offensichtlich stärker auf die beteiligten Firmen als auf den Endkunden.

7.2 Kostensituation

Vielfältige Abschätzungen zeigen, dass die Zielkosten für Brennstoffzellensysteme, die sich an den Kosten einer vergleichbaren Technik auf konventioneller Basis orientieren, erreichbar sein werden. Allerdings besteht in der Markteinführungsphase ein erheblicher Vorfinanzierungsbedarf durch die Firmen, die diese Produkte einführen wollen, da die Produkte anfangs nur weit unter den Herstellkosten verkauft werden können.

Brennstoffzellensysteme werden in der Anfangsphase Technologieförderung benötigen.

8. Übererwartungen schaden der Brennstoffzellentechnik

In ihrer Eigenschaft als Substitutionsprodukte werden an Brennstoffzellen besonders hohe Erwartungen bereits zu einem frühen Zeitpunkt gestellt. Die Brennstoffzelle wird weder die Energieprobleme lösen, noch wird sie konventionelle Techniken verdrängen. Sie wird aber zur Lösung der Probleme einen Beitrag leisten können, und sie wird sich Sparten – nicht nur Nischen – erobern können. Die Einführung der Technologie wird auch nicht in 10 Jahren beendet sein, sondern sie wird eher 20 Jahre dauern, obgleich erste Produkte bereits in etwa 3 Jahren am Markt sein werden. Einige der derzeitigen Leistungs- und Kostenversprechungen erscheinen auf der Zeitachse recht optimistisch.

Zu hohe Erwartungen führen auch zu Enttäuschungen und damit zu heftigen Reaktionen auf den Kapitalmärkten, bei Verbrauchern und der Förderung. Ein zu früher Markteintritt mit unzureichend entwickelten Produkten wie im Fall der Wärmepumpe muss ebenso vermieden werden, wie der langsame und schwierige Markteintritt der Brennstoffzellentechnik, die wegen ihres höheren Preises und ihres damals vergleichsweise geringen individuellen Kundennutzens erst nach Jahren den Durchbruch erreicht hat. Auch der Keramik haben massive Fördermittel vor einigen Jahren nicht zum Durchbruch verhelfen können.

Kritikloser Optimismus wird der Entwicklung der Technologie schaden; es werden ein kritischer Optimismus, Langfristigkeit, Stetigkeit und

Verlässlichkeit in Förderung und Rahmenbedingungen benötigt.

Die Autoren empfehlen, eine Studie anfertigen zu lassen, die aus den genannten Fehlschlägen der Markteinführung unter den Aspekten des Marketings und der Förderpolitik Lehren ziehen sollte für die Brennstoffzellentechnik.

9. Brennstoffzellenförderung

9.1 Demonstrationsprojekte

Demonstrationsprojekte haben eine große Bedeutung für die technische Verifikation, aber auch dafür, die Technik bekannt zu machen und Vertrauen zu schaffen.

Bei der Kraftstoffauswahl für Pkw kommen Demonstrationsprojekten besondere Bedeutung zu, da hierbei die konkurrierenden Systeme gasförmiger Wasserstoff und Methanol unter praktischen Bedingungen getestet werden. Für eine Entscheidung müssen dann auch derstellungsaufwand und die Distribution des Kraftstoffes berücksichtigt werden.

Wenn die Technologie als Querschnittstechnologie ausgebaut werden soll, ist auch die Förderung von Nischenprodukten, insbesondere unter Beteiligung von Klein- und Mittelunternehmen, sinnvoll.

9.2 Rahmenbedingungen

Wegen der Vielfältigkeit der Rahmenbedingungen können hier nur einige grobe Punkte genannt werden:

- Wesentlich sind die Abgasgesetzgebung, Regelungen zur Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung und die Vorbereitung steuerlicher Vorteile für die Einführung eines alternativen Kraftstoffes.
- Bei der Kraft-Wärme-Kopplung und besonders den Hausenergiesystemen kommt auch der Vereinfachung bestehender Regelungen eine besondere Bedeutung zu. So muss beispielsweise in Zukunft ein Techniker allein in der Lage – und damit berechtigt – sein, eine Anlage gasseitig und elektrisch anzuschließen. Es sind also Ausbildungsgänge zu reformieren oder entsprechende Zusatzaus-

bildungen zu schaffen. Diese Problematik tritt bei klassischen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen analog auf.

- Wesentlich ist auch die Harmonisierung der Regelwerke in der EU, um die Technik einerseits exportierbar zu machen, andererseits auch im Ausland hergestellte und zugelassene Komponenten problemlos verwenden zu können. Dies gilt auch besonders für die Kraftstoffe und Sicherheitsregeln.
- Über kostenarme Anreize für die Technikeinführung sollte nachgedacht werden. Dies könnten beispielsweise die Mitbenutzung von Busfahrstreifen in Innenstädten oder ähnliche Privilegien für besonders umweltfreundliche Fahrzeuge sein.
- Netzwerke, wie sie auf Landesebene in Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg bereits bestehen, können dazu beitragen, Synergien zu schaffen. Dies gilt sowohl für die Vernetzung von Unternehmen untereinander als auch zwischen Unternehmen und öffentlicher Forschung. Da bereits Landesnetzwerke bestehen, sollte ein eventuelles Bundesnetzwerke darauf abgestimmt werden.
- In der Hochschulausbildung sollten die klassischen Ausbildungsgänge die Brennstoffzelle einbeziehen. Die Ausbildung von „Brennstoffzelleningenieurern“ dagegen erscheint wenig sinnvoll. Es werden interdisziplinäre Teams benötigt, die sich über die Fachrichtungen hinweg miteinander verständigen können. Das geforderte Fachwissen erscheint aber bei der notwendigen fachlichen Breite zu tief, um es in einem Studiengang zu vereinen.
- Auch oder gerade wenn die Brennstoffzellentechnik jetzt in die Feldtestphase kommt, ist Forschung wichtig. Es werden beispielsweise Beiträge zu neuen Materialien, Herstellungstechniken und Systemvereinfachungen benötigt. Neben der angewandten Forschung und Entwicklung kommt auch den Grundlagen erhebliche Bedeutung zu. Dies gilt besonders für die Elektrochemie, die derzeit in Deutschland nicht ausreichend vertreten ist.

Grundsätzlich wesentlich ist für die Brennstoffzelle die Langfristigkeit von Förderung und Rahmenbedingungen.

Übersicht 2: Zusammenfassung

- **Die Brennstoffzelle ist ökologisch positiv**
- **Sie bietet wirtschaftliche Chancen**
 - auch und gerade für KMU
 - sowie durch Querschnittscharakter
- **Sie ist ein Substitutionsprodukt und benötigt daher Technologieförderung**
- **Übererwartungen schaden der Technikeinführung**
- **Sie benötigt einen langfristigen Planungs- und Förderhorizont**
- **Sie benötigt langfristiges (aber kritisches) Denken auch in Durststrecken**
- **Entwicklungszeiten können durch Geld nicht beliebig verkürzt werden**
- **Die derzeitige Brennstoffzellendiskussion berücksichtigt zu wenig:**
 - Industrielle Chancen
 - Nischenmärkte (Türöffnerfunktion, Märkte für KMU)

TEIL II: PODIUMSDISKUSSION

B. DISKUSSION¹

Podiumsteilnehmer:

Ferdinand **Panik**,
Geschäftsführer, XCELLSIS GmbH und Projekthaus Brennstoffzelle der DaimlerChrysler GmbH,
Kirchheim / Teck-Nabern

Detlev **Stolten**, Direktor, Institut für Werkstoffe und Verfahren der Energietechnik, Forschungszentrum Jülich

Uwe **Thomas**, Staatssekretär, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn

Andreas **Troge**, Präsident, Umweltbundesamt, Berlin

Moderator:

Carl Graf **Hohenthal**, Frankfurter Allgemeine Zeitung

¹ Die Wortbeiträge des Fachgesprächs wurden zum besseren Leseverständnis redaktionell bearbeitet. Nicht bei allen Beiträgen aus dem Publikum konnten die Teilnehmer namentlich identifiziert werden.

Carl Graf Hohenthal, FAZ¹:

Herr Prof. Panik, stimmen Sie Herrn Prof. Stolten zu oder sehen Sie einige Dinge etwa anders? Und, ein bisschen mehr auf die praktische Seite geschaut: Wie sehen Sie die Marktentwicklung für die Brennstoffzelle? Und vor allem die Kostenentwicklung?

Ferdinand Panik, DaimlerChrysler:

Deutschland ist in der weltweiten Brennstoffzellenentwicklung eigentlich nicht vertreten. Insofern kann ich der Forderung Prof. Stolten, man solle nichts überstürzen, nicht zustimmen, auch wenn es richtig ist, die Erwartungen an die Brennstoffzelle zu dämpfen. Der Einstieg in diese Technologie ist verschlafen worden. Im Moment stehen in Deutschland im mobilen Bereich keine Brennstoffzellen zur Verfügung, warum dies so ist, müssen sich Politik und Wirtschaft in Deutschland fragen lassen. Dieser Rückstand ist nicht primär an den Fahrzeugen, die herumfahren, ablesbar, denn das sind Konzeptfahrzeuge. Sie sehen den Rückstand anhand der Patentlandschaft: Was derzeit international im vorwettbewerblichen Feld im Patentwesen geschieht, ist gewaltig. Wenn *DaimlerChrysler* nicht da wäre, die sich das wirklich als strategisches Projekt auf die Fahne geschrieben haben, dann wäre die deutsche Patentlandschaft im gesamten Brennstoffzellenfeld nahezu leer, und zwar beim gesamten Antriebssystem.

Deutschland muss da wirklich aufwachen, deshalb begrüße ich solche Diskussionen. Wir stehen vor einer großen Aufgabe, weil sowohl die etablierten Technologien als auch die Kraftstoffsysteme durch die Brennstoffzellen revolutioniert werden. Das schafft natürlich Widerstände. Es ist nicht nur eine Geldfrage, ob man diesen ganzen Weg gehen kann, es ist auch eine Motivationsfrage und eine Frage des *Leadership*. Es geht nicht in erster Linie um Fördermittel, es geht hier wirklich darum, Zeichen zu setzen und zu bekennen, dass wir uns Gedanken darüber machen, welches unser Kraftstoff der Zukunft ist, welches das Energiesystem der Zukunft ist usw. Und das muss wirklich aktiv und aggressiv angegangen werden. Insofern darf das von Prof. Stolten formulierte „nichts überstür-

zen“ nicht so gemeint sein, dass diesbezüglich kein dringender Handlungsbedarf bestünde.

Zur Kostenfrage: *DaimlerChrysler* hat ein Einführungsszenario für den Brennstoffzellen-Antrieb im Pkw-Bereich entworfen. Das ist noch mit vielen Risiken verbunden, wovon eines die Kostenfrage darstellt. Die Kosten müssen im Verhältnis zum Verbrennungsmotor wettbewerbsfähig sein. Unsere *Benchmark* ist der Dieselmotor, an dessen Kosten sollen die der Brennstoffzellentechnik bis zum Jahr 2010 herangeführt werden.

Mit der heute verfügbaren Technologie kostete ein Antrieb bei der Produktion von 100.000 Stück zwischen 8.000 und 10.000 Euro. Der vergleichbare Dieselantrieb mit Getriebe liegt bei 4.000 bis 5.000 Euro. Der Unterschied ist jedoch nicht so groß, wie man glaubt, auch ein Prototyp des V10-Dieselmotors kostet viel Geld. Nimmt man die Zahlen für eine Fertigung in großen Stückzahlen, ist der erwähnte Faktor 2 in Etappen bis zum Jahr 2010 abzarbeiten.

Andreas Troge, Umweltbundesamt:

Zu den Kosten: Ich verstehe Herrn Panik so, dass die Zukunft offen ist und somit auch im Hinblick auf die Kostensenkung abzuwarten bleibt. Das ist eine Strategie, der das Umweltbundesamt nur folgen kann, denn unsere Fortschritte in der Umwelt- und Produktionstechnik sind vor 20 Jahren auch noch nicht wahrgenommen worden. Am Anfang der Diskussion möchte ich eines deutlich machen:

Ich halte die Brennstoffzellentechnik in der Tat für eine Querschnittstechnologie

Aber Querschnitt wozu?

Die Diskussion über die Brennstoffzelle muss anhand der Energiedienstleistungen, die erbracht werden sollen, geführt werden. Eine Technik lässt sich nicht ohne Bezug zu ihrer Anwendung als Dienstleistung diskutieren. Möglicherweise ergeben sich – auch aus Umweltsicht – unterschiedliche Rangfolgen, wenn man sich diese Energiedienstleistungen ansieht: Wir haben bei Ihnen, Herr Stolten, den Unterschied zwischen den stationären und den mobilen Anwendungen und dem, was sich noch nicht so ganz zuordnen lässt, gehört. Das halte ich für eine sehr gute Anfangsunterscheidung.

1 Seit März 2001 stellv. Chefredakteur der Tageszeitung *Die Welt*.

Carl Graf Hohenthal, FAZ:

Herr Prof. Panik behauptete, Deutschland hätte die Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie verschlafen. Die daran anschließende Frage lautet, ob diese Kritik den Unternehmen oder der Politik mit ihren Rahmenbedingungen und Fördermöglichkeiten gilt. Herr Dr. Thomas, wie würden Sie diese Frage beantworten und wie wird die Brennstoffzelle seitens der Bundesregierung gefördert?

Uwe Thomas, Staatssekretär BMBF:

In Schleswig-Holstein sind, wie Prof. Stolten erwähnte, schon vor Jahren die U-Boote der HDW mit Brennstoffzellen-Antrieb in Betrieb gesetzt worden. Insofern hat es hier, wie übrigens auch in Amerika, im militärischen Bereich eine Fülle von Forschungen gegeben. Im zivilen Bereich wurden in den letzten 12 Jahren eine Reihe von Forschungsprojekten unternommen, getragen insbesondere von dem Forschungszentrum Jülich. Einen Prototyp hat das Zentrum aber nicht auf den Markt bringen können. Wir müssen in diesem Bereich eindeutig mehr tun. Seit 1988 summiert sich die Forschungsförderung auf etwa 160 Mio. Dank der UMTS-Millionen kann dies in den nächsten drei Jahren auf etwa 230 Mio. gesteigert werden.

Ein zweiter Punkt: In einem Punkt möchte ich Herrn Stolten widersprechen. Er betrifft die Chance, mit Mikro-Brennstoffzellen die Akkus in den Notebooks zu ersetzen, so dass diese wochenlang anstelle einiger Stunden laufen. Für diese Entwicklung gäbe es einen riesigen Markt, dabei sollte sich also auch Deutschland Mühe geben.

Der dritte Punkt: Die Unterscheidung von stationärer und mobiler Anwendungen ist völlig richtig. Im stationären Bereich müssen die Veränderungen im Strommarkt so gestaltet werden, dass einerseits kleine Kraftwerke ungehindert Zugang zum Strommarkt bekommen und andererseits Kraft-Wärme-Kopplung besonders honoriert werden muss, weil sie besonders umweltfreundlich ist. Hier muss die Bundesregierung auch einen Kampf mit der Europäischen Kommission führen.

Im ersten Punkt hat uns die EU geholfen, im zweiten Punkt hat sie unsere Pläne beinahe verhindert. Eine stationäre Brennstoffzelle als eine

Art Block-Heizkraftwerk wäre sicherlich eine großartige Entwicklung mit einem sicherlich großen Markt.

Etwas anders sieht es bei den mobilen Anwendungen aus. Ich erinnere daran, dass eine Brennstoffzelle zunächst nicht der Antrieb des Kraftfahrzeugs ist, sondern die Umwandlung eines Energieträgers in elektrische Energie. Damit beginnen die spannenden Themen. Noch glauben wir wie selbstverständlich, dass auch in den nächsten 20 Jahren komplizierte Getriebe per Kraftübertragung die Räder eines Fahrzeuges antreiben. Was wir uns dagegen im BMWF vorstellen, ist tatsächlich das serielle Hybridfahrzeug als ein Träger von allen möglichen Technologieentwicklungen, die in diesem Zusammenhang interessant sind, z.B. Radnaben-Motoren. Hiermit reden wir im Grunde von einer ganz neuen Automobilindustrie. Ich glaube, dass dies eine gemeinsame Anstrengung von Industrie und Forschung in Deutschland wert ist.

Carl Graf Hohenthal, FAZ:

Sie haben den Automarkt angesprochen. Herr Prof. Panik, stimmen Sie der von Dr. Thomas skizzierte Entwicklung zu? Die zweite Frage: Herr Prof. Troge hat provozierend gefragt, wozu der Querschnitt dienen soll. Diese Frage sollten wir nochmals diskutieren.

Ferdinand Panik, DaimlerChrysler:

Es stimmt, dass der Trend, jetzt Hybridtechnik in die Fahrzeuge hineinzubringen, wichtig ist. Auch die Leistungselektronik ist eine Schlüsseltechnologie, die es zu entwickeln gilt, um all diese positiven Eigenschaften wie Bremsenergie-Rückgewinnung, *Stop-and-Go* nutzbar zu machen. Trotzdem habe ich die Befürchtung, dass andere hier schon sehr weit sind und Trends setzen. Wir müssen deshalb schnell sein, denn egal ob Brennstoffzelle oder Verbrennungsmotor, die Nutzung von Hochleistungsbatterien, Leistungselektronik und Elektromotoren wird kommen. Und Sie haben recht, das wird das ganze Fahrzeug umgestalten.

Sie haben die Radnaben-Motoren genannt. Das ist ein gutes Thema, das aufgegriffen werden muss, egal ob man Batteriefahrzeuge, Brennstoffzellenfahrzeuge oder Hybridfahrzeuge macht. Gerade in Japan hat die Automobilin-

dustrie diese Schlüsseltechnologien erkannt, investiert darin und arbeitet daran. Und die Fahrzeuge, etwa der Prius von Toyota, erfreuen sich immer zunehmender Kundenbeliebtheit. Kundennutzen entwickelt sich, plötzlich schätzt der Kunde das geräuscharme Fahren, die gute Beschleunigung und das einfache Aufladen an der heimischen Steckdose. Das kann man bei Hybrid-Fahrzeugen noch nicht machen, aber es wird kommen. Und schließlich stellt der Kunde fest, wenn ich einen solchen Energieträger habe, wie eine Brennstoffzelle im Fahrzeug, dann kann ich vielleicht auch meine Energieversorgung zu Hause auf diesem Weg gewinnen.

Außerdem können neue Produkte entwickelt werden. Wenn man eine Technologie beginnt, sieht man noch nicht die ganze Perspektive. Ich glaube, dass der Brennstoffzellen-Antrieb das Auto total verändern wird, in Richtung *Mobile-home*, in Richtung einer eigenen Energiestation. Das Auto von heute ist ja ziemlich ärmlich: Wir müssen die Fenster kratzen, wenn es kalt ist. Wenn es warm ist, dann ist es innen heiß. Es gibt keine Kaffeemaschine drin, keinen Eisschrank. Vielleicht ist viel mehr machbar, wenn man eine Energiequelle hat, die zwar einen hohen Wirkungsgrad hat, aber keine Emission und keine Geräusche.

Detlef Stolten, FZ Jülich:

Zur Querschnittsfrage: Ich denke, Querschnitt bedeutet in diesem Zusammenhang, dass man dies für sinnvolle Techniken anwendet. Sinnvoll ist eine Technik etwa in ökologischer Hinsicht, wenn man mit ihrer Einführung CO₂ oder andere Emissionen vermindern kann. Mit Querschnitt meine ich außerdem, dass es viele Nischen- oder Spartenanwendungen geben kann. Mein Plädoyer an der Stelle wäre: Man muss unter staatlichen Regeln, die Rahmenwerte darstellen, dem Markt überlassen, was eine sinnvolle Technik ist und wo man Dinge ersetzen kann. Und dann kann die Brennstoffzelle beispielsweise in solch einen Nischenmarkt zu sehr hohen Preisen eingeführt werden. Man sollte also Rahmenbedingungen definieren, wo es energietechnisch relevant ist. Man könnte etwa sagen, man fördert beispielsweise Kraft-Wärme-Kopplung, um die Brennstoffzelle einzuführen.

Aber man sollte auch Vieles dem freien Kräftespiel und dem Markt überlassen, denn ich stim-

me Herrn Panik zu, dass heute noch nicht zu überblicken ist, welche Anwendungen noch entwickelt werden. Immerhin ist die Brennstoffzelle die erste Technik, die jenseits der Verbrennung nach der Dampfkraftmaschine eine neue Art darstellt, Energie so umzuwandeln, dass wir sie sinnvoll für Antriebe und für elektrische Dinge nutzen können.

Carl Graf Hohenthal, FAZ:

Herr Troge, wie kriegt man nach Ihrer Meinung den Durchbruch bei der Brennstoffzelle in diesem Land, in diesem Markt, am besten hin, ohne diesen durch umfangreiche Regelwerke sofort wieder zu bremsen?

Andreas Troge, Umweltbundesamt:

Wir stellen an alle Technik und jedes Produkt bestimmte Umwelanforderungen. Zu fragen ist, was ein Produkt mit der spezifisch umweltentlastenden Technik bringt? Also, weniger CO₂ oder generell weniger Energieverbrauch pro Produkt? Und wir fragen auch: Was bringt die Nutzungshäufigkeit der Produkte? Ein Beispiel hierfür ist die Umweltbelastung durch Pkw-Verkehr: Trotz sinkender Verbräuche pro 100 km steigt der CO₂-Ausstoß an, da die Zahl der gefahrenen Kilometer steigt. Die Umwelt interessiert nicht, ob die Schadstoffbelastung aus einer kleinen Zahl hochgradig umweltverschmutzender Erzeugnisse oder Dienstleistungen kommt, oder aus einer Vielzahl wenig umweltverschmutzender. Deshalb sage ich zum Thema Brennstoffzelle genau dasselbe.

Grundsätzlich wollen wir nicht Technik regulieren, sondern Freiräume schaffen. Die Liberalisierung des Strommarktes soll verknüpft werden mit einem Handelssystem für Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung und mit dem Thema „Virtuelles Kraftwerk“. Durch die energiepolitischen Entscheidungen dieser Bundesregierung wird somit der Markt für stationäre Anwendungen geöffnet.

Wenn wir relativ schmutzige Stromerzeugungsquellen durch dezentrale Brennstoffzellen ersetzen, dann tun wir mehr für die Umwelt, als würden wir die Brennstoffzelle anstelle des *Down-sizing* von Pkw einsetzen. Außerdem gibt es viele Maßnahmen, die – auf einen Zeithorizont von 5 Jahren bezogen, da für eine längere

Zeitspanne belastbares Zahlenmaterial fehlt – für die Emissionsminderung im Straßenverkehr wesentlich billiger sind als der Einsatz eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs. Die spezifischen Vorteile des Brennstoffzellen-Fahrzeugs – etwa hinsichtlich der CO₂-Emission gegenüber dem extrem wenig emittierenden Pkw – sind relativ gering, deshalb hat die bekannte Technik Kostenvorteile. Wir werden zukünftig aber ein anderes Problem haben, nämlich die Frage nach der Hauptenergiebasis für eine Volkswirtschaft. Die andere Frage ist, ob man die Energiebasis zuerst im kritischsten Bereich, wo die Substitution außerordentlich teuer ist, nämlich im Verkehrsbereich, ersetzt.

Uwe Thomas, Staatssekretär BMBF:

Zu der Äußerung, „man sollte nicht zuviel regulieren“: Die USA verbrauchen in einer Zeit knapper werdender Energieressourcen doppelt soviel Energie pro Kopf als Deutschland. Da kann man nur sagen, dort müsste dringend intelligent reguliert werden.

Punkt 2: Herr Troge, ich habe Ihre Studie auch gelesen und kann ihr nicht zustimmen. Man kann nicht stationäre gegen mobile Anwendungen der Brennstoffzelle ausspielen. Beide haben eine Perspektive, möglicherweise in unterschiedlichen Zeiträumen und mit unterschiedlichen Bedingungen. Gegen die Anwendung der Brennstoffzelle im mobilen Bereich würde ich nicht unbedingt polemisieren.

Punkt 3: Ich denke, man darf auch mal ein bisschen träumen. Das BMWF tut das mit einigen hundert Millionen im Jahr für Fusionsreaktoren, von denen wir genau wissen, dass diese – wenn überhaupt – erst in rund 50 Jahren Strom erzeugen werden. Solche Visionen, von denen auch die Brennstoffzelle eine ist, sollten wir uns nicht kaputt machen. Es ist sicher, dass die fossilen Energievorräte zur Neige gehen. Die Sonne wird aber auch in 50 Jahren noch scheinen. Deshalb sollte man langfristig durchaus Wasserstoffwirtschaft, Brennstoffzelle und Solarenergie im Zusammenhang diskutieren.

Carl Graf Hohenthal, FAZ:

Herr Prof. Troge, Ihre Studie wurde soeben kritisiert, Sie haben jetzt Gelegenheit, dazu Stellung zu nehmen.

Andreas Troge, Umweltbundesamt:

Ich habe nicht gegen die Brennstoffzelle polemisiert, ich habe nur darauf aufmerksam gemacht, dass es aus Umweltsicht, Herr Thomas, eine gewisse Abfolge gibt. Die Brennstoffzelle kann schmutzigere Anwendungen eher im stationären Bereich verdrängen, als beim Auto. Und wir brauchen ja auch gewisse Erfolgsergebnisse bei der Technikanwendung.

Unsere heute etwa drei Jahre alte Studie hat zwei Fragen gestellt. Erstens: Können Brennstoffzellen-Fahrzeuge in absehbarer Zeit einen nennenswerten Kohlendioxid-Entlastungsbeitrag bringen? Zweitens: Wenn sie es können, ist es die effizienteste Methode, wie wir dies erreichen? Wir haben beide Fragen verneint, ohne damit technologiepolitische Alternativen für die nächsten 50 oder 60 Jahre zu entwerfen. Das ist jetzt kein prinzipielles Verdikt gegen die Brennstoffzelle im Fahrzeug, die Aussage ist nur, dass wir eine gewisse Reihenfolge im Zeitablauf sehen.

Detlef Stolten, FZ Jülich:

Ich möchte einfach noch einmal zu der Alternative, mobile oder stationäre Brennstoffzelle, Stellung nehmen. Wenn man die Historie der letzten Jahre sieht, dann muss man sagen, dass es heute eine Brennstoffzelle im stationären Bereich, wie sie beispielsweise von *Vaillant* betrieben wird, nur aufgrund der Tatsache gibt, dass ihr eine mobile Brennstoffzellenentwicklung vorausging. Mein Plädoyer lautet deshalb, man sollte nicht positive oder negative Anwendungen unterscheiden, sondern sie müssen marktgerecht sein. Die Studie des Umweltbundesamtes hat richtigerweise darauf hingewiesen, dass die Vorteile in der mobilen Anwendung der Brennstoffzelle derzeit noch nicht so groß sind. Allerdings ist mir die Interpretation zu statisch. Ich denke, man sollte mehr dem freien und dynamischen Marktspiel überlassen. Wenn man die Steuerregulierung für die Kraftstoffe richtig macht, dann reguliert der Markt den Rest von selbst.

Ferdinand Panik, DaimlerChrysler:

Ich stimme der Bewertung meines Vorredners voll zu. Es gibt keine Separation zwischen stationären und mobilen Anlagen. Die Chance der Brennstoffzellen-Technologie ist ihre sowohl mobile als auch stationäre Anwendbarkeit, nur gemeinsam wird das Projekt Erfolg haben.

Der zweite Punkt, an dem der falsche Weg vielleicht ganz intensiv aufgezeigt wird, ist das Thema Kosten-Nutzen. Sie sagen, ich könnte CO₂ auch mit einer anderen Technologie zu geringeren Kosten einsparen. Das stimmt. Aber diese Kosten-Nutzen-Überlegung bei einer neuen Technologie ist sehr gefährlich, da deren Potenzial nicht abschätzbar ist. Bei den Werten, die ich Ihnen gegeben habe, haben Sie mir vorgerechnet, dass der heutige Verbrennungsmotor das Verhältnis Kosten-Nutzen günstiger machen kann. Wir können aber eine neue Technologie nicht nur an der Kosten-Nutzen-Elle messen. Jede neue Technologie braucht einen Innovationsschwung, gegen den die etablierte Technik sich wehrt. Auch deshalb haben wir die Entwicklung verschlafen. Das kann nicht allein dem Umweltbundesamt angelastet werden, aber eine Teilschuld liegt auch dort.

Frage aus dem Publikum:

Welcher Brennstoff wird mittelfristig, etwa bis 2010, als Einsatzstoff prognostiziert?

Stefan Ramesohl, Wuppertal-Institut:

Die *Sports-* und *Utility-Vehicles* machen den Autofahrern die meiste Freude, verbrauchen aber bis zu 20 Liter auf 100 km. Halten Sie den Jeep-Commander unter diesen Bedingungen für das geeignete Demonstrationsfahrzeug für die Brennstoffzelle? Gehört die Brennstoffzelle nicht eher in ein Leichtbaufahrzeug?

Joachim Kahlert, VEAG Berlin:

Herr Stolten, Sie hatten davon gesprochen, dass die Entwicklung in den USA vorrangig bei den *Stacks* vorangetrieben worden ist. Deshalb meine Frage: Wie hoch sind die Fördermittel in den USA auch von der staatlichen Seite bei der Entwicklung der Brennstoffzelle gewesen?

Ferdinand Panik, DaimlerChrysler:

Zur Kraftstofffrage: Die Frage nach alternativem Kraftstoff stellt sich im Zusammenhang mit der Brennstoffzelle natürlich besonders intensiv. Der ideale Brennstoff für die Brennstoffzelle ist der Wasserstoff. Die Problematik der Wasserstoffspeicherung und Wasserstoffbetankung kennen Sie. Für uns ist Wasserstoff der favorisierte Treibstoff für die Flottenbetriebe, also in Stadt-

omnibussen, im Shuttle- und Verteilerverkehr, wie sie bereits in Vancouver und Chicago eingesetzt werden. Ein psychologisches Problem ist dabei das Risiko bei einem Unfall, bislang hat sich jedoch glücklicherweise kein derartiger Unfall ereignet.

Für den Individualverkehr setzen wir auf Methanol. Es kann regenerativ aus Abfällen hergestellt werden und ist am besten zu reformieren. Man kann es in einer Direktmethanol-Brennstoffzelle verarbeiten, deshalb hat es großes Potenzial für den Individualverkehr. Methanol ist im Moment für uns der beste Wasserstoffspeicher an Bord eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs.

Über die Frage, ob es richtig ist, den Jeep-Commander als Testfahrzeug zu nehmen oder ob es sinnvoll ist, dass die Leute *Sport-Utilities* und Jeeps kaufen, kann man vortrefflich streiten. Am Anfang hat sich *DaimlerChrysler* auf ein Stadtfahrzeug wie die A-Klasse konzentriert. Bei der Thematik Flottenverbrauch und CO₂-Verbrauch muss man aber auch sehen, dass wir durch den Einsatz der Brennstoffzelle am meisten bewirken bei Fahrzeugen wie dem Commander.

Detlef Stolten, FZ Jülich:

Eine Ergänzung zu den Fördermitteln: In den USA wird zweifellos massiv gefördert, aber eigentlich unterstützt dies nur zwei große Aktivitäten. *Westinghouse*, die mittlerweile von *Siemens* übernommen wurden, wurde beispielsweise für 250 Mio. \$ eine Fabrik aufgebaut, das gleiche gilt für *United Technologies* oder *ONSI*. Andererseits gibt die strukturelle Art der Förderung in den USA genauso viel für militärische Förderung aus wie für zivile. Wir müssen uns auch in Deutschland überlegen, ob wir uns die Scheu vor militärischer Förderung leisten können. Ich glaube, die Synergieeffekte, die es in dem Bereich geben kann, lassen es sinnvoll erscheinen und würden somit militärische Förderung rechtfertigen.

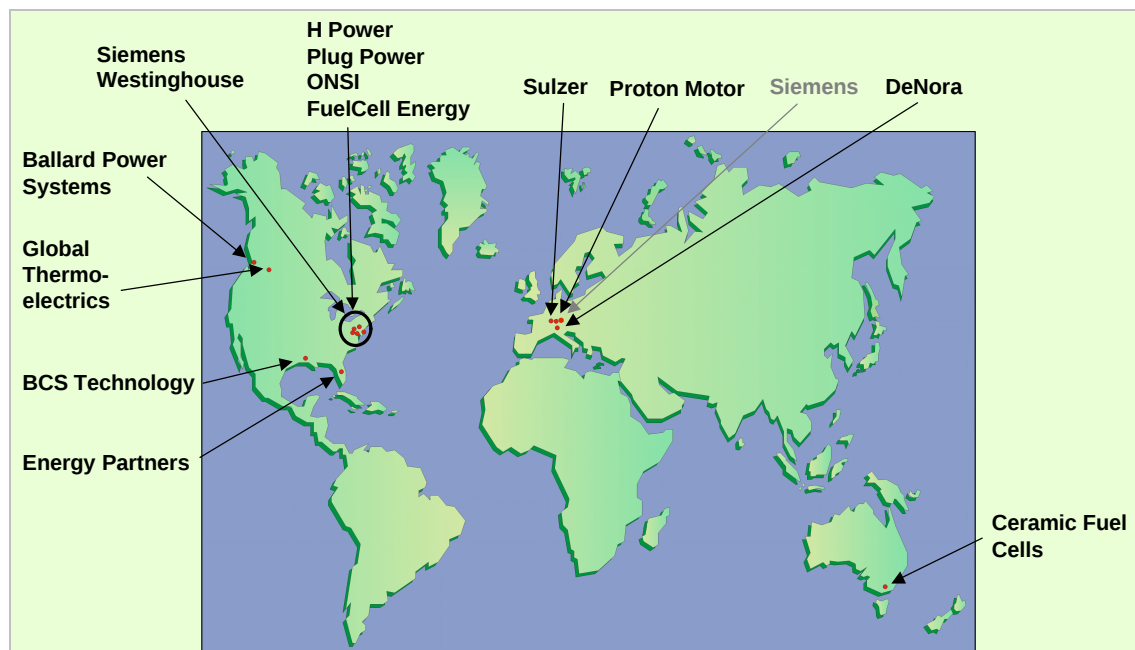
Nehmen wir diese beiden Aspekte zusammen, ist Europa deutlich unterlegen. Betrachten wir es aber im Einzelnen, steht die deutsche Förderung gut da. Es gibt große Institute, den Forschungsverbund Sonnenenergie, große Aktivitäten in Jülich, beim Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffwirtschaft (ZSW) und beim Fraunhofer ISI. Firmen wie *General Motors* sind

nach Deutschland gekommen und betreiben bei Opel Teile der Brennstoffzellen-Forschung.

Wir stehen, was die öffentliche Forschung anbetrifft, relativ gut da. Das Problem liegt zu-
meist im Übertrag der Forschungsergebnisse auf die Wirtschaft, und auch daran, dass offensichtlich in Amerika die kleinen Unternehmen

doch sehr viel bessere Bedingungen vorfinden als bei uns. Bis auf zwei *Stacks*, die ich kenne, nämlich *ONSI* und jetzt *Siemens/Westinghouse*, stammen alle anderen *Stacks* aus kleinen *Start-up*-Unternehmen. In Deutschland und Europa haben wir bislang jedoch nicht das Umfeld, in dem sich kleine Firmen entwickeln und anschließend großes leisten können.

Abb. 1: Stackherstellung weltweit



Quelle: FZ-Jülich

Carl Graf Hohenthal, FAZ:

Die Frage nach der militärischen Förderung würde ich gerne an Herrn Dr. Thomas weiterreichen.

Uwe Thomas, Staatssekretär BMBF:

Ich denke, man sollte keine militärische Förderung machen, wenn man zivile Ziele hat. Einen Punkt möchte ich in diesem Zusammenhang noch einmal ansprechen. Wie Herr Stolten erwähnte, führen wir mit dem Forschungszentrum Jülich und anderen Forschungseinrichtungen eine sehr intensive Diskussion darüber, dass Sie sich erstens Patente sichern und zweitens nach Möglichkeit Unternehmen ausgründen. Aus der Fraunhofer-Gesellschaft sind in den letzten vier Jahren 200 Unternehmen hervor gegangen, auch aus Jülich ergaben sich einige Ausgründungen. Aber das ist noch nicht genug. Es gibt genug *Venture-capital* in Deutschland, mit dem

sich *Start-up*-Unternehmen in Deutschland finanzieren lassen. Das Problem speziell in diesem Bereich ist, dass Sie eine Nische finden müssen, wo ein junges Unternehmen anschließend sein Produkt verkaufen kann. Und ich möchte nochmals unterstreichen: Es wäre wunderbar, wenn die deutsche Kraftwerksindustrie und Stromversorger durch die Möglichkeit aufgerüttelt würden, dass mit einer Brennstoffzellen-Technik die heutigen Leistungen von Blockheizkraftwerken realisiert werden könnten. Das größte Optimierungspotenzial bei CO₂ liegt in der Heizung.

Ulrich Stimming, TU München:

Vorab sei erwähnt, dass die USA einen Großteil der Förderbeträge für Grundlagenforschung ausgegeben und nicht für angewandte Militärforschung. Überdies, Herr Thomas, habe ich speziell vor dem Hintergrund der Klimaschutz-

konferenzen Verständnis für ihre Kritik an den USA, aber dabei sollte man berücksichtigen, dass es eine ganz harte Linie der amerikanischen Bundesregierung gibt, Primärenergie einzusparen.

Herr Troge, wenn das Umweltbundesamt über Brennstoffzellen-Fahrzeuge spricht, wäre meine Erwartung, dass alle Aspekte der Schadstoffemissionen berücksichtigt werden. Wenn Sie über CO₂ reden und den möglichen Vorteil von Brennstoffzellen-Fahrzeugen, stimme ich Ihnen völlig zu, der kann nur gering sein. Dagegen ist das Einsparpotenzial der Emissionen von Stickoxiden, Kohlenwasserstoffen oder Kohlenmonoxid um Größenordnungen günstiger bei Brennstoffzellen-Fahrzeugen. Wenn man gleichzeitig beachtet, dass trotz der Einführung des Katalysators und der damit verbundenen Verringerung der Schadstoffemissionen des einzelnen Fahrzeugs durch den Zuwachs an Fahrzeugen und Kilometerleistung im Grunde eine gleichbleibende Emissionsbelastung vorliegt, ist unverkennbar, dass im Verkehrssektor ein Umweltproblem vorliegt. Hierbei bietet das Brennstoffzellen-Fahrzeug die Chance, im Bereich der limitierten Emission eine deutlich niedrigere Emissionssituation zu erzeugen und ich denke, das Umweltbundesamt sollte Interesse daran haben, dass es entwickelt wird.

Dietrich Naunyn, FB Elektrotechnik, TU Berlin:

Weshalb haben wir die Forschungs-Entwicklung in Deutschland verschlafen? Weil nämlich in den USA die Kraftfahrzeuge eben nicht nur einen hohen Verbrauch haben, sondern man auch versucht, die Emissionen zu senken. Dafür ist die Katalysator-Technik, die in Kalifornien eingeführt wurde, natürlich ein gutes Beispiel, wie auch der *Clean-Air-Act* von Kalifornien, der eigentlich die Debatte um Luftverschmutzung und Klimaschutz erst angestoßen hat. Etwas vergleichbares gab es in Deutschland nicht, wir haben diese Schritte langsam mit eingeführt und ich freue mich, dass jetzt das BMBF, trotz des Umweltbundesamtes, muss man eigentlich sagen, dieses Anliegen wesentlich mehr unterstützt, als das bisher der Fall war.

Klaus Thiessen, WISTA solar, Berlin-Adlershof:

Zu der Gründermentalität von kleinen *Spin-off*-Unternehmen: Herr Thomas hat völlig zu recht

gesagt, dass die Bedingungen zur Ausgründung von kleinen Innovationsfirmen in Deutschland inzwischen bestens sind. Es gibt genügend *Venture-capital*, es gibt genügend Möglichkeiten, es gibt genügend Fördermöglichkeiten, etwa im Innovations- und Gründerzentrum oder im BIG in Berlin-Wedding. Es gibt Hunderte von solchen Zentren in Deutschland, allein in den neuen Bundesländern Dutzende.

Aber die Ausbildung der Mitarbeiter ist mangelhaft. Das liegt daran, dass wir vier verschiedene außeruniversitäre Forschungsorganisationen haben. Die einzige, die wirklich auf Ausgründungen hinarbeitet, ist die Fraunhofer-Gesellschaft. Daneben stehen die Max-Planck-Gesellschaft, die ihrer Tradition folgend „*science for science*“ treibt und mit hervorragenden Ergebnissen in einer „*splendid isolation*“ arbeitet. Ähnlich sieht es bei der Helmholtz-Gesellschaft aus. Diese riesigen Organisationen sind aus meiner Sicht überlebt. Auch in der Leibniz-Gemeinschaft, der ehemaligen Blauen Liste, reden die Leute wie die Blinden von der Farbe, wenn sie von Überführung, Ausgründung oder ähnlichem sprechen.

Wir haben in Adlershof eine wunderbare Ausgründung aus der TU-Berlin, die Firma Alligator Sunshine. Diese ging nicht zufällig aus dem Spur'schen Institut hervor, weil da schon immer applikationsnah und gründungsintensiv gelehrt wurde. Außerdem befindet sich in Adlershof eine Ausgründung aus dem Hahn-Meitner-Institut. Es gibt also Möglichkeiten, wir müssen aber endlich darüber nachdenken, diese zu verbessern. Kein Mensch traut sich, mal dieses heiße Eisen anzufassen, dass wir vier verschiedene außeruniversitäre Organisationen haben. Deswegen ist es in den USA so viel besser, weil die nicht diese Art von Forschungsorganisation haben.

Ferdinand Panik, DaimlerChrysler:

Weil unser Unternehmen sowohl in Deutschland als auch in den USA arbeitet, stellen wir immer wieder den Unterschied fest: Die dortigen *start-up-companies* haben eine andere Mentalität, da gibt es zwei fundamentale Unterschiede, trotz aller Chancen hier. In den USA werden *start-up-companies* stärker wahrgenommen. Außerdem ist die Mitarbeiterstruktur eine andere, nicht nur Forscher, sondern auch Unternehmer kommen dort zusammen. Das ist keine unbeachtete Forschungssecke, sondern es hat ei-

nen hohen gesellschaftlichen Stellenwert, weshalb wirklich talentierte Leute gewonnen werden können. Somit erregen sie Aufmerksamkeit und ziehen damit natürlich auch große Unternehmen an. Wie gesagt, man wird darauf aufmerksam, dann gehen die General Electric zu *Plug-Power*, dann gehen die *DaimlerChrysler* zu *Ballard* und sehen sich das an, oder sie kommen zu den *Global Electrics*. Das ist eine ganz andere Kultur. Das weiß ich auch nicht, wie man das schnell löst, aber das ist ein riesengroßer Unterschied.

Andreas Troge, Umweltbundesamt:

Ich bin von Herrn Stimming gefragt worden, ob das Umweltbundesamt die Schadstoffminderung der Brennstoffzelle nicht mitnehmen wolle? Das würden wir gerne, nur muss man das Gewicht dieses Arguments etwas relativieren. Wir werden bis 2010 die Luftqualitätsziele erreichen, trotz Fahrleistungswachstums. Selbstverständlich gibt es allerdings Anwendungsfelder, etwa in Innenstadtbereichen, wo emissionsfreie Fahrzeuge von Vorteil wären.

Auf das Thema Ozon will ich nicht im Detail eingehen, aber eine Ursache für Sommersmog, leichtflüchtige organische Verbindungen, werden stärker von Lösemittelanwendungen verursacht als von Fahrzeugen. Schon heute sind die Fahrzeuge so sauber, dass, sollte jemand in diesem Saal – nicht wegen der Forschungsförderung, Herr Thomas – Suizidgedanken haben und diese in der Garage mit Abgasen umsetzen zu wollen, viel Zeit mitbringen sollte. So weit sind wir heute, was natürlich nicht bedeutet, dass keine Verbesserungen mehr möglich wären. Die Frage ist nur, wo die Schwerpunkte liegen, denn alles kostet Geld. Und wenn wir an einem Ort die Luftqualitätsziele erreicht haben und ich sage, jetzt müssen wir aber noch mehr tun, wird gefragt warum, denn das Umweltbundesamt hat doch gesagt das reicht. Deshalb werden dann andere ökologische Ziele in den Vordergrund gerückt, diesen Konflikt bitte ich zu beachten.

Uwe Thomas, Staatssekretär BMBF:

Zur Forschungseffizienz: Es ist wahr, dass das amerikanische *Department of Energy* ungefähr vier mal soviel für die Förderung von Brennstoffzellen-Technologie ausgibt, wie Deutschland im nächsten Jahr ausgeben wird, was *per capita* kein übermäßig großer Unterschied ist.

Was mich immer wieder erstaunt ist, wie die deutsche Forschung schlecht geredet wird, obwohl wir auf der anderen Seite in einer ganzen Reihe von Gebieten, und dazu zähle ich inzwischen auch die Biotechnologie und weite Bereiche der Elektronik, mit den Amerikanern gleichgezogen haben. Trotz der geringeren Ausgaben scheint es uns doch nicht ganz so schlecht zu gehen.

Zweite Bemerkung: Was die USA bei aller umweltbezogenen Regulierung leider nie getan haben, ist die Verteuerung der Energie. Bei teurerer Energie könnten sie eben nicht pro Kopf doppelt soviel Energie verbrauchen wie hier in Deutschland. Diese Umstellungen, die wir systematisch hinter uns zu bringen versuchen, in Europa und in Deutschland, sind kapitalintensiv und zeitintensiv. Und wenn die Amerikaner hier nicht bald umdenken, werden wir einen harten Kampf um knappe Ressourcen erleben. Deshalb ist das Ringen um den besten Weg in eine nachhaltige Wohlstandsgesellschaft das zentrale Thema, das zwar die amerikanische Elite längst begriffen hat, aber die Politik nicht umsetzen kann, weil es in Amerika noch kein wirkliches Thema ist. Es ist rücksichtslos, wie die knappen Ressourcen dieser Erde von einem Land, der Supermacht, verbraucht werden. Das müssen wir aussprechen.

Detlef Stolten, FZ Jülich:

Zu dem Thema Großforschungseinrichtungen, Forschungsstruktur und Institute: Ich stimme ihnen nicht zu, dass Großforschungseinrichtungen nur auf die eigenen Ergebnisse schauen und den Kontakt zur Wirtschaft verloren haben. Wir haben heute in der Helmholtz-Gesellschaft einen durchaus beachtlichen Drittmittelanteil gerade in den Instituten, die mit Technik beschäftigt sind. In meinem Institut decken Drittmittel bereits 30% des Etats, und Mitte nächsten Jahres werden wir genauso viel Drittmittelmitarbeiter beschäftigen wie Grundmittelmitarbeiter. Es gibt also durchaus eine intensive Zusammenarbeit mit der Industrie. Des weiteren können wir eine gewisse Erfolgsbilanz aufweisen, dass wir etliche Mitarbeiter in vielfältigen Positionen der Industrie abgesetzt haben. Insofern glaube ich nicht, dass die Bilanz der Großforschung schlecht ist.

TEIL III:

STUDIE

Brennstoffzellen:

Technologiefeld für das 21. Jahrhundert

Rolf **Theenhaus**, Klaus **Bonhoff**

BRENNSTOFFZELLEN: TECHNOLOGIEFELD FÜR DAS 21. JAHRHUNDERT

Studie für die
Friedrich-Ebert-Stiftung
von

Rolf **Theenhaus**, Forschungszentrum Jülich
Klaus **Bonhoff**, Ballard Power Systems¹

Inhalt

1. Einleitung	81
2. Grundlagen	81
2.1 Vorteile	85
3. Anwendungen und Perspektiven	87
3.1 Brennstoffzellen für Fahrzeuge	87
3.2 Brennstoffzellensysteme für die stationäre Energieversorgung	88
3.2.1 Kraftwerke.....	88
3.2.2 Hausenergieversorgung.....	90
3.2.3 Netzferne Anwendungen.....	90
3.3 Tragbare Brennstoffzellensysteme.....	91
3.4 Nischenmärkte	91
3.4.1 Brennstoffzellen in der Raumfahrt	91
3.4.2 Brennstoffzellen in U-Booten.....	92
4. Forschungs- und Entwicklungsbedarf	92

¹ Zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie war Dr. Bonhoff noch wissenschaftlicher Mitarbeiter des Forschungszentrums Jülich.

1. Einleitung

Die sichere und verlässliche Bereitstellung und Nutzung von Energie ist eine der Säulen unseres Wohlstands. Mobilität (Verfügbarkeit von Treibstoff) und die Versorgung mit Strom und Wärme sind sowohl für die Befriedigung der individuellen Bedürfnisse als auch für handwerkliche und industrielle Prozesse unabdingbar.

Weltweit führt die rasch wachsende Bevölkerung einerseits und die zunehmende Industrialisierung bzw. die Anpassung der Entwicklungsländer an die energieintensiven Gewohnheiten der führenden Industrienationen andererseits zu einem rapiden Anstieg des Weltenergieverbrauchs. In Deutschland führt die volkswirtschaftliche Marktentwicklung in den nächsten Jahrzehnten zu einem wachsenden Anteil des Stromverbrauchs am insgesamt nahezu stagnierenden Endenergieverbrauch.

Diesen absehbaren Entwicklungen stehen die Notwendigkeiten gegenüber, angesichts der Endlichkeit der fossilen Ressourcen und der globalen Auswirkungen der durch ihre Nutzung verursachten Luftschadstoffe auf das Klima,

- fossile Energieträger so effizient wie möglich zu nutzen und ihre Inanspruchnahme bis zum Übergang in ein neues Energiezeitalter schrittweise zu reduzieren,
- den Ausbau erneuerbarer Energien zu beschleunigen und
- die bereitgestellte Energie in allen Bereichen (Industrie, Kleinverbraucher, Haushalt und Verkehr) sparsam und effizient zu nutzen.

Das langfristige Ziel muss es sein, den globalen Energiebedarf aus emissionsfreien oder regenerativen Energiequellen zu decken. Die Brennstoffzelle kann vor diesem Hintergrund eine zentrale Komponente in zukünftigen Verkehrssystemen und Energieversorgungskonzepten werden.

Die Entdeckung des Prinzips der Brennstoffzelle ist eng verknüpft mit dem aufkommenden Interesse der Wissenschaften an der Elektrochemie, der Entwicklung der Thermodynamik und schließlich der Stromerzeugung im 18. Jahrhundert. William Robert Grove erzeugte 1839 erstmals Strom mit einer Brennstoffzelle, die mit

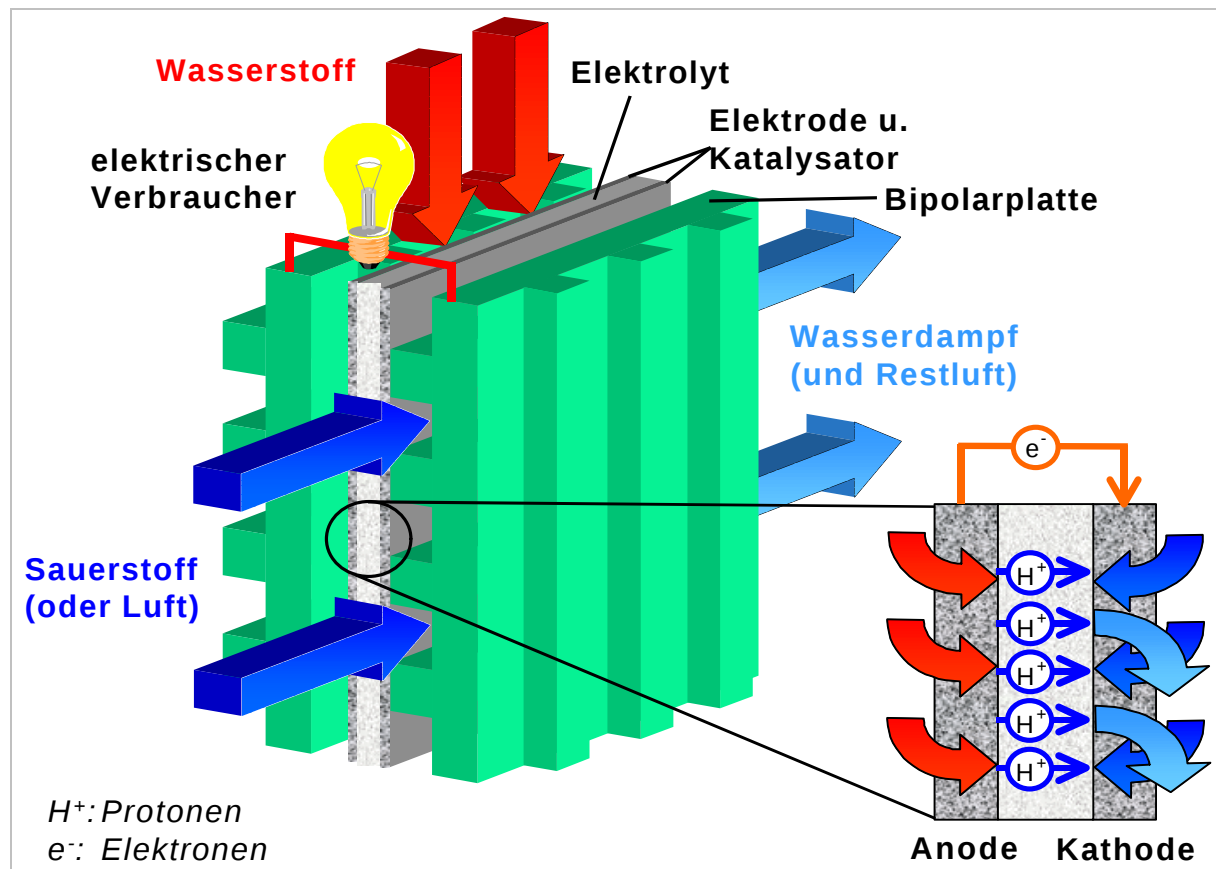
Wasserstoff und Sauerstoff versorgt wurde. Trotz der Weiterentwicklung des Grundlagenverständnisses in den darauf folgenden Jahrzehnten gelang in der Folge allerdings keine technische Umsetzung. Erst mit der Entwicklung von Energieversorgungseinheiten für die Raumfahrt kam, von den USA ausgehend, gegen Ende der 50er Jahre dieses Jahrhunderts neues Interesse auf, das in der Entwicklung der alkalischen Brennstoffzelle seine Realisierung fand. Sie wird noch heute für die Energieversorgung der *Space Shuttle* eingesetzt. Die Verfügbarkeit neuer Werkstoffe und neuer Prozesstechniken führte dann in den vergangenen Jahren zu wesentlichen Fortschritten in der Entwicklung neuer Brennstoffzellentypen und zu der Ausweitung auf andere Energieträger. Neben Wasserstoff sind heute auch gasförmige und flüssige kohlenstoffhaltige Energieträger wie Benzin, Erdgas, Methanol oder Biogas in Brennstoffzellensystemen grundsätzlich einsetzbar. Die Erzeugung von Strom und Wärme in Brennstoffzellen erscheint heute in Antriebssystemen für Fahrzeuge, in dezentralen oder zentralen stationären Energieversorgungseinheiten oder in tragbaren Systemen nutzbar.

Die Brennstoffzelle ist eine Schlüsseltechnologie der Zukunft, die eine effiziente und emissionsfreie Energienutzung ermöglicht. In dieser Studie werden die Grundlagen und die Merkmale von Brennstoffzellensystemen sowie ihre heute diskutierten bzw. demonstrierten Anwendungen dargestellt. Die Frage nach der Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit der Systeme führt zu einer Betrachtung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs. Angesichts der Vorteile und der vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten von Brennstoffzellen haben diese Systeme das Potential, den Energiesektor weitreichend zu verändern; mögliche Veränderungen werden dargestellt. Darüber hinaus wird auf die volkswirtschaftliche Relevanz der Entwicklung und Nutzung von Brennstoffzellensystemen eingegangen.

2. Grundlagen

Eine Brennstoffzelle wandelt die in chemischen Energieträgern gespeicherte Energie direkt in elektrische Energie um. Der prinzipielle Aufbau einer Brennstoffzelle ist in Abb. 1 dargestellt.

Abb. 1: Aufbau einer Brennstoffzelle



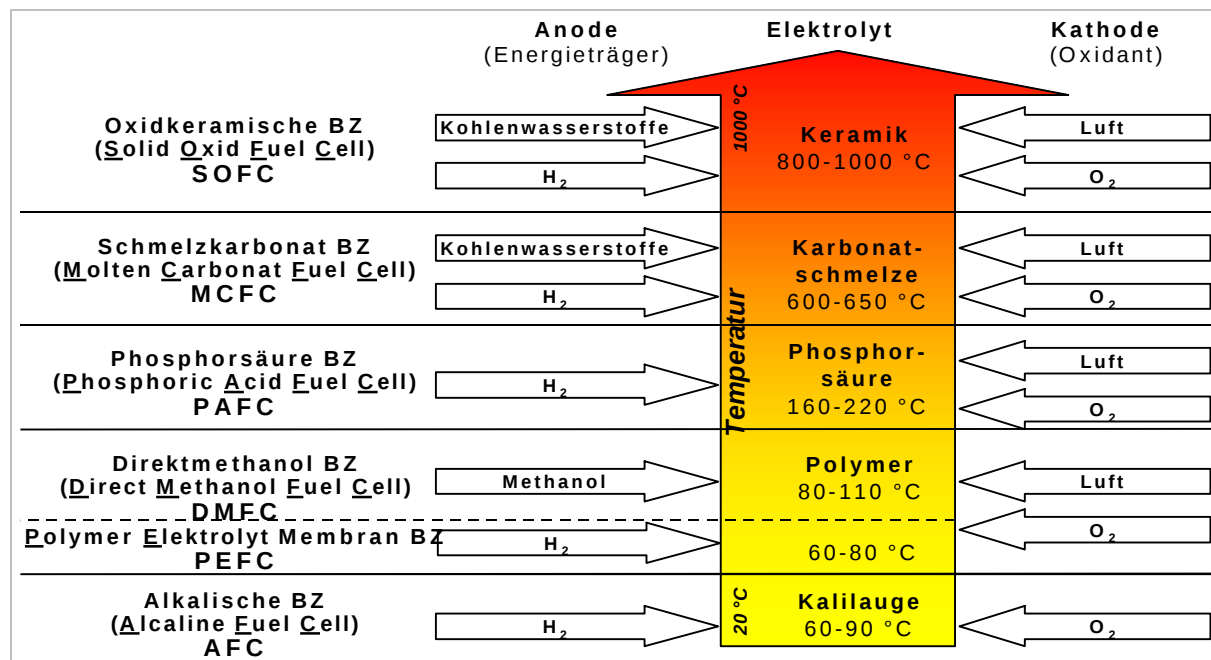
An der Anode wird der Energieträger (in Abb. 1 der Wasserstoff) und an der Kathode der für die elektrochemische Umsetzung notwendige Sauerstoff zugeführt. Die beiden mit Katalysatormaterial beschichteten Elektroden sind durch eine gasdichte Membran, den Elektrolyten, voneinander getrennt. An der Anode dissoziieren die Wasserstoffmoleküle. Die frei werdenden Elektronen werden über einen äußeren Verbraucher geleitet und können dort elektrische Arbeit verrichten – es wird Strom produziert. Die Wasserstoff-Protonen werden durch die für sie durchlässige Membran zur Kathode transportiert. Dort reagieren die Wasserstoff-Protonen mit dem vorhandenen Sauerstoff und den vom elektrischen Verbraucher kommenden Elektronen zu Wasser. Der Teil des Energieinhaltes des Energieträgers, der nicht als elektrische Energie genutzt werden kann, wird als Wärme frei.

Zur Steigerung der Gesamtspannung bzw. der Leistung einer Brennstoffzelle werden Einzelzel-

len zu *Stacks* zusammengefügt, die durch bipolare Platten miteinander verbunden sind (Abb. 1). Hierbei gilt es, eine ausreichende und passende Gasversorgung, eine hohe elektrische Leitfähigkeit der Elektroden und der die Zellen miteinander verbindenden bipolaren Platten sowie die Wärmeabfuhr aus den Zellen zu gewährleisten.

Das Prinzip einer Brennstoffzelle, deren Elektrolyt aus einem Polymer besteht, ist in Abb. 1 exemplarisch dargestellt. Neben Polymeren gibt es weitere Materialien, die als Elektrolyt verwendet werden können. Abb. 2 zeigt weitere bisher realisierte Brennstoffzellensysteme (engl. Brennstoffzelle: *Fuel Cell*; AFC, PEFC, DMFC, PAFC, MCFC, SOFC). Die Grundfunktionen der Trennschicht zwischen der Anode und der Kathode sind in allen Systemen die selben: Trennung der Reaktionsprodukte einerseits und Durchlässigkeit für die an der jeweiligen Reaktion beteiligten geladenen Teilchen andererseits.

Abb. 2: Brennstoffzellentypen



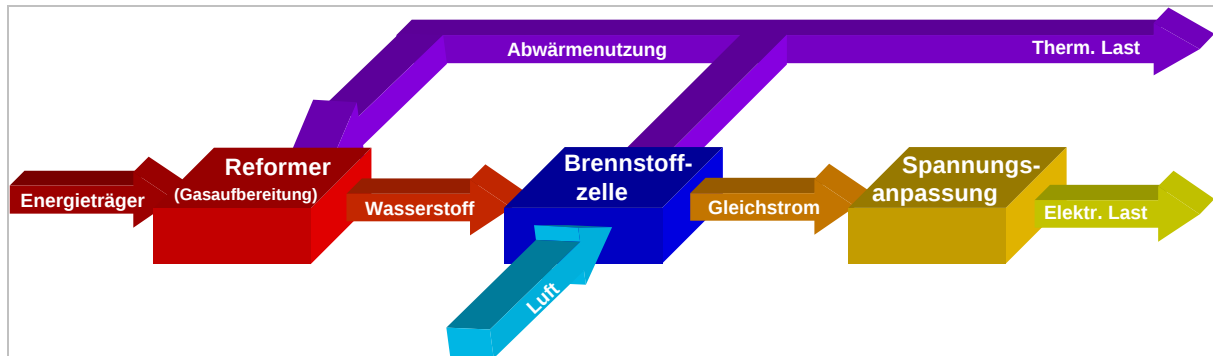
Während die Elektrolyte auf Polymerbasis (PEFC, DMFC) und auf keramischer Basis (SOFC) fest sind, haben die alkalische (AFC), die phosphorsäure (PAFC) und die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC) bei Betriebstemperatur flüssige Elektrolyte. Die unterschiedlichen Betriebstemperaturen folgen aus dem unterschiedlichen Leitfähigkeitsverhalten der Materialien. Man unterscheidet zwischen den Niedertemperaturbrennstoffzellen (AFC, PEFC, DMFC), die bis etwa 100 °C betrieben werden, der Mitteltemperaturbrennstoffzelle (PAFC), die eine Betriebstemperatur um 200 °C hat und den Hochtemperaturbrennstoffzellen (MCFC, SOFC), deren Betriebstemperatur über 650 °C liegt.

Die Betriebstemperatur wirkt sich in zweierlei Hinsicht auf Brennstoffzellensysteme aus. Einerseits verringert sich mit steigender Temperatur die Gefahr der Vergiftung des Katalysators an der Anode. So muss z.B. bei den Niedertempe-

raturesystemen das aus der Wasserstoff-Herstellung aus fossilen Energieträgern stammende Kohlenmonoxid (CO) fast vollständig entfernt werden, während bei den Hochtemperaturesystemen neben Wasserstoff auch Kohlenwasserstoffe zugeführt werden können, die dann direkt in der Zelle umgesetzt werden. Andererseits steigen die Belastungen der Komponentenwerkstoffe eines Brennstoffzellensystems mit steigender Temperatur.

Die aufgrund der vorhandenen Infrastruktur heute wirtschaftlich verfügbaren Energieträger Kohle, Gas und Öl werden zur Deckung des weltweiten Energiebedarfs auch in den kommenden Jahrzehnten die wesentlichen Energieträger sein. Damit Brennstoffzellensysteme mit diesen fossilen Energieträgern versorgt werden können, sind neben dem eigentlichen Brennstoffzellenstack weitere Komponenten notwendig.

Abb. 3: Basiskomponenten eines Brennstoffzellensystems für kohlenstoffhaltige Energieträger



Ein allgemeines Schema eines kompletten Brennstoffzellensystems ist in Abb. 3 dargestellt. Kohlenstoffhaltige Energieträger (Benzin, Diesel, Methanol, Erdgas...) werden in einem sogenannten Reformer in ein wasserstoffreiches Synthesegas umgewandelt. Nach weiterer Gasnachbehandlung und -reinigung wird der so gewonnene Wasserstoff der Brennstoffzelle zur Stromerzeugung zugeführt. Der in der Brennstoffzelle erzeugte Gleichstrom muss dann der elektrischen Last angepasst werden. Die Abwärme wird zum Teil im Prozess selber genutzt oder als Nutzwärme ausgekoppelt. Die Komplexität des Gesamtsystems ergibt sich aus der jeweiligen Anwendung und den damit verbundenen Rahmenbedingungen (s. Abb. 4). Es ist im Einzelfall zu entscheiden, welcher Reformer eingesetzt wird, welche Qualität der Wasserstoff haben muss oder in welcher Form die Nutzenergien Strom und Wärme aufbereitet werden müssen.

schen Last angepasst werden. Die Abwärme wird zum Teil im Prozess selber genutzt oder als Nutzwärme ausgekoppelt. Die Komplexität des Gesamtsystems ergibt sich aus der jeweiligen Anwendung und den damit verbundenen Rahmenbedingungen (s. Abb. 4). Es ist im Einzelfall zu entscheiden, welcher Reformer eingesetzt wird, welche Qualität der Wasserstoff haben muss oder in welcher Form die Nutzenergien Strom und Wärme aufbereitet werden müssen.

Abb. 4: Einfluss der Anwendung auf die Komplexität des Brennstoffzellensystems



2.1 Vorteile

Den **elektrische Wirkungsgrad**¹ von Brennstoffzellensystemen pauschal anzugeben, ist aufgrund der sehr unterschiedlichen Anwendungen und der damit verbundenen Komplexität der Systeme kaum möglich. Er liegt in der Praxis über einen weiten Lastbereich des Systems (bei etwa 50% Teillast bis in den Volllastbereich) bei über 40%. Insbesondere für die Anwendung als Fahrzeugantrieb ist der hohe elektrische Wirkungsgrad über einen weiten Lastbereich ein Vorteil gegenüber Otto- und Dieselmotoren, da im Fahrzeug während der Fahrt der gesamte Leistungsbereich inklusive des Teillastbereichs, in dem der Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren sehr klein ist, benötigt wird.

Stationäre Anlagen können dagegen kontinuierlich im optimalen Auslegungspunkt betrieben werden. Für die keramischen Hochtemperaturbrennstoffzellensysteme (SOFC) werden heute in Verbindung mit einer konventionellen Gasturbine elektrische Wirkungsgrade von 70% prognostiziert. Der hohe elektrische Wirkungsgrad und somit die sparsame Verwendung der eingesetzten Energieträger bedeutet in zweierlei Hinsicht einen Vorteil: einerseits leisten Brennstoffzellen einen Beitrag zu der notwendigen Ressourcenschonung, andererseits weisen sie geringe Kohlendioxidemissionen auf.

Wird die Brennstoffzelle mit z.B. solar erzeugtem Wasserstoff versorgt, entsteht bei der Umwandlung in Strom und Wärme nur Wasser. Dieses System ist vollkommen emissionsfrei. Wird jedoch der Wasserstoff aus fossilen Energieträgern erzeugt, müssen in diesem Prozess freigesetzte Schadstoffemissionen bei der Nutzung von Brennstoffzellensystemen berücksichtigt werden. In der Regel erfolgt die Umwandlung des kohlenstoffhaltigen Energieträgers in Wasserstoff direkt vor Ort in einer vorgeschalteten Gasaufbereitung. Der Vergleich der **limitierten Emissionen** (Stickoxide, Kohlenmonoxid, Staub, ...), die bei einem Verbrennungskraftprozess frei werden, mit denen, die solche Brennstoffzellensysteme aufweisen, zeigt deutliche Vorteile für die Brennstoffzellensysteme (s. Abb. 5 und 6). Dies gilt sowohl für die heute bereits

kommerziell käufliche stationäre erdgasbetriebene PAFC-Anlage (Abb. 5) als auch für den im Labor getesteten Brennstoffzellenantrieb für Fahrzeuge mit Methanolreformer (Abb. 6). In beiden Fällen liegen die limitierten Emissionen sehr deutlich unter denen konventioneller Techniken.

Neben Strom wird bei der Umwandlung in der Brennstoffzelle auch Wärme produziert. Die Abwärme der Niedertemperatur- und der Mitteltemperatursysteme (PEFC $\leq 80^\circ\text{C}$, PAFC $\leq 170^\circ\text{C}$) bietet sich z.B. für die Nahwärmenutzung in Gebäuden an. Die hohen Temperaturen der MCFC ($\leq 650^\circ\text{C}$) oder der SOFC ($\leq 950^\circ\text{C}$) bieten die Möglichkeit der Fernwärmenutzung bzw. der Nutzung in industriellen Prozessen. Aus der Nutzung sowohl der elektrischen als auch der thermischen Energie ergibt sich ein **hoher Gesamtnutzungsgrad**² bezogen auf den eingesetzten Brennstoff von bis zu 90%.

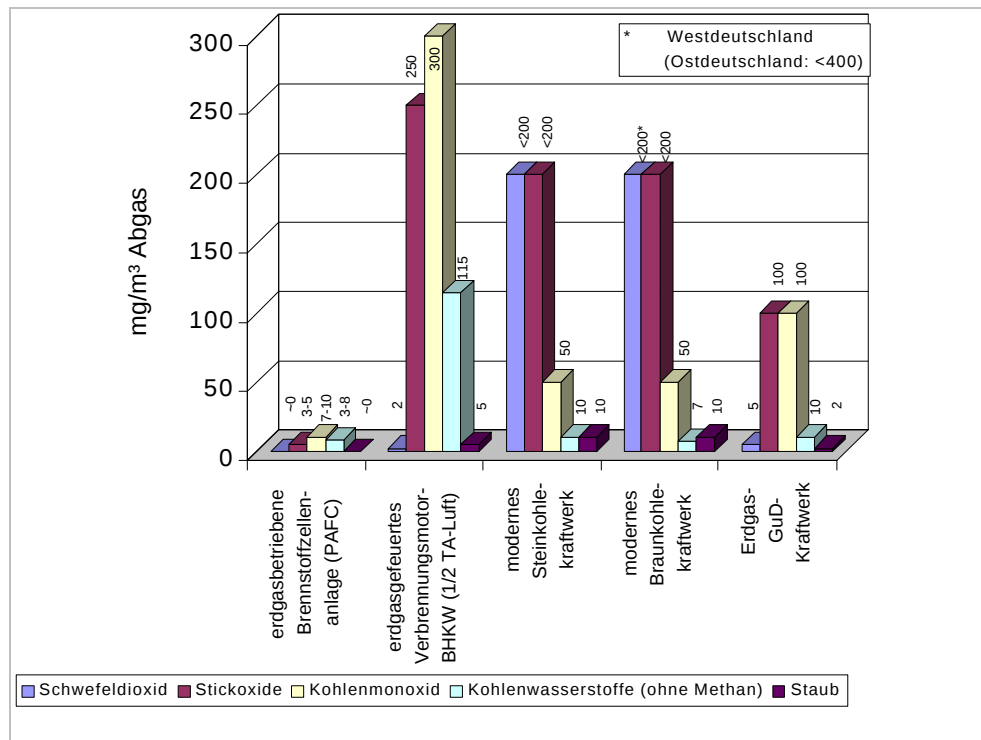
Mit Hilfe entsprechender Reformertechnologien sind neben **Wasserstoff** eine Reihe **kohlenstoffhaltiger Energieträger** in Brennstoffzellensystemen einsetzbar. Dies gilt sowohl für die heute weit verbreiteten Energieträger Benzin, Diesel und Erdgas als auch für zukünftige Energieträger wie zum Beispiel Methanol oder Energieträger, die aus Biomasse gewonnen werden. Die Brennstoffzelle stellt damit eine Technologie dar, die bereits heute im Rahmen der bestehenden Infrastruktur grundsätzlich eingesetzt werden kann, die aber auch eine Brücke zu zukünftigen regenerativen Energiesystemen schlagen kann.

Die elektrochemische Umwandlung des Energieträgers in Brennstoffzellen ist ein **geräuschloser** Prozess. In der Zelle sind keine beweglichen Teile; somit ist die Brennstoffzelle **vibrationsfrei**.

1 Der elektrische Wirkungsgrad gibt an, welcher Anteil der im Energieträger chemisch gespeicherten Energie in elektrische Energie umgewandelt wird.

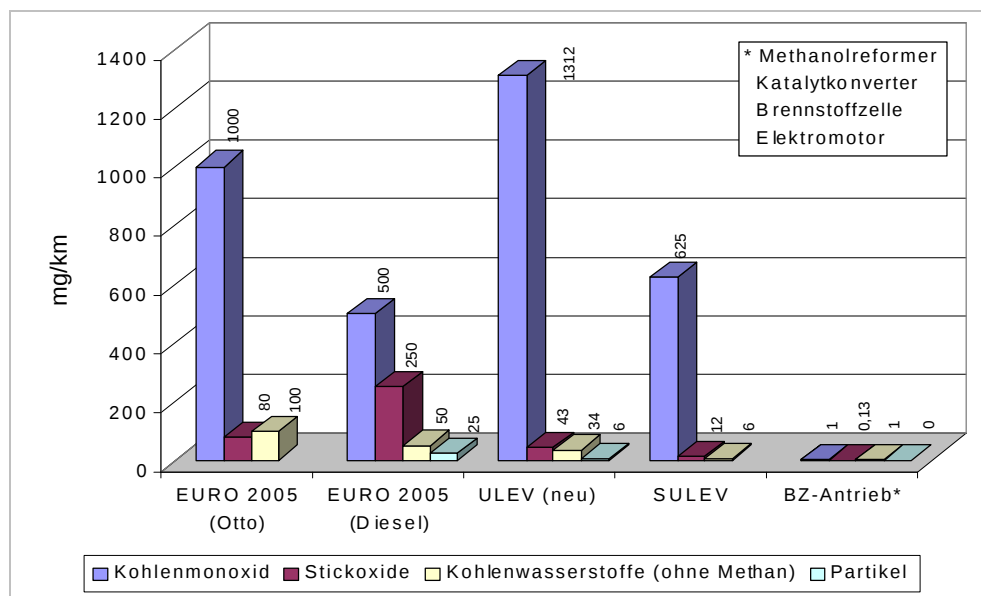
2 Der Gesamtnutzungsgrad gibt an, welcher Anteil der im Energieträger chemisch gebundenen Energie in Nutzenergie (Strom und Wärme) umgewandelt wird.

Abb. 5: Spezifische limitierte Luftschadstoffemissionen verschiedener stationärer Elektrizitätserzeugungstechniken



Quelle: VDEW

Abb. 6: Vergleich der spezifischen limitierten Emissionen für den PKW-Antrieb



Abgasnormen: EURO 2005
ULEV (Ultra Low Emission Vehicle, USA)
SULEV (Super Ultra Low Emission Vehicle, USA)

Quelle: Forschungszentrum Jülich

Die Leistung der Brennstoffzelle bestimmt sich aus ihrer aktiven Zellfläche. Durch die Anpassung der Zellgröße und die Anzahl der Zellen, die zu einem *Stack* verschaltet werden, decken Brennstoffzellen ein **weites Leistungsspektrum** von wenigen Watt (Batterieersatz) bis zu einigen Megawatt (Kraftwerke) elektrischer Leistung ab. Sie sind somit in vielen Anwendungen einsetzbar.

3. Anwendungen und Perspektiven

3.1 Brennstoffzellen für Fahrzeuge

Die heute in der Öffentlichkeit am häufigsten diskutierte Nutzung von Brennstoffzellen ist der **Pkw-Antrieb**. Ausgehend von einem flüssigen Energieträger, wie z.B. Methanol, wird in einer Gasaufbereitung ausreichend reiner Wasserstoff erzeugt, der der Brennstoffzelle zugeführt wird. Die hier erzeugte elektrische Energie versorgt einen Elektromotor, der seinerseits mechanische Energie an den Antriebsrädern zur Verfügung stellt. Die Motivation für den Einsatz der Brennstoffzelle in Fahrzeugen ist die fast vollständige Emissionsfreiheit bezüglich der limitierten Emissionen. Der spezifische Energieverbrauch heutiger Brennstoffzellen unter Berücksichtigung der vorgelagerten Kraftstoffkette – und damit die Kohlendioxidemissionen – sind heute bereits vergleichbar mit konventionellen Diesel- oder Ottomotoren. Darüber hinaus existiert ein großes Potential, weniger oder keine Kohlendioxidemissionen zu verursachen. Weiterhin wird die Lärmentwicklung von Fahrzeugen im Innenstadtbereich zunehmend als Umweltbelastung erkannt, die bei geringen Geschwindigkeiten durch Elektrofahrzeuge auch mit Brennstoffzellenantrieb deutlich gemindert wird.

Die Nutzung der Brennstoffzelle im Fahrzeugantrieb stellt anspruchsvolle Anforderungen an das System. Um konkurrenzfähig zu sein, dürfen die Systemkosten inklusive Gasaufbereitung, Elektromotor und *Powermanagement* nicht mehr als etwa 100 DM/kW betragen. Die bis heute erreichten Kosten liegen um etwa zwei Größenordnungen höher. Dabei muss dem begrenzten Platzangebot durch ein geringes Leistungsvolumen und ein geringes Leistungsgewicht bei hoher mechanischer Stabilität Rechnung getragen werden. Zur Akzeptanz durch den Kunden gehört darüber hinaus eine ausreichend gute Dy-

namik des Gesamtsystems. Nur wenn die Fahreigenschaften und die Fahrleistungen denen verbrennungsmotorischer Antriebskonzepte gleichen, haben Brennstoffzellen eine Chance, gegen diese zu bestehen.

Weltweit wird für den Einsatz im Pkw die Polymer-Brennstoffzelle (**PEFC**) favorisiert. Dieser im Grundsatz konstruktiv einfache Zelltyp bietet eine gute Chance, durch Massenfertigungsverfahren (Folienherstellung) die notwendige Kostenreduktion zu erreichen. Seine geringe Betriebstemperatur von etwa 80°C stellt keine besonderen Anforderungen an die verwendeten Konstruktionswerkstoffe. Die hohen Anforderungen an die Qualität des verwendeten Wasserstoffs bedingen jedoch eine aufwändige Gasaufbereitung, die derzeit einen großen Anteil an den Kosten und am Platzbedarf ausmacht. Der heute favorisierte Energieträger ist das im Vergleich zu Benzin oder Diesel kohlenstoffarme Methanol, welches verhältnismäßig einfach reformiert werden kann. Aber auch Reformer für Benzin und Diesel werden entwickelt, vor allem um die bestehende Infrastruktur (Tankstellennetz) nutzen zu können.

Im Sinne einer verfahrenstechnischen Vereinfachung (Kostenreduktion) sowie einer Verbesserung der Dynamik des Gesamtsystems ist der Verzicht auf die externe Reformierung wünschenswert. Der Ansatz, Methanol direkt der Anode einer Polymer-Brennstoffzelle zuzuführen, wird derzeit weltweit in Forschungseinrichtungen intensiv untersucht. Probleme liefert bei dieser Direct Methanol Fuel Cell (**DMFC**) neben der Vergiftung des Katalysators vor allem die Tatsache, dass die Polymermembran durchlässig für Methanol ist. Dies führt zu einer Beeinträchtigung der Reaktion an der Kathode und zu einem hohen Brennstoffverbrauch. Beides bedingt einen deutlichen Wirkungsgradverlust.

Nahezu alle großen Automobilkonzerne unternehmen derzeit große Anstrengungen, um in den nächsten Jahren einen mit Brennstoffzellen angetriebenen Pkw auf den Markt zu bringen. Einige der international agierenden Firmen haben die Zentrale ihrer Forschungsaktivitäten in Deutschland aufgebaut: so hat *DaimlerChrysler* in Nabern das Projekthaus Brennstoffzelle gegründet, *General Motors* bei der *Adam Opel AG* in Rüsselsheim das *Global Alternative Propulsion*

Centre aufgebaut, die Volkswagen AG arbeitet an diesem Thema, und Ford hat in Aachen ein neues Forschungszentrum eröffnet, in dem u.a. die Brennstoffzellentechnologie für Elektrofahrzeuge weiterentwickelt wird.

Den Aussagen der Automobilindustrie zufolge werden die technischen Probleme in den nächsten Jahren soweit gelöst sein, dass noch in diesem Jahrzehnt erste durch Brennstoffzellen getriebene Fahrzeuge in Serie gebaut werden. Sollten diese Systeme technisch und wirtschaftlich konkurrenzfähig sein und sich am Markt behaupten, könnte in Zukunft ein bedeutender Teil der Pkw-Zulassungen auf Brennstoffzellenfahrzeuge entfallen. In der Folge würden die verkehrsbedingten Emissionen deutlich reduziert werden.

Der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger in Brennstoffzellenfahrzeugen wird heute bei **Flottenfahrzeugen**, wie z.B. Bussen, demonstriert. Durch die zentrale Betankung ist in diesem Fall der Aufbau einer lokalen Wasserstoffinfrastruktur denkbar. Darüber hinaus liegen die täglichen Fahrleistungen der Flottenfahrzeuge im Bereich weniger 100 km, so dass verfügbare Wasserstoffspeicherverfahren (Druckspeicher, Flüssigwasserstoff-Speicher) ausreichende Reichweiten gewähren. Berücksichtigt man für die Kohlendioxidbilanz die Bereitstellung des Wasserstoffs aus kohlenstoffhaltigen Energieträgern, stellt diese Anwendung bezogen auf die gesamten Kohlendioxidemissionen heute noch keinen Vorteil dar. Aber der damit lokal vollkommen emissionsfreie Betrieb ist in Ballungsräumen ein erheblicher Vorteil gegenüber verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen (Mikroklima). Neben Straßenfahrzeugen wird auch über den Einsatz von Brennstoffzellen im Schienenverkehr und in der Schifffahrt nachgedacht.

Alternativ zu der Bereitstellung der gesamten notwendigen Leistung durch Brennstoffzellen für den Antrieb des Fahrzeugs werden in **Hybrid-Konzepten** Brennstoffzellen mit Leistungsbatterien gekoppelt. Hierbei wird die Spitzenleistung mit der Batterie abgedeckt, während die Brennstoffzelle als Ladeinheit für die Batterie kontinuierlich betrieben wird. Mit diesem Konzept kann einerseits die Reichweite des Fahrzeugs im Vergleich zu einem reinen batteriebetriebenen Fahrzeug vergrößert werden, auf der anderen Seite hat man nach wie vor den Nachteil des hohen Gewichts durch die große Batte-

rie und damit verbunden einen hohen Energieverbrauch.

Neben der Anwendung der Brennstoffzelle für den Antrieb wird die Möglichkeit der Versorgung des Bordnetzes mit Brennstoffzellen diskutiert. BMW stellte vor kurzem sein Konzept für eine solche **Auxiliary Power Unit (APU)** vor. Da der elektrische Verbrauch im Pkw ständig zunimmt, und um die Hilfsaggregate auch im Stillstand betreiben zu können, soll eine Brennstoffzelle die elektrische Versorgung hierfür übernehmen. Mit diesem System könnte mehr elektrische Energie im Fahrzeug verfügbar sein, die zu einer Komforterhöhung für die Insassen führt.

Perspektiven

- Der Einsatz von Brennstoffzellen in Fahrzeugen führt zu einer deutlichen Reduktion der verkehrsbedingten Schadstoffemissionen. Insbesondere in Innenstadtbereichen können lokal emissionsfreie wasserstoffgetriebene Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb (Taxis, Busse, Transporter, ...) eingesetzt werden. Dies führt zu einer deutlichen Verbesserung der Luftqualität.
- Im Ballungszentren leisten Brennstoffzellenfahrzeuge einen Beitrag zur Verminderung der Lärmbelästigung durch den Verkehr.

3.2 Brennstoffzellensysteme für die stationäre Energieversorgung

3.2.1 Kraftwerke

Der Einsatz von Brennstoffzellen reicht von dezentralen Blockheizkraftwerken zur autonomen Strom- und Wärmeversorgung von Siedlungen, Krankenhäusern o.ä., über Kraftwerke der Industrie an Produktionsstandorten, die darüber hinaus Prozesswärme bereitstellen, bis hin zu Kraftwerken der Energieversorgungsunternehmen, die die öffentliche Grund-, Mittel- und Spitzenlast abdecken. Ein großer Vorteil ist der modulare Aufbau der Brennstoffzellenstacks und damit die Möglichkeit, die Leistung sehr flexibel anzupassen. Durch die Zunahme des Verbrauchs von Erdgas in den vergangenen Jahren steht darüber hinaus für die stationäre Energieversorgung eine Infrastruktur für einen kohlenstoffarmen Energieträger zur Verfügung, die gut geeignet ist, Brennstoffzellen zu versorgen.

Eines der Hauptkriterien, das eine Anlage in der stationären Energieversorgung erfüllen muss, ist eine hohe Lebensdauer bzw. eine möglichst geringe Alterung des Systems. Darüber hinaus muss – abhängig von der Anwendung (Grundlast oder Spitzenlast) – das An- und Abfahren der Anlagen genügend schnell und ohne zu große Materialermüdung erfolgen können.

Die einzige Brennstoffzellenanlage für die stationäre Energieversorgung, die heute kommerziell verfügbar ist, ist eine 200 kW **PAFC**-Anlage der amerikanischen Firma *ONSI*, die als Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage betrieben wird. Mehr als 160 Demonstrationsanwendungen weltweit demonstrieren, dass mit dieser Technologie Strom und Wärme wartungsarm und verlässlich bereitgestellt werden können. Die gemessenen elektrischen Wirkungsgrade liegen über 40%, der Gesamtnutzungsgrad über 80%. Die phosphorsaure Brennstoffzelle eignet sich nur für einen kontinuierlichen Betrieb, da der bei Betriebstemperatur flüssige Elektrolyt beim Abkühlen erstarrt. Das gesamte System muss beim Herunterfahren der Anlage mit Stickstoff gespült werden.

Ein gegenüber der PAFC einfacheres Zyklieverhalten und höhere Kostenreduktionspotentiale werden von den Brennstoffzellentypen mit festem Elektrolyten (**PEFC**, **SOFC**) erwartet. Ein Konsortium der kanadischen Firma *Ballard Power Systems*, die der weltweit führende Hersteller von **PEFC**-Brennstoffzellen ist, und dem internationalen Konzern *ALSTOM* baut in Dresden eine Fertigung für 250 kW **PEFC**-Systeme für die Anwendung als Blockheizkraftwerk auf. Die drastischen Kostenreduktionen, die für die mobile Anwendung notwendig sind, sollen auch für die stationäre Anwendung genutzt werden, um Anlagen wirtschaftlich betreiben zu können.

Keramische **SOFC**-Systeme versprechen gegenüber den Niedertemperatursystemen Vorteile hinsichtlich der geringen Anfälligkeit gegenüber Verunreinigungen im Brenngas, womit als Folge eine breite Palette an Energieträgern in Frage kommt. Durch die hohe Temperatur der Abwärme von bis zu 900°C bietet die **SOFC** einen weiteren Vorteil gegenüber der **PEFC** (Fernwärme, Prozesswärme). Besonders hohe elektrische Wirkungsgrade von über 70% sollen durch die Kopplung mit Gasturbinen erreicht werden.

Bei der **SOFC** werden zwei konstruktiv unterschiedliche Konzepte verfolgt. Die röhrenför-

migen Zellen (tubulares Konzept) der *Siemens Westinghouse Power Cooperation* (**SWPC**) wurden seit Jahrzehnten in den USA durch das *Department of Energy* (**DoE**) gefördert. Sie weisen einen hohen technischen Entwicklungsstand auf, was in einer ersten 100 kW-Demonstrationsanlage in den Niederlanden gezeigt wird. Druckbetriebene Anlagen mit einer elektrischen Leistung von 300 kW bzw. 1 MW, mit denen die Kopplung mit einer Gasturbine zur Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads demonstriert werden soll, stellen den nächsten Entwicklungsschritt dar.

Prinzipiell einfachere und kostengünstigere Herstellungsverfahren versprechen ebene Zellkonstruktionen (planares Konzept). Mit ihnen lassen sich kompaktere Bauformen realisieren, die höhere Leistungsdichten erwarten lassen. Ein weiteres Entwicklungsziel ist die Absenkung der Betriebstemperatur auf unter 800°C, um für die Komponenten kostengünstigere Materialien verwenden zu können. Der Entwicklungsstand dieser Zellen, die bis zum Erwerb von *Westinghouse* durch *Siemens* im Bereich der Energieerzeugung von *Siemens* in Deutschland entwickelt wurden und die heute in optimierter Form im Forschungszentrum Jülich und beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik (**DLR**) weiter verfolgt werden, ist an der Schnittstelle zwischen Forschung und Demonstration anzusiedeln. In einem gemeinsamen europäischen Konsortium von Forschungseinrichtungen und industriellen Partnern soll im nächsten Schritt die Funktionsfähigkeit und die Wirtschaftlichkeit planarer **SOFC**-Systeme für die stationäre Energieversorgung gezeigt werden.

Mit ihrer Betriebstemperatur von 650°C bietet die Brennstoffzelle mit Karbonatschmelze – **MCFC** – diesbezüglich Vorteile gegenüber der **SOFC** hinsichtlich der verwendbaren Konstruktionsmaterialien. Weltweit werden in Japan, in den USA und in Deutschland Demonstrationsanlagen mit Leistungen von bis zu 1 MW betrieben. Die **MCFC** eignet sich aufgrund des flüssigen Elektrolyten jedoch nur für eine kontinuierliche Versorgung eines Verbrauchers, sei es für die Grundlastversorgung größerer Netze oder für einen Industriebetrieb, der einen ständigen Bedarf an Strom und Wärme hat. Vor allem leidet dieses Konzept unter schwierigen Korrosionsproblemen, deren Lösung aus heutiger Sicht offen erscheint.

In zukünftigen stationären Energiesystemen, die vollständig aus regenerativen Energien wie Photovoltaik oder Wind versorgt werden, nehmen Brennstoffzellen eine zentrale Rolle bei der Speicherung elektrischer Energie ein. Um einen zeitlichen Ausgleich zwischen dem Angebot der regenerativ erzeugten elektrischen Energie und der Nachfrage durch den Verbraucher herbeizuführen, wird überschüssiger Strom verwendet, um in einer Elektrolyse Wasserstoff und Sauerstoff zu produzieren. Diese Gase können gespeichert werden und im Bedarfsfall wieder einer Brennstoffzelle zugeführt werden, um somit dem Verbraucher wieder elektrische Energie zur Verfügung zu stellen.

3.2.2 Hausenergieversorgung

Für den Einsatz in der Hausenergieversorgung bieten sich Brennstoffzellen in idealer Weise an. Sie werden dort – so die heute betrachteten Konzepte – als stromerzeugende Heizgeräte eingesetzt. Das heißt, dass die chemische Energie des Energieträgers (in der Regel Erdgas) nach der Reformierung in der Brennstoffzelle in Strom und Wärme umgewandelt wird und zusätzlich ein nachgeschalteter Brenner betrieben wird, der zum einen das in dieser Anwendung nur unvollständig umgesetzte Brenngas verbrennt und zum anderen direkt mit Erdgas versorgt werden kann, um Spitzen im Wärmebedarf (Heizung, warmes Wasser) abzudecken. Das Brennstoffzellensystem kann parallel zum öffentlichen Stromnetz betrieben werden, so dass sowohl die elektrische Spitzenlast hierüber abgedeckt als auch überschüssig produzierter Strom ins Netz eingespeist werden kann. Vergleicht man dieses Konzept mit einer Versorgung, bei der der Strom zu 100% aus dem öffentlichen Netz bezogen und die Wärme in einem konventionellen Brennwärtekessel bereitgestellt wird, so können mit dem Brennstoffzellenkonzept in einem durchschnittlichen Haushalt etwa ein Drittel Kohlendioxidemissionen eingespart werden.

Die Kostenreduktionen, die die **PEFC** für die mobile Anwendung erreichen muss, sind für Heizungsbaufirmen wie *Vaillant* der Grund, diesen Zelltyp zukünftig für die Hausenergieversorgung einzusetzen. Entsprechend mehr Aufwand muss in der Reduzierung der Verunreinigungen in der Gasaufbereitung betrieben werden, damit hinreichend lange Betriebszeiten er-

reicht werden können. Die Nutzwärme, die bei etwa 60°C ausgekoppelt werden kann, reicht für den Hausenergiebereich aus, Raumwärme und warmes Wasser bereitzustellen. *Vaillant* will – so die Mitteilungen dieser Firma – in wenigen Jahren einen Prototyp präsentieren.

Bei der **SOFC** muss kein hoher Aufwand bei der Brenngasaufbereitung betrieben werden. Darüber hinaus können unterschiedliche Energieträger eingesetzt werden. Dafür können zunächst aber keine Kostendegressionseffekte aus anderen Märkten erwartet werden. *Sulzer HEXIS* entwickelt ein planares SOFC-Konzept, das einen integrierten Wärmetauscher für die Auskopplung der Nutzwärme sowie einen Nachbrenner zur Deckung der Wärmelast hat. Erste Demonstrationsanlagen wurden bereits erfolgreich getestet. Im Hinblick auf die Markteinführung hat *Sulzer HEXIS* bereits die Planungen für die Fertigung der Hausversorgungsaggregate aufgenommen.

3.2.3 Netzferne Anwendungen

Weltweit werden zunehmend Brennstoffzellensysteme für die verschiedensten netzfernen Anwendungen entwickelt, die autonom Strom produzieren. Als zwei Beispiele seien die Arbeiten der kanadischen Firma *Global Thermoelectric Inc.* genannt, die auf der Basis der im Forschungszentrum Jülich entwickelten planaren SOFC-Technologie autonome Energieversorgungseinheiten für den aktiven Korrosionsschutz für Pipelines entwickeln. Die Stromversorgung entlegener Kommunikationsstationen sind ein weiteres Beispiel für die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten von Brennstoffzellensystemen. Der Kostenaspekt ist in diesen Bereichen aufgrund mangelnder Alternativen sicher nicht prioritär, dafür werden erhebliche Anforderungen an die Zuverlässigkeit dieser Systeme gestellt.

Perspektiven

- Durch den vermehrten Einsatz von Brennstoffzellen, die als Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit hohem Gesamtnutzungsgrad betrieben werden (Kraftwerke, Hausenergieversorgung), werden die Ressourcen sparsam verwendet, was eine Verminderung der Kohlendioxidemissionen bedeutet. Darüber hinaus werden die limitierten Emissionen (Stickoxi-

de, Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid, Staubpartikel) nahezu vollständig vermieden.

- Brennstoffzellenkraftwerke, die mit Gasturbinen gekoppelt sind, erreichen hohe elektrische Wirkungsgrade von bis zu 70%.
- Verbraucher in entlegenen Gebieten werden mit autonomen Brennstoffzellenanlagen auf der Basis regenerativer Energiequellen versorgt.

3.3 Tragbare Brennstoffzellensysteme

Büro- und Kommunikationsgeräte, Notstromaggregate, Unterhaltungselektronik, Camping-, Haus- und Gartengeräte werden heute in zunehmenden Maße mit Batterien und wiederaufladbaren Akkus versorgt, um einen netztunabhängigen Betrieb zu realisieren. Dabei wachsen die Ansprüche des Kunden im Hinblick auf die unterbrechungsfreie Betriebsdauer dieser Systeme. Polymer-Brennstoffzellen in Verbindung mit geeigneten Wasserstoffspeichern sind konstruktiv einfache Systeme, die bei Umgebungstemperatur geringe Leistungen im Bereich weniger Watt über lange Betriebszeiten bereitstellen können. Gegenüber Akkus bieten Sie den Vorteil, dass Leistung und Energieinhalt des Systems durch die Dimensionierung der Zelle bzw. des Speichers unabhängig voneinander festgelegt werden können. Die aufgrund ihres hohen spezifischen Gewichts für die mobile Anwendung in Fahrzeugen weniger geeigneten Metallhydridspeicher stellen für die tragbaren Anwendungen, in denen verhältnismäßig geringe Energiemengen mitgeführt werden müssen, einen kompakten und sicheren Wasserstoffspeicher dar. Diese Systeme weisen darüber hinaus fast keine Selbstentladung und nur geringe Alterungserscheinungen auf. Hinzu kommt, dass die Verwendung von Brennstoffzellen vor dem Hintergrund der umweltproblematischen Batterieentsorgung umweltentlastend wirkt.

Die Möglichkeit, einen flüssigen Energieträger, wie z.B. Methanol, direkt der Brennstoffzelle zuzuführen, würde wie für die Anwendung in Fahrzeugen bedeuten, Energie mit geringem Aufwand mitführen und nachladen zu können. Auch vor diesem Hintergrund wird die Entwicklung der DMFC betrieben.

Dieser Markt spielt zwar in energiewirtschaftlichen Dimensionen nur eine untergeordnete Rolle, aber da die spezifischen Energiekosten der etablierten Technik (Batterien, Akkus) bei diesen Anwendungen sehr hoch sind, scheint dies ein Markt zu sein, in dem Brennstoffzellen am ehesten wettbewerbsfähig sein können. Neben der Entwicklung des Brennstoffzellensystems ist seine Integration in die Anwendung ein zentraler Punkt.

3.4 Nischenmärkte

3.4.1 Brennstoffzellen in der Raumfahrt

Eine extrem zuverlässige Energieversorgung ist die Voraussetzung für die Lebenserhaltung und für die Durchführung von Experimenten an Bord von Raumkapseln im Weltall. Da die Brennstoffzelle effizient und vibrationsfrei ist, hatten schon die ersten Gemini-Missionen (1964 – 1966) hierfür Brennstoffzellen (PEFC) an Bord, die aus Flüssig-Wasserstoff- und -Sauerstoff-Tanks versorgt wurden. Es folgten die Apollo-Missionen (1966–1972), in denen alkalische Brennstoffzellen eingesetzt wurden. In beiden Fällen diente eine Nickel-Cadmium Batterie als *Back-up*-Versorgung. Im *Space-Shuttle* werden seit 1981 ebenfalls alkalische Brennstoffzellen eingesetzt. Die *Back-up*-Versorgung über Batterien gibt es nicht mehr. Neben der energetischen Versorgung wird das Produktwasser der Brennstoffzelle für die Trinkwasserversorgung der Astronauten genutzt. Die elektrische Leistung und die pro Mission benötigte Energie wurden von Programm zu Programm größer (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Brennstoffzellen der NASA-Raumfahrt-Programme

(Quellen: NASA, International Fuell Cells)

Programm	Gemini (1964–1966)	Apollo (1966–1972)	Space Shuttle (seit 1981)
BZ-Typ	PEFC	AFC	AFC
Leistung / kW	1	3 x 1,5 (max. 2,2)	3 x 12 (max. 16)
Gewicht pro Modul / kg	31	110	90
Leistungsdichte / mA/cm ²	36	68	172
Energie / kWh/Mission	65	115	2600

Die Entwicklung, die die Brennstoffzelle seit Beginn der sechziger Jahre erlebt hat, wird an der Abnahme des Gewichts bei deutlicher Leistungssteigerung sowie an der Zunahme der Leistungsdichte deutlich.

3.4.2 Brennstoffzellen in U-Booten

Die Merkmale der Brennstoffzelle, vibrationsfrei und geräuscharm Strom zu erzeugen, spielen in der Versorgung von U-Booten aus taktischen Gründen eine entscheidende Rolle. Das für diese Anwendung bisher größte Brennstoffzellensystem (PEFC, 3 x 3 Module à 34 kW von Siemens) soll ab 2003 ein deutsches U-Boot der Klasse 212 antreiben und mit Strom versorgen. Der Wasserstoff wird in Metallhydridspeichern mitgeführt. Durch den Einsatz der Brennstoffzelle kann die Tauchzeit um den Faktor 5 gegenüber herkömmlicher Technologie verlängert werden.

4. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die dargestellten Anwendungen von Brennstoffzellensystemen zeigen die Vorteile, die Vielfalt und die Perspektiven der Nutzung dieser Technologie. Bevor Brennstoffzellen jedoch in diesen Märkten Erfolg haben können, muss die Zuverlässigkeit und die Wirtschaftlichkeit der Systeme gewährleistet sein. Die etablierten, konventionellen Umwandlungstechniken geben in beiden Aspekten hohe Standards vor.

Das wichtigste Ziel der notwendigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist eine drastische Kostenreduktion. Diese muss in zwei Schritten realisiert werden. Zunächst müssen die technologischen Optimierungsmöglichkeiten ausgenutzt werden, bevor die Kosten über die Massenfertigung auf das Marktniveau reduziert werden.

Zu den technologischen Optimierungsmöglichkeiten zählt der weitestgehende Einsatz handelsüblicher und kostengünstiger Materialien. Dort, wo teure Edelmetalle oder andere exoti-

sche Materialien nicht zu vermeiden sind, muss ihre Menge minimiert werden. Ebenfalls eine Frage der Materialien ist die Alterungsbeständigkeit der Brennstoffzellen. Der Erforschung und der Entwicklung neuartiger Werkstoffe kommt hierbei eine zentrale Rolle zu. Dies sind Aufgaben, die typischerweise als Querschnittsaufgaben zwischen Grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung zu lösen sind.

Neben der Frage der Werkstoffe liegt in der Anwendung und der Entwicklung geeigneter standardisierter Fertigungsverfahren mit integrierter Qualitätskontrolle ein hohes Kostenreduktionspotential.

Abhängig vom verwendeten Energieträger und vom eingesetzten Brennstoffzellentyp nehmen die Komponenten der Peripherie, wie der Reformier, die Gasreinigung oder der Stromwandler, einen bedeutenden Anteil an den Kosten des Gesamtsystems ein. Die Weiterentwicklung dieser Komponenten sowie die Optimierung ihres Zusammenspiels sind ein weiterer wichtiger Faktor zur Reduzierung der Anlagenkosten. Sie sind darüber hinaus Voraussetzung für den Einsatz im Rahmen bestehender Infrastrukturen.

Im Falle der Nutzung von Methanol oder Wasserstoff als Energieträger stellen die Kosten und die Entwicklung einer Infrastruktur zentrale Herausforderungen dar. Die Realisierung der Vision einer Wasserstoffenergiwelt bedarf darüber hinaus der Entwicklung effektiver Wasserstoffspeicher mit hoher Energiedichte.

Die grundsätzlicheren Arbeiten der Werkstoff-Forschung, der Fertigungstechnik oder der Entwicklung und Analyse verfahrenstechnischer Prozesse, die eher langfristig angelegt sind und Verbesserungspotentiale für die übernächste Brennstoffzellengeneration aufzeigen, müssen im Rahmen staatlich geförderter Forschung kontinuierlich durchgeführt werden. Die hiermit einhergehende Nachwuchsausbildung und -förderung in innovativen Technikfeldern wie der Brennstoffzelle ist auch ein Beitrag zur Zukunftssicherung des Industriestandorts Deutschland.

AUTOREN, PODIUMSTEILNEHMER UND MODERATOREN

Dr. Thomas **Behringer**,
geboren 1959, seit 1999 verantwortlich für politisch-technische Rahmenbedingungen (Verbände) bei Vaillant und Mitarbeiter des Verbandes Gas-Wärmetechnik in den Jahren 1992–1999. Maschinenbaustudium mit der Fachrichtung Energietechnik an der RWTH Aachen, Dissertation im Bereich Energieforschung am Forschungszentrum Jülich, Promotion an der RWTH Aachen.

Dr.-Ing. Klaus **Bonhoff**,
Jahrgang 1968, seit 2001 Mitarbeiter der Ballard Power Systems GmbH, zuständig für die Kommerzialisierung von Brennstoffzellen in Europa. Studium des Maschinenbaus an der RWTH Aachen und an der ENSTA, Paris, Diplom 1994. Promotion im Bereich der Energieverfahrenstechnik 1998 im FZ Jülich, seit 1998 Assistent des Vorstandes des FZ-Jülich für den Bereich der Energie- und Materialforschung, 2000–2001 kommissarischer Leiter des Projekts Brennstoffzelle im FZ Jülich.

Prof. Dr. Georg **Erdmann**,
geboren 1951, Professor für Energiesysteme am Institut für Energietechnik der Technischen Universität Berlin. Studium der Mathematik und Wirtschaftsforschung, Promotion 1981 an der Universität Münster in Volkswirtschaftslehre. Zwischen 1982 und 1995 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter und Dozent am Institut für Wirtschaftsforschung der ETH Zürich sowie im Zeitraum 1993–1995 Delegierter am Paul Scherer Institut in Villingen. Zu den Forschungsinteressen gehören Energiemärkte einschließlich Investitionen, Risiko und Innovation sowie Arbeit auf dem Gebiet der evolutiven Ökonomik. Mitglied ist er u.a. im Vorstand der *Gesellschaft für Energiewirtschaft und Energiepolitik (GEE)*, und der Deutschen Sektion der *International Association for Energy Economics (IAEE)*.

Prof. Dr.-Ing. Bernd **Höhlein**,
Abteilungsleiter für Verfahrens und Systemanalyse am Institut für *Werkstoffe und Verfahren der Energietechnik* beim Forschungszentrum Jülich

GmbH. Abschluss als Dipl.-Ing. an der TU-Braunschweig, anschließen bis 1970 tätig bei der Koppers Wistra Industrieofenbau GmbH, Düsseldorf. Seit 1970 Mitarbeiter der Forschungszentrums Jülich, 1978 Promotion an der RWTH Aachen. Seit 1993 hauptamtlicher Professor für Energieverfahrenstechnik an der FH Aachen/Jülich. Arbeitsschwerpunkte beim FZ Jülich: Katalyse und Verfahrenstechnik der Reformierung und Synthesen, Verfahrens- und Systemanalyse neuer Energieträger und Antriebe und Brennstoffzellensysteme für mobile und stationäre Anwendungen.

Carl Graf **Hohenthal**,
geboren 1955, Leiter der Berliner Wirtschaftsredaktion der Frankfurter Allgemeinen Zeitung. Seit März 2001 stellvertretender Chefredakteur der Tageszeitung *Die Welt*. Dort insbesondere verantwortlich für Wirtschaft und Finanzen. Nach zweijähriger Militärdienstzeit Studium der Volkswirtschaft und Geschichte in Hamburg. Im Jahre 1983 zunächst bei der *Zeit* in Hamburg tätig. Seit 1984 Wirtschaftsredakteur der Frankfurter Allgemeinen Zeitung. In der Frankfurter Zentrale zunächst für wirtschaftspolitische Nachrichten zuständig. Im Mai 1987 Wechsel als wirtschaftspolitischer Korrespondent nach Bonn. Wechsel mit der Parlamentsredaktion im August 1999 nach Berlin.

Dr. Gerhard **Isenberg**,
geboren 1941, Mitarbeiter der DaimlerChrysler AG. Studium der Physik an der Technischen Universität Karlsruhe, Promotion 1969. In den Jahren 1966–1970 wissenschaftlicher Mitarbeiter des nuklearen Forschungszentrums in Karlsruhe. Von 1970–1988 Angestellter bei MAN Technologie München auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien.

Karl-Heinz **Karisch**,
geboren 1952, seit 1985 Redakteur der Frankfurter Rundschau, seit 1995 im Ressort Wissenschaft und Technik. Diplom-Ingenieur und Diplom-Soziologe, Studium in Paderborn und Frankfurt am Main.

Dipl.-Chem. Dr. rer. nat. Frank **Marscheider-Weidemann**,

Jahrgang 1960. Studium der technischen Chemie an der Universität Hamburg und Promotion 1993. Seit 1994 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter beim Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI) in Karlsruhe in der Abteilung Umwelttechnik und Umweltökonomie. Seine Arbeitsschwerpunkte sind Untersuchungen zum technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Energie- und Klimagasreduktionspotential in der chemischen Industrie. Außerdem befasst er sich mit ökologischen Aspekten der Brennstoffzellentechnik, der Abfall- und Abwasserbehandlung sowie *Recycling* Technologien und Umweltchemikalien.

Prof. Dr. Ferdinand **Panik**,

geboren 1942, seit 1997 Mitglied des Direktori-ums und Leiter des Projekthauses Brennstoffzelle der DaimlerChrysler AG. Studium der Elektrotechnik mit Fachrichtung Nachrichtentechnik an der Technischen Universität Berlin. 1972 Eintritt in die Daimler-Benz AG. Hier wurde ihm 1983 die Leitung des Fachbereichs *Forschung Wagen* übertragen. 1986 war er maßgeblich am Zustandekommen des Forschungsprogramms *PROMETHEUS – Programme for European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety* beteiligt. 1987 erfolgte die Ernennung zum Direktor und Leiter der Daimler-Benz Fahrzeug-Forschung. Von 1989 bis 1996 war er Mitglied der Geschäftsführung der Mercedes-Benz do Brasil für die Entwicklung der Lkw- und Omnibusfamilie zuständig. In Brasilien hat er unter anderem 1991 das Gemeinschaftsprojekt *POEMA – Armut und Umwelt in Amazonien*, ein kommunales Konzept für dauerhafte Entwicklung gemeinsam von Daimler-Benz, UNICEF und der Universität do Pará in Belem, initiiert. Honorarprofessor an der Fachhochschule Esslingen.

Dr. Matthias **Rzepka**,

geboren 1955, Studium der Physik an der Technischen Universität München, Promotion 1994 am Max-Planck-Institut für Physik (MPIP). Seit 1997 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern), ab 2000 dort Gruppenleiter Brennstoffzellen.

Dipl.-Wirtschaftsing. Elna **Schirrmeister**,

Jahrgang 1971, Studium des Wirtschaftsingenieurwesens, Fachrichtung Maschinenbau an der TU Darmstadt. Anschließend Mitarbeit im Bereich Logistik-Controlling eines Chemieunternehmens. Seit 1999 wissenschaftliche Mitarbeiterin und Projektleiterin beim Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI) in Karlsruhe in der Abteilung Innovationen in der Produktion mit den Arbeitsschwerpunkten *Monitoring* der Entwicklung von Produktionstechnologien und der ökonomischen und ökologischen Effekte durch die Einführung der Brennstoffzelle und durch Produktinnovationen.

Prof. Dr. Ulrich **Stimming**,

geboren 1946, Professor an der Technischen Universität München und Mitglied des Vorstands sowie wissenschaftlicher Leiter der Abt. 1 beim Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung. Studium der Chemie, Promotion 1979 in Physikalischer Chemie an der Freien Universität Berlin. Wissenschaftlicher Angestellter der Universität Düsseldorf von 1979–1982, *Research Scientist* bei IBM, T.J. Watson Research Laboratory, NY/USA 1982/83, *Assistant Professor* an der Columbia University 1983–1986, *Associate Professor* an der Columbia University NY/USA 1986–1991, von 1991–1997 Direktor des Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energieverfahrenstechnik und Professor an der Universität Bonn, Institut für Physikalische Chemie.

Prof. Dr.-Ing. Detlef **Stolten**,

geboren 1958, Direktor am Institut für Werkstoffe und Verfahren der Energietechnik beim Forschungszentrum Jülich GmbH und Inhaber des Lehrstuhls für Brennstoffzellen an der RWTH Aachen sowie Leiter des Kompetenz-Netzwerkes Brennstoffzelle NRW im Rahmen der Landesinitiative Zukunftsenergien NRW. Studium des Hüttenwesens/Steine und Erden an der Technischen Universität Clausthal. Dissertation während der Tätigkeit im Forschungslabor *der Robert Bosch GmbH*, Promotion an der Technischen Universität Clausthal. In den Jahren 1989–1997 Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in der *Daimler-Benz / Dornier* Forschung im Bereich *Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)* u.a. als Arbeitsgruppen-

penleiter Keramik für SOFC und Projektleiter SOFC, 1997/1998 Marketingmanager in der Abteilung *Marketing/Business Development* der *Dornier Satellitensysteme GmbH*. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in der Energieverfahrenstechnik der Polymembran Brennstoffzelle (PEFC) und SOFC, d.h. der Elektrochemie, Stacktechnik, Verfahrens- und Systemtechnik sowie der Systemanalyse.

Prof. Dr.-Ing. Rolf **Theenhaus**,

Jahrgang 1936, 1974–1999 Vorstandsmitglied der Kernforschungsanlage Jülich GmbH, heute Forschungszentrum Jülich GmbH, in den letzten fünf Jahren zuständig für Energieforschung, Werkstoff-Forschung, wissenschaftliche und technische Zentralinstitute und Technologietransfer. 1964 Promotion im Bereich der Plasma-physik. Verschiedene leitende Tätigkeiten in Entwicklung, Produktion und Vertrieb in Industrieunternehmen. Mitgliedschaften und Leitungsfunktionen in technisch-wissenschaftlichen Gesellschaften, Verbänden und Beiräten von Forschungseinrichtungen. Mitglied des Aufsichtsrates des Technologiezentrums Jülich.

Dr. Uwe **Thomas**,

geboren 1938, Staatssekretär im Bundesministerium für Bildung und Forschung. Studium der Physik an der Universität München. Von 1965–1967 Computeringenieur im Forschungsinstitut der AEG in Berlin, 1967–1969 Projektleiter in der Studiengruppe für Systemforschung Heidelberg für EDV-Projekte im Deutschen Patentamt und im Bundespresseamt, 1969–1971 Studie über *Computerised Data Banks in Public Administration* bei der OECD in Paris, 1971–1972 tätig in der Planungsabteilung des Bundeskanzleramts in Bonn, Vertreter des Amtes in der interministeriellen Arbeitsgruppe zur Reform der öffentlichen Verwaltung. Von 1973–1988 Mitarbeiter im Bundesministerium für Forschung und Technologie, zuletzt als Unterabteilungsleiter verantwortlich für Informationstechnik, Fertigungstechnik und Humanisierung des Arbeitslebens, Innovation. Von 1988–1993 Staatssekretär und dann Minister für Wirtschaft, Technik und Verkehr in der Landesregierung Schleswig-Holstein, 1994–1995 *Consulting Bureau* Bonn, 1996 Vorsitzender der Geschäftsführung der *Deutschen Systemtechnik GmbH (DST)*, 1997–1998 Vorsitzender der Geschäftsführung des *Berufs-*

fortbildungswerks des DGB GmbH, einem Unternehmen für Fort- und Weiterbildung, seit 1998 Ehrendoktor der Technischen Universität Berlin.

Dipl.-Volkswirt, Prof. Dr. rer. pol. Andreas **Troge**,

geboren 1950, seit 1995 Präsident des Umweltbundesamtes. Studium an der Technischen Universität Berlin, Promotion an der Universität Bayreuth. Gutachterliche Tätigkeit für das Umweltbundesamt, Umweltreferent im Bundesverband der Deutschen Industrie von 1981–1986. In den Jahren 1986–1990 Geschäftsführer des Instituts für gewerbliche Wasserwirtschaft und Luftreinhaltung e.V., Geschäftsführer der Überwachungsgemeinschaft Chemieanlagenbetreiber. Von 1990–1995 Vizepräsident des Umweltbundesamtes. Ernennung zum Honorarprofessor der Universität Bayreuth. Seine Hauptforschungsgebiete sind verkehrsbedingte Umweltbelastungen und deren Reduzierung, Theorie und Praxis der Wirtschaftsordnungen, neue ökonomische Theorie der Politik/ *property rights* Theorie, theoretische und praktische Umweltökologie, sektorale Strukturpolitik und Erkenntnistheorie.

Jürgen **Wengel**,

geboren 1958, stellvertretender Leiter der Abteilung *Innovation in der Produktion* des Fraunhofer-Instituts für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI) in Karlsruhe. Studium der Sozial- und Verwaltungswissenschaften in Göttingen und Speyer. Nach einer zweijährigen Tätigkeit am soziologischen Seminar der Universität Göttingen begann er 1985 als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung *Industrielle Innovation* des Fraunhofer ISI. Von November 1989 bis Mai 1991 Abstellung zur Generaldirektion Forschung der Europäischen Union in Brüssel. 1992 wurde er stellvertretender Leiter der Abteilung *Produktion und Kommunikation*. Arbeitsschwerpunkte sind Diffusionscharakteristika neuer Produktionstechniken und -konzepte, Technologiepolitik, Programmevaluation und Technologietransfer im Bereich Produktion sowie die sozialen, ökonomischen und ökologischen Effekte von Produktionsinnovationen.

Prof. Dr.-Ing. Felix **Ziegler**,

geboren 1955, seit 2001 Professor am Institut für Energietechnik der Technischen Universität Ber-

lin. Studium des Maschinenwesens an der TU München, 1982–1995 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät für Physik an der TU München, Promotion 1991. 1995–2001 Abteilungsleiter am ZAE Bayern, 1998 Habilitation in Thermodynamik.