

Bernd Hirschl, Esther Hoffmann

# Zukunftstechnologie Brennstoffzelle?

Diffusionsbedingungen und sozial-ökologische Forschungsempfehlungen  
unter besonderer Berücksichtigung dezentraler Energieversorgung

Schriftenreihe des IÖW 165/02





Bernd Hirschl, Esther Hoffmann

# Zukunftstechnologie Brennstoffzelle?

Diffusionsbedingungen und sozial-ökologische Forschungsempfehlungen unter besonderer Berücksichtigung dezentraler Energieversorgung

Schriftenreihe des IÖW 165/03  
Berlin, Februar 2003, ISBN 3-932092-65-1

IÖW gGmbH Geschäftsstelle  
Potsdamer Straße 105  
D-10785 Berlin

Tel.: +49.(0)30.884 59 40  
Fax: +49.(0)30.882 54 39  
mailbox@ioew.de

## Zusammenfassung

Brennstoffzellen werden große Umweltentlastungspotenziale zugesprochen. Dabei hängt ihre erfolgreiche Diffusion sowie die Erzielung von Umweltentlastungen in erheblichem Maße von nicht-technischen Faktoren ab. Die Studie berücksichtigt die drei wesentlichen Einsatzbereiche (stationär, mobil, portabel), der Fokus liegt jedoch auf der stationären Brennstoffzelle in der Hausenergieversorgung. Dies begründet sich zum einen durch die hohe ökologische Relevanz des Energieverbrauchs in Haushalten, zum anderen dadurch, dass die Veränderungen bei den Akteursstrukturen vielfältiger und radikaler erscheinen als in anderen Einsatzbereichen. Aufbauend auf einer Darstellung des Standes der Technik werden gesellschaftliche und politische Diffusionsbedingungen behandelt und Forschungsempfehlungen entwickelt, welche Innovationsanalysen, neue Akteursstrukturen und Unternehmensstrategien, Akzeptanzforschung, politische Instrumente und Steuerung, ökologische und ökonomische Bewertungen, Szenarien sowie Anforderungen an Bildung umfassen.

## Abstract

Fuel cells are expected to contribute exceedingly to environmental improvements. However, both the successful market diffusion of fuel cells and their environmental benefits are highly influenced by non-technical aspects. This study deals with the three general applications of fuel cells (stationary, transport, and portable), but focuses primarily on stationary fuel cells as energy supply for housing. The focus is selected because of the high relevance of energy consumption in households. Besides this, the introduction of fuel cells into a decentralised power generation system would cause significant and radical changes for the involved actors and networks. Starting with a description of the state of the art, we analyse social and political conditions for the market diffusion of fuel cells. We make recommendations for future research dealing with innovation analysis, new networks and strategies of companies, consumer acceptance, political instruments and governance, ecological and economical assessments, scenarios, and education requirements.

## Die AutorInnen

Dipl.-Ing. Oec. **Bernd Hirschl**, Jahrgang 1969, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Forschungsfeld Ökologische Produktpolitik. Seine Arbeitsschwerpunkte sind: nachhaltige Energiewirtschaft und Klimaschutz, Öko-effiziente Produkte und Dienstleistungen, Produkt-Ökobilanzen sowie Innovation und Diffusion ökologischer Technologien und Produkte.

Dipl.-Ing. **Esther Hoffmann**, Jahrgang 1970, ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Forschungsfeld Ökologische Unternehmenspolitik. Ihre Arbeitsschwerpunkte sind: ökologische Produktentwicklung, Umweltmanagement, organisationales Lernen, nachhaltige Energiewirtschaft und Klimaschutz sowie Evaluationsforschung.

## Kontakt:

bernd.hirschl@ioew.de

esther.hoffmann@ioew.de

Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) gGmbH,  
Potsdamer Str. 105, 10785 Berlin;  
Tel. 030 – 884 594 – 0; Fax 030 – 8825439;

## Inhalt

0	VORWORT .....	III
1	EINFÜHRUNG .....	1
1.1	Problemdruck und Dynamik – der Energiesektor im Wandel .....	1
1.2	Zur Bedeutung von Brennstoffzellen und Wasserstoff für eine nachhaltige Energiewirtschaft.....	4
2	BRENNSTOFFZELLENTechnologien und Anwendungsbereiche.....	7
2.1	Aufbau und Funktion von Brennstoffzellen.....	7
2.1.1	Allgemeine Funktionsweise und Komponenten .....	8
2.1.2	Brennstoffzellentypen .....	8
2.2	Stationäre Anwendungen – Stand und Entwicklungen.....	11
2.2.1	Dezentrale Hausenergieversorgung .....	11
2.2.2	Siedlungsversorgung .....	14
2.2.3	Brennstoffzellen-Kraftwerke zur öffentlichen Stromversorgung.....	14
2.2.4	Aktuelle Forschungen zu stationären Anlagen .....	15
2.2.5	Ökologische Aspekte stationärer Brennstoffzellen .....	17
2.2.6	Rahmenbedingungen und Wirtschaftlichkeit.....	18
2.3	Mobile Anwendungen - Stand und Entwicklungen .....	18
2.3.1	Hintergründe der Entwicklungsaktivitäten.....	19
2.3.2	Zur Technologie in mobilen Systemen.....	19
2.3.3	Ökologische Aspekte von Brennstoffzellenfahrzeugen.....	22
2.3.4	Aktivitäten und Akteure .....	23
2.3.5	Aktuelle Forschungen zu mobilen Anwendungen.....	25
2.4	Portable Anwendungen – Stand und Entwicklungen.....	25
2.5	Exkurs zur gegenwärtigen Situation der Wasserstoffwirtschaft.....	27

---

3	NISCHE ODER REVOLUTION? WAS BEEINFLUSST DIE DIFFUSION VON BRENNSTOFFZELLEN? .....	29
3.1	Innovationsanalyse .....	31
3.2	Neue Akteursstrukturen und Unternehmensstrategien .....	32
3.3	Zielgruppenanalysen und Akzeptanzforschung.....	34
3.4	Politische Instrumente und Steuerung .....	36
3.5	Ökologische und ökonomische Bewertungen .....	39
3.6	Szenarien – Zukunftsbilder .....	41
3.7	Bildung .....	43
4	ZUSAMMENFASSUNG .....	44
5	LITERATUR .....	47

## 0 Vorwort

Das Thema Brennstoffzelle erfährt derzeit einen bemerkenswerten Boom: eine bekannte Technologie zur Stromerzeugung wird aus der Schublade geholt und avanciert zum Hoffnungsträger für alternative Energieszenarien – und das übergreifend bei vielen verschiedenen gesellschaftlichen Gruppierungen und politischen Lagern. Die großen Hoffnungen sind in erster Linie mit ihrer potenziellen Umweltfreundlichkeit verbunden, denn aus der benötigten Energiequelle Wasserstoff entsteht im Wesentlichen nur das Reaktionsprodukt Wasser. Als Brennstoffe können zudem verschiedene wasserstoffhaltige Substanzen (z.B. Methanol, Erdgas) eingesetzt werden. Die Brennstoffzellentechnologie ist darüber hinaus vielseitig, modular und dezentral einsetzbar.

Den großen Potenzialen und Visionen stehen jedoch noch eine Fülle von technischen und konzeptionellen Problemen gegenüber. Diese betreffen nicht nur Aspekte der technischen Machbarkeit der Anlagen, da bislang erst einzelne Prototypen, Pilotprojekte und erste Feldversuche in den diversen Anwendungsbereichen existieren. Auch in Bezug auf die Brennstoffe sind technische Verbesserungen notwendig und die Entwicklung einer geeigneten Infrastruktur erforderlich.

Die Diffusion der vielfältig einsetzbaren (generischen) Innovation Brennstoffzelle hängt jedoch neben diesen „harten“, technisch-ökonomischen Faktoren ebenso von z.B. strukturellen und „weichen“ Faktoren ab. Denn sie kann – in allen Einsatzgebieten, d.h. im mobilen, portablen und stationären Anwendungsfall – zu einem radikalen Wandel in den betroffenen Sektoren führen. Dabei ist die Diffusion der Innovation Brennstoffzelle zum einen vom Zusammenwirken technischer Faktoren und der Zusammenarbeit verschiedener Akteure abhängig. Zum anderen bestehen in diesem systemischen Geflecht viele Erfolgsfaktoren jenseits der technisch-ökonomischen Rationalität. In diesem Papier werden nach einer allgemeinen Einführung in die Technologie insbesondere diese Faktoren und Zusammenhänge diskutiert und diesbezügliche Diffusionsdeterminanten und Forschungsbedarfe formuliert.

Die Berücksichtigung bzw. die Analyse von Diffusions- und Transformationsbedingungen ist in der gegenwärtigen Diskussion um die Brennstoffzellentechnologie in Forschung und Praxis deutlich unterrepräsentiert. Dies ist zwar einerseits angesichts des technischen Entwicklungsbedarfs als normal anzusehen. Andererseits erscheint es aufgrund des radikalen Veränderungspotenzials dieser neuen Technologie geradezu notwendig, sozial-ökologische Transformationsaspekte frühzeitig mit einzubeziehen. Wenn dieser Entwicklungspfad politisch und ökonomisch beschritten werden soll, gilt es, sich frühzeitig mit den möglichen Folgen auseinander zu setzen, um falsche Richtungen und „stranded investments“ zu vermeiden sowie Blockaden und Hemmnisse zu erkennen und abzubauen. Dies kann naturgemäß nur bedingt von den beteiligten bzw. etablierten Unternehmen selbst untersucht werden.

Das IÖW führt mit dieser Untersuchung Erfahrungen aus mehreren Projekten zusammen, die beispielsweise dezentrale und erneuerbare Energieversorgung sowie Diffusionsanalysen und Systeminnovationen behandeln. Die vorliegende Schriftenreihe ist im Rahmen eines Eigenprojektes des IÖW unter Einbeziehung interner Diskussionen und Anregungen entstanden. Der Text dient – angesichts der immer noch geringen allgemeinen Kenntnis der Brennstoffzellentechnologie – zunächst als Überblick über die Grundlagen und das „technologische Spektrum“, bevor die eigentliche Fragestellung näher beleuchtet wird.



# 1 Einführung

Die Brennstoffzellentechnologie wird als technische Innovation gefeiert, von Umweltschützern mit großen Hoffnungen begleitet und von einigen Promotoren und Politikern gar als Revolution im Energiesektor vergleichbar dem Mikrochip in der Computerindustrie gesehen (vgl. z.B. Ledjeff-Hey et al. 2001, Jopp 2001a und b, Donnerbauer 2001b). Doch wovon wird die Markteinführung und letztlich die erfolgreiche Diffusion der Brennstoffzelle abhängen und welche Diffusions- und Rahmenbedingungen bräuchte sie, wenn sie ein (politisch gewollter) Erfolg werden soll? Ist ein Erfolg der Brennstoffzelle in den verschiedenen Sektoren überhaupt mit den vorhandenen Strukturen und Akteuren machbar? Welche Aspekte sind zu beachten, damit die Vision einer *nachhaltigen* Energieversorgung (und Mobilität) auch erreicht werden kann?

Derartige Fragen, die über die rein technisch-ökonomische Machbarkeit hinausgehen, sind Gegenstand dieses Berichtes. In einer Einführung erfolgt zunächst ein allgemeiner Überblick zur Problematik des Wandels im Energiesektor, da hier Gemeinsamkeiten beispielsweise in Bezug auf die Diffusionsbedingungen dezentraler; erneuerbarer Erzeugungstechnologien gesehen werden können. Zudem wird nach derzeitigem Stand der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten eine breitere Einführung der Brennstoffzellentechnologie voraussichtlich zunächst im Sektor der Energieversorgung erfolgen. Im Anschluss daran wird in das Thema Brennstoffzelle eingeführt. Darauf folgt ein Kapitel zum Überblick über die Technologien, Anwendungsbereiche und bisherigen Entwicklungen. Schließlich wird ausgehend vom bisherigen Stand der Forschung weiterer Forschungsbedarf jenseits der technisch-ökonomischen Fragestellungen formuliert. In einer Zusammenfassung werden die wesentlichen Erkenntnisse dargestellt.

## 1.1 Problemdruck und Dynamik – der Energiesektor im Wandel

Der Energiebereich – d.h. die Erzeugung, Verteilung und auch der Verbrauch von Energie – ist durch die Liberalisierung des EU-Elektrizitätsmarktes einem dynamischen Wandel unterworfen. In Deutschland begann dies mit der Umsetzung der EU-Direktive auf dem Strommarkt<sup>1</sup> im Jahr 1998, wodurch die ursprünglichen und jahrzehntelang existierenden regionalen Gebietsmonopole formal aufgehoben wurden. Auch auf dem Wärmemarkt zeichnet sich im Rahmen der Umsetzung der europäischen Gasrichtlinie Bewegung ab, wenngleich hier die Entwicklungen und Umsetzungen noch nicht so weit fortgeschritten sind wie im Stromsektor.<sup>2</sup>

Die Dynamik betrifft

- den Gesetzgeber: der regulative Rahmen ist vorgezeichnet, aber bei weitem noch nicht endgültig abgesteckt, da hier oft erst Praxiserfahrungen Klarheit bringen; zudem steht

---

<sup>1</sup> Novellierung des Energiewirtschaftsgesetzes seit dem 29. April 1998, Umsetzung der EU-Direktive 96/92/EC aus dem Jahre 1996.

<sup>2</sup> Mitte 2002 wurde wie im Stromsektor (mittlerweile VV II plus) eine Verbändevereinbarung ausgehandelt (VV Erdgas II). Danach beginnt der Wettbewerb für Privatkunden und gewerbliche Tarifkunden ab Mitte 2003.

das Instrument der freiwilligen Verbändevereinbarungen, welches Deutschland als einziges EU-Land anstelle einer Regulierungsbehörde verfolgt, noch auf dem Prüfstand. Dies gilt auch für die Unternehmensaktivitäten und –zusammenschlüsse auf dem Markt, die eine erhöhte Aktivität von Wettbewerbs- und Kartellaufsichten erfordern.

- die etablierten und neuen Energieversorger und -dienstleister, die nun in andere Märkte und Gebiete vordringen können, andererseits Konkurrenz im ehemals geschützten Markt zulassen müssen. Noch ist unklar, ob sich längerfristig kleinere Unternehmen gegenüber den großen, internationalen werden durchsetzen können. Ebenso gibt es gegenwärtig sowohl Tendenzen zu spezialisierten Angeboten als auch zu breit angelegten „Multi Utility“-Strategien.
- die Technologien, da mit dem erhöhten Wettbewerb auch neue Technologien und Dienstleistungen eine Rolle spielen: Überkapazitäten und alte Anlagen werden unwirtschaftlich, neue Anlagen müssen effizienter sein und auch neuen Kriterien wie modular, kundenfreundlich, „gesellschaftlich erwünscht“ etc. genügen.
- die VerbraucherInnen, die z.B. durch die freie Anbieterwahl neu mit dem Thema Energiebereitstellung konfrontiert werden. Die Nachfrage bekommt damit ein entscheidendes Gewicht in Bezug auf die Ausgestaltung des Angebots. Dies gilt bereits in höherem Maße für Industriekunden, geringer für gewerbliche Tarifkunden und kaum für PrivatkundInnen, bei letzteren wird die neue Freiheit erst sehr spärlich genutzt.

Die genaue Richtung und das Ausmaß der – hier nur ansatzweise skizzierten – Dynamik ist derzeit jedoch noch nicht genau absehbar.

### **Ökologischer, ökonomischer – und globaler Problemdruck**

Die Energieversorgung ist eine wichtige Grundlage für die Entfaltung von Wirtschaft und Wohlstand. Angesichts eines globalen Wachstums der Weltwirtschaft und der Weltbevölkerung steigt damit nach derzeitigen Prognosen auch der Weltenergiebedarf. Aufgrund der weltweiten Vorherrschaft fossil-atomarer Energieerzeugung steigen daher auch die dementsprechenden Umweltbelastungen und –risiken. Diese Probleme hängen eng mit dem traditionellen Energieversorgungssystem zusammen, mit den Primär-Rohstoffen, den zentralen Erzeugungsstrukturen, aber auch den Verbrauchsgewohnheiten. Der Klimawandel durch den anthropogenen Treibhauseffekt, aber auch weiterhin die Luftbelastung und die mit ihr verbundene Bodenversauerung, sind die zentralen negativen Umweltfolgen (Matthes & Cames 2000). Dazu kommen die Risiken der Atomkraftnutzung, die durch die Terroranschläge des 11. September 2001 eine realere Dimension erlangt haben.<sup>3</sup>

Vergegenwärtigt man sich zudem, dass die ökologischen Folgen und Risiken insbesondere weniger entwickelte, ärmere Länder sowie die nachfolgenden Generationen betreffen werden (wobei erste Auswirkungen wie beispielsweise die Hochwasserfluten des Jahres 2002 bereits in der Gegenwart stattfinden), und dass ein kleiner Teil der Menschheit zu Lasten der ärmeren Mehrheit und der zukünftigen Generationen die verknappenden Energierohstoffe verbraucht – dann wird schnell deutlich, dass das gegenwärtige Energiesystem nicht nachhaltig sein kann. Dies wurde auch von der zuständigen Enquête-Kommission (2002) des

---

<sup>3</sup> In Deutschland ist seit Ende 2001 der Atomausstieg gesetzlich beschlossen.

Deutschen Bundestages so gesehen. Die Tatsache, dass die noch verbleibenden Primärenergiequellen im wesentlichen in sogenannten Krisengebieten liegen, trägt dazu bei, dass das Themenfeld Energie wieder zu einem der bedeutendsten politischen und gesellschaftlichen Problemfelder unserer Zeit wird.

### **Strategien des Wandels: Erneuerbare Energien und Energieeffizienz**

Die beiden zentralen Lösungsstrategien für einen zukunftsfähigen Wandel des Energiesektors werden einerseits im Ausbau von Technologien zur Nutzung Erneuerbarer Energien (nachfolgend kurz EE) und andererseits in der Steigerung der Energieeffizienz gesehen. Gegenwärtig sind im Bereich der EE insbesondere durch das Erneuerbare Energien-Gesetz (EEG) vielversprechende Marktentwicklungen zu verzeichnen (vgl. Hirschl et al. 2002). Die Effizienz soll zum einen über Einsparungen im Energieverbrauch z.B. bei Elektrogeräten und beim Wärmeverbrauch im Wohnungssektor erhöht werden. Letzteres soll über die neue Energieeinsparverordnung<sup>4</sup> angeregt werden. Zum anderen sind für die Steigerung der Energieeffizienz in Bezug auf die Energieerzeugung Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) bedeutsam, die durch die gleichzeitige Nutzung von Strom und Wärme deutlich höhere Gesamtwirkungsgrade erzielen. Außerdem spielen in diesem Bereich neue Dienstleistungen wie Contracting eine Rolle. Als wichtigstes Förderinstrument ist das KWK-Gesetz zu nennen, das allerdings bislang aufgrund einiger Regelungen (u.a. zur Vergütung) nicht zu einem wirklichen Durchbruch geführt hat.

Die Potenziale in den hier aufgezeigten Bereichen der Energieeffizienz und bei fast allen erneuerbaren Energien sind noch zu großen Teilen unerschlossen. Dies gilt auch für die EE, die trotz beeindruckender Wachstumsraten seit Einführung des EEG im Jahr 2002 bei etwa 8% Anteil an der Stromerzeugung und etwa 2% Anteil an der gesamten Energieversorgung liegen werden. Der längste Weg des Ausbaus ist also noch zu gehen. Außerdem sind weitere technische Verbesserungen, Innovationen und Kostendegressionen z.B. durch Massenproduktion als notwendige Bedingungen für die Diffusion zu nennen. Dass diese technisch-ökonomischen Voraussetzungen jedoch nicht allein ausreichen, gilt auch für energieeffiziente Technologien und EE-Anlagen. Hier spielen beispielsweise infrastrukturelle Aspekte oder Strategien und Interessen der etablierten Akteure eine entscheidende Rolle.

### **Diffusion neuer Energietechnologien**

Die neuen Technologien und Dienstleistungen werden überwiegend von neuen Anbietern und Herstellern auf den Markt gebracht. Dies galt bislang insbesondere für die Phase der Technologieentwicklung und der Markteinführung. Diese wurde häufig von KMU dominiert wie die Beispielmärkte Windkraft und Solarenergie, aber auch der Contractingmarkt zeigen. Mittlerweile hat die Anzahl der großen, etablierten Unternehmen – Energieversorger, Energiedienstleister oder technologieverwandte Hersteller – ihr Angebot bzw. ihr technologisches Portfolio in Bezug auf diese neuen Produkte erweitert. Dies birgt gleichzeitig Chancen und Risiken für die Diffusion. Mit dem Einstieg größerer Unternehmen sind größere Finanzmittel für Investitionen erschließbar – ein Aspekt, der in den letzten Jahren in einigen Bereichen

---

<sup>4</sup> Die Energieeinsparverordnung (EnEV) ist seit Februar des Jahres 2002 in Kraft.

beobachtet werden konnte.<sup>5</sup> Mit der „Übernahme“ der neuen Märkte durch die „konventionellen“ Unternehmen, bzw. Vertreter der konkurrierenden, klassischen Technologien besteht allerdings auch die Gefahr der Kontrolle über die Diffusionsgeschwindigkeit der neuen Technologien. Denn Konzepte des geringeren Energieverkaufs (Effizienz) oder aber die dezentralen Energieerzeugungseinheiten (EE, BHKW) widersprechen den bisherigen Strategien der etablierten Unternehmen.

Insofern ist gegenwärtig die Frage offen, inwieweit der Markt und insbesondere die bedeutenden Großunternehmen den technischen Wandel unterstützen und mitgestalten oder aber behindern. Darüber hinaus können „systemimmanente“ Hemmnisse z.B. technischer, infrastruktureller oder regulativer Art vorliegen, die zusätzlich ein Beharrungsvermögen des bestehenden Systems bzw. technologischen Regimes verstärken. Dazu zählen z.B. die Ausgestaltung von Steuern und Subventionen sowie allgemein die unzureichende Internalisierung externer Kosten.

Eine dezentrale Energieversorgung hat unter dem Aspekt der „Verfügungsgewalt“ über die Energie überdies ein „demokratisches“ Element. Nimmt man die Vorstellung eines energieerzeugenden Haushalts, dann wird der Haushalt in Bezug auf einen elementaren Versorgungsaspekt (Strom und Wärme) autonom, wobei er natürlich abhängig von einer Brennstoffversorgung bleibt. Zudem verlieren auf der anderen Seite gegenwärtig sehr mächtige und einflussreiche Unternehmen ihren Hauptabsatzbereich. Diese zugespitzte Auswirkung einer dezentralen Energieversorgung hat eine besondere Bedeutung in Bezug auf die bevorstehende Versorgungsproblematik in Entwicklungs- und Schwellenländern.<sup>6</sup> Aber auch hierzulande würde es die bisherigen ökonomischen Beziehungen in einem wichtigen Sektor deutlich verändern.

Die dezentralen Technologien sorgen zudem für eine verstärkte Beschäftigung und Dienstleistungsbindung vor Ort. Dies kann – als bedeutende soziale Folge – eine Stärkung des ländlichen, regionalen Raums nach sich ziehen, und zudem eine Reihe neuer und zukunftssicherer Arbeitsplätze schaffen. Gegenwärtig wird für Deutschland bereits von über 130.000 Arbeitsplätzen allein im Bereich der EE gesprochen. Diese Zahl liegt weit über den Beschäftigtenzahlen in Atom- und Kohleindustrie zusammen.<sup>7</sup>

In der Diskussion um den Wandel zu einer nachhaltigen Energiewirtschaft spielt im Kontext der effizienten Kraft-Wärme-Kopplung sowie dem Einsatz umweltfreundlicherer Primärenergien die Brennstoffzelle seit einigen Jahren eine zunehmend bedeutende Rolle.

## **1.2 Zur Bedeutung von Brennstoffzellen und Wasserstoff für eine nachhaltige Energiewirtschaft**

Eine Brennstoffzelle erzeugt gleichzeitig Strom und Wärme. Dabei nutzt sie als Brennstoffe Wasserstoff und Sauerstoff, wobei der Wasserstoff aus einem wasserstoffhaltigen Brennstoff

---

<sup>5</sup> Allerdings konnten sich auch einige der neuen Energie-Unternehmen erfolgreich selbstständig am Kapitalmarkt behaupten und dadurch expandieren.

<sup>6</sup> Gegenwärtig schätzt man, dass weltweit mehr als 2 Mrd. Haushalte keine Stromversorgung haben.

<sup>7</sup> U.a. Bundesverband Erneuerbarer Energien BEE, [www.bee-ev.de](http://www.bee-ev.de).

und der Sauerstoff aus der Luft gewonnen werden kann. Da sie ohne thermische und mechanische Zwischenschritte (wie bei Motoren) direkt elektrische Energie erzeugt (vergleichbar einer Batterie), erzielt sie einen vergleichsweise hohen Wirkungsgrad und ist vielseitig einsetzbar. Es werden drei zentrale **Anwendungsbereiche** unterschieden:

- Stationär (große und kleine Kraftwerke, Strom- und Wärmeversorgung von Objekten)
- Mobil (für Fahrzeuge aller Art)
- Energieversorgung von (portablen) Geräten

Hierfür gibt es unterschiedliche Brennstoffzellensysteme, die aus verschiedenen Materialien aufgebaut sind und aufgrund ihres jeweiligen Betriebsverhaltens nicht für alle Anwendungen geeignet sind. Aufgrund der Vielfalt der Einsatzbereiche, der Zellentypen und der möglichen Brennstoffe gibt es auch eine Vielzahl von Forschungsaktivitäten.<sup>8</sup> Derzeit ist noch offen, in welchem Bereich und mit welcher Technologie zuerst die Marktreife erreicht werden kann, wobei mittlerweile die kleinen stationären die mobilen Anwendungen zu überholen scheinen.

Eine zentrale Motivation für die Entwicklung und Förderung der Brennstoffzelle sind ihre potenziellen **ökologischen Vorteile**. Aufgrund ihrer hohen Wirkungsgrade können je nach Brennstoff die Emissionen von Treibhausgasen und Luftschadstoffen sowie der Ressourcenverbrauch im Allgemeinen erheblich vermindert werden. Durch die geringeren Emissionen (auch bei Nutzung fossiler Brennstoffe) könnten die Emissionen des Verkehrs sowie der Strom- und Wärmeerzeugung deutlich reduziert werden.<sup>9</sup> Die elektrochemische Umsetzung selbst, d.h. der eigentliche strom- und wärmeerzeugende Prozess – die Kaltverbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser – ist sogar völlig emissionsfrei. Die Emissionen entstehen durch die vorgeschaltete Brennstoffaufbereitung, wenn kohlenwasserstoffreiche Brennstoffe wie z.B. Erdgas oder Methan verwendet werden. Wird reiner Wasserstoff verwendet ist die Herstellung des Brennstoffs und ihre Umweltrelevanz zu berücksichtigen. Die Umweltbewertung hängt zudem vom Einsatzbereich ab. Bei stationären Systemen ist beispielsweise als zusätzlicher ökologischer Vorteil die bedarfsgerechte Erzeugung von Wärme möglich.<sup>10</sup>

Mit der Diskussion um die Brennstoffzellentechnologie hat auch die Idee einer **wasserstoffbasierten Energieversorgung** parallel wieder eine Renaissance erfahren. Allerdings sind auf dem Weg zur Wasserstoffwirtschaft noch viele technische Lösungen in Bezug auf (wirtschaftliche) Erzeugung, Transport und Speicherung erforderlich. Die Brennstoffzellentechnologie bietet gleichzeitig die Möglichkeit, mit wasserstoffreichen Brennstoffen (z.B. Erdgas, Methanol) mit nahezu der gleichen Technologie die Zeit bis zur Wasserstoffwirtschaft zu überbrücken und diese vorzubereiten.

---

<sup>8</sup> Bereits im Jahr 2001 beschäftigten sich mehr als 1000 Firmen und Forschungsinstitute mit Brennstoffzellen (Jopp 2001a); diese Zahl wächst beständig, was u.a. an der steigenden Zahl von Kongressen, Tagungen und Messen zu ersehen ist.

<sup>9</sup> Diese mögliche Lösung für den Bereich Verkehr sorgte beispielsweise dafür, dass die Brennstoffzelle das Auto(-Fahren) selbst für einige Protagonisten der grünen Partei wieder attraktiv bzw. vertretbar erscheinen lässt (vgl. Schlauch et al. 2000).

<sup>10</sup> Die Technologie und ökologischen Aspekte werden ausführlicher in den nachfolgenden Abschnitten behandelt, vgl. auch VDEW 2000.

Die Frage des **Brennstoffs** ist entscheidend in Bezug auf die Diffusion und die ökologische Vorteilhaftigkeit der Technologien. Erst der mit erneuerbaren Energien erzeugte Wasserstoff wird den ökologischen Traum von weitgehend umweltneutraler Energieerzeugung Wirklichkeit werden lassen. Dem stehen jedoch (ökologisch relevante) Aufwendungen zum Bau entsprechender Anlagen und Infrastrukturen gegenüber. Bis zur Wasserstoffwirtschaft werden Übergangsbrennstoffe genutzt werden (müssen). Auch hier sind die Fragen nach ökonomischer, ökologischer und infrastruktureller Eignung zu stellen. Daher wird gegenwärtig die stationäre Brennstoffzelle auf Erdgasbasis als die erste breitere Umsetzung dieser Technologie gesehen.

Die skizzierten Hoffnungen in den verschiedenen Anwendungsbereichen sind bereits in einem Stadium, das über rein theoretische Szenarienentwürfe hinausgeschritten ist. In den beiden großen Anwendungsfeldern der stationären und mobilen Brennstoffzellen sind jeweils große, finanzkräftige **Unternehmen** am Start, die sich die Führungsrolle im Wettlauf um das beste Konzept und den frühesten Marktauftritt streitig machen. Mit den Aktivitäten von DaimlerChrysler war Anfang der 90er Jahre die Renaissance im Automobilbereich eingeläutet worden – mittlerweile sind nahezu alle großen Automobilkonzerne in der Brennstoffzellen- bzw. Wasserstoffforschung aktiv. Die Aktivitäten im stationären Bereich setzten etwas später ein, hier wurde das Feld zunächst lange kleineren Innovatoren überlassen. Nur wenige größere Unternehmen stiegen mit entsprechendem Budget und Forschungen ein. Erst seitdem die stationäre Brennstoffzelle in Prognosen bezüglich der Erfolgchancen und des Markteintrittszeitraumes die mobile Brennstoffzelle überholt hat, ist ein signifikantes Umschwenken von immer mehr Großunternehmen zu verzeichnen, die nun aktiv in die laufenden und geplanten Pilotreihen einsteigen und auf die Brennstoffzelle setzen.

In den nachfolgenden Betrachtungen dieses Papiers werden die **kleineren stationären Brennstoffzellensysteme** eine besondere Rolle spielen. Dies begründet sich aus mehreren Argumenten:

- Für kleinere stationäre BZ-Systeme wird der früheste Marktauftritt angenommen.
- BZ können mit geringen Leistungen und schwankenden Belastungen effizient betrieben werden, was sie für dezentrale Anwendungen im Hausenergieversorgungsbereich auszeichnet.
- Mit dieser BZ wird der Haushalt zum Energieversorger. Dies kann einen radikaleren Wandel als in den anderen Anwendungsbereichen bedeuten. Beispielsweise wird im mobilen Bereich nur der Antrieb, nicht aber das Auto selbst bzw. das Mobilitätssystem verändert. Gleiches gilt für ein elektrisch versorgtes Gerät.

Der letzte Aspekt steht für eine dezentrale Energieversorgung. Damit verbunden sind die bereits oben angesprochenen Fragen nach den Veränderungen, ihren Voraussetzungen und möglichen Folgen, die durch die stationär-dezentrale Brennstoffzellenanwendung ausgelöst werden. Der Einsatz dezentraler stationärer Systeme bedeutet nicht nur einen Wechsel der Technologie, sondern auch von Strukturen, Akteuren und Wirtschaftsbeziehungen. Eine erfolgreiche Diffusion ist damit nicht nur von technisch-ökonomischen oder regulativem Faktoren abhängig. Diese Aspekte stehen jedoch in den gegenwärtigen Aktivitäten, Forschungen, Netzwerken und Förderungen dominant im Vordergrund, wie im folgenden Kapitel gezeigt wird.

## 2 Brennstoffzellentechnologien und Anwendungsbereiche

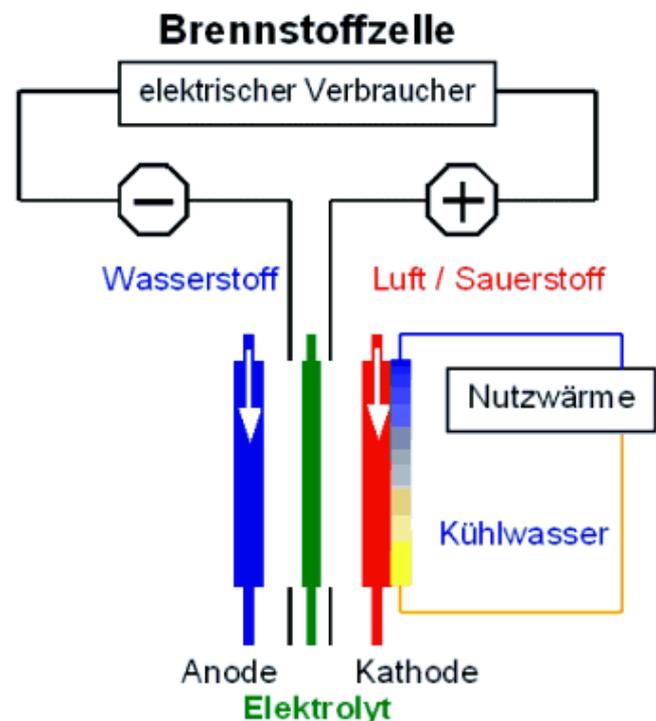
Die Technik der Brennstoffzelle ist bereits seit über 150 Jahren bekannt. 1839 entdeckte der englische Physiker Sir William Robert Grove das Prinzip der Brennstoffzelle. Ende des 19. Jahrhunderts erschien diese Form der Energieerzeugung bereits veraltet, als Werner von Siemens das elektrodynamische Prinzip entdeckte. Mit der Generatorentwicklung verlor die Brennstoffzelle an technischer Bedeutung (Gummert et al. 1998). Die technische Realisierung der Brennstoffzelle wurde lange Zeit durch Werkstoffprobleme erschwert (Jörissen & Garche 2001). In den 1960er Jahren wurden sie im Rahmen der Weltraumprogramme wiederentdeckt und erlebte schließlich im Zuge der Diskussion um endliche Vorkommen fossiler Brennstoffe eine Renaissance.

Nachfolgend werden zunächst das allgemeine Funktionsprinzip sowie die verschiedenen Brennstoffzellentypen beschrieben. Anschließend wird der derzeitige Entwicklungsstand in den drei Anwendungsfeldern – stationär, mobil, portabel – dargestellt.

### 2.1 Aufbau und Funktion von Brennstoffzellen

In der Brennstoffzelle findet durch die Reaktion von Wasser- und Sauerstoff zu Wasser eine umgekehrte Elektrolyse statt. Hierbei werden sowohl Strom als auch Wärme erzeugt. Die Energiewandlung erfolgt auf direktem Wege in einer chemischen Reaktion. So entfallen die in Wärmekraftmaschinen üblichen Zwischenschritte, in denen durch Verbrennung Wärme (thermische Energie) erzeugt wird, die in Motoren oder Turbinen in eine Drehbewegung (mechanische Energie) und mit Generatoren in Strom (elektrische Energie) umgewandelt wird. Auf Grund der direkten Umwandlung sind die auftretenden Verluste geringer. Zudem sind Brennstoffzellen nicht dem Carnot'schen Gesetz unterworfen, das bei der Umwandlung von Wärme in mechanische Energie Grenzen für den Wirkungsgrad setzt. Durch die direkte chemische Reaktion bieten Brennstoffzellen zudem den Vorteil, dass sie deutlich leiser arbeiten und weniger verschleißanfällig sind, da sie kaum bewegliche Teile aufweisen.

Abbildung 1: Aufbau einer Brennstoffzelle



Quelle: bmvit 2002

### 2.1.1 Allgemeine Funktionsweise und Komponenten

Es gibt verschiedene Typen von Brennstoffzellen (s. Abschnitt 2.1.2), die sich im prinzipiellen Aufbau gleichen. Die Abbildung 1 zeigt schematisch den Aufbau einer einzelnen Brennstoffzelle.

Eine **einzelne Zelle** besteht aus einem Elektrolyten (ionenleitende Schicht), der links und rechts von Elektroden (Anode und Kathode) umgeben ist. An der Anode befindet sich die Zuführung für das Brenngas (Wasserstoff) und an der Kathode die Zuführung für die Luft (Sauerstoff). Der Elektrolyt trennt die Brenngas- von der Luftseite. Der Ladungstransport erfolgt je nach Zelltyp von der Kathode zur Anode oder umgekehrt (vgl. Abbildung 2). Hierbei wandern Ionen durch den Elektrolyten und an der Elektrode, zu der die Ionen wandern, findet die Reaktion statt. An der Anode werden Elektronen abgegeben, hier entsteht ein Elektronenmangel, und an der Kathode Elektronen aufgenommen, was zu einem Überfluss an Elektronen führt. Werden Anode und Kathode über einen Stromverbraucher miteinander verbunden, fließt Strom. In einer einzelnen Zelle entsteht eine Spannung von 0,7 Volt. Durch Reihenschaltung können entsprechend höhere Spannungen und Leistungen erzielt werden. Diese Reihenschaltungen werden **Zellstapel** bzw. Zellstacks genannt.

Zumeist wird mit dem Begriff Brennstoffzelle nicht eine einzelne Zelle sondern das **Gesamtsystem** bezeichnet. Dieses besteht aus einem Zellstapel, der Gasaufbereitung, Leistungselektronik sowie Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik.

Für die Reaktion in der Zelle werden Wasserstoff und Sauerstoff benötigt. Der Sauerstoff wird in Form von Luft zugeführt (Ausnahme Alkalische Brennstoffzelle, s. Abschnitt 2.1.2), die **Wasserstoffversorgung** erfolgt entweder direkt durch reinen Wasserstoff (aus Tanks, Flaschen oder Patronen) oder durch die Umwandlung von wasserstoffreichen Brennstoffen. Hierfür kommen sowohl Gase (Erdgas oder so genannte Sondergase: Bio-, Klär-, Deponie- oder Grubengas) als auch flüssige Treibstoffe (Benzin, Diesel/Heizöl und Methanol) in Frage. Diese werden direkt vor dem Verbrauch in einem so genannten Reformier aufbereitet (Reformationsprozess). Je nach Zelltyp sind verschiedene Anforderungen an die Reinheit des Reformates zu stellen.

### 2.1.2 Brennstoffzellentypen

Zu unterscheiden sind sechs Typen von Brennstoffzellen. Sie unterscheiden sich durch den eingesetzten Elektrolyten und damit durch die Betriebstemperatur, bei welcher der elektrochemische Prozess im Zellstapel abläuft. Abbildung 2 zeigt einen Überblick über verschiedene Typen von Brennstoffzellen, die anschließend sowohl technisch als auch in Bezug auf Einsatzbereiche und -möglichkeiten kurz erläutert werden.

Je nach Einsatzbereich ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Brennstoffzellen: Für mobile Anwendungen spielen insbesondere die Starteigenschaften, eine große Flexibilität im Lastgang und das Gewicht eine wichtige Rolle. Demgegenüber ist für stationäre Anwendungen die Lebensdauer eine entscheidende Anforderung.<sup>11</sup> Hierbei ist zwischen

---

<sup>11</sup> Während PKW-Motoren nur eine Laufzeit von etwa 3.000 Stunden erreichen, haben motorische BHKW jährliche Laufzeiten von 6.000 bis 8.000 Betriebsstunden und erreichen Gesamtlaufzeiten von 60.000 bis 100.000 Betriebsstunden.

Hausenergieanwendungen und größeren Kraftwerken zu unterscheiden. Erstere erfordern ebenfalls schnelle Lastwechsel, während für letztere auch langsame Lastwechsel möglich sind (Garcke & Jörissen 2002). Für portable Brennstoffzellen ist wie bei den mobilen Brennstoffzellen das Gewicht zentral, zudem empfiehlt sich eine geringe Betriebstemperatur.

Abbildung 2: Kennzeichnende Eigenschaften der Brennstoffzellentypen<sup>12</sup>

TYP	Kathodenkammer und Kathodengas	Elektrolyt mit Ionenstrom	Anodenkammer und Brenngas	Betriebs-temp.
<b>PAFC</b> Phosphoric Acid Fuel Cell	CO-freie Luft	Phosphorsäure H <sup>+</sup>	Wasserstoffreiches Gas	200°C
<b>AFC</b> Alkaline Fuel Cell	Gemisch: CO <sub>2</sub> -freie Luft und H <sub>2</sub> O	Kalilauge OH <sup>-</sup>	Abgas CO <sub>2</sub> -freier Wasserstoff	70°C
<b>PEFC</b> Polymer Electrolyte Fuel Cell	CO-freie Luft	Polymermembran H <sup>+</sup>	CO-freier Wasserstoff	80°C
<b>MCFC</b> Molten Carbonate Fuel Cell	Gemisch: Luft und CO <sub>2</sub>	Karbonatschmelze CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Abgas Erdgas, C-Monoxid, Wasserstoff	650°C
<b>SOFC</b> Solid Oxide Fuel Cell	Luft	Zirkonoxidkeramik O <sup>-</sup>	Abgas Erdgas, C-Monoxid, Wasserstoff	750°C bis 950°C

Quelle: Gummert et al. 1998, S. 10

### ➤ Phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC)

Die PAFC zählt zu den am weitesten entwickelten Zellen. Sie arbeitet mit dem flüssigen Elektrolyten Phosphorsäure, der in einer Matrix gebunden ist. Der flüssige Elektrolyt wirkt sich nachteilig aus, da die Anlage auf einer bestimmten Temperatur gehalten werden muss, damit der Elektrolyt nicht auskristallisiert, wodurch der Zellstapel irreparabel geschädigt wäre. In der PAFC kann Erdgas-Reformat oder reiner Wasserstoff verwendet werden. Auch entsprechend aufbereitete Sondergase, z.B. Biogas, Deponiegas oder Klärgas, können eingesetzt werden. Auf Grund der relativ niedrigen Betriebstemperatur werden hohe Anforderungen an die Reinheit des eingesetzten Brenngases und damit an die Qualität des Reformationsprozesses gestellt. Die PAFC ist vor allem für den stationären Einsatz geeignet.

### ➤ Alkalische Brennstoffzelle (AFC)

In den fünfziger Jahren wurde die Alkalische Brennstoffzelle (AFC) von den Firmen VARTA und SIEMENS entwickelt. Die Leistung dieser Systeme erreichte bis zu 100 kW. Da die AFC mit reinem Wasserstoff und Sauerstoff versorgt werden muss, blieb die An-

<sup>12</sup> Die Pfeile kennzeichnen die Flussrichtung von Ionen und Abgas.

wendung der AFC auf die Bereiche Raumfahrt, Militär- und U-Boottechnik begrenzt. Die AFC ist eine typische Niedertemperaturbrennstoffzelle.

➤ **Polymermembranbrennstoffzelle (PEFC bzw. PEMFC)**

In Polymermembranbrennstoffzellen (PEFC oder PEMFC) wird als Elektrolyt eine dünne Kunststoffmembran eingesetzt. Die PEFC stellt hohe Anforderungen an den Reformationsprozess, da der feste Elektrolyt empfindlich gegen Kohlenmonoxid ist.

Die PEFC wird in den USA, Kanada und Japan aber auch in Europa entwickelt. Sie ist aufgrund ihres festen Elektrolyten gut im mobilen Bereich zu verwenden. Wesentlich sind ihre Schnellstarteigenschaften, das heißt dass sie sofort nach dem Start elektrische Energie liefern kann. Neben dem mobilen Einsatz wird sie auch für stationäre und portable Anwendungen entwickelt.

➤ **Direktmethanolbrennstoffzelle (DMFC)**

Die Direktmethanolbrennstoffzelle ist eine Weiterentwicklung der PEFC. Sie zeichnet sich dadurch aus, dass sie direkt mit flüssigem Methanol oder mit Methanoldampf betrieben werden kann, das heißt, dass keine Umwandlung in Wasserstoff notwendig ist. Damit stellt sie insbesondere für mobile Anwendungen eine interessante Alternative dar. Auch für portable Anwendungen sind DMFC geeignet, sie befinden sich jedoch noch im Laborstadium.

➤ **Schmelzkarbonatbrennstoffzelle (MCFC)**

Die Schmelzkarbonatbrennstoffzelle (MCFC) ist eine Hochtemperaturbrennstoffzelle und arbeitet wie die PAFC mit einem flüssigen Elektrolyten, der hier aus geschmolzenen Karbonaten besteht.

In der MCFC kann auf Grund ihrer hohen Betriebstemperatur eine interne Reformierung stattfinden. Das bedeutet, dass innerhalb des Zellstapelraumes auch die Umsetzung des Brenngases zu Wasserstoff stattfindet und kein vorgeschalteter Reformator erforderlich ist. Der Elektrolyt ist deutlich unempfindlicher und kann daher auch Sondergase sehr viel besser verarbeiten als Brennstoffzellen niedrigerer Temperatur. Hier stellen jedoch die Werkstoffe und die Temperaturschwankungen noch hohe Anforderungen an die Entwicklung.

MCFC sind auf Grund der langen Aufheizzeiten hauptsächlich für die stationäre Anwendung in Blockheizkraftwerken (BHKW) und Großkraftwerken geeignet.

➤ **Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)**

Die oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC) ist ebenfalls eine Hochtemperaturbrennstoffzelle und auch für den stationären Einsatz vorgesehen. Sie arbeitet bei ca. 1000°C mit einem festen Elektrolyten. Die SOFC hat die gleichen Vor- und Nachteile wie die MCFC. Wie bei der MCFC können aufgrund der hohen Temperatur neben Erdgas auch Sondergase verwendet werden.

Die SOFC ist von den genannten Brennstoffzellentypen am wenigsten weit entwickelt (Oertel & Fleischer 2000), ihr werden aber große Potenziale zugesprochen.

## 2.2 Stationäre Anwendungen – Stand und Entwicklungen

Stationäre Brennstoffzellen eignen sich zur Erzeugung von Strom und Wärme, sie können damit motorisch betriebene Blockheizkraftwerke oder Dampfturbinen-Heizkraftwerke ersetzen. Sie werden zur Zeit sowohl für kleine, dezentrale Anwendungen als auch für große Kraftwerke entwickelt. Brennstoffzellen zeichnen sich im Vergleich zu Motor-BHKW und Heizkraftwerken durch einen höheren elektrischen Wirkungsgrad, bessere Teillastfähigkeit und höhere Stromkennzahlen (Verhältnis von Strom zu Wärme) aus. Sie können also flexibler „gefahren“ werden, d.h. sich den häufig schwankenden Nutzenergiemengen besser anpassen. Die im Vergleich zu motorisch betriebenen Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen z.T. deutlich geringere Wärmeproduktion stellt ebenfalls einen bedeutenden Vorteil insbesondere bei den Anwendungen im kleineren Leistungsbereich bzw. bei Haushalten dar, denn in der Regel stellt die sinnvolle Abnahme einer größeren Wärmemenge das entscheidende Problem der technischen Auslegung dar. Die beschriebenen Vorteile können somit zu deutlich effizienterer Primärenergieausnutzung und Reduktion von Emissionen führen.

Im Folgenden wird – geordnet nach drei zentralen Leistungsklassen: dezentrale Hausenergieversorgung, Siedlungsversorgung und Großkraftwerke – der gegenwärtige Entwicklungsstand stationärer Anlagen dargestellt.

### 2.2.1 Dezentrale Hausenergieversorgung

In der dezentralen Hausenergieversorgung stehen Brennstoffzellen in Konkurrenz zu motorischen Blockheizkraftwerken. Hierbei haben die kleinsten am Markt verfügbaren Blockheizkraftwerke elektrische Leistungen von ca. 5 kW (Kilowatt) und thermische Leistungen von ca. 12 kW. Diese Blockheizkraftwerke sind eher für Mehrfamilienhäuser geeignet und benötigen eine zusätzliche Spitzenlastversorgung für die Wärme (vgl. Hoffmann & Hirschl 2001). Die Brennstoffzellen, die für den Einsatz im Wohnungsbau konzipiert werden, können noch geringere Leistungen - bis zu 1 kW elektrisch - erreichen, wodurch erstmals auch der Einsatz in Einfamilienhäusern oder Wohnungen möglich wird. An kleine dezentrale Anlagen werden relativ hohe Anforderungen an die Flexibilität gestellt, da die Leistungsnachfrage in Einfamilienhäusern starken zeitlichen – sowohl jahreszeitlich als auch im Tagesverlauf – Schwankungen unterworfen ist.

Konzepte zur Hausenergieversorgung mit Brennstoffzellen<sup>13</sup> werden bereits seit einigen Jahren von zwei deutschen und einer Schweizer Firma verfolgt. Hierbei handelt es sich um einen Heizungshersteller, einen Industriekonzern und eine technische Entwicklungsfirma. Neben diesen „First-mover“ Unternehmen beschäftigen sich in jüngster Zeit zunehmend mehr Unternehmen mit der Entwicklung kleiner stationärer Brennstoffzellensysteme. Nachfolgend werden die drei wesentlichen, treibenden Unternehmen und ihre Entwicklungen in diesem Anwendungsbereich näher beschrieben (Informationen aus den Jahren 2001/2002):

- Der Heizgeräte-Hersteller John *Vaillant* GmbH u. Co. war die erste deutsche Firma, die mit der Entwicklung von Brennstoffzellen zur Hausenergieversorgung begann. Vaillant

---

<sup>13</sup> In den geplanten Brennstoffzellensystemen werden in Kraft-Wärme-Kopplung Strom und Wärme zur Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung erzeugt.

entwickelt derzeit kleine stationäre Brennstoffzellengeräte primär für den Wohnungsbe-  
reich, die neben der Heizwärme auch Strom erzeugen sollen (Bezeichnung: Brennstoff-  
zellen-Heizgerät BZH).<sup>14</sup> Sie eignen sich besonders für Mehrfamilienhäuser.

Entwicklungspartner von Vaillant sind die amerikanischen Unternehmen Plug Power und  
General Electric Fuel Cell Systems (GE). Derzeit sind bereits Prototypen entwickelt. Seit  
2001 werden erste Feldtests durchgeführt. Vaillant wird hierbei von Energieversorgungs-  
unternehmen wie RWE, E.on, Ruhrgas oder Gasunie (Frankreich) unterstützt (Donner-  
bauer 2001b). Testanlagen sollen in Deutschland und den Niederlanden installiert wer-  
den. Für 2003 ist eine Pilotserie von ca. 400 Geräten geplant, die primär an Fachhand-  
werker gelangen sollen, bevor im Jahre 2004 der breite Marktauftritt mit Seriengeräten  
erfolgen soll (vgl. Donnerbauer 2001a; Janzing 2001).

- Die Schweizer Firma *Sulzer-Hexis* (Maschinenbau/Verfahrenstechnik) entwickelt eine  
noch kleinere für Einfamilienhäuser geeignete Brennstoffzelle.<sup>15</sup> In Feldtests wurden in  
dieser oxidkeramischen Brennstoffzelle (SOFC) neben Erdgas auch Flüssiggas und  
leichtes Heizöl getestet. Ebenso beabsichtigt Sulzer-Hexis den Betrieb mit Biogas zur  
Marktreife zu entwickeln (Janzing 2001; Jenne & Riggerbach 2002). Seit 1998 werden  
Feldtestversuche in der Schweiz, Deutschland, den Niederlanden, Japan und Spanien  
durchgeführt. Bis einschließlich 2003 sollen etwa 400 Geräte installiert werden. Dazu  
wurden bereits Vertriebsvereinbarungen mit der Oldenburger EWE AG, der EnBW Ener-  
gie Baden-Württemberg AG und der EWR AG getroffen. Dabei wird zunächst ein  
Contractingmodell angeboten. Die Energieversorgungsunternehmen installieren und war-  
ten die Brennstoffzellen in Zusammenarbeit mit von ihnen beauftragten Installateuren. Ab  
2004 ist geplant, ein verbessertes Serienprodukt herzustellen und ab 2005 soll auch der  
amerikanische Markt erschlossen werden.
- Die Firma *HGC Hamburg Gas Consult* GmbH bzw. ihre Tochtergesellschaft *European  
fuel cell GmbH* entwickelt seit 1997 eine erdgasversorgte PEFC-Brennstoffzellen-  
Hausenergiezentrale<sup>16</sup> und führt zur Zeit Feldtests bei verschiedenen Gas- und Stromver-  
sorgern (u.a. Rheinische Energie AG, Wingas GmbH, Heingas Hamburger Gaswerke  
GmbH, VNG Verbundnetz Gas AG) durch. Die *European fuel cell GmbH* wurde inzwi-  
schen an die britische BAXI Group (Heizungsanlagenhersteller) verkauft, die HGC selbst  
beschränkt sich nun auf die Planung und den Betrieb von Brennstoffzellenanlagen.

Neben diesen drei Herstellern, die sich bereits seit mehreren Jahren mit der Entwicklung von  
Brennstoffzellen für die Hausenergieversorgung befassen, gibt es mittlerweile weitere, die in  
diesen Zukunftsmarkt einsteigen. So plant mittlerweile auch *Buderus* Heiztechnik die Ent-

---

<sup>14</sup> Das Brennstoffzellen-Heizgerät basiert auf einer Polymermembranbrennstoffzelle (PEFC), hat ca. 4,5 kW  
elektrischer und 7 kW thermischer Leistung und ist mit einem integrierten Zusatzheizgerät geplant, das zusätz-  
lich bis zu 50 kW modulierbare thermische Leistung liefert (Klinder 2000). Das Gerät kann auch in Teillast mit  
einer minimalen Leistung von 1 kW elektrisch und 1,5 kW thermisch betrieben werden. Zielwert des Gerätes ist  
ein elektrischer Wirkungsgrad von 35% und ein Gesamtwirkungsgrad von 80%.

<sup>15</sup> Die Anlage hat eine elektrische Leistung von 1 kW und eine thermische Leistung von 3 kW sowie einem ther-  
mischen Zusatzbrenner mit bis zu 25 kW. Der elektrische Wirkungsgrad beträgt zur Zeit 25 bis 30% und soll  
bis über 30% gesteigert werden, der Gesamtwirkungsgrad beträgt etwa 85%.

<sup>16</sup> Die elektrische Leistung dieser Anlagen beträgt 3 kW und die maximale thermische Leistung 8 kW.

wicklung einer entsprechenden Anlage. Hierfür ging das Unternehmen eine Kooperation mit International Fuel Cells (IFC) ein. Die *Viessmann Werke*<sup>17</sup> entwickeln eine erdgasbetriebene PEFC-Hausenergieversorgungsanlage. Die Entwicklung wird bis Juni 2003 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert. Damit sind mehrere große deutsche Heizungsanlagenhersteller in dieses Geschäftsfeld eingestiegen.

Die PROTON MOTOR Fuel Cell GmbH entwickelt gemeinsam mit Robert Bosch GmbH, Fraunhofer ISE, Süd-Chemie AG und Kaco Gerätetechnik GmbH eine kleine PEFC-Brennstoffzelle. Dieses Projekt wird ebenfalls bis zum Sommer 2003 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert.

International gibt es ebenfalls eine Reihe weiterer Unternehmen, vor allen in den USA, die kleine Brennstoffzellen im Leistungsbereich bis 10 kW<sub>el</sub> entwickeln (vgl. z.B. Erdmann 2002).

Dieser Überblick verdeutlicht, dass mittlerweile eine Vielzahl von Unternehmen, vorwiegend aus den Bereichen Entwicklung, Heizungsanlagen und Energieversorgung, den Markt der Hausenergieversorgung mit Brennstoffzellen besetzen wollen. Dabei schließen sich die Energieversorger häufig als erste Anwender und Dienstleister in Netzwerken und Kooperationen mit entwickelnden Unternehmen zusammen. Als ein bedeutendes Beispiel für eine derartige Kooperation sei hier die Initiative Brennstoffzelle (IBZ)<sup>18</sup> genannt.

Dezentrale kleine Kraftwerke können elektronisch über eine Last-Steuerungssoftware zu so genannten **virtuellen Kraftwerken** verbunden werden (BUND 2001). Der flexible Zusammenschluss von Einzelanlagen kann einen Ersatz für zentrale Kraftwerke bilden. Indem die Endenergie am Ort des Verbrauchs erzeugt wird, können die Primärenergie-Verluste bei der Stromerzeugung und Verteilung verringert werden. In ein solches virtuelles Kraftwerk können prinzipiell alle dezentralen Energieerzeugungsanlagen einbezogen werden. Entscheidend ist dabei die richtige Regelung und bestmögliche Antizipierung von Last- und Klimaprofilen. Energiemanagement, Kommunikations- und Informationstechnik werden somit zu entscheidenden Anforderungen.<sup>19</sup> Die Forschung und praktische Erprobung steht hier erst am Anfang. Inwieweit das Konzept der virtuellen Kraftwerke Auswirkungen und ggf. Beeinträchtigungen für die Haushalte mit sich bringen kann (z.B. bei widersprüchlichen Anforderungen bzw. Situationen bezüglich der Haushalts- und öffentlichen Versorgung) ist ebenfalls noch unklar. Die Hersteller gehen jedoch davon aus, dass „der Regelfall sein wird, dass viele

---

<sup>17</sup> Die Entwicklung erfolgt gemeinsam mit dem Zentrum für Wasserstoffforschung, dem Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Sachsenring Entwicklungsgesellschaft mbH, SGL Carbon AG, Siemens und Landis & Staefa.

<sup>18</sup> Der IBZ gehören Gerätehersteller und Forschungseinrichtungen ebenso wie Umweltinstitutionen oder Branchenverbände an. Die derzeitigen Mitglieder sind die EWE AG (Oldenburg), die MVV Energie AG (Mannheim), die Ruhrgas AG (Essen) und die VNG - Verbundnetz Gas Aktiengesellschaft (Leipzig). Weitere Partner sind z.B. Vaillant, Buderus, Viessmann, Sulzer Hexis, die deutsche Energieagentur (dena), der Zentralverband Sanitär Heizung Klima.

<sup>19</sup> Die Energietechnische Gesellschaft (ETG) im VDE (Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik) schreibt hierzu: „Der Trend zur Dezentralisierung in der Stromwirtschaft ist unaufhaltsam. Übertragungs- und Verteilnetze müssen eine zunehmende Zahl an Windkraftwerken, Photovoltaikanlagen oder Blockheizkraftwerken verkraften. Energieversorger untersuchen derzeit, wie sie zukünftig eine Vielzahl kleinster Brennstoffzellenheizgeräte integrieren können, die in ihrer Vielzahl eines Tages die Größe mittlerer Kraftwerke erreichen könnten.“ ([www.vde.de](http://www.vde.de), Zugriffsdatum 4.10.2002).

Kleinerzeuger sich – über die Stochastik gemittelt – wie gut prognostizierbare Netzbezirke verhalten. Über die mit der Zeit wachsende Erfahrung lassen sich so Verhaltensalgorithmen (bzw. Lastprofile) erstellen, die in das Netzmanagement integriert werden können.“ (Klinder 2001b) Überproduktionen von Wärme, die bei einer Spitzenlaststrom-Anforderung entstehen, müssen dann mit Wärmespeichern aufgefangen werden.

### 2.2.2 Siedlungsversorgung

Auch im Bereich der Siedlungsversorgung stehen Brennstoffzellen in Konkurrenz zu motorischen Blockheizkraftwerken, denen sie durch bessere Wirkungsgrade, bessere Stromkennzahlen und besseres Teillastverhalten überlegen sind. In dieser Leistungsklasse sind die Anforderungen an Flexibilität deutlich geringer als bei der Hausenergieversorgung. Im Leistungsbereich 100 bis 300 kW gibt es eine Reihe von Herstellern, die Anlagen entwickeln und zum Teil bereits anbieten.

Die erste kommerziell verfügbare Brennstoffzelle war der phosphorsaure Typ PAFC PC 25 der amerikanischen Firma ONSI. Sie wird seit etwa zehn Jahren in einem Leistungsbereich von 200 kW<sub>el</sub> (Kilowatt elektrisch) und 220 kW<sub>th</sub> (Kilowatt thermisch) angeboten und ist mittlerweile ein marktreifes Produkt, von dem weltweit über 200 Anlagen betrieben werden (Stand 2001). Allerdings ist für diese Anlage in Bezug auf ihre Weiterentwicklung und weitere Verbreitung eine Stagnation und Bedeutungsabnahme zu konstatieren, was z.T. auf zu geringe Wirkungsgrade sowie den eingesetzten Elektrolyten (Phosphorsäure) zurückgeführt wird (Oertel/Fleischer 2000).

Weitere Entwicklungen in dieser Größenordnung werden von verschiedenen Unternehmen betrieben:

- Weitere Forschung und Entwicklung an der PAFC durch die International Fuel Cells sowie die Firmen Fuji Electric, Toshiba und Mitsubishi Electric.
- Die ALSTOM Energietechnik GmbH entwickelt in Kooperation mit Ballard eine 250 kW Polymermembran-Brennstoffzelle (PEFC). Eine Demonstrationsanlage wird bereits von der BEWAG in Berlin betrieben, eine weitere plant die EnBW Energie Baden-Württemberg AG in Mingolsheim (Kreis Karlsruhe) für 2002 (EnBW 2001).
- Ein deutsch-dänisches Firmenkonsortium unter der Leitung von MTU Friedrichshafen entwickelt eine Schmelzkarbonatbrennstoffzelle (MCFC) mit 280 kW. Das sogenannte „Hot Module“ wird zur Zeit in Feldtests erprobt und soll 2003 kommerzialisiert werden (DWV 2000).
- Siemens entwickelt SOFC-Anlagen in einer Größe von 250 Kilowatt und von 300 kW, wobei letztere mit einer Gasturbine gekoppelt werden sollen. Erste Produkte sollen im Jahr 2004 eingeführt werden.

### 2.2.3 Brennstoffzellen-Kraftwerke zur öffentlichen Stromversorgung

Für die öffentliche Stromversorgung kommen Brennstoffzellenanlagen im Leistungsbereich zwischen 20 und 200 MW in Betracht. Zudem eignen sich für die industrielle Eigenversor-

gung Brennstoffzellensysteme in der Leistungsklasse 0,5 bis 20 MW. Für diese Leistungsbe-  
reiche sind vor allem die Schmelzkarbonatbrennstoffzelle (MCFC) und die oxidkeramische  
Brennstoffzelle (SOFC) geeignet. Die Entwicklung von Brennstoffzellen-Kraftwerken in dieser  
Größenordnung stellt eher eine langfristige Option dar. Zur Zeit befinden sie sich erst in klei-  
neren Leistungsgrößen in der Erprobung. Hochtemperatur-Brennstoffzellen eignen sich –  
aufgrund ihrer langen Anfahrzeiten und hohen Leistungen – besonders für den Einsatz im  
Grundlastbereich. Schmelzkarbonatbrennstoffzellen können mit Dampfturbinen gekoppelt  
werden, und so einen Systemwirkungsgrad von bis zu 70% erreichen. Entsprechende De-  
monstrationsvorhaben befinden sich noch in Vorbereitung (VDEW 2000). SOFC können zur  
Wirkungsgraderhöhung mit Gasturbinen kombiniert werden.

An der Weiterentwicklung der MCFC wird weltweit gearbeitet. In den USA werden Testan-  
lagen im Leistungsbereich von 250 bis 2.000 kW betrieben, diese Anlagen sollen auf Leistun-  
gen von 3 bis 4 MW vergrößert werden. In Japan wird eine 1 MW Demonstrationsanlage  
errichtet. Auch in Deutschland ist unter Federführung der EnBW Energie Baden-  
Württemberg AG eine 1 MW-Anlage geplant. Die Grundsteinlegung ist bereits erfolgt, die  
Inbetriebnahme soll in 2003 erfolgen.<sup>20</sup>

Auch für SOFC-Kraftwerke werden weltweit (USA, Japan, Europa) verschiedene Entwick-  
lungsvorhaben durchgeführt. SOFC befinden sich derzeit noch im Laborstadium, es wurden  
jedoch bereits erste Demonstrationsvorhaben in kleineren Leistungsbereichen durchgeführt.  
Im späteren Verlauf sollen diese Anlagen im MW-Bereich vertrieben werden.

PAFC haben bereits einen höheren Entwicklungsstand, ihr bisheriges Wirkungsgradpotenzial  
gilt aber als nicht mehr steigerbar (vgl. Fleischer & Oertel 2000). Daher konzentrieren sich  
die Entwicklungen im Bereich Kraftwerke auf SOFC und MCFC. Hier sind noch erhebliche  
Weiterentwicklungen notwendig. Auch für die mögliche Kopplung mit Gas- oder Dampfturbi-  
nen ist noch weitere Forschung nötig.

## 2.2.4 Aktuelle Forschungen zu stationären Anlagen

Wie gezeigt sind Brennstoffzellen sowohl für die zentrale als auch für die dezentrale Bereit-  
stellung von Strom und Wärme in Industrie, Kraftwerken, Wohnsiedlungen und einzelnen  
Haushalten geeignet. Der anvisierte Leistungsbereich von Brennstoffzellen erstreckt sich  
hierbei von Kleinanlagen im Bereich weniger Kilowatt bis zu Großanlagen im Megawattbe-  
reich.

Da sich Brennstoffzellen im Allgemeinen und über alle Typen noch im Entwicklungsstadium  
befinden, liegt der größte Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten grundsätzlich in der Wei-  
terentwicklung der Technologie, der technischen Machbarkeit und der Erschließung von Kos-  
tensenkungspotenzialen zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit. Die konkreten F&E-  
Bemühungen finden jedoch überwiegend nicht auf der Ebene der allgemeinen Brennstoffzel-  
le, sondern in Bezug auf das spezifische, anwendungsbezogene System statt, da das Zu-  
sammenwirken und die Abstimmung der Systemkomponenten eine zentrale Aufgabe ist.

---

<sup>20</sup> Hersteller dieser Anlage ist Siemens-Westinghouse. Hierbei handelt es sich um eine SOFC-Zelle von 800  
Kilowatt, die durch eine Gasturbine von 200 Kilowatt ergänzt wird.

Für die stationäre Anwendung werden nach derzeitigem Stand der Entwicklung sowie der aktuellen und geplanten Forschungsaktivitäten insbesondere Membran- (PEFC), phosphorsäure (PAFC) sowie Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen (SOFC) eingesetzt.<sup>21</sup>

Die Entwicklungen und Aktivitäten im Bereich der **Hausenergieversorgung** können als die umfangreichsten und derzeit am weitesten fortgeschrittenen hervorgehoben werden. Auf Grund der derzeitigen Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben sowie der Ankündigungen der Hersteller kann in diesem Bereich in den nächsten Jahren mit der Markteinführung gerechnet werden.

Zentrales F&E-Ziel für die stationäre Anwendung im Bereich der Hausenergieversorgung ist die Erhöhung der Lebensdauer der Brennstoffzellenstacks. Hier sollen bis zu 40.000 Betriebsstunden erreicht werden, die bisherigen Tests erreichten bislang maximal 5.000 Stunden. Der Schwerpunkt in diesem Bereich liegt in der Entwicklung der PEFC, die eine hohe Flexibilität hinsichtlich verschiedener Nutzerprofile in Bezug auf die Relation der erzeugten Strom- und Wärmemengen aufweist (d.h. diese Zelle kann bei Bedarf bevorzugt mit hoher Stromkennzahl, d.h. einem vergleichsweise hohen Anteil an Strom (im Vergleich zur Wärme) betrieben werden).

Der zweite Brennstoffzellentyp, der in diesem Bereich eine bedeutsame Rolle spielen soll, ist die oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC). Bei der SOFC wird gegenwärtig daran gearbeitet, die häufig wechselnden Lastansprüche dieses Anwendungsbereichs zu erfüllen. Auf Grund der hohen Betriebstemperatur besteht hier zudem intensiver Forschungsbedarf im Bereich der Materialien und Werkstoffe (vgl. Oertel & Fleischer 2000).

Weitere Entwicklungsziele bei kleinen stationären Brennstoffzellen sind die Betriebssicherheit, die technische Genehmigungsfähigkeit und Kostenreduktion (Erdmann 2002).

Bei den **Brennstoffen** für die stationären Anlagen im Haus- und Siedlungsbereich spielen derzeit Erdgas, aber auch Heizöl, Benzin oder Methan eine vorrangige Rolle in der Diskussion und der Anwendungserprobung.<sup>22</sup> Bei der **Brennstoffaufbereitung** für kleine stationäre Anlagen ist noch gesonderte Entwicklungsarbeit notwendig. Zwar wird derzeit konventionelle Verfahrenstechnik zur Reformierung eingesetzt (die in Großanlagen bereits vielfach erprobt ist), ihre Anpassung auf die kleinen Anlagengrößen stößt jedoch noch auf Schwierigkeiten (Oertel & Fleischer 2000).

Reiner Wasserstoff wird derzeit bereits ebenfalls in einigen Demonstrationsanlagen eingesetzt, allerdings sind breiter angelegte Pilotvorhaben derzeit nicht in Planung. In Bezug auf den Einsatz von Wasserstoff als Brennstoff besteht noch großer Entwicklungsbedarf bezüglich der Speicherung, des Transports und der Herstellung, die auf möglichst ökologische, d.h. ressourcensparende Weise erfolgen sollte.

---

<sup>21</sup> Die Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC) ist derzeit aufgrund des Einsatzes von Methanol als Brennstoff (aus ökologischen Gründen) umstritten, allerdings ist sie in allen Anwendungsbereichen (stationär, mobil, portabel) einsetzbar, was zu einem entscheidenden ökonomischen Vorteil führen könnte. Sie befindet sich derzeit jedoch noch im Laborstadium, und die gegenwärtigen Forschungsbemühungen konzentrieren sich in Bezug auf die Anzahl, das Finanzvolumen und die Marktbedeutung der beteiligten Akteure deutlich auf die zuerst genannten Brennstoffzellentypen.

<sup>22</sup> Erste Versuche werden auch mit Biogas durchgeführt (vgl. Jenne & Riggensbach 2002).

## 2.2.5 Ökologische Aspekte stationärer Brennstoffzellen

Generell stellt die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme einen Effizienzgewinn gegenüber der ungekoppelten Erzeugung dar. Dieser Effizienzgewinn und die damit verbundene Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen fallen bei Brennstoffzellen noch positiver aus als bei BHKW, da diese höhere elektrische Wirkungsgrade erreichen und bessere Teillastfähigkeiten sowie Stromkennzahlen haben und somit flexibler einsetzbar sind (vgl. Bünger et al. 2000).

In Bezug auf sonstige Schadstoffemissionen (CO, NO<sub>x</sub> etc.) sind Brennstoffzellen gegenüber motorischen BHKW ebenfalls positiv zu bewerten. Bislang existieren jedoch noch keine detaillierten Ökobilanzen und bei der Darstellung der ökologischen Vorteile von Brennstoffzellen werden die Brennstoffvorketten teilweise nicht vollständig berücksichtigt.

Für größere stationäre Brennstoffzellen (Anwendungsbereich z.B. Siedlungsversorgung) existieren erste orientierende ökologische Systemvergleiche mit Kraftwerken und Heizanlagen (vgl. Dienhart et al. 1998, Pehnt 2000, Höhlelein et al. 1998, Patyk 2000, Pehnt & Nitsch 2000, Pehnt 2001). Diese wurden überwiegend auf der Basis von Abschätzungen durchgeführt, da die Datenverfügbarkeit noch gering ist. Die meisten beziehen sich auf große Brennstoffzellenkraftwerke oder Brennstoffzellen-BHKW im Leistungsbereich 200 bis 300 kW. Für kleine Anlagen im Hausenergiebereich liegen noch keine detaillierten ökologischen Betrachtungen vor. Erste Ansätze liefert hier die Studie des TAB, die einen Vergleich der Emissionen von kleinen dezentralen stationären Brennstoffzellen mit Gas- und Ölheizungen sowie Fernwärme für verschieden große Ein- und Mehrfamilienhäuser enthält (Oertel & Fleischer 2000).

Der breite Einsatz von Brennstoffzellen würde deutliche Veränderungen in der Energieträgerstruktur bewirken. Mögliche Auswirkungen dieser Veränderungen wurden von Oertel & Fleischer (2000) für den Anwendungsfall einer dezentralen Hausenergieversorgung untersucht. Hierzu wurden verschiedene Szenarien betrachtet. So ergibt sich beispielsweise bei einer 10-prozentigen Implementierung von Brennstoffzellen-BHKW in Haushalten im Jahre 2010, dass je nach Auslegung der Brennstoffzellen jährlich zwischen 28 und 47 PJ Strom in Brennstoffzellen erzeugt und damit eine entsprechende Menge zentral erzeugten Stroms substituiert werden kann. Gleichzeitig könnten 16 PJ Fernwärme substituiert werden. Je nachdem, ob Öl-Heizungen durch Heizöl-Brennstoffzellen oder Gas-Brennstoffzellen ersetzt werden, ergibt sich ein Mehrverbrauch von 23 PJ bzw. ein Minderverbrauch an Heizöl von 72 PJ. Dies wäre mit einem Mehrbedarf an Erdgas zwischen 46 und 163 PJ pro Jahr verbunden. Damit ergäbe sich im Haushaltssektor eine deutliche Verschiebung der Energieträgerstruktur gegenüber ansonsten erwarteten Trendszenarien. Zudem ergeben sich Einsparungen von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten zwischen 1,6 und 5,1 Mio t pro Jahr (vgl. Oertel & Fleischer 2000, S. 192ff.) Bei einer 100-prozentigen Durchdringung des Heizungsbestandes mit Brennstoffzellen könnten je nach Auslegung der Brennstoffzellen 60-100% des für 2010 erwarteten Stromverbrauchs der Haushalte substituiert werden, womit eine CO<sub>2</sub>-Einsparung von 10-25% der Haushaltsemissionen erreichbar wäre (Oertel & Fleischer 2000, S. 195).

Damit ergibt sich durch Brennstoffzellen zwar ein insgesamt effizienterer Einsatz von Primärenergie, eine Verschiebung zum umweltfreundlicheren Brennstoff Erdgas und teilweise ein Ersatz zentraler Kraftwerke, es wird aber auch deutlich, dass Brennstoffzellen erst dann

einen wirklich deutlichen Beitrag zu einer nachhaltigen Energieversorgung leisten können, wenn sie mit regenerativen Brennstoffen betrieben werden.

### 2.2.6 Rahmenbedingungen und Wirtschaftlichkeit

Brennstoffzellenanlagen lassen sich verglichen mit z.B. etablierten Heizungsanlagen oder Kraftwerken noch nicht wirtschaftlich betreiben. Zur Zeit liegen die Herstellungskosten bei kleineren Anlagen bei ca. 10.000 bis 20.000 US\$ pro kW, wobei die Hersteller damit rechnen, die Kosten durch Entwicklungsfortschritte in den nächsten Jahren je nach Zellentyp und elektrischer Leistung auf ein Preisniveau zwischen 1.200 und 2.000 €/kW<sub>el</sub> senken zu können (Erdmann 2002). Bei einer Großserienproduktion wird seitens der Hersteller derzeit von einem Preis unter ca. 10.000 € für eine Hausenergiezentrale (1-5 kW<sub>el</sub>) ausgegangen (Froböse 2001).

Die Markteinführung von Brennstoffzellenanlagen soll seitens des Gesetzgebers durch das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz<sup>23</sup> gefördert werden. Allerdings reicht der dort festgeschriebene Zuschlag von 5,11 Cent/kWh<sub>el</sub> derzeit nicht aus, um eine Wirtschaftlichkeit der Anlagen zu erreichen.<sup>24</sup> Darüber hinaus fördern Bund und einige Länder die Forschung, Entwicklung und Anwendung (Pilot- und Feldtests) in mehreren Fällen. Als ein Beispiel sei an dieser Stelle das Zukunftsinvestitionsprogramm (ZIP) der Bundesregierung zu nennen, in welchem die Brennstoffzelle einen Schwerpunktbereich der Förderung einnimmt.

Einige Hersteller schätzen, dass 2010 der Umsatz mit stationären Brennstoffzellensystemen aller Größen in Europa 2,5 Milliarden Euro betragen wird. Die gleiche Größenordnung wird für den nordamerikanischen Markt angenommen. In Westeuropa wird für die Hausenergieversorgung unter 10 kW<sub>el</sub> mit einem Umsatz von knapp einer Milliarde Euro gerechnet. Dabei wird langfristig von jährlichen Stückzahlen von etwa 250.000 häuslichen Systemen ausgegangen. (Klinder 2001.)

## 2.3 Mobile Anwendungen - Stand und Entwicklungen

Der Schwerpunkt der internationalen Anstrengungen in der Brennstoffzellentechnologie liegt - gemessen am finanziellen Volumen - derzeit noch in der Entwicklung der **mobilen Anwendungen** in Fahrzeugen. Allerdings haben sich die angekündigten Markteinführungen deutlich nach hinten verschoben: wurde gegen Ende der 90er Jahre noch von einigen Herstellern das Jahr 2003 oder 2004 angestrebt, so wird jetzt allgemein eher vom Ende dieses Jahrzehnts gesprochen. Damit würde nach derzeitigen Prognosen die mobile Brennstoffzellentechnik nicht als erste sondern als letzte Anwendung die Marktreife erreichen.

Der mobile Einsatz in Brennstoffzellen-Fahrzeugen meint die Kombination einer stromerzeugenden Brennstoffzelle mit einem Elektromotor. Die Forschung und Entwicklung von Straßenfahrzeugantrieben steht deutlich im Vordergrund; die Automobilkonzerne wenden derzeit

<sup>23</sup> Das Gesetz für die Erhaltung, Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung ist am 1. April 2002 in Kraft getreten.

<sup>24</sup> Diese 5,11 Cent/kWh<sub>el</sub> erhalten die Anlagenbetreiber vom Netzbetreiber zusätzlich zum Marktpreis für Strom, der zwischen dem Anlagenbetreiber- und dem Netzbetreiber zu vereinbaren ist.

mehrere Milliarden US-\$ für Forschung und Entwicklung auf. Mittlerweile sind nahezu alle großen Automobilkonzerne an derartigen F&E-Vorhaben beteiligt bzw. selbst aktiv tätig. Außerdem wird auch die Anwendung bei elektrischen Bahnen oder Schiffen verfolgt.

### 2.3.1 Hintergründe der Entwicklungsaktivitäten

Die Motivationen für die großen Forschungsanstrengungen in der Brennstoffzellenforschung für mobile Anwendungen sind einerseits in ökologischen Notwendigkeiten (Klimarelevanz des Verkehrs), andererseits in (damit verbundenen) langfristigen strategischen Erwägungen der Automobilkonzerne zu sehen.

Mit der Entwicklung der Brennstoffzellen-Fahrzeuge ist die Aussicht auf einen emissionsärmeren bzw. -freien Verkehr und die Nutzung alternativer Brennstoffe verbunden (low bzw. zero emission cars). Insofern wird mit der Brennstoffzellentechnologie die Hoffnung auf eine technische Lösung für zentrale Umwelt-, Gesundheits- und Klimaprobleme verbunden, die durch den weltweit weiter steigenden Bedarf an individueller Mobilität verstärkt wird. Zu beachten ist jedoch, dass andere wichtige Umweltauswirkungen des Verkehrs, verursacht z.B. durch den enormen Flächenverbrauch, durch einen Umstieg auf Brennstoffzellenantriebe nicht berührt werden.

Der Verkehr ist mit etwa 20-25% der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen eine der wesentlichen anthropogenen Quellen für den Treibhauseffekt. Die Situation wird durch die steigende Nachfrage nicht nur in den Industriestaaten - die allein für 75% dieser sektorspezifischen Emissionen verantwortlich sind - sondern auch durch die erwarteten hohen Zuwachsraten in Südostasien und den sog. Schwellenländern verstärkt (vgl. BMU 1999).

Weitere Faktoren, die das gestiegene Interesse an Ersatztechnologien wie der Brennstoffzelle verstärken, sind die Verknappung der konventionellen Treibstoffe, die damit einhergehende Verteuerung sowie das Bezugsrisiko (in Verbindung mit politischen Instabilitäten in den Erzeugerländern). Dazu kommt die Tatsache, dass die Effizienzsteigerungen beim Verbrennungsmotor technisch begrenzt sind - wenngleich auf der Basis des gegenwärtigen Fahrzeugbestands noch ein großes Reduktionspotenzial erschließbar ist.

Die aufgezeigten Hintergründe erklären das finanzkräftige Engagement im F&E-Bereich und das strategische Interesse der Automobilkonzerne. Es unterstreicht auch die wichtige Rolle der Politik, die für die Einführung dieser neuen Technologie, aber auch dazugehöriger Infrastrukturen, Treibstoffe und Speichermedien den geeigneten Rahmen bzw. Anreize setzen muss.

### 2.3.2 Zur Technologie in mobilen Systemen

#### Antriebstechniken

Bei der mobilen Anwendung ist die Brennstoffzelle nicht mit dem Antrieb zu verwechseln: der Antrieb des Brennstoffzellen-Fahrzeugs erfolgt durch einen **Elektromotor**. Fahrzeuge mit Elektromotoren weisen einige spezifische Vorteile im Vergleich zu konventionellen Verbrennungsantrieben auf: sie haben beispielsweise ein höheres Beschleunigungsvermögen, sind leiser, ruckfrei und benötigen kein mehrstufiges Getriebe.

Die Brennstoffzelle kann auch additiv zu einem Verbrennungsmotor eingebaut werden (**Hybridfahrzeug**), wobei sie zusätzliche und ersetzende Funktion zur Batterie übernehmen kann. Derartige hybride Lösungen werden derzeit von einigen Automobilkonzernen entwickelt (z.B. VW, Nissan). Besondere Nachteile sind die erhöhte Komplexität des Systems und derzeit noch das deutlich höhere Gewicht.

In diesem Zusammenhang ist auch auf eine weitere begriffliche Differenzierung hinzuweisen: Aufgrund der Wasserstoffnutzung werden Fahrzeuge, die mit Brennstoffzellen betrieben werden oft auch als **Wasserstoffautos** bezeichnet. Beim Wasserstoffauto kann es sich jedoch auch um eine Variante handeln, bei der der Wasserstoff als Treibstoff direkt in einem „konventionellen“ Verbrennungsmotor eingesetzt wird.<sup>25</sup> Der Vorteil dieser Technologie ist, dass die bestehende Motorentechnik nutzbar bleibt und die Motoren prinzipiell weiterhin auch mit konventionellen Brennstoffen fahrbar sind. Nachteile sind die im Vergleich zum Brennstoffzellensystem geringeren Wirkungsgrade sowie die derzeit fehlende Infrastruktur für reinen Wasserstoff.

### **Brennstoffzellen und Brennstoffe**

Für den mobilen Anwendungsbereich kommen fast ausschließlich Konzepte mit der Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle (PEFC) zum Einsatz, da diese als Niedertemperaturzelle eine große Flexibilität in Bezug auf wechselnde Lastgänge (Teillast) und gute Starteigenschaften aufweist, was für den Einsatz in Fahrzeugen erforderlich ist. Ausnahme ist die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle, die ohne die Umwandlung mit Methanol betrieben werden kann.

Bei der PEFC werden verschiedene Brennstoffkonzepte verfolgt, die jeweils unterschiedliche Stadien in der Erforschung aufweisen sowie verschiedene ökonomische und ökologische (s. Abschnitt 2.3.3) Implikationen haben. Die Durch die Erfordernis einer kontinuierlichen Brennstoffzufuhr sind entsprechende Tanks bzw. Speichersysteme zu entwickeln. Dies ist beim Wasserstoff derzeit nur mit großen Aufwand, d.h. mit hohem Gewicht und hohen Kosten möglich, zudem steht noch keine ausreichende Infrastruktur zur Verfügung. Daher werden gegenwärtig wasserstoffreiche Trägermedien wie Erdgas, Benzin oder Alkohole (Methanol), aus denen der Wasserstoff im Fahrzeug über einen Reformier gewonnen werden muss, favorisiert, da für diese Brennstoffe Infrastrukturen vorhanden bzw. nutzbar sind. Der Reformierprozess ist jedoch technisch anspruchsvoll und die benötigten Zusatzaggregate gegenwärtig ein weiterer bedeutender Gewichts- und Kostenfaktor.

Tabelle 1 gibt diesbezüglich einen Überblick.

Durch die Erfordernis einer kontinuierlichen Brennstoffzufuhr sind entsprechende Tanks bzw. Speichersysteme zu entwickeln. Dies ist beim Wasserstoff derzeit nur mit großen Aufwand, d.h. mit hohem Gewicht und hohen Kosten möglich, zudem steht noch keine ausreichende Infrastruktur zur Verfügung. Daher werden gegenwärtig wasserstoffreiche Trägermedien wie Erdgas, Benzin oder Alkohole (Methanol), aus denen der Wasserstoff im Fahrzeug über einen Reformier gewonnen werden muss, favorisiert, da für diese Brennstoffe Infrastrukturen

---

<sup>25</sup> Hier ist die Firma BMW in Deutschland das zentrale Entwicklungsunternehmen, welches bereits zur EXPO 2000 mit einigen in Serie produzierten Pkw einen umfangreicheren Marktauftritt hatte. Das Funktionsprinzip ist ein Verbrennungsmotor, dessen Bewegungsenergieerzeugung auf der Knallgasreaktion, d.h. der explosiven Verbindung von Wasserstoff und Sauerstoff (bzw. Luft) beruht (vgl. VDI nachrichten 2000).

vorhanden bzw. nutzbar sind. Der Reforming-Prozess ist jedoch technisch anspruchsvoll und die benötigten Zusatzaggregate gegenwärtig ein weiterer bedeutender Gewichts- und Kostenfaktor.

**Tabelle 1: Übersicht über die Brennstoffzellen-Konzepte für Fahrzeuge**

Brennstoffzelle		Brennstoff	On-board-Reformer	On-board-Kraftstoffspeicherung	Infrastruktur
<b>PEFC</b>	in Entwicklung	Gasförmiger Wasserstoff	nicht erforderlich	aufwändig	Neubau notwendig, aufwändig
	in Entwicklung	Flüssiger Wasserstoff	nicht erforderlich	sehr aufwändig	Neubau notwendig, sehr aufwändig
	in Entwicklung	Methanol	aufwändig, in Entwicklung	einfach	Umrüstung, wenig aufwändig
	in Entwicklung	Kohlenwasserstoffe (Benzin)	sehr aufwändig, in Entwicklung	einfach	existiert
<b>DMFC</b>	Forschung	Methanol	nicht erforderlich	einfach	Umrüstung, wenig aufwändig

Quelle: Oertel & Fleischer 2000, S. 87

Als allgemeine **technische Vorteile** von Brennstoffzellenfahrzeugen im Vergleich zu Verbrennungskraftmaschinen-Fahrzeugen sind die folgenden zu nennen:

- Wichtigster Effizienzvorteil - der zu positiven ökonomischen und ökologischen Effekten führen kann - ist der höhere Teillastwirkungsgrad, womit ein geringerer Kraftstoffverbrauch, geringere Emissionen sowie u.U. ein geringerer Wartungsaufwand verbunden sind.
- Das Konzept ermöglicht eine modulare Leistungserweiterung und eine umfassende Bordenergieversorgung.
- Die Brennstoffzelle im Fahrzeug kann darüber hinaus im „nicht-mobilen“ Einsatz als stationäres Gerät bei Bedarf Strom erzeugen.

Die **Nachteile** liegen derzeit primär in den allgemeinen Entwicklungsdefiziten der Brennstoffzelle, die sich im Fahrzeugkonzept z.B. in wesentlichen Aspekten wie Gewicht und Reichweite bemerkbar machen (Tillmetz et al. 2001). Letztlich sind die Entwicklungskosten bei der Fahrzeuganwendung gegenwärtig im Vergleich zu den konventionellen Fahrzeugen und in Relation zu den anderen Brennstoffzellenanwendungen noch deutlich zu hoch: Die Zielkosten des Antriebsstrangs (vom Tank bis zum Rad) müssten bis auf 50 - 75 €/kW<sub>el</sub> reduziert werden - demgegenüber liegen die heutigen Systeme selbst bei industrieller Fertigung noch über 2000 €/kW<sub>el</sub> (vgl. Erdmann 2002).

### 2.3.3 Ökologische Aspekte von Brennstoffzellenfahrzeugen

Allgemein ist zur Anwendung der Brennstoffzelle im Fahrzeug und den möglichen ökologischen Auswirkungen festzuhalten; dass ein Brennstoffzellenantrieb am Endprodukt und seiner Funktion nicht zwingend etwas verändern wird: Das Fahrzeug soll mit gleicher Häufigkeit und mindestens gleichem Komfort genutzt werden können – ansonsten wird es sich schwerlich außerhalb einer Nische auf breiterer Ebene auf dem Markt durchsetzen können. Es braucht im Gegenteil sicherlich einigen Zusatznutzen, um seinen zunächst bestehenden Kostennachteil aufzuwiegen. Der Umweltnutzen wird - nach bisherigen Erfahrungen im Automobilsektor - nur dann ein Diffusionskriterium, wenn er gleichzeitig zur Reduzierung der Verbrauchskosten (z.B. anfangs durch steuerliche Entlastung) beiträgt. Unter diesen Bedingungen kann der Brennstoffzellenantrieb nur zur Lösung eines Teils der verkehrsbedingten Umweltprobleme beitragen.

Die ökologische Bewertung der Brennstoffzelle hängt von der Wahl des Brennstoffzellenkonzepts, des eingesetzten Brennstoffs - und schließlich von der Festsetzung der Systemgrenzen sowie des Vergleichssystems ab. Entscheidend ist beispielsweise die Frage, ob die Art des Brennstoffes und seine Herstellung mit berücksichtigt werden. Die wenigen vorhandenen Untersuchungen von Brennstoffzellenantrieben kommen daher auch zu unterschiedlichen Ergebnissen.

Grundsätzlich lassen sich die folgenden ökologischen Aspekte festhalten:

- Brennstoffzellen-Fahrzeuge versprechen deutlich höhere Wirkungsgrade und damit eine höhere Ressourceneffizienz und geringere Emissionen als konventionelle Verbrennungsmotoren. Dies ist vor allem auf die Vorteile im Teillastbereich zurückzuführen. Systemgrenze ist bei dieser Bewertung das Fahrzeug selbst und seine lokalen Auswirkungen.
- Die Herstellung der Brennstoffe erfordert jedoch - insbesondere, wenn diese aus fossilen Quellen gewonnen werden - fallweise mehr Energie und verursacht höhere Emissionen, wodurch der positive Effekt der Brennstoffzellentechnologie konterkariert werden kann. Die Erzeugung mit regenerativen Energiequellen bzw. der Einsatz Erneuerbarer Energien selbst ist eindeutig zu bevorzugen, verursacht derzeit jedoch noch höhere Kosten.
- Diese negative Bilanz kann durch den u.U. erforderlichen Aufbau einer Infrastruktur noch erhöht werden. Es ist allerdings zu diskutieren, inwieweit der Aufbau einer Infrastruktur für eine neue „Schlüsseltechnologie“ dieser in ökologischer Sicht „anzulasten“ ist. In jedem Fall erzeugt eine neue Infrastruktur hohe zusätzliche Kosten und politischen Entscheidungs- und Förderbedarf.

Die Gesamtbilanz hängt somit stark von der Wahl des Kraftstoffes und der Herstellungsweise ab. Derzeit wird aus pragmatischer Sicht (Nutzungsmöglichkeit der Versorgungsinfrastruktur) der **Kraftstoff Methanol** von mehreren Akteuren favorisiert. Die CO<sub>2</sub>-Emission liegt rund ein Drittel unter der von Verbrennungsmotoren. Wird das Methanol regenerativ erzeugt, ist die CO<sub>2</sub>-Bilanz nahezu neutral. Das Problem beim Brennstoff Methanol ist jedoch seine Toxizität; Methanol ist wasserlöslich, verdunstet leicht und ist ätzend. Demgegenüber wird von Entwicklerseite betont, dass die Technik erst am Anfang steht und der Vorteil gegenüber Wasserstoff u.a. in besseren Transporteigenschaften liegt: Methanol ist bei Raum-

temperatur flüssig, wohingegen Wasserstoff dafür minus 250°C benötigt (z.B. VDI nachrichten 2000).

Insbesondere aufgrund der Brennstoff- und Infrastrukturproblematik in Verbindung mit den Systemwechsel-Kosten kommt das Umweltbundesamt in einer Studie zu einem ablehnenden Ergebnis in Bezug auf die mobile Anwendung der Brennstoffzelle (UBA 1999). Das Umweltbundesamt kommt zu dem Ergebnis, dass in den nächsten zehn bis 20 Jahren die Verringerung von Schadstoffausstößen und Ressourcenverbrauch deutlich kostengünstiger durch verbrauchsoptimierte Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren mit niedrigen Emissionswerten erreicht werden kann (UBA 1999). Kritisiert wird zudem der hohe Energieaufwand der Gewinnung von Wasserstoff und Methanol.

Die ablehnende Haltung des Umweltbundesamtes wird wiederum u.a. seitens der Hersteller kritisiert (vgl. Flotow & Steger 2000). Zudem berücksichtigen die Szenarien des Umweltbundesamtes nicht die gesellschaftlichen Herausforderungen und Widerstände bzw. kundenseitige Akzeptanzprobleme beim Umstieg auf effiziente Kleinwagen (vgl. Nill 2000, S.16f). Darüber hinaus sind durch die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten sowie die Tatsache, dass die stationäre und die portable Brennstoffzellentechnologie die mobilen Aktivitäten bereits „überholt“ haben u.U. entwicklungs- und industrielle Synergiepotenziale nutzbar, die in mittel- bis langfristigen Szenarien zu berücksichtigen sind.

### 2.3.4 Aktivitäten und Akteure

Die zentralen Anwendungsgebiete sind im mobilen Bereich der Einsatz in Straßenfahrzeugen, d.h. in Pkw und Bussen, sowie in Nutzfahrzeugen, z.B. in Gabelstaplern. Möglich ist auch der Einsatz in elektrischen Bahnen oder bei Schiffen, hier befinden sich die Entwicklungen noch am Anfang (vgl. Oertel & Fleischer 2000).

Am weitesten fortgeschritten und verbreitet ist die Entwicklung im Bereich der Pkw. Nachdem über einige Jahre nahezu ausschließlich der Daimler-Chrysler-Konzern auf eigene Initiative tätig war, forschen und entwickeln mittlerweile alle großen Automobilkonzerne. Die meisten haben bereits Prototypen entwickelt und planen Serienfahrzeuge und breite Markteinführungen. Die nebenstehende Tabelle gibt einen Überblick über die aktiven Hersteller bzw. Konzerne (ohne Anspruch auf Vollständigkeit, vgl. auch Schirrmeister et al. 2000).

Die meisten der **Automobilhersteller** kooperieren in Bezug auf die Brennstoffzellenentwicklung mit spezialisierten Entwicklern wie der kanadischen Firma Ballard Power und zum Teil mit weiteren wichtigen Playern entlang der Produktionskette. Als bedeutendes Beispiel ist die sog. „Brennstoffzellen-Allianz“ zwischen DaimlerChrysler, Ford und Ballard zu nennen, oder die „California Fuel Cell Partnership mit DaimlerChrysler, Ford, Honda, VW, den Kraftstoffherstellern Texaco, Shell und Arco sowie den Behörden California Air Resource Board (CARB) und California Energy Commission (CEC).

Automobilhersteller mit Brennstoffzellen-Aktivitäten (Stand 2000)

- [BMW AG](#)
- [DaimlerChrysler-Stuttgart](#)
- [Fiat AG](#)
- [Ford Motor Company](#)
- [General Motors](#)
- [Honda USA](#)
- [MAN Nutzfahrzeuge AG](#)
- [Mazda Corporation](#)
- [Mitsubishi](#)
- [Neoplan](#)
- [Nissan Corp](#)
- [Opel AG](#)
- [PSA Peugeot Citroen](#)
- [Renault](#)
- [Toyota Motor Corp.](#)
- [Volkswagen AG](#)
- [Volvo Group](#)

Quelle: Forum 2000

Die Beteiligung der vielen Großkonzerne und Global Player und der daraus resultierende Wettbewerb kann sich einerseits positiv auf die Entwicklungsgeschwindigkeit und die Kosten der Brennstoffzelle auswirken. Andererseits besteht bei der Entwicklung einer Vielfalt von verschiedenen Innovationen und technischen Ansätzen auch die Gefahr von (volkswirtschaftlichen) Ineffizienzen z.B. aufgrund fehlender Koordination bei der Frage der breiten Einführung neuer Brennstoffe und Infrastrukturen.

Um derartige Entwicklungen zu vermeiden, wurde in Deutschland die „Initiative Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie VES“ ins Leben gerufen, an der u.a. die Unternehmen Aral, BMW, DaimlerChrysler, RWE, Shell und VW beteiligt sind. Die von der VES ursprünglich angedachte Strategie des Aufbaus eines flächendeckenden Netzes von 2000 Wasserstoff-tankstellen bis 2020 wird zunehmend relativiert – nicht zuletzt aufgrund der hohen Kosten, die teilweise bis auf 120 Mrd. Euro für die Infrastruktur-Investitionen beziffert werden. Nicht zuletzt deshalb hat die Enquête-Kommission des Deutschen Bundestages Abstand von der Vision einer breiten Einführung von BZ-Fahrzeugen bis zum Jahr 2020 genommen. Nun wird eher das Jahr 2050 gehandelt (vgl. Spiegelnet 2002).

Nach Ansicht vieler Experten werden jedoch nicht die Pkw als erste den Durchbruch in der mobilen Brennstoffzellentechnologie erwirken, sondern vor allem **Busse**, die im öffentlichen Nahverkehr eingesetzt werden, sowie Nutzfahrzeuge. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass bei diesen Fahrzeugen die gegenwärtigen Nachteile des noch hohen Gewichts und Raumbedarfs geringer ausfallen und die Brennstoffversorgung durch zyklische Fahrstrecken besser gewährleistet werden kann. Für diese Fahrzeuge ist unter den gegebenen Voraussetzungen dann sogar eine Wasserstoffversorgung möglich - und sinnvoll, da dann beispielsweise ein emissionsfreier und geräuscharmer ÖPNV verwirklicht werden wäre. (VDI nachrichten 2000).

Erste nennenswerte Praxisfeldtest sind beispielsweise 60 Stadtomnibusse mit Brennstoffzellenantrieb im Linienverkehr in Hamburg und Stuttgart (vgl. Spiegelnet 2001b). Ein weiteres Beispiel ist die Kooperation von DaimlerChrysler mit dem Versandservice Hermes, der in Mercedes Lieferwagen den Brennstoffzellen-Antrieb im Großraum Stuttgart im Betriebsalltag erproben soll (Spiegelnet 2001c)

Für das Jahr 2003 haben mehrere Automobilhersteller – nun deutlich vorsichtiger als noch Ende der 90er Jahre – breitere Serientests auf der Basis einer begrenzten Stückzahl in Aussicht gestellt (z.B. DaimlerChrysler, Honda, Toyota, Ford, Fiat etc.). In wenigen Jahren dürfte die gesamte Erprobungsflotte von Brennstoffzellen-Fahrzeugen die 1000-Stückgrenze überschreiten (vgl. Spiegelnet 2001a, b). Die breite Markteinführung der Brennstoffzellentechnologie im mobilen Bereich wird zwar mittlerweile mit „frühestens in 10 Jahren“ kommentiert, möglicherweise erfolgt sie jedoch bereits früher – als Ersatz oder Ergänzung der Autobatterie zur Versorgung der Nebenaggregate wie etwa Klimaanlage, Licht, Radio, Sitzheizung etc. Derartige Features sind in nennenswertem Ausmaß bevorzugt in Luxuswagen vorhanden, in denen zusätzliches Gewicht und erhöhte Kosten nicht unbedingt Ausschlusskriterien darstellen.

### 2.3.5 Aktuelle Forschungen zu mobilen Anwendungen

In technischer Hinsicht sind mit Blick auf eine erfolgreiche Markteinführung noch die folgenden Aufgaben zu lösen:

- Verbesserung des dynamischen Verhaltens
- Miniaturisierung und Gewichtsreduktion des Gesamtsystems
- Entwicklung von Speichersystemen für Brennstoffe und elektrische Energie
- Weiterentwicklung der Reformer
- Nachweis von Betriebssicherheit sowie letztlich der Praxistauglichkeit

Insgesamt gilt es, für das Gesamtsystem „Brennstoffzellenfahrzeug“ die Kosten deutlich zu reduzieren. Ansatzpunkte hierfür sind neben Skaleneffekten durch hohe Stückzahlen beispielsweise durch den Einsatz neuer Materialien und die Verringerung des Edelmetalleinsatzes gegeben.

Zusätzlich sind Fragen der Kraftstoffwahl und der dazugehörigen Infrastruktur zu klären. Die hier zu behandelnden Forschungsschwerpunkte sind nach Oertel & Fleischer (2000, S. 134) die zu erwartenden Veränderungen von Kraftstoffherstellungsverfahren, Verfahren zur wirtschaftlichen und umweltverträglichen Bereitstellung regenerativer Kraftstoffe, die Definition einheitlicher Kraftstoffspezifikationen, der Umgang mit den Gefahrenpotenzialen der Kraftstoffe sowie Anforderungen an den Aufbau von neuen Kraftstoffinfrastrukturen.

## 2.4 Portable Anwendungen – Stand und Entwicklungen

Ein weiteres vielversprechendes Anwendungsfeld stellen die Klein-Brennstoffzellen im Leistungsbereich von 1 bis 500 Watt dar, deren Einsatzgebiet in der Energieversorgung von tragbaren bzw. netzfreien/mobilen Geräten wie Computern, Telekommunikationsgeräten oder Mess- und Verkehrseinrichtungen geplant ist.

Portable Geräte, die eine Energieversorgung benötigen, werden heutzutage primär mit Batterien und Akkumulatoren (Primär- und Sekundärzellen) angetrieben<sup>26</sup>, die zu einem erheblichen Umweltproblem (Belastungen mit Schwermetallen, z.B. Quecksilber und Cadmium) beitragen.<sup>27</sup> Neben diesen ökologischen Problemen sind als weitere Nachteile die hohen Kosten (insbesondere, wenn Zellen eine höhere Energiedichte aufweisen sollen) und bei Akkumulatoren ihre begrenzte Energiespeicherkapazität zu nennen.

Mit Blick auf die genannten Probleme kann die Brennstoffzelle in Verbindung mit einem entsprechend dimensionierten Speicher für den Energieträger geeignete Lösungen bieten. Derzeit werden neben Wasserstoff und Methanol auch haushaltsübliche, kohlenstoffstämmige Brennstoffe wie Propan eingesetzt (Oertel & Fleischer 2000).

---

<sup>26</sup> Ausnahmen bilden mechanische Antriebe, die derzeit über den Absatz ökologischer Produkthanbieter (z.B. Kurbelradios) eine (bescheidene) Renaissance erleben.

<sup>27</sup> Zur Umweltproblematik von Batterien siehe Scholl (1995).

Mit dem Einsatz von Mikro- und Minibrennstoffzellen in elektrischen Geräten lassen sich die genannten ökologischen und ökonomischen Nachteile konventioneller Energieversorgung wie folgt beheben:

- größere Anzahl von Ladezyklen
- geringere Ressourcenverbräuche, Abfall- und Schadstoffmengen
- Einsatz umweltverträglicherer Stoffe
- Erhöhung des Nutzungskomforts durch längere Nutzungszyklen

Die (portablen) Anwendungen der kleinen Brennstoffzellen liegen dabei zunächst noch überwiegend im Consumer-Bereich (Informations- und Kommunikationstechnologien), weitere Einsatzfelder sind alle kabellosen, netzfernen Geräte z.B. in der Verkehrs-, Mess- oder Umwelttechnik.

Die Entwicklung dieser kleinen Brennstoffzellen für die Energieversorgung (tragbarer) elektrischer Geräte ist das jüngste Anwendungsgebiet dieser Technologie, weshalb der Stand der Arbeiten hier noch hinter dem stationären und mobilen Bereich zurückliegt.<sup>28</sup> Allerdings sind auch hier erste angekündigte Marktauftritte und Serienproduktionen zu verzeichnen, d.h. das Laborstadium wurde bereits verlassen.<sup>29</sup>

### **Zur Technologie**

Bei portablen Anwendungen kommt in der Regel nur die PEFC zum Einsatz, da sie die niedrigsten Betriebstemperaturen aufweist. Derartige Systeme liegen in einer Leistungs-Größenordnung von ein bis 500 Watt. Derzeit stehen für die Zufuhr eines Energieträgers zwei Versorgungskonzepte im Vordergrund: zum einen wird eine Versorgung mit reinem Wasserstoff angestrebt, wobei der Wasserstoff in Metallhydrid-Speichern chemisch gebunden bzw. eingelagert vorliegt. Eine zweite Systemvariante sind Direktmethanol-Brennstoffzellen (DMFC). Die beiden Systeme unterscheiden sich in ihrem Einsatzbereich, da das Methanol-System vorrangig für kleinste Leistungsbereiche Vorteile bietet.

### **Anwendungen und Marktchancen**

Angesichts der Einsatzvielfalt in vielen verschiedenen Produkten laufen im Bereich der Kleinsysteme zur Zeit viele Entwicklungen. Wann die Markteinführung solcher Systeme erfolgt und mit welchen Produkten, ist noch nicht genau absehbar. Allerdings werden derzeit vor allem Lösungen für portable Geräte wie Laptops und Handys entwickelt. Da die Palette sowie die Verbreitung der Informations- und Kommunikationstechnologien (I&K) sich ständig ausweitet, steigt damit auch der potenzielle Einsatzbereich für Brennstoffzellensysteme. Weitere Beispiele sind Videokameras, portable Informationsgeräte, tragbare Spiele, portable Musikgeräte. Neben diesem Bereich der Konsum- und Bürogeräte spielen die oben genannten netzfernen Anwendungen und damit Produkte wie Staumelder, Verkehrssignale, Leitsysteme, Umweltsensoren etc. eine Rolle.

---

<sup>28</sup> Die Entwicklung der Brennstoffzellennutzung für Geräte geht maßgeblich auf Aktivitäten des US-amerikanischen Militärs zurück (vgl. hierzu Heinzel 2001).

<sup>29</sup> Beispiel hierfür ist die Fa. Masterflex, die eine 50-Watt-Minibrennstoffzelle auf Wasserstoffbasis für mobile Office Systeme entwickelt und diese „als erstes deutsches Unternehmen in Serie produzieren“ will (Stromthemen 2003). Derzeit existiert ein in Betrieb genommener Teststand zur Produktion.

Neben den aufgezeigten ökologischen Vorteilen von Brennstoffzellen gegenüber Batterien und Akkumulatoren sind die – eng damit verbundenen – Vorteile bezüglich der Nutzungsqualität hervorzuheben. Die Ansprüche an die Nutzungsqualität von tragbaren I&K-Geräten werden voraussichtlich in der Zukunft enorm ansteigen, da die Geräte länger und öfter genutzt werden. Begründende Stichworte sind hier die Zunahme der Mobilität, der Wandel zur Dienstleistungsgesellschaft und die allgemein erhöhte Diffusion von I&K-Geräten aufgrund ihrer technischen Reife und Kostendegression. Damit wird die netzunabhängige Bereitschaft zu einer wichtigen Kaufentscheidung. Insofern beeinflussen auch in diesem Bereich gesellschaftliche Entwicklungen und Bedürfnisse die Entwicklung und Erforschung von Brennstoffzellen-Anwendungen.

### **Aktuelle Forschungen zu portablen Anwendungen**

Im Zentrum weiterer technischer Verbesserungen der portablen Brennstoffzellen-Anwendungen stehen die Entwicklung hoher Leistungsdichten und Energiespeicherkapazitäten, ein geringes Gewicht sowie eine möglichst variable Geometrie des Systems. Dazu kommen Anforderungen wie die schnelle Befüllung mit dem jeweiligen Energieträger bzw. die Entwicklung geeigneter und komfortabler Wechselsysteme (z.B. Patronen), die eine möglichst lange Netzautarkie ermöglichen, und mit denen eine hohe Zyklenzahl realisierbar ist (Heinzel 2001). Insgesamt ist die Zuverlässigkeit und die Sicherheit (z.B. in Bezug auf die Anwendung von Wasserstoff-Druckspeichern) des Systems zu erhöhen. Zusätzlich ist allgemein eine Verkleinerung bzw. Miniaturisierung des Systems und einzelner Komponenten bedeutsam, weshalb die Forschung in diesem Bereich gleichzeitig mit Entwicklungen z.B. im Bereich der Mikro- und Nanotechnologie korrespondiert.

## **2.5 Exkurs zur gegenwärtigen Situation der Wasserstoffwirtschaft**

Brennstoffzellensysteme verursachen dann keine lokalen Emissionen, wenn sie direkt mit Wasserstoff betrieben werden – denn so entsteht als Reaktionsprodukt nur Wasserdampf. Bezieht man die Herstellung des Brennstoffes mit ein, sollte der Wasserstoff aus ökologischer Sicht mit regenerativen Energien erzeugt werden. Allerdings bestehen aufgrund der chemischen Eigenschaften des Wasserstoffs noch große Probleme in Bezug auf effiziente Erzeugung, Speicherung und Transport.

Die gegenwärtige Weltproduktion von Wasserstoff liegt in einer Größenordnung von 500 Mrd. Nm<sup>3</sup> (Normkubikmeter), was in etwa 1,5% des Weltenergiebedarfs entspricht. Von dieser Gesamtmenge werden ca. 20 Mrd. Nm<sup>3</sup> in Deutschland produziert - ebenfalls etwa 1,5% des deutschen Energiebedarfs. Etwa die Hälfte des weltweit erzeugten Wasserstoffs wird aus Erdgas produziert, der zweitgrößte Anteil entstammt der Chloralkalielektrolyse, und nur 4% entstehen aus Elektrizität. (Daten nach Wagner 2001.) Die derzeitigen Kosten liegen nach Wagner (2001) bei etwa 20,5 cent/Nm<sup>3</sup>, das entspricht umgerechnet 6,6 cent/kWh (H<sub>2</sub>).

Für den Transport von Wasserstoff sind die technischen Probleme in Bezug auf seine Flüchtigkeit, den Aggregatzustand und das Transportgewicht zu lösen. Vergleichsweise ist für eine Tankfüllung von 500 km Reichweite eine Füllung mit flüssigem Wasserstoff knapp doppelt so schwer (80 kg) wie eine Benzinfüllung (45 kg). Bettet man das (flüchtige) H<sub>2</sub> beispielsweise in Metall-Hydrid (TiFe), dann erhöht sich dadurch das Gewicht deutlich auf 980 kg - was jedoch noch um ein Vielfaches unterhalb einer vergleichbaren Bleibatterie liegt (20.800 kg).

Für den Fall eines deutlich steigenden Wasserstoffbedarfes ist die Erzeugungsfrage offen. Um aufwändige Transporte und Lagerungen zu vermeiden, sollte möglichst eine dezentrale Erzeugung angestrebt werden. Dabei erscheint die Erzeugung von Wasserstoff aus Strom – auch wenn dieser aus erneuerbaren Energien hergestellt wird – aufgrund der damit verbundenen Umwandlungsverluste fragwürdig. Statt dessen könnten andere regenerative Brennstoffe wie z.B. Biogas oder Klärgas zum Einsatz kommen.

### 3 Nische oder Revolution? Was beeinflusst die Diffusion von Brennstoffzellen?

Die Ausführungen im Kapitel 2 dokumentieren das breite Anwendungsspektrum der Brennstoffzellentechnologie: sie kann die Märkte der Wärme- und Stromversorgung, Verkehrs- und Nutzfahrzeuge sowie der portablen elektronischen Geräte entscheidend verändern. Dieses Veränderungspotenzial hängt stark mit der Technologie selbst sowie den ökologischen und ökonomischen Potenzialen zusammen. Darüber hinaus spielt die Verbesserung von wichtigen Nutzungseigenschaften der Produkte und Anlagen eine Rolle. Die technischen Besonderheiten – andere Funktionsweise und Komponenten, flexibler Einsatz verschiedener und neuer Brennstoffe, neue Infrastrukturen etc. – unterscheiden sich teilweise deutlich von den gegenwärtigen technischen Systemen.

Wovon hängt nun aber die erfolgreiche Diffusion in den verschiedenen Einsatzbereichen ab? Welche Faktoren und welche Akteure entscheiden maßgeblich darüber, ob die Brennstoffzelle eine Nischenanwendung wird oder zu einer Revolution z.B. im Energiesektor führt? Ist die Brennstoffzellentechnologie mit all ihren Veränderungen überhaupt bei allen betroffenen gesellschaftlichen Akteuren (von Unternehmen bis Verbraucher) erwünscht? Und wie kann sie die erforderlichen ökologischen Anforderungen erreichen und tatsächlich einen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung leisten? Solche Fragen verlassen den Fokus der rein technisch-ökonomischen Rationalität.

Die technisch-ökonomische Machbarkeit ist sicher eine notwendige Voraussetzung für jede Innovation, die am Markt erfolgreich sein will. *Sie ist jedoch gerade bei komplexeren, systemischen Innovationen, die wie die Brennstoffzelle sogar einen Pfadwechsel bedeuten können, nicht hinreichend. Die zentrale These dieses Papiers ist daher, dass die erfolgreiche Diffusion der Brennstoffzelle aufgrund ihrer zum Teil grundlegenden Veränderungen in erheblichem Maße von nicht-technischen Faktoren abhängen wird.*

Dieser Blickwinkel gilt auch für die allgemeine, gesellschaftliche Bewertung der Innovation Brennstoffzelle. Konrad und Nill (2001, S. 7) schreiben dazu: „Die Beurteilung einer Innovation als Verbesserung kann nicht allein der Marktrationalität des ökonomisch Erfolgreichen/nicht Erfolgreichen und der technischen Rationalität des Machbaren/nicht Machbaren folgen, vielmehr müssen auch soziale und ökologische Kriterien einbezogen werden, wenn diese vom Markt nicht geeignet reflektiert werden“.

Die gegenwärtigen Diskussionen um die Entwicklungspotenziale von Brennstoffzellen sowie die Forschungen selbst sind noch deutlich von den „klassischen“ Fokussierungen dominiert: den technischen Fragen (technische Machbarkeit, Zuverlässigkeit und Effizienz, Brennstoffwahl und Infrastruktur etc.) und eng damit verbunden der Wirtschaftlichkeit bzw. Kostendegression. Andere Einfluss- und Erfolgsfaktoren oder Folgen gesellschaftlicher, struktureller und sozialer Art erfahren zur Zeit noch keine tiefergehende analytische Betrachtung. Derartige Aspekte werden in den laufenden Forschungs- und Pilotvorhaben, Netzwerken und Initiativen nur in Ansätzen berücksichtigt und untersucht.

Wenn die beteiligten Akteure und Promotoren aus Politik, Wirtschaft und Gesellschaft die Diffusion der Brennstoffzellentechnologie mit ihren u.U. drastischen Folgen und Marktveränderungen ernsthaft unterstützen wollen, dann sollten die Bedingungen und Erfordernisse der

Diffusion eingehender und inklusive ihrer sozial-ökologischen Folgen analysiert werden. Der bevorstehende Zeitraum der nächsten Jahre, welcher sich bis zur breiteren Markteinführung der Brennstoffzellentechnologien in ihren einzelnen Anwendungsfeldern eröffnet, sollte diesbezüglich genutzt werden.

In diesem Kapitel werden übergreifende Problemstellungen herausgearbeitet, die über die technisch-ökonomische Machbarkeit hinausgehen. Dabei werden erste, bereits vorhandene bzw. in Forschung und Praxis behandelte Aspekte und Fragestellungen in die Darstellung integriert. Insgesamt nimmt die stationäre Anwendung, und hier insbesondere die **Hausenergieversorgung** in diesem Kontext den umfangreichsten Teil ein, da hier die weitreichendsten Veränderungen und Folgen zu erwarten sind.

Über 50% der Endenergie wird in den privaten Haushalten verbraucht. Über 60% davon entfallen dabei auf die Raumheizung und Warmwasser (Behringer 2001). Vergegenwärtigt man sich also die Problematik der gegenwärtigen Energiebereitstellung und –nutzung, dann kommt der stationären Anwendung der Brennstoffzelle, insbesondere im Haushalt, eine hohe Bedeutung zu. Diese Bedeutung wird dadurch verstärkt, dass die Veränderungen im Vergleich zur mobilen und portablen Anwendung vielfältiger und radikaler sein werden (vgl. Abschnitt 1.2), das „Revolutionspotenzial“ insofern höher einzuschätzen ist, und gleichzeitig eine erfolgreiche Umsetzung und Diffusion voraussetzungsvoller erscheint. Zusätzlich werden exemplarisch einzelne Aspekte der mobilen und portablen Anwendungen behandelt.

Mit Blick auf die nicht-technischen Diffusionsbedingungen werden die folgenden Forschungs- bzw. Analyse-Schwerpunkte nachfolgend eingehender behandelt, die teilweise Überschneidungen aufweisen:

- Innovationsanalyse
- Neue Akteursstrukturen und Unternehmensstrategien
- Zielgruppenanalysen und Akzeptanzforschung
- Politische Instrumente und Steuerung
- Ökologische und ökonomische Bewertungen
- Szenarien – Zukunftsbilder
- Bildung

Die genannten Problemstellungen können je nach Blickwinkel und (akademischer) Disziplin mit unterschiedlichen Schwerpunkten und Begrifflichkeiten beschrieben und kategorisiert werden. Sie weisen Bezüge zur *sozial-ökologischen Forschung* auf, die sich als transdisziplinärer Ansatz mit hoher Praxisorientierung begreift. Dabei greifen sie Inhalte, Methoden und Ansätze aus z.B. der Ökonomie, Techniksoziologie, Politologie oder Technikfolgenabschätzung auf und wollen damit – ohne Anspruch auf „systematische“ Vollständigkeit – einen übergeordneten Beitrag auch in die einzelnen Bereiche hinein liefern.

Die aufgeführten Themen und Fragestellungen haben damit sowohl einen forschungsstrategischen Charakter und sollten bei der Ausgestaltung von Forschungsprogrammen zu Brennstoffzellen berücksichtigt werden, sie richten sich aber auch an politische und unternehmerische Akteure sowie an die ForscherInnen selbst.

### 3.1 Innovationsanalyse

Die Brennstoffzellentechnik wird oft als Basis- bzw. generische Innovation bezeichnet, weil ihr Anwendungspotenzial vom Kleinstaggregat für Handys über Fahrzeugantriebe bis zu stationären Kraftwerken in höchst effizienter KWK, über Bordsysteme in Flugzeugen bis zu Raumstationen reicht. Darüber hinaus ist mit der Kopplung von Reformern, die das erforderliche Brenngas Wasserstoff erzeugen, ein breites Spektrum von Brennstoffen anwendbar (vgl. Fischer 2000). Aufgrund dieser Eigenschaften, der notwendigen infrastrukturellen und regulativen Anpassungen und der Funktion der Brennstoffzelle als Träger- bzw. Querschnittstechnologie hin zu einer neuen wasserstoffbasierten Energiewirtschaft wird sie teilweise auch als Systeminnovation bezeichnet (siehe auch Wengel et al. 2001; Mok & Walliser 2000). Konrad und Nill (2001, S. 34) bezeichnen demgegenüber nur die Brennstoffzelle in der dezentralen stationären Energieversorgung als Systeminnovation, da nur in diesem Anwendungsfall neben der Veränderung der Technologie und Produktion auch eine wesentliche Veränderung der Markt- und Akteursstrukturen stattfinden wird. Demgegenüber wird die erdgasbetriebene mobile Brennstoffzelle von Konrad und Nill (2001) als radikale Innovation bezeichnet, da sie mit vergleichsweise geringeren Veränderungen der Markt- und Akteursstrukturen einhergeht.

Die analytische Erfassung der Komplexität dieser vielfältigen Innovation kann wichtige Impulse für eine gezielte Gestaltung und politische Steuerung geben. Wengel et al. (2001, S. 48) fordern für die Brennstoffzellentechnologie eine **Innovationspolitik** statt einer Industriepolitik, die parallel in verschiedenen Politikfeldern ansetzt. Dafür ist allerdings zunächst die analytische Basis zu schaffen. Erste tiefere Betrachtungen von Brennstoffzellen unter dem Blickwinkel der Innovationsforschung konzentrieren sich bisher auf die mobilen Anwendungen (vgl. z.B. Wengel & Schirrmeister 2000, Hübner et al. 2000; Hübner & Nill 2001, siehe auch Abschnitt 3.6).

Bei der Entwicklung einer geeigneten und effizienten Innovationspolitik sollte darauf geachtet werden, dass die übergreifenden, systemischen Aspekte der Innovation Brennstoffzelle einerseits und einsatzspezifische Aspekte andererseits identifiziert werden, um Synergien zu erschließen und beispielsweise Mehrkosten zu vermeiden. Die Frage sinnvoller technischer **Synergien von mobilen und stationären Anwendungen** von der Entwicklung, Fertigung bis hin zur Anwendung wird bislang kaum diskutiert und untersucht – die nicht-technischen Implikationen solcher Synergieeffekte dementsprechend erst recht nicht.<sup>30</sup> Darüber hinaus sind auch Voraussetzungen, Folgen und Wechselwirkungen der Brennstoffzellentechnologie in diese Innovationsanalyse mit einzubeziehen. Dies bezieht sich beispielsweise auf Fragen zu Infrastrukturen und Brennstoffherzeugung, z.B. welche Auswirkungen die dezentrale Brennstoffzelle im Haushalt auf die Entwicklung von Nahwärmenetzen oder ergänzende / komplementäre / konkurrierende Technologien wie solarthermische Kollektoren hat.

Als besonders wichtig ist in diesem frühen Stadium der Technik-Entwicklung die Berücksichtigung von **Nachhaltigkeitskriterien** anzusehen. Dies könnte im Rahmen einer Technikfolgenabschätzung erfolgen. Bevor eine gezielte Innovationspolitik Richtungen vorgibt und u.U.

---

<sup>30</sup> Die derzeitigen Entwicklungen sind eher darauf gerichtet, Brennstoffzellen für das jeweilige spezielle Anwendungsfeld zu optimieren. Wie in 2.1.2 gezeigt, stehen dabei unterschiedliche Eigenschaften und Entwicklungsziele im Vordergrund.

Marktentscheidungen (z.B. bei der Ausgestaltung der Brennstoffzellentechnologie und des Brennstoffeinsatzes) beeinflusst, sollte sie den neuen energiewirtschaftlichen Pfad, der sich unter Umständen daraus ergibt, auf den kritischen Prüfstand der Nachhaltigkeit stellen. Aus dem Bewusstsein der globalen Verantwortung für eine nachhaltige Entwicklung darf kein neuer Pfad dieser Reichweite ohne Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten erfolgen. Demgegenüber ist jedoch auch klar, dass die Analyse nachhaltiger Innovationen selbst, die Bestimmung von Indikatoren und Zielen, ihre Operationalisierbarkeit und Bewertung, noch am Anfang steht und hier kein fertiges Instrumentarium zur Verfügung steht (Konrad & Nill 2001). Dies ist allerdings kein Argument für die Vernachlässigung der Berücksichtigung und Diskussion von Nachhaltigkeitsaspekten.

### 3.2 Neue Akteursstrukturen und Unternehmensstrategien

Mit der Brennstoffzellentechnologie kommt eine neue Technologie mit zum Teil neuen Herstellern und Zulieferern auf den Markt, und somit verändern sich auch Wirtschaftsbeziehungen und bisherige Akteurskonstellationen. Dies gilt insbesondere für den Bereich der **Energieversorgung**, wenn sich die **dezentrale Brennstoffzelle** durchsetzen sollte. Diese Dezentralität könnte beispielsweise die Rolle regionaler Unternehmen und des Handwerks stärken. Die Energieversorger müssten sich weiter und stärker als bisher zu Dienstleistern entwickeln und neue Kooperationen eingehen. Der Haushalt wird zum Energieproduzenten und zum Partner - oder Konkurrenten - des Energieversorgers. Damit hätte die Brennstoffzelle einen großen Einfluss auf die Umgestaltung des bestehenden Akteursgeflechtes im Energiesektor sowie auf die Unternehmensstrategien der bestehenden Unternehmen.

Im Beispielfall der dezentralen stationären Anwendung stehen sowohl die NutzerInnen, als auch InstallateurInnen und Energieversorgungsunternehmen vor neuen Aufgaben und Anforderungen und verfolgen zudem zum Teil unterschiedliche Interessen. Oertel und Fleischer (2000) unterscheiden die folgenden zentralen Akteure mit ihren jeweiligen, auf die Brennstoffzelle bezogenen Perspektiven und einigen spezifischen Anforderungen bzw. Aufgaben (vgl. Tabelle 2).

**Tabelle 2: Unterschiedliche Perspektiven auf die Brennstoffzelle**

	<b>Anwender (Haus-eigentümer etc.)</b>	<b>Hersteller von BZ-Anlagen</b>	<b>Installateur</b>	<b>Dienstleister (z.B. EVU)</b>
<b>Technische Kriterien</b>	Bedienbarkeit Service durch Anbieter	Eignung für Serienproduktion	Änderung der Qualifikationsanforderungen	Flexibel einsetzbar (modulierbar)
<b>Ökonomische Kriterien</b>	Investition im Vergleich zu vorher	Preiswerte Materialien	Evtl. Mehraufwand für Aus- und Weiterbildung	Betriebsw. Optimum der Anlagenauslegung Serviceangebot zur Kundenbindung
<b>Ökologische Kriterien</b>	„Öko-Image“	Minimale Emissionen bei Herstellung	Verkaufskriterium	Verkaufskriterium

Quelle: Oertel & Fleischer 2000, S. 162

Die Tabelle verdeutlicht im Ansatz die Heterogenität der Kriterien der beteiligten Akteursgruppen. Die unterschiedlichen und möglicherweise konfliktären Interessenlagen der Akteure sind insbesondere von Anbieterseite zu berücksichtigen und zu erforschen, um dies frühzeitig in den Entwicklungs- und Diffusionsprozess einzubinden.

Im Laufe der letzten Jahre wurden die **Initiativen und Netzwerke zur dezentralen stationären Brennstoffzelle** immer zahlreicher und breiter angelegt. Wichtige Akteure neben den Herstellern sind dabei mittlerweile die großen Energieversorger, das Handwerk wird ebenfalls zunehmend einbezogen. Allerdings kann es derzeit als noch offen bezeichnet werden, wie letztlich die Diffusion der Brennstoffzelle im stationär-dezentralen Bereich aussehen wird, welche Akteure wie beteiligt sind und wer letztlich davon profitieren wird. Beispielsweise ist die Frage von Kooperation oder Konkurrenz, die Frage der „Aufgabenteilung“ zwischen dem Handwerk und den Energieversorgern offen. Netzanbieter und Handwerk werden zwar voraussichtlich bei der Installation der Anlagen zusammenarbeiten – aber können beide Seiten auch gleichermaßen und ausreichend von Verkauf, Betrieb, Wartung etc. profitieren?

Politische Entscheidungsträger sollten sich der Bedeutung der einzelnen Akteure und ihrer möglichen Rollen und ökonomischen Interessen bewusst sein. Hierzu sind, insbesondere im stationär-dezentralen Fall, Überlegungen zu zukünftigen und wünschenswerten Konstellationen – unter Berücksichtigung von volkswirtschaftlichen Effekten – anzustellen. Auf dieser Grundlage sind auch gegenwärtige und zukünftige Förderungen und Rahmensetzungen, die ggf. Weichenstellungen für zukünftige Marktstrukturen darstellen, kritisch zu prüfen.

Mit Blick auf die einzelnen Akteursgruppen und ihre Strategien können folgende Aspekte beispielhaft angeführt werden, aus denen sich ein Forschungs- bzw. Handlungsbedarf ergibt:

- Die **Hersteller von Brennstoffzellensystemen** müssen sich auf den Marktauftritt vorbereiten. Brennstoffzellen sind ein neues Produkt, von dessen Vorteil die KonsumentInnen erst überzeugt werden müssen und das sich zugleich in einem Verdrängungswettbewerb in einem gesättigten Markt (Heizenergieversorgung) befindet. Dies erfordert umfangreiche Kommunikations- und Informationsmaßnahmen sowie Kooperationen mit anderen Akteuren (EVU, Handwerker) in Innovationsnetzwerken. An diesem Beispiel könnten Innovations- und Kooperationsstrategien untersucht werden, um fördernde und hemmende Faktoren der Innovation und Diffusion zu identifizieren.
- Die Anzahl der **Energieversorger**, die sich mit der Brennstoffzelle befassen, Pilotprojekte durchführen und Strategien entwickeln (wollen), nimmt stetig zu. Hier ist eine Analyse der unterschiedlichen Strategien und Konzepte im Kontext ihrer Ziele und unternehmensspezifischen Rahmenbedingungen sinnvoll. Mit Hilfe einer derartigen Analyse können ggf. mehr oder weniger geeignete Strategien identifiziert werden – als Orientierung für die Unternehmen selbst sowie für die Politik und die Ausgestaltung von Maßnahmen und Instrumenten.
- Für das **Handwerk** ergeben sich mit der Einführung der Brennstoffzelle starke strukturelle Umbrüche. Während das Fachhandwerk zur Zeit durch Vermittlung und Verkauf auch am Heizgerätevertrieb verdient, könnten sich hier zukünftig neue Vertriebswege ergeben, die das Handwerk nicht wie bisher berücksichtigen (z.B. Contracting oder Direktvertrieb durch den Energieversorger). Zugleich entstehen neue Herausforderungen: Während für Heizungsinstallationen bislang HeizungsinstallateurInnen zuständig waren, erfordert die Installation einer Brennstoffzelle zusätzlich auch das Know-how von ElektroinstallateurInnen.

nen. Hier ergeben sich einerseits Chancen für gewerkeübergreifende Handwerkskooperationen, andererseits entsteht Bedarf für Weiterbildung und veränderte Ausbildungsgänge. Hier gibt es bereits erste Projekte, die sich damit beschäftigen (vgl. Koschorke et al. 2002; Bünger et al. 2002). Zusätzlich sind HandwerkerInnen die Türöffner zu den Haushalten. Da sie oft erste Ansprechpartner von PrivatkundInnen sind, kann ihre Einstellung zur Brennstoffzelle Einfluss auf die Diffusion haben.

- Der zentrale neue Akteur, der sinnbildlich für die Dezentralität steht und entscheidenden Einfluss auf die Diffusion haben wird, ist der **Haushalt** mit seinen BewohnerInnen. Durch den Einsatz kleiner Brennstoffzellen besteht für Haushalte die Möglichkeit der Eigenversorgung mit Strom und Wärme. Damit einher geht ein Wandel vom Stromkonsumenten zum Stromproduzenten, im Fall von eigenproduzierter Überschusswärme möglicherweise auch zum Wärmelieferanten. Auch hier stellt sich die Frage nach dem Verhältnis von Kooperation und Konkurrenz zwischen dem Haushalt als neuem Produzenten und dem traditionellen Energieversorgungsunternehmen. Die EVU könnten hier proaktiv über erweiterte Dienstleistungsangebote (z.B. mit neuen Contractingformen) eine stärkere Kundenbindung herstellen und gleichzeitig ihre Netzaufwendungen reduzieren (vgl. Jörissen & Garche 2001). Auch diese Strategien lohnt es vergleichend zu analysieren.

Darüber hinaus sollte der Haushalt und alle anderen „Zielgruppen“ der neuen Brennstoffzellenanwendungen nicht nur in der unternehmerischen Marktforschung, sondern auch in der Wissenschaft eingehender untersucht werden, um hieraus wichtige Determinanten für die Diffusion bestimmen zu können; dies wird im nachfolgenden Abschnitt vertieft behandelt.

### 3.3 Zielgruppenanalysen und Akzeptanzforschung

Die erfolgreiche Diffusion der Brennstoffzellentechnologie ist in allen Anwendungen entscheidend von der Akzeptanz seitens der NutzerInnen abhängig. Damit rücken eine Reihe von Forschungsfragen in den Vordergrund, die die Ebene der klassischen Marktforschung überschreiten wie z.B. eine umfassende Akzeptanzforschung, aber auch partizipative Produktentwicklung etc.<sup>31</sup>

Bei der Analyse der Verbreitungschancen einer neuen Technik ist die **zielgruppenspezifische Technikakzeptanz** zu berücksichtigen. Diese kann je nach Person und Haushaltstyp sehr unterschiedlich sein (vgl. Meyer et al. 2001).<sup>32</sup> Die Akzeptanz einer Technologie hängt zusätzlich von ihrer Bekanntheit und dem gesellschaftlichen Informationsstand ab. Diesbezüglich ist festzustellen, dass das Funktionsprinzip der Brennstoffzelle immer noch als vergleichsweise unbekannt angesehen werden kann. Ein weiteres wichtiges Problemfeld kön-

<sup>31</sup> Eine erste Reflexion dieser Problematik fand in der Brennstoffzellen-Studie des TAB (Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag) statt: Die Autoren Oertel und Fleischer stellen hierzu für die Anwendung kleiner stationärer Brennstoffzellen für die Haus- und Siedlungsenergieversorgung fest, dass die Einführung dieser neuen Technik neben messbaren Faktoren, wie Wirkungsgrad und Einhaltung von Emissionsgrenzwerten auch von einer Reihe sozialer Randbedingungen wie z.B. sozio-demografischer oder sog. „weicher“ Faktoren, wie z.B. Wohnkomfort oder Informationsstand der KäuferInnen, abhängt (2000, S. 163ff.), jedoch ohne dass diese Einflüsse genauer analysiert werden.

<sup>32</sup> Individuelle Einflussfaktoren sind bspw. Alter, Geschlecht, Bildungsstand, Einkommen, Technikbiografie und bisherige Technikanwendung; haushaltsbezogene Einflussfaktoren sind z.B. die Anzahl der Personen, Altersmischung, Bedarf für Unterstützungsleistungen (Meyer et al. 2001).

nen Vorbehalte und Ängste gegen die neuen Brennstoffe sein, insbesondere gegen Wasserstoff, aber auch ggf. Methanol, als Energieträger.<sup>33</sup>

Die Zielgruppenbestimmung erfordert die Berücksichtigung von verschiedenen Motiven und Lebenskontexten. Hier kann u.U. auf vorhandene Ansätze und bereits genauer untersuchte bzw. bekannte potenzielle Nutzermilieus zurückgegriffen werden, die bei der Entwicklung entsprechender Informations-, Kommunikations- und Marketingstrategien weiterhelfen können. In einer Untersuchung zur Nutzung erneuerbarer Energieversorgungstechnologien (Haas et al. 2001) wurden beispielsweise Nutzerkategorisierungen entwickelt, von denen für den Anwendungskontext Brennstoffzelle vermutlich die Gruppen „Technologiebegeisterte“, „ÖkotechnikerInnen“ und „Komfortsuchende“ in Frage kommen könnten.<sup>34</sup>

Weitere akzeptanzrelevante Aspekte der Technologie, die sowohl in der Produktentwicklung, als auch in der Entwicklung von Kommunikations- und Informationsstrategien zu berücksichtigen sind, sind Sicherheit, Risiko und Zuverlässigkeit der Anlagen bzw. Geräte, aber auch der einfache und möglichst vertraute Umgang in der Benutzung, Wartung oder Brennstoffbefüllung (Beispiele: Fahrzeug: Betankung, Geräteinsatz: Kartuschen-Wechsel etc.).

Solche und weitere Nutzeranforderungen sollten die Auswahl geeigneter Systeme und deren Ausgestaltung beeinflussen. Hier bieten sich **partizipative Produktentwicklungen** an. Dies erfordert eine frühzeitige, gestaltungsorientierte Einbeziehung und Berücksichtigung von NutzerInnen und ihren Erwartungen und Wünschen. Dies gilt sowohl für das Brennstoffzellensystem selbst als auch für die damit verbundenen Dienstleistungen (Service, Contracting, Vernetzung etc.). Brennstoffzellen befinden sich in einem Verdrängungswettbewerb mit etablierten Technologien. Dies erfordert, dass die NutzerInnen von den Vorteilen der neuen Technik überzeugt sind. Ein Problem kann dabei sein, dass der individuelle im Vergleich zum gesamtgesellschaftlichen Nutzen eher gering ausfällt. Auch dies ist mit geeigneten Kommunikations- und Informationsstrategien zu reflektieren.

Im **stationär-dezentralen** Fall ist der **Haushalt** die entscheidende Zielgruppe. Durch die Brennstoffzelle wird für die Kraft-Wärme-Kopplung ein neues Marktsegment im Eigenheim- und Wohnungsmarkt erschlossen, das so bislang noch nicht existent ist. Zusammen mit den beschriebenen drastischen Marktveränderungen, die die Brennstoffzelle auslösen kann, wird der Haushalt mit seinen BewohnerInnen damit zum wichtigen Geschäftspartner – und nicht mehr nur Kunden.

Ein Hemmnis für die Diffusion der Brennstoffzelle in die Haushalte hinein kann durch den Trend zum **Outsourcing von Haushaltsfunktionen** bzw. der zunehmenden Inanspruchnahme von Dienstleistungen gegeben sein. Die Übernahme der Strom- und Wärmeerzeugung

---

<sup>33</sup> Die derzeit wahrscheinlichsten anfänglichen Einsatzbrennstoffe im Hausgebrauch sind Erdgas und Heizöl – denn sie bieten die größten Vorteile aufgrund der vorhandenen Infrastruktur, aber auch und insbesondere aufgrund der gegebenen „Vertrautheit im Hausgebrauch“.

<sup>34</sup> Haas et al. (2001) charakterisieren diese Gruppen wie folgt: Die *Technologiebegeisterten* und *ÖkotechnikerInnen* haben großes Technikinteresse, wobei die Ökotechniker zusätzlich ökologisch sensibilisiert sind. Sie bringen in der Regel viel Eigenarbeit auf und basteln an der Anlage. Sie interessieren sich besonders für Fotovoltaik, teilsolare Heizungen oder Sonnenkollektoren zu Warmwasserbereitung. *Komfortsuchende* streben einen hohen Komfort an und wollen sich mit den technischen Systemen nicht zu genau befassen. Sie entscheiden sich hauptsächlich für Wärmepumpenanlagen, Biomasse-Nahwärmeanschlüsse oder solar-passive Elemente. Zusätzlich unterscheiden sie Gestalter, Präsentierer, Kostensparer und Gesamtplaner (Haas et al. 2001); diese Gruppen sind vermutlich weniger interessiert an Brennstoffzellen, da sie andere Motive verfolgen.

gung durch den Haushalt kann somit als „Insourcing“ eher unattraktiv wirken. Allerdings können zielgruppenspezifische Dienstleistungskonzepte und geeignete technische Konzepte (vernetztes Haus) dies ggf. überwinden und den Haushalt möglicherweise sogar für weitergehende Dienstleistungen gewinnen.

Für die erfolgreiche Verbreitung der **Brennstoffzelle in Fahrzeugen** werden Aspekte wie Preis, Nutzungskomfort (Brennstoffversorgung, Fahrzeugeigenschaften im Vergleich zu konventionellen Modellen), und Handhabbarkeit eine große Rolle spielen. Das Kostenargument wird dabei im PkV-Bereich ggf. dadurch entschärft, dass voraussichtlich zuerst ohnehin das hochpreisige Segment bedient werden wird - auch aus technischen Gründen wie Gewicht etc.

Da eine breitere Einführung der **mobilen Brennstoffzelle** zuerst jedoch im Bereich von Personentransportfahrzeugen (z.T. auch Gütertransport) erfolgen wird (und gegenwärtig bereits erfolgt, wie zahlreiche Beispiele zeigen, vgl. Abschnitt 2.3.4) eröffnen sich spezifische Möglichkeiten für breit angelegte Informationskampagnen. Die Brennstoffzelle kann einerseits mit ihrem positiven Image (z.B. leise, umweltfreundliche, fortschrittliche Busse) die Akzeptanz des ÖPNV steigern, andererseits lässt sich der öffentliche Personennahverkehr mit seinen spezifischen „Kommunikationsstrukturen“ (Busraum, Haltestellen etc.) zur Information über die Brennstoffzelle nutzen. Für diesen Kontext - Brennstoffzelleneinsatz im ÖPNV - sollte eine spezielle Strategie erarbeitet werden, aus der eine Informationskampagne zur Aufklärung und Akzeptanzhöhung hervorgeht. Zudem können über den Einsatz im ÖPNV auf vergleichsweise einfache Weise Begleitforschungen und Erhebungen durchgeführt werden.

### 3.4 Politische Instrumente und Steuerung

Im Zuge der Entwicklung und Markteinführung von Brennstoffzellensystemen kommt der Politik eine entscheidende Bedeutung zu. Sie kann mit geeigneten Instrumenten die ökonomischen Nachteile aufheben und Anreize für die Diffusion setzen (z.B. Internalisierung externer Kosten). Dies wird sowohl in Bezug auf die Anlagentechnologien als auch auf zu schaffende Infrastrukturen der Fall sein müssen.

#### Integrierte Politikansätze

Aufgrund der Vielzahl der Anwendungen und der Komplexität der neuen Systeme sind viele Politikbereiche gleichzeitig betroffen. Dies erfordert ein hohes Maß an politischer Kooperation und Koordination. Gleichzeitig sollten in dieser frühen Phase vor der breiteren Marktdurchdringung die Gestaltungsspielräume mit geeigneten politischen Instrumenten genutzt werden, um z.B. ökologische, strategische und wettbewerbliche Fehlentwicklungen zu vermeiden. Gleichzeitig sollte dies nicht zu einer frühzeitigen Eindämmung weiterer technischer Entwicklungen führen.

Die systemischen Zusammenhänge der Brennstoffzellentechnologie sind in ihren technischen und sozial-ökologischen Auswirkungen politisch-instrumentell integriert zu gestalten. Dabei können verschiedene Konzepte bzw. Ansätze zur Diffusion und Förderung von Innovationen aufgegriffen werden, die u.a. auch im Kontext von erneuerbaren Energien eine Rolle spielen, und die für die politische Gestaltung von Maßnahmen handlungsleitend sein können: das Konzept des **Leadmarkets** (vgl. Wengel et al. 2001) und das Konzept des **Strate-**

**gischen Nischen Managements**<sup>35</sup> (vgl. Hoogma et al. 2002, Nill et al. 2002) sowie das derzeit am IÖW mit entwickelte Konzept der Zeitstrategien (Nill & Zundel 2002, Erdmann 1999).

Bislang gab es ein vergleichsweise geringes Niveau an staatlich initiiertem Begleitforschung beispielsweise zu den ökologischen Folgen der Brennstoffzelleneinführung. Dies erscheint insbesondere angesichts der radikalen Tragweite der Brennstoffzellentechnologie sowie der Tatsache, dass viele Hersteller im Grunde schon jetzt mit Produkten auf dem Markt sein wollten, verwunderlich. Der „neue“ Zeitraum bis zu den tatsächlichen Marktaufritten sollte diesbezüglich genutzt werden. Aufgrund der Komplexität der Brennstoffzellenanwendung und der teilweise langen Ketten beteiligter Akteure bieten sich u.U. zur Behandlung bzw. Lösung ökologischer Probleme die frühzeitige Anwendung „moderner“ Politikansätze wie der **Integrierten Produkt Politik (IPP)** (Rubik 2002) an. Im Fall der Brennstoffzelle könnte somit eine Art „antizipativer“ IPP zum Einsatz kommen, mit deren Hilfe in dialogischen Verfahren geeignete Instrumente zur Verbesserung von z.B. ökologischen, informatorischen und technischen Problemen ermittelt werden.<sup>36</sup>

Neben den Erfordernissen der praktischen politischen Gestaltung ist die Innovation Brennstoffzelle aufgrund ihres systemischen und - bezogen auf einen möglichen Pfadwechsel mit all seinen Implikationen - eventuell radikalen Charakters auch von hohem politikwissenschaftlichen Interesse. Die beschriebenen Aspekte des Einflusses auf und Wandels in der Akteursstruktur sowie der mögliche Wechsel des gegenwärtigen technologischen Regimes (zumindest im **Energiesektor**), verdeutlichen, dass dies nicht ohne erhebliche Einflussnahme der beteiligten und betroffenen Akteure erfolgen wird. Diese Stakeholder – die sowohl positiv als auch negativ betroffen sein können – nehmen Einfluss auf den Steuerungsprozess der Diffusion der Brennstoffzellentechnologie. Man könnte hier insofern von einer **sektoralen Governancestruktur** sprechen, deren explizite und implizite Steuerungskapazitäten und –absichten zu untersuchen sind.<sup>37</sup>

### **Monitoring der (technischen) Optionen**

Eine **Innovationspolitik** für den Bereich der Brennstoffzellentechnologie sollte gleichzeitig eine Art Monitoring der vielfältigen Aktivitäten vornehmen. Parallele sozial-ökologische Analysen, Technikfolgenabschätzungen und Bewertungen sollten dazu dienen, ggf. frühzeitig Richtungskorrekturen vornehmen zu können. Neben der Analyse der einzelnen Optionen ist dabei die integrierte Behandlung in Form einer Gesamtschau der Brennstoffzellenentwicklung nötig, um den Erfolg und die volkswirtschaftliche Effizienz sicherzustellen.

---

<sup>35</sup> Strategisches Nischenmanagement meint die zeitlich begrenzte Schaffung eines geschützten Raumes für die Entwicklung und Erprobung neuer Technologien. Ziel ist es, neue Technologien über in der Nutzungspraxis gewonnene Erfahrungen so weiter zu entwickeln, dass sie mit etablierten Technologien konkurrieren können.

<sup>36</sup> Einzelne Aspekte der ökologischen Bewertung werden im nachfolgenden Abschnitt 3.5 noch etwas eingehender beschrieben.

<sup>37</sup> Derartige Zusammenhänge sollen in den nächsten Jahren in dem Projekt „Transformation and Innovation in Power Systems (TIPS)“ unter Leitung des DIW untersucht werden, welches im Rahmen des Programms sozial-ökologische Forschung vom BMBF gefördert wird. Hier sollen Transformationsdynamiken und Innovationsprozesse im Energiesektor untersucht und modelliert werden, wobei auch Brennstoffzellen eine Rolle spielen.

### Anpassung des regulativen Rahmens

Wichtig ist auch die Prüfung und ggf. Modifizierung der **regulativen Rahmenbedingungen**, die auf die Brennstoffzellendiffusion einwirken. Als Beispiele für die **stationäre Anwendung** seien hier das KWK-Gesetz und die Energieeinsparverordnung angeführt:

- Die Durchsetzung von Brennstoffzellen im stationären Anwendungsbereich ist abhängig von den politischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen für die Kraft-Wärme-Kopplung. Die Kraft-Wärme-Kopplung ist seit der Liberalisierung des Strommarktes stark unter Druck geraten. Erste Maßnahmen zum Schutz der KWK wurden zunächst mit dem KWK-Vorschaltgesetz (vom 17. Mai 2000) und schließlich mit dem **KWK-Gesetz** ergriffen, das am 1. April 2002 in Kraft getreten ist. Das KWK-Gesetz ist hinsichtlich seiner Wirksamkeit sehr umstritten, der Gesetzgebung gingen lange Diskussionen um andere Instrumente wie z.B. Zertifikate oder Bonussysteme voraus. Aufgrund erheblicher Interessenkonflikte zwischen Energieversorgern, Umweltverbänden, Anlagenbauern etc. konnte keine für alle zufriedenstellende Lösung gefunden werden.

Der Zuschlag für Brennstoffzellen aus dem KWK-Gesetz sowie die mit der Ökosteuer verbundene Befreiung von Gas- und Stromsteuer für KWK-Anlagen bis 2 MW und von der Mineralölsteuer (für KWK Anlagen mit einem Jahresnutzungsgrad über 70%) reichen jedoch noch nicht aus um einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlagen zu ermöglichen.

- Die **Energieeinsparverordnung** (EnEV) schreibt die Erneuerung alter Heizungsanlagen bis zum Jahr 2006 vor.<sup>38</sup> Diese Regelung fördert zwar den Einbau neuer Anlagen - dies könnte sich für Brennstoffzellen jedoch dann hemmend auswirken, wenn sie bis zu dem festgesetzten Zeitpunkt noch nicht in ausreichender Breite und Wirtschaftlichkeit am Markt verfügbar sind.

Darüber hinaus spielen viele weitere Gesetze, Verordnungen und Normen direkt oder indirekt eine Rolle, beispielsweise mit Blick auf die Brennstoffe oder die allgemeine ökologische Relevanz der Brennstoffzellentechnik. Beispiele sind hier die Ökosteuer und die Steuerbefreiung für Biokraftstoffe. Auch die Förderung Erneuerbarer Energien hat Auswirkungen auf die Brennstoffzellendiffusion: Bereits jetzt gilt beispielsweise, dass Brennstoffzellenanlagen beim Einsatz regenerativer Brennstoffe (Biogas, Klärgas, Deponiegas, Grubengas) die entsprechenden Einspeisevergütungen nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz in Anspruch nehmen können.<sup>39</sup>

Insgesamt gilt in Bezug auf die regulative Rahmensetzung: Wenn die Brennstoffzelle im Allgemeinen bzw. in ihren verschiedenen Anwendungsbereichen eine Chance haben soll, muss die Politik hierfür den Rahmen aktiv gestalten. Hierbei ist nach den einzelnen Anwendungsfeldern der Brennstoffzelle zu differenzieren. Mit Blick auf die stationäre Anwendung sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt weitere Unterstützungen bei der Forschung und Entwicklung

<sup>38</sup> § 9 EnEV schreibt vor, dass Heizkessel, die mit flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen beschickt werden und vor dem 1. Oktober 1978 eingebaut oder aufgestellt worden sind, bis zum 31. Dezember 2006 außer Betrieb genommen werden müssen. Wurden die Anlagen in der Zwischenzeit ertüchtigt (z.B. Erneuerung des Brenners nach dem 1. November 1996) verschiebt sich der Termin um zwei Jahre.

<sup>39</sup> Da die (dezentralen) Brennstoffzellen voraussichtlich überwiegend wärmegeführt eingesetzt werden, würden hier auch spezifische Förderungen bzw. Regulierungen des Wärmemarktes greifen, welcher bislang kaum geregelt ist. Hierzu gibt es aktuelle Überlegungen zur Förderung erneuerbarer Energien auf dem Wärmemarkt in Analogie zum EEG.

sowie Demonstrationsvorhaben notwendig. Neben direkten Gesetzen wie dem erwähnten KWK-Gesetz kann der weitere Ausbau der Ökosteuer bzw. die Berücksichtigung externer Kosten in den Energiepreisen die Wettbewerbsfähigkeit der Brennstoffzelle verbessern. Darüber hinaus sind für die neuen Brennstoffzellenanwendungen noch zahlreiche Normen und Standards zu entwickeln.

Die mobilen Brennstoffzellen sind insbesondere in Bezug auf die Infrastruktur-Frage abhängig von politischer Unterstützung und Rahmensetzung. Für grundsätzliche politische Weichenstellungen ist es zum gegenwärtigen Zeitpunkt angesichts der ungeklärten technischen Optionen im mobilen Bereich noch zu früh. Daher werden zunächst Ansätze wie das strategische Nischenmanagement empfohlen (Hübner & Nill 2001; Nill 2000).

### 3.5 Ökologische und ökonomische Bewertungen

Die ökologische Bewertung spielte bislang vereinzelt für unterschiedliche Brennstoffzellentechnologien und –anwendungen eine Rolle. Als Beispiel sei hier die Studie des TAB (Oertel & Fleischer 2000) angeführt, in der ökobilanzielle Abschätzungen in den Bereichen mobiler und stationärer Anwendungen dargestellt werden. In einigen anderen Studien werden spezielle Anwendungsfälle behandelt, wobei Zellen im kleinen Leistungsbereich bislang kaum eingehender untersucht wurden.<sup>40</sup>

Die ökologische Argumentation für Brennstoffzellen erfolgt zumeist über die Emissionsfreiheit des eigentlichen Brennstoffzellenprozesses. Zur ganzheitlichen Beurteilung von Brennstoffzellen müssen jedoch die Brennstoffvorketten, der Prozess der Brennstoffaufbereitung bzw. Reformierung und der Herstellungs- sowie Entsorgungsprozess der Brennstoffzellen berücksichtigt werden. Hier gibt es erste orientierende Ökobilanzen, die aber aufgrund begrenzter Datenverfügbarkeit stark auf Abschätzungen und in der Regel auf Darstellungen einzelner Hersteller beruhen. Mit Blick auf die drei grundsätzlichen Einsatzbereiche ergeben sich folgende Untersuchungsbedarfe:

- Detailliertere ökologische Bewertungen der möglichen Durchsetzung von **stationären Brennstoffzellen** und der damit verbundenen Veränderungen in der Brennstoffversorgung und -Infrastruktur (verschiedene Szenarien) fehlen derzeit noch. Es gibt lediglich vereinfachende Abschätzungen über einige angenommene Implementierungsquoten von Brennstoffzellen-BHKW im Bereich der Hausenergieversorgung (siehe Oertel & Fleischer 2000). Für detailliertere ökologische Analysen sind auch die infrastrukturellen Aspekte zu berücksichtigen, die mit einem Energieträgerwechsel verbunden wären.

Eine interessante Detailfrage ergibt sich mit Blick auf den bevorstehenden Einsatz stationär-dezentraler Brennstoffzellen im Haushalt: Welche Auswirkungen hat der Wandel des Haushalts vom Energieverbraucher zum Energieerzeuger im Hinblick auf seinen Umgang mit Energie und Umweltressourcen? Mit dem Einzug der Brennstoffzelle in den Haushalt lässt sich ggf. eine größere **Sensibilisierung für ökologische Probleme** erzielen, oder können beispielsweise Stromsparstrategien besser verbreitet werden, da nun für den Haushalt ein unmittelbarer und direkterer ökonomischer Anreiz entsteht. Andererseits

---

<sup>40</sup> Einzelne Beispiele bisheriger ökologischer Abschätzungen und Bewertungen siehe in den Abschnitten 2.2.5 und 2.3.3.

sind hier auch **ökologische Rebound-Effekte** möglich, indem z.B. der eigenproduzierte Strom nicht als begrenztes Gut oder die gekoppelt erzeugte Wärme als „Abfallprodukt“ gesehen wird, das nicht effizient eingesetzt werden muss.<sup>41</sup>

- Für die Untersuchung der ökologischen Effekte im **mobilen Einsatzbereich** gilt das gleiche wie im stationären Fall - die infrastrukturellen und brennstoffbezogenen Aspekte sind mit zu berücksichtigen; sie tragen einen hohen Anteil an der Gesamtbilanz und -bewertung. Ein frühes Beispiel hierfür ist eine Studie des UBA, welche jedoch bis zur tatsächlichen Markteinführung erster Modelle sicher einiger Aktualisierungen und detaillierter Ausführungen bedarf (UBA 1999).

Im Fall der **Kraftstoffe** sind ihre Auswirkungen nach Verbrennung sowie ihre Herstellung einzubeziehen. Die Rohstoffe können aus fossilen, aber auch aus regenerativen Quellen stammen. Dies gilt auch für den Kraftstoff Methanol, der in der gegenwärtigen Diskussion für die erste breite Markteinführung für Brennstoffzellen-Fahrzeuge favorisiert wird.

Darüber hinaus gilt es bezüglich der ökologischen Effekte bei der mobilen Anwendung der Brennstoffzelle unerwünschte „**Nebeneffekte**“ zu beachten: Mit der Brennstoffzelle im Auto kann - und soll aus Sicht der Automobilindustrie - die Stabilisierung oder gar Steigerung des Status quo hinsichtlich eines ohnehin bereits hohen und stetig **steigenden Verkehrsaufkommens** erfolgen. Ein weiteres Beispiel für derartige ökologische Rebound-Effekte wäre durch umweltschädliche bzw. umweltschädigend hergestellte Brennstoffe gegeben (s.o.) sowie durch die Entwicklung ineffizienter Fahrzeuge - die aufgrund einer (vermeintlich) umweltfreundlich zur Verfügung stehenden Energiequelle die Effizienzpotenziale nicht ausschöpfen. Diese Gefahr besteht beispielsweise durch den geplanten ersten Einsatz von Brennstoffzellen in größeren „Luxuswagen“, deren Energieverbrauch durch hohes Gewicht, hohe PS-Zahlen und in der Regel zusätzliche technische Features (Klimaanlagen etc.) erheblich ist.

- Die Brennstoffzellen, die für **portable Anwendungen** genutzt werden, sollten strengen ökologischen Kriterien unterliegen, da sie kleiner und deutlich zahlreicher sind und daher u.U. häufiger im normalen Hausmüll bzw. unsachgemäß entsorgt werden (Stichwort Ökotoxizität; dies gilt unter der Annahme, dass es noch einige Jahre bis zu einer geregelten Praxis der Elektronikschrottverordnung braucht). Zudem dürfen beim direkten Nutzerkontakt mit dem Produkt keine gesundheitlichen Schäden hervorgerufen werden (Humantoxizität, Allergien, Sensibilitäten).

Weiterhin kann die portable Brennstoffzelle durch ihre deutlich längeren Ladezyklen im Vergleich zu Batterien oder Akkus positive ökologische Effekte aufweisen - was diese Eigenschaft zu einem wichtigen Zielkriterium macht. Aber auch bei der portablen Anwendung können ökologische Rebound-Effekte entstehen, beispielsweise indem die Effi-

---

<sup>41</sup> Erste Untersuchungen zum Einfluss dezentraler Technologien auf das Energieverhaltensverhalten kommen zu dem Ergebnis, dass sich die Gruppe der Technologieanwender im Hinblick auf den Energieverbrauch und Nutzerverhalten insgesamt nicht wesentlich von Nicht-Anwendern unterscheidet, wobei es bei einzelnen Technologien durchaus Unterschiede gibt (vgl. Haas et al. 2001). In der Studie wurden die Technologiegruppen Wärmepumpen für die Raumheizung und Warmwasserbereitung, Biomassenutzung in individuellen und Nahwärmesystemen, solar-thermische Kollektoren zur Warmwasserbereitung, teilsolare Raumheizung, solar-passive Elemente und Fotovoltaik untersucht. Dabei neigen z.B. AnwenderInnen individueller Biomasse zu erhöhtem Heizenergieverbrauch, während NutzerInnen solarer Heizungen oder Wärmepumpenheizungen eher weniger Heizenergie verbrauchen. FotovoltaikanwenderInnen zeigten einen leicht geringeren Stromverbrauch.

zierungsgewinne durch Brennstoffzellen gegenüber Batterien oder Akkus durch eine vermehrte Nutzung oder durch eine größere Anzahl verkaufter Geräte aufgewogen werden.

Spätestens wenn sich in den einzelnen Anwendungsfeldern die relevanten Technologietypen und Brennstoffe herauskristallisieren, sollten umfassende ökologische Bewertungen durchgeführt werden. Bestenfalls sollten die ökologischen Analysen jedoch bereits im Vorfeld als Kriterium zur Entscheidungsfindung beitragen. Diese könnten Bestandteil von Technikfolgenabschätzungen (TA-Analysen) sein, durch die Richtungssicherheit erreicht werden kann. Bei der Durchführung der Bewertungen sollten auch die möglichen Synergieeffekte der einzelnen Brennstoffzellentechnologie und -anwendung, die sie z.B. mit den anderen Brennstoffzellenanwendungen aufweist, untersucht werden. Mögliche Rebound-Effekte und entsprechende Vermeidungsstrategien sind entsprechend zu berücksichtigen.

Diese Anforderungen gelten ebenso für **ökonomische** bzw. **volkswirtschaftliche Effekte** der Diffusion der Brennstoffzelle, die bislang auch erst ansatzweise untersucht sind. In vereinzelt Szenarien (s. Abschnitt 3.6) wurden erste Abschätzungen hinsichtlich der wirtschaftlichen und branchenbezogenen Auswirkungen (Veränderung der Branchenstruktur, Zulieferketten, Arbeitsplatzeffekte) vorgenommen (Wengel & Schirrmeister 2001). Hier fehlt es noch an Wissen über die letztliche Ausprägung und Ausgestaltung der beteiligten Wirtschaftszweige, sowohl in der Produktion, als auch im Dienstleistungsbereich und im Handwerk.

### 3.6 Szenarien – Zukunftsbilder

Zur Unterstützung der politischen und unternehmerischen Entscheidungen für oder gegen einen technologischen Pfad bietet sich die Entwicklung geeigneter Szenarien an. Szenarien können auf bereits vorhandenen Daten und Informationen basierend generiert werden, wobei dies mit allgemeinen Trend- bzw. Prognoseentwicklungen gekoppelt wird. Die Szenarioentwicklung ist auch für die Entscheidungsbereiche der ökonomischen und ökologischen Bewertung geeignet. Für den fundierten Aufbau von Szenarien für die verschiedenen Brennstoffzellentechnologien und ihre Vielfalt an Anwendungsmöglichkeiten ist die Datenlage aus heutiger Sicht allerdings noch deutlich zu verbessern. Da Entscheidungen für einzelne Entwicklungspfade jedoch bereits getroffen bzw. diskutiert werden sollten, können hier auch andere Methoden zur Eingrenzung von Unsicherheit wie z.B. die Generierung von „Zukunftsbildern“ hilfreich sein.

#### Szenarioentwicklung

Bislang liegen nur wenige ausführlichere Szenarien zu einzelnen Anwendungsbereichen vor. Sie beziehen sich vorwiegend auf die mobile Anwendung. Hier wurde z.B. unter der Leitung des Fraunhofer Instituts für Systemtechnik und Innovationsforschung eine Untersuchung zu den Auswirkungen des Umstiegs vom Verbrennungsmotor auf die Brennstoffzelle für die Baden-Württembergische Industrie durchgeführt (Wengel & Schirrmeister 2000).<sup>42</sup> Die Über-

---

<sup>42</sup> In dieser Untersuchung wurden drei verschiedene Szenarien zur Markteinführung und -durchdringung („Durchbruch im Inland“, „Durchbruch im Ausland“ und „Konkurrenz“) von Brennstoffzellen entwickelt und ihre Auswirkungen auf die Baden-Württembergische Industrie in Form von Umsatzveränderungen und Arbeitsplatzeffekten im Vergleich zu einem Referenzszenario bewertet. Bei der Entwicklung der Szenarien wurden die folgenden Einflussfaktoren auf die Brennstoffzellendiffusion berücksichtigt (Schirrmeister et al. 2000):

tragbarkeit dieser Szenarien ist jedoch aufgrund der regionalen Fokussierung, sowie teilweise spezifischer Datenquellen (ein Hersteller, Brennstoff Methanol) eingeschränkt. Fragen der ökologischen Bewertung, infrastruktureller Voraussetzungen etc. wurden zudem in den Szenarien nicht behandelt.

Aufgrund der möglicherweise gravierenden Zukunftswirkungen der Brennstoffzellentechnik sowie ihrer breiten Einsatzvielfalt sollte verstärkt mit Szenarien gearbeitet werden. Dabei empfiehlt sich eine breite Partizipation, auch von „betroffenen“ Entscheidern an der Szenarioentwicklung, um eine realitätsnahe Annahmensetzung. So können unter Einbeziehung verschiedener Interessenlagen unterschiedliche Entwicklungspfade aufgezeigt werden und hinsichtlich ihrer Auswirkungen verglichen werden.

### **Zukunftsbilder**

Neben derartigen vergleichsweise konkreten Szenarien können auch gesellschaftliche Visionen und Zukunftsbilder hilfreich für die Diskussion und Entscheidungsvorbereitung sein, insbesondere so lang die Datenbasis noch unsicher und gering ist. Darüber hinaus ist dies sinnvoll, wenn es sich wie bei der Brennstoffzellentechnologie um einen möglicherweise radikalen Veränderungsprozess und einen grundlegend neuen Entwicklungspfad handelt - zu dem nach gegenwärtiger Sicht viele Wege mit unterschiedlichsten Ausprägungen führen können.

Dabei ließen sich auch „gesellschaftliche“ Vorstellungen integrieren, beispielsweise im Rahmen einer partizipativen Technikfolgenabschätzung, durch die z.B. Zukunftsbilder von KonsumentInnen entwickelt werden könnten (vgl. Fonk & Hamstra 1996). In derartigen Zukunftsentwürfen sollten nicht nur die technischen, ökonomischen und ökologischen Implikationen erwogen, sondern insbesondere die gesellschaftlichen Auswirkungen in den Blick genommen werden, um so die Technikentwicklung um ökologische und soziale Aspekte erweitern zu können. Dabei sind auch Vergleiche zwischen der Einführung hierzulande und in Ländern mit anderen technologischen Settings, beispielsweise Entwicklungs- oder Schwellenländern instruktiv. Derartige Gedankenspiele zu möglichen Zukunftsentwürfen sollten den Blick für die Chancen und Risiken sowie die Möglichkeiten und Grenzen eines brennstoffzellenbasierten Technologiepfades schärfen, aber auch handlungsleitende Intentionen und Bedürfnisse involvierter Akteure beleuchten.

Eine interessante Zuspitzung könnte sich beispielsweise für den Fall der **stationär-dezentralen Brennstoffzelle** ergeben, wenn eine besondere Betonung auf die dezentralen Eigenschaften erfolgt. Die Dezentralität steht den herkömmlichen Strukturen, insofern eventuell auch den Bedürfnissen der traditionellen Unternehmen entgegen und stärkt gleichzeitig neue, kleinere Unternehmen. Für den Fall stark „monopolisierter“ Märkte kann eine solche Dezentralisierung unter Umständen zu einer „Demokratisierung der Energieversorgung“ beitragen. Aus einem solchen Blickwinkel können sich neue Erkenntnisse in Bezug auf fördernde und hemmende Faktoren der Diffusion ergeben.

Ein Beispiel für die Verbindung der technologischen Eigenschaften mit gesellschaftlichen Trends liefert die **portable Anwendung** von Brennstoffzellen. Eine breite Einführung von Brennstoffzellen in portablen elektrischen Geräten wird durch die Erhöhung der Nutzungsdauer (und damit der Arbeitsdauer) gegebenenfalls auch den Trend zur Mobilisierung, zu mobilen MitarbeiterInnen mit ihren mobilen Büros verstärken.

Die Beispiele zeigen, dass neben der eher „deterministischen“, d.h. datenbasierten Bestimmung von möglichen Zukunftsszenarien auch der etwas freiere Blick in die Zukunft wichtig ist. Dabei sollten gesellschaftliche Aspekte und Entwicklungen berücksichtigt werden, ebenso wie Motivationen, Bedürfnisse und Strategien von entscheidungsrelevanten Akteuren.

### 3.7 Bildung

Die Brennstoffzelle repräsentiert in ihrer derzeitigen Form und Ausdifferenzierung nicht nur einen neuen Technologiezweig, sondern sie liegt mit ihren besonderen Eigenschaften auch gewissermaßen „quer“ zu unserem bisherigen Ausbildungssystem. Es sind also eine Reihe neuer Qualifikationen erforderlich, die durch Aus- und Weiterbildung vermittelt werden müssen. Dazu gehören Veränderungen in universitären Ausbildungsgängen bis hin zum Handwerk. Die universitäre Ausbildung ist im technischen Bereich zukünftig auch um Methoden der Technikbewertung und -folgenabschätzung zu erweitern, um bei der Brennstoffzellen- und anderen Technologieentwicklungen sozial-ökologische bzw. ganzheitliche Sichtweisen zu unterstützen. Die akademische Ausbildung muss dabei auch die Lehrtätigen einbeziehen und die Brennstoffzelle zudem in die Lehrpläne allgemeinbildender Schulen integriert werden.

Wie bereits in Abschnitt 3.2 erwähnt, ergibt sich insbesondere im Handwerk Bedarf für Anpassung, um die mit Brennstoffzellen verbundenen Anforderungen (Installation, Service, Wartung/Reparatur) zu erfüllen – und um die Chancen adäquat nutzen zu können. Dies betrifft zum einen eine Ausweitung der Kompetenz in fachlicher Hinsicht (z.B. Kombination von Elektro- und Heizungsinstallationshandwerk) als auch soziale Qualifikationen (Kooperationskompetenz in gewerkeübergreifender Zusammenarbeit, stärkere Kunden- und Dienstleistungsorientierung). Dies erfordert langfristig eine Veränderung der entsprechenden Berufsbilder und eine Anpassung der Ausbildungsverordnungen. Hier gibt es bereits erste Projekte, die den Bedarf für Weiterbildung ermitteln, Informationsstellen einrichten, Informationsmaterial und Weiterbildungskonzepte entwickeln (vgl. Bünger et al. 2002, Koschorke et al. 2002). Dies sollte in Form von Konzeptentwicklung, Begleitforschung und Monitoring intensiviert werden.

## 4 Zusammenfassung

Brennstoffzellen sind zwar keine neue Erfindung, sie erfahren in den letzten Jahren jedoch eine bedeutende Renaissance. In einer Brennstoffzelle wird Wasserstoff oder ein wasserstoffbasierter Brennstoff in einem elektrochemischen Prozess in Nutzstrom umgewandelt, mit dem sich dann beispielsweise ein Elektromotor antreiben lässt. Eine Besonderheit der Brennstoffzellentechnologie ist ihre große **Einsatzvielfalt**. Es werden drei zentrale Anwendungsbereiche unterschieden:

- **Stationär:** Strom- und Wärmeversorgung
- **Mobil:** Antrieb für Fahrzeuge aller Art
- Energieversorgung von (**portablen**) Geräten

Vor mehr als 150 Jahren konnte die Erfindung der Brennstoffzelle nicht mithalten mit der Generatorentwicklung und den auf der Verbrennung fossiler Brennstoffe basierenden Antrieben. Ein wesentlicher Grund für die heutige Renaissance der Brennstoffzelle liegt nun genau darin begründet, dass der Brennstoffzellentechnologie große **Potenziale zur Lösung der globalen Umweltprobleme** zugeschrieben werden, die in zwei zentralen gesellschaftlichen Problemfeldern verursacht werden: in der Energieversorgung und im Verkehr. Die Aussicht auf eine Verringerung der bislang zunehmenden klimaschädlichen Emissionen und einen Ersatz der versiegenden und gefährlichen fossil-atomaren Energiequellen lässt die Brennstoffzelle damit auch für die Politik quer zu allen politischen Lagern attraktiv erscheinen.

Auf der Basis einer Darstellung des technischen und praktischen Status quo fokussiert diese Arbeit auf die folgenden Fragestellungen: **Wovon hängt die erfolgreiche Diffusion in den verschiedenen Einsatzbereichen ab?** Welche Faktoren und welche Akteure beeinflussen, ob die Brennstoffzelle eine Nischenanwendung wird oder zu einer Revolution führt? Dabei wird konstatiert, dass die technisch-ökonomische Machbarkeit eine notwendige Voraussetzung für jede Innovation ist, die am Markt erfolgreich sein will - und das diese Fokussierung bislang auch die politische Diskussion und die gesamte Forschungslandschaft dominiert hat. Die Begrenzung auf die technisch-ökonomische Rationalität ist jedoch gerade bei komplexeren Innovationen, die wie die Brennstoffzelle sogar einen Pfadwechsel bedeuten können, nicht hinreichend. Daher lautet die **zentrale These** des Papiers, dass die **erfolgreiche Diffusion der Brennstoffzelle** aufgrund ihrer zum Teil grundlegenden Veränderungen **in erheblichem Maße von nicht-technischen Faktoren abhängen wird**.

Die Brennstoffzellentechnik ist eine generische Innovation, weil ihr Anwendungspotenzial sehr vielfältig ist, mehrere Brennstoffe einsetzbar sind und damit weitreichende infrastrukturelle Anpassungen erfolgen müssen. Zudem verändert sie nicht nur die technischen Strukturen sondern auch die Akteursstruktur und bietet weitreichende ökologische Entlastungspotenziale. Mit Blick auf eine effiziente Innovationspolitik sollten übergreifende, systemische Aspekte identifiziert werden, um **Synergien zu erschließen** und Mehrkosten zu vermeiden. Dies gilt z.B. für Synergien von mobilen und stationären Brennstoffzellen, Synergien von neuen mit bestehenden Infrastrukturnetzen etc.

Die gewählte Fragestellung führt mit Blick auf den Grad eines möglichen „radikalen“ Wandels zu einer besonderen **Fokussierung der stationären Anwendung** der Brennstoffzelle. Hier-

bei ist zu unterscheiden zwischen Brennstoffzellenanlagen verschiedener Leistungsgrößen: dezentrale Hausenergieversorgung, Siedlungsversorgung und zentrale Kraftwerke für die öffentliche Stromversorgung. Von besonderem Interesse ist für die vorliegende Fragestellung wiederum der **Einsatz im Haushalt**. Dies begründet sich zum einen durch die hohe ökologische Relevanz des Energieverbrauchs in Haushalten, zum anderen dadurch, dass z.B. die Veränderungen bei den Akteursstrukturen vielfältiger, radikaler und gleichzeitig voraussetzungsvoller erscheinen. In Bezug auf die ökologische Entlastung wird der stationären Anwendung zudem vergleichsweise einmütig ein großes Potenzial bescheinigt, wohingegen die mobile Anwendung von Brennstoffzellen diesbezüglich teilweise kritisch hinterfragt wird.

Der radikale Wandel in den wirtschaftlichen Beziehungen und Akteursstrukturen zeigt sich im Bereich der Energieversorgung beispielsweise darin, dass sich der **Haushalt** vom Stromkonsumenten zum Stromproduzenten entwickelt, der im Fall von eigenproduzierter Überschusswärme auch zum Wärmelieferanten werden kann. Auch die Beziehungen zwischen Energieversorgern und dem Handwerk sind noch unklar; die Frage nach **Kooperation oder Konkurrenz**, der Aufgaben- und letztlich der Profitaufteilung sind weitgehend offen. Hier entsteht Handlungs- und Forschungsbedarf in antizipativer und begleitender Weise bezüglich geeigneter (bzw. wünschenswerter) Strategien und Konzepte, zudem müssen zielgruppen-gerechte Informationskampagnen und Weiterbildungen entwickelt und durchgeführt werden.

Die Anwendung der Brennstoffzelle in der dezentralen Hausenergieversorgung bietet den Haushalten auch eine **Funktionsinnovation** in Form der dezentralen gekoppelten Strom- und Wärmeversorgung, die zudem auch im **Verhalten** der NutzerInnen einen Wandel bezüglich ihres Energieverbrauchs auslösen kann. Diese neue Rolle muss zum einen von Seiten der Anbieter stärker in ihrer **Strategie- und Angebotsentwicklung** berücksichtigt werden, zum anderen stellen sich damit Fragen von **Technikakzeptanz**, Verhaltensimplikationen und nach einer frühzeitigen Einbindung von NutzerInnen in Entwicklungsprozesse oder Technologiebewertungsverfahren. Hierbei sind insbesondere mögliche ökologische Rebound-Effekte zu berücksichtigen und geeignete Strategien zu ihrer Vermeidung zu entwickeln.

Eine zentrale Voraussetzung für die Entwicklung geeigneter **politischer Strategien und Rahmenbedingungen** zur Gestaltung der Brennstoffzellentechnologie ist eine integrative Sichtweise, die der Komplexität der Thematik angemessen ist. Innovationspolitische Ansätze wie das Strategische Nischenmanagement, das Leadmarket-Konzept oder das Konzept der Zeitstrategien sind auf ihre Übertragbarkeit und Reichweite zu prüfen. Sollte die Brennstoffzellendiffusion beispielsweise in einem strategischen Nischenmarkt gefördert werden, so ist zu untersuchen wie dieser beschaffen sein sollte. Für den stationären Fall ist hier der gesamte Kontext des Energiesektors zu berücksichtigen, sowohl hinsichtlich möglicher Synergiepotenziale als auch Konkurrenzen zu anderen Entwicklungen (z.B. erneuerbare Energien).

Bei relativ konkreten Umsetzungsoptionen, bei denen beteiligte Akteure entlang der Produktionskette bestimmbar sind, kann die Lösung ökologischer Probleme durch frühzeitige Anwendung einer **Integrierten Produkt Politik (IPP)** angestrebt werden. Durch einen solchen kooperativen und vergleichsweise „antizipativen“ Ansatz können geeignete Instrumente zur Verbesserung von z.B. ökologischen, informatorischen und technischen Problemen ermittelt werden. Insgesamt entsteht für den **Gesetzgeber** sowie für (technische) Normierungsinstitutionen ein enormer Anpassungsbedarf durch die neue Technologie, die von vielen Gesetzen direkt und indirekt betroffen ist bzw. in diese hineinreicht. Auch hier gilt es, wo nötig eine sys-

tematische Gesamtschau zu betreiben, um ökonomisch effiziente und gleichförmige Änderungen und Neuregelungen zu entwickeln.

Die **ökologische Bewertung** von Brennstoffzellensystemen ist als wichtige politische Entscheidungsgrundlage deutlich bezüglich der verschiedenen Optionen in den einzelnen Anwendungen zu verstärken, wobei verstärkt auch Bewertungen anhand von Nachhaltigkeitskriterien einzubeziehen sind. Diese können durch **Szenarienbildung** unterstützt werden.

Das ökologische Potenzial von Brennstoffzellen wird stark durch den **Brennstoffeinsatz** beeinflusst. Für den Betrieb von Brennstoffzellen wird Wasserstoff benötigt. Dieser kann z.B. durch Elektrolyse erzeugt oder aus verschiedenen Brennstoffen (fossil oder regenerativ) durch Reformierung gewonnen werden. Hierbei wird für die Umwandlung in Wasserstoff jeweils Energie benötigt, die in der Gesamtbilanz des Systems berücksichtigt werden muss. Somit muss die Brennstoff- und **Infrastrukturfrage** bei allen ökologischen, aber auch ökonomischen Bewertungen eine zentrale Rolle spielen, und sollte dabei jeweils nicht losgelöst von wahrscheinlichen Anwendungen aus anderen Einsatzbereichen gesehen werden.

Somit lässt sich zum Schluss festhalten, dass die Frage, ob es sich bei der Brennstoffzelle um ein Nischenprodukt oder um ein Produkt mit revolutionärem Potenzial handelt, derzeit zwar noch nicht beantwortet werden kann. Es sollte jedoch bei der Suche nach einer Antwort berücksichtigt werden, dass diese in hohem Maße von Diffusionsbedingungen abhängen wird, die jenseits der rein technisch-ökonomischen Machbarkeit liegen und insbesondere sozial-ökologische Aspekte berühren. Der gegenwärtige Schwerpunkt der Forschungen zu Brennstoffzellen liegt jedoch noch fast ausschließlich auf der technischen Machbarkeit.

In der vorliegenden Arbeit wurden daher mit Blick auf die nicht-technischen Diffusionsbedingungen Forschungs- bzw. Analyse-Schwerpunkte behandelt, welche die Innovationsanalyse, neue Akteursstrukturen und Unternehmensstrategien, Zielgruppenanalysen und Akzeptanzforschung, politische Instrumente und Steuerung, ökologische und ökonomische Bewertungen, Szenarien, Zukunftsbilder sowie Anforderungen an Bildung in den Vordergrund gestellt haben. Die behandelten Themen und Fragestellungen haben sowohl einen forschungsstrategischen Charakter und sollten bei der Ausgestaltung von Forschungsprogrammen zu Brennstoffzellen berücksichtigt werden, sie richten sich aber auch an die ForscherInnen selbst sowie an politische und unternehmerische Akteure.

Noch ist offen, ob die Brennstoffzelle eine erfolgreiche und noch dazu eine nachhaltige Innovation wird. Sowohl ihre erfolgreiche Diffusion als auch ihre Nachhaltigkeitspotenziale hängen in hohem Maße von sozial-ökologischen Faktoren ab. Gegenwärtig erscheinen die Aussichten auf eine nachhaltige Gestaltung bei der dezentralen stationären Energieversorgung am günstigsten. Damit die Nachhaltigkeitspotenziale der Brennstoffzellentechnologie erschlossen werden können, sind die beschriebenen Diffusionsfaktoren bei der Gestaltung von Politikstrategien zu berücksichtigen.

## 5 Literatur

- Behringer, Thomas (2001): Strom und Wärme aus der Heizung: das Vaillant Brennstoffzellen-Heizgerät. In: Friedrich-Ebert-Stiftung (Hrsg.): Die Brennstoffzelle. Zukünftige Querschnittstechnologie für den Industriestandort Deutschland? Konferenzband zum ersten Berliner Forum Wissenschaft und Innovation am 6.12.2000, Berlin.
- BMU (1999): Alternative Kraftstoffe und Antriebssysteme - Chancen für einen nachhaltigen Verkehr? Rede von Bundesumweltminister Jürgen Trittin anlässlich des G8-Environmental Futures Forums. In: Umwelt, Nr. 3/1999, Berlin.
- Bmvit (Bundesministerium für Verkehr, Technologie und Innovation) (2002): Innovative Prozesse, online, [http://www.energytech.at/kwk/portrait\\_kapitel-2\\_6.html](http://www.energytech.at/kwk/portrait_kapitel-2_6.html), Zugriffsdatum: 3.10.2002
- BUND (2001): Das virtuelle Kraftwerk - dezentrale Hausenergieversorgung. Informationsblatt.
- Bünger, U.; Höhle, B.; Patyk, A. & Pehnt, M. (2000): Energieketten In: Forschungsverbund Sonnenenergie (Hrsg.): Zukunftstechnologie Brennstoffzelle. Berlin 2000, S. 59-64.
- Bünger, Ulrich; Koschorke, Wolfgang & Marscheider-Weidemann, Frank (2002): Einbindung des Handwerks bei der Markteinführung der Brennstoffzelle. Vortragsmanuskript zur Fachveranstaltung „Brennstoffzellen-Heizgeräte zur Stromerzeugung im Haushalt“, Essen, 25./26. Februar 2002.
- Dienhart, Helmut; Nitsch, Joachim; Pehnt, Martin (1998): Ökologische und ökonomische Bewertung von PEFC-BHKW am Beispiel einer Nahwärmeversorgung. Unveröffentlichtes Manuskript, Langfassung des Beitrages für Elektrizitätswirtschaft, Jg. 97 (1998). Heft 24.
- Donnerbauer, Robert (2001a): Brennstoffzellenheizgerät bereit zum Feldtest. In: VDI-Nachrichten, 23.3.01, Nr. 12, S. 20-21, Düsseldorf.
- Donnerbauer, Robert (2001b): Das „Heimkraftwerk“ im Karton verpackt. In: VDI Nachrichten, 6. Juli 2001, Nr. 27, S. 10.
- DWV (Deutscher Wasserstoff-Verband) (Hrsg. 2000): DWV Wasserstoff-Führer. Wasserstoffprojekte in Deutschland. Berlin.
- EnBW (2001): <http://www.enbw.com/news/presse/pres215/text.html>
- Enquête-Kommission (2002): Schlussbericht der Enquête-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ des Deutschen Bundestages, 14. Wahlperiode.
- Erdmann, Georg (2002): Kostenfragen bei der Markteinführung von stationären Brennstoffzellen. In: Technische Universität Berlin (Hrsg., 2002): Brennstoffzelle für die dezentrale Hausenergieversorgung. Technik – Betrieb – Kosten – Arbeitsplätze - Aus- und Weiterbildung. Tagungsunterlagen (Manuskriptform) vom 23. Januar 2002.
- Erdmann, Georg (1999): Zeitfenster beachten. In: Ökologisches Wirtschaften, Nr. 2/99.
- EscoVale, Consultancy Services (2000): Fuel Cells. The Source Book, February 2000, United Kingdom
- EVA [Energieverwertungsagentur & AUSTRIA FERNGAS] (1999): Brennstoffzellen-Systeme – Energietechnik der Zukunft? Entwicklungsstand und Perspektiven der stationären Brennstoffzellen-Technologie. Informationsbroschüre im Rahmen des Projektes „Brennstoffzellen-Information-Initiative“ im Auftrag des Bundesministeriums für Wissenschaft und Verkehr, Wien 1999.

- Flotow, P. von & Steger, U. (Hrsg., 2000): Die Brennstoffzelle – Ende des Verbrennungsmotors? Automobilhersteller und Stakeholder im Dialog. Bern, Stuttgart, Wien.
- Fonk, G. & Hamstra, A. (1996): Toekomstbeelden van Consumenten voor Novel Protein Foods. Illustratieproces voor consumenten van Novel Protein Foods. DTO werkdocument VN 12, Delft.
- Forum 2000 <http://www.forum-brennstoffzelle.de/index.php?main=info&bsID=18&kapID=11>
- Froböse, Rolf (2001): Platz ist in der kleinsten Hütte. In: Süddeutsche Zeitung, Nr. 49, 28.2.2001, S. V2/4.
- Garche, Jürgen & Jörissen, Ludwig (2002): Übersicht und Einführung zur Technik der Brennstoffzelle und erste Betriebserfahrungen. In: Technische Universität Berlin (Hrsg., 2002): Brennstoffzelle für die dezentrale Hausenergieversorgung. Technik – Betrieb – Kosten – Arbeitsplätze - Aus- und Weiterbildung. Tagungsunterlagen (Manuskriptform) vom 23. Januar 2002.
- Gummert, Guido; Ebel, Martin, Tiedge, Henning & Bossel, Ulf (1998): Brennstoffzellen: Stand und Perspektiven einer zeitgemäßen Technik. HGC Hamburg Gas Consult.
- Haas, R.; Biermayr, P.; Baumann, B.; Schriefl, E.; Skopetz, H. (2001): Erneuerbare Energieträger und Energieverbrauchsverhalten. Berichte aus der Energie- und Umweltforschung 16/2001, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.
- HdT [Haus der Technik] (2000): Veranstaltungsunterlagen: Brennstoffzellen-Heizgerät zur Stromerzeugung im Haushalt, Haus der Technik e.V., Essen, 21./22.02.2000.
- Heinzel, Angelika (2001): Brennstoffzellen im kleinen Leistungsbereich – portable Anwendungen und Batterieersatz. In: Ledjeff-Hey, Konstantin / Mahlendorf, Falko / Roes, Jürgen (Hrsg.): Brennstoffzellen. Entwicklung, Technologie, Anwendung; 2. Auflage, Heidelberg.
- Hirschl, Bernd; Hoffmann, Esther; Zapfel, Björn et al. (2002): Markt- und Kostenentwicklung Erneuerbarer Energien. 2 Jahre EEG - Bilanz und Ausblick. Berlin: Erich-Schmidt.
- Hoffmann, Esther & Hirschl, Bernd (2001): Machbarkeitsstudie für neue Umweltzeichen für die Produktgruppe: Kleine Blockheizkraftwerk-Module. UBA-Texte 53/01, Berlin.
- Höhlein, Bernd; Nitsch, Joachim; Carpetis, Constantin (1998): Energie- und Schadstoffbilanzen von Brennstoffzellen-Systemen. In: Forschungsverbund Sonnenenergie: Jahrestagung 1998.
- Hoogma, Remco; Kemp, Rene; Schot, Johan; Truffer, Bernhard (2002): Experimenting for sustainable transport. The approach of Strategic niche management; London, New York.
- Hübner, Kurt & Nill, Jan (2001): Nachhaltigkeit als Innovationsmotor. Herausforderungen für das deutsche Innovationssystem. Fachhochschule für Wirtschaft Berlin, Berlin.
- Hübner, Kurt; Nill, Jan; Rickert, Christian (2001) Greening of the innovation system? Opportunities and obstacles for a path change towards sustainability - the case of Germany. In: International Journal of Sustainable Development, Vol. 4, No. 4, S. 454-473.
- Janzing, Bernward (2001): Brennstoffzellen vor der Marktreife: Die Szenarien werden präziser. In: Neue Energie 8/2001, S. 58f.
- Jenne, Markus & Riggerbach, Susanne (2002): Biogasbetriebene Brennstoffzellen für den kleinen Leistungsbereich – technische Machbarkeit und Zukunftspotenzial. In: Fachverband Biogas (Hrsg., 2002): Biogas- die universelle Energie von morgen. 11. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V., Borken, 29.-31. Januar 2002.

- Jopp, Klaus (2001a): Brennstoffzelle drängt mit Tempo auf den Markt. In: VDI Nachrichten, 6.7.01, Nr. 27, S. 9.
- Jopp, Klaus (2001b): Brennstoffzellen auf dem Sprung in die Anwendung. In: VDI nachrichten, 13.7.2001, S. 20.
- Jörissen, L. & Garcke, J. (2001): Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft der Brennstoffzellen. In: WechselWirkung, November/Dezember 2001, S. 42-51.
- Klinder, Kai (2000): Das Vaillant Brennstoffzellen-Heizgerät. Strom und Wärme aus der Heizung. In: Brennstoffzellen... effiziente Energietechnik der Zukunft, Tagungsband zur Tagung am 20. und 21. Juli 2000 in Friedrichshafen. S. 103-114.
- Klinder, Kai (2001a): Dezentrale Gebäudeversorgung mit Brennstoffzellen-Heizgeräten. Entwicklungsstand und Marktchancen. Vortragsmanuskript Bayern regenerativ, Juni 2001.
- Klinder, Kai (2001b): PEM-Niederdrucktechnik-Brennstoffzellen von Vaillant für den Einsatz im Mehrfamilienhaus. In: ASUE [Arbeitsgemeinschaft für Sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.] (Hrsg.): Brennstoffzellen und Mikro-KWK. Entwicklungen, Akteure, Zukunftsaussichten. ASUE-Fachtagung vom 5./6.12.2001 in Darmstadt; Essen.
- Konrad, Wilfried; Nill, Jan (2001), Innovationen für Nachhaltigkeit. Ein interdisziplinärer Beitrag zur konzeptionellen Klärung aus wirtschafts- und sozialwissenschaftlicher Perspektive, Schriftenreihe des IÖW 157/01
- Koschorke, Wolfgang; Marscheider-Weidemann, Frank & Bünger, Ulrich (2002): Auswirkungen der Innovation Brennstoffzelle auf Handwerksberufe. Anforderungen, Tätigkeiten, Berufsbilder, Ausbildungsordnungen (Erste Analyse-Ansätze). In: Technische Universität Berlin (Hrsg., 2002): Brennstoffzelle für die dezentrale Hausenergieversorgung. Technik – Betrieb – Kosten – Arbeitsplätze - Aus- und Weiterbildung. Tagungsunterlagen (Manuskriptform) vom 23. Januar 2002.
- Ledjeff-Hey, Konstantin / Mahlendorf, Falko / Roes, Jürgen (2001): Brennstoffzellen - ein Überblick. In: Ledjeff-Hey, Konstantin / Mahlendorf, Falko / Roes, Jürgen (Hrsg.): Brennstoffzellen. Entwicklung, Technologie, Anwendung; 2. Auflage, Heidelberg.
- Matthes, Felix & Cames, Martin (2000): Energiewende 2020. Studie im Auftrag der Heinrich-Böll-Stiftung (Hrsg.), Berlin.
- Meyer, Sibylle; Schulze, Eva; Helten, Frank & Fischer, Bernd (2001): Vernetztes Wohnen. Die Informatisierung des Alltagslebens. Berlin, Edition Sigma.
- Mok, Philip / Walliser, Dirk (2000): Brennstoffzellen - saubere Antriebe für Straßenfahrzeuge von morgen. In: Forschungsverbund Sonnenenergie, Themen 1999-2000: Zukunftstechnologie Brennstoffzelle. Dokumentation der FVS-Jahrestagung vom 15-16.9.1999 in Neu-Ulm; Berlin.
- Nill, Jan & Zundel, Stefan (2002): Die Rolle von Vielfalt für Zeitstrategien ökologischer Innovationspolitik. In: Spehl, H. & Held, M. (Hrsg.): Vom Wert der Vielfalt. Diversität in Ökonomie und Ökologie. ZAU Special Issue No. 13/2001, Berlin, S. 148-157.
- Nill, Jan; Einacker, Ingo; Korbun, Thomas; Nordbeck, Ralf & Peine, Alexander (2001): Nachhaltigkeitsstrategien. Sondierung neuerer Ansätze innovativer politischer Langfriststrategien und Ergebnisse einer empirischen Vertiefung im Handlungsfeld Mobilität und Verkehr. Schriftenreihe des IÖW 158/01, Berlin.
- Nill, Jan (2000): Die Brennstoffzelle im Auto - Antrieb eines Umweltinnovationswettbewerbs mit Zukunft? Diskussionspapier des IÖW 48/00, Berlin.
- Oertel, Dagmar & Fleischer, Torsten (2000): TA-Projekt „Brennstoffzellen-Technologie“. Endbericht. TAB-Arbeitsbericht Nr. 67.

- Patyk, A. (2000): Umweltaspekte des Einsatzes von Brennstoffzellen und ihrer Energieträger. In: Brennstoffzellen... effiziente Energietechnik der Zukunft, Tagungsband zur Tagung am 20. und 21. Juli 2000 in Friedrichshafen. S. 41-50.
- Pehnt, Martin (2000): Life Cycle Assessment of Fuel Cells and Relevant Fuel Chains. To be published in: Proc. Hyforum, The Internationale Hydrogen Energy Forum 2000, 11<sup>th</sup>-15<sup>th</sup> September, Munich.
- Pehnt, Martin (2001): Life Cycle Assessment of Fuel Cell Stacks. In: International Journal of Hydrogen Energy, 26 (2001), p. 91-101.
- Pehnt, Martin & Nitsch, Joachim (2000): Einsatzfelder und Marktchancen von Brennstoffzellen in der industriellen und öffentlichen Kraft-Wärme-Kopplung. In: Brennstoffzellen... effiziente Energietechnik der Zukunft. Tagungsband zur Tagung am 20. und 21. Juli in Friedrichshafen. S. 15-28.
- Rubik, Frieder (2002): Integrierte Produktpolitik. Marburg.
- Schirrmeister, Elna; Mannsbart, Wilhelm; Marscheider-Weidemann, Frank (2000): Einflussfaktoren und Szenarien zur Diffusion. In: Wengel, Jürgen / Schirrmeister, Elna: Innovationsprozess vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle - Chancen und Risiken für die baden-württembergische Industrie. Abschlussbericht, Karlsruhe.
- Schlauch, Rezzo / Hustedt, Michael / Schmidt, Albert (2000): Auto-Fahren mit Sonne und Wasser. In: Frankfurter Rundschau, Nr. 129, 5.6.2000, Frankfurt.
- Scholl, Gerd (1995): Product Policy and the Environment: The Example of Batteries. Schriftenreihe des IÖW 87/95, Berlin.
- Spiegelnet 2001a: Über den Berg – VW Brennstoffzellenauto. Internetveröffentlichung unter [www.spiegel.de](http://www.spiegel.de). Zugriffsdatum: 4.2.2002
- Spiegelnet 2001b: In der Warteschleife – Brennstoffzellenantrieb. Internetveröffentlichung unter [www.spiegel.de](http://www.spiegel.de). Zugriffsdatum: 4.2.2002
- Spiegelnet 2001c: Saubere Lieferung - Brennstoffzellentest. Internetveröffentlichung unter [www.spiegel.de](http://www.spiegel.de). Zugriffsdatum: 4.2.2002
- Spiegelnet 2002: Wie fahren wir in Zukunft? – Brennstoff-Delle. Internetveröffentlichung unter [www.spiegel.de](http://www.spiegel.de). Zugriffsdatum: 4.2.2002
- Stromthemen 2003: Minibrennstoffzelle aus Herten soll Weltmarkt erobern. Meldung unter [www.strom-magazin.de](http://www.strom-magazin.de), news 21.1.03
- Tillmetz, Werner, Hornburg, Gerald / Dietrich, Günther (2001): Polymermembran-Brennstoffzellen-Systeme. In: Ledjeff-Hey, Konstantin / Mahlendorf, Falko / Roes, Jürgen (Hrsg.): Brennstoffzellen. Entwicklung, Technologie, Anwendung; 2. Auflage, Heidelberg.
- UBA (Umweltbundesamt) (Hrsg., 1999): Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastungen. UBA-Texte 33/99, Berlin.
- VDEW-Projektgruppe „Brennstoffzellen“ (2000): Brennstoffzellen - eine Option für EVU? In: Elektrizitätswirtschaft, Jg. 99, Heft 24, Frankfurt a.M.
- VDI nachrichten (2000): Toxizität von Methanol bereitet Probleme. Nr. 46, 17.11.2000.
- VDI nachrichten (2000): Das Wasserstoff-Zeitalter des Autos startet mit Serien-Pkw von BMW. Nr. 20, 19.5.2000.
- Weide, Silvia Von der (2001): Ökosteuer kann Brennstoffzellen aus der Nische helfen. In: VDI-Nachrichten, 23.3.01, Nr. 12, S. 24-25.

- Wagner, H.-J. (2001): Auf dem Weg in die Wasserstoffgesellschaft, Tagung „Brennstoffzelle – Technik, Wirtschaft, Umwelt“ der Konrad-Adenauer Stiftung, 10. April 2001, Berlin
- Wengel, Jürgen & Schirrmeister, Elna (2000): Innovationsprozess vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle - Chancen und Risiken für die baden-württembergische Industrie. Abschlussbericht, Karlsruhe.
- Wengel, Jürgen / Schirrmeister, Elna, Marscheider-Weidemann, Frank (2001): Industrielle Kernkompetenzen und Beschäftigung: Brauchen wir die Brennstoffzelle für die Wettbewerbsfähigkeit des Industriestandortes Deutschland? In: Friedrich-Ebert-Stiftung (Hrsg.): Die Brennstoffzelle. Zukünftige Querschnittstechnologie für den Industriestandort Deutschland? Konferenzband zum ersten Berliner Forum Wissenschaft und Innovation am 6.12.2000, Berlin.

# Publikationen des Instituts für ökologische Wirtschaftsforschung

Das IÖW veröffentlicht die Ergebnisse seiner Forschungstätigkeit in einer Schriftenreihe, in Diskussionspapieren sowie in Broschüren und Büchern. Des Weiteren ist das IÖW Mitherausgeber der Fachzeitschrift „Ökologisches Wirtschaften“, die allvierteljährlich im oekom-Verlag erscheint, und veröffentlicht den IÖW-Newsletter, der regelmäßig per Email über Neuigkeiten aus dem Institut informiert.

## Schriftenreihe/Diskussionspapiere



Seit 1985, als das IÖW mit seiner ersten Schriftenreihe „Auswege aus dem industriellen Wachstumsdilemma“ suchte, veröffentlicht das Institut im Eigenverlag seine Forschungstätigkeit in Schriftenreihen. Sie sind direkt beim IÖW zu bestellen und auch online als PDF-Dateien verfügbar. Neben den Schriftenreihen veröffentlicht das IÖW seine Forschungsergebnisse in Diskussionspapieren – 1990 wurde im ersten Papier „Die volkswirtschaftliche Theorie der Firma“ diskutiert. Auch die Diskussionspapiere können direkt über das IÖW bezogen werden. Informationen unter [www.ioew.de/schriftenreihe\\_diskussionspapiere](http://www.ioew.de/schriftenreihe_diskussionspapiere).

## Fachzeitschrift „Ökologisches Wirtschaften“



Ausgabe 2/2010

Das IÖW gibt gemeinsam mit der Vereinigung für ökologische Wirtschaftsforschung (VÖW) das Journal „Ökologisches Wirtschaften“ heraus, das in vier Ausgaben pro Jahr im oekom-Verlag erscheint. Das interdisziplinäre Magazin stellt neue Forschungsansätze in Beziehung zu praktischen Erfahrungen aus Politik und Wirtschaft. Im Spannungsfeld von Ökonomie, Ökologie und Gesellschaft stellt die Zeitschrift neue Ideen für ein zukunftsfähiges, nachhaltiges Wirtschaften vor. Zusätzlich bietet „Ökologisches Wirtschaften online“ als Open Access Portal Zugang zu allen Fachartikeln seit der Gründung der Zeitschrift 1986. In diesem reichen Wissensfundus können Sie über 1.000 Artikeln durchsuchen und herunterladen. Die Ausgaben der letzten zwei Jahre stehen exklusiv für Abonnent/innen zur Verfügung. Abonnement unter: [www.oekom.de](http://www.oekom.de).

## IÖW-Newsletter

Der IÖW-Newsletter informiert rund vier Mal im Jahr über Neuigkeiten aus dem Institut. Stets über Projektergebnisse und Veröffentlichungen informiert sowie die aktuellen Termine im Blick – Abonnement des Newsletters unter [www.ioew.de/service/newsletter](http://www.ioew.de/service/newsletter).

---

Weitere Informationen erhalten Sie unter [www.ioew.de](http://www.ioew.de) oder Sie kontaktieren die

IÖW-Geschäftsstelle Berlin  
Potsdamer Straße 105  
10785 Berlin  
Telefon: +49 30-884 594-0  
Fax: +49 30-882 54 39  
Email: [vertrieb\(at\)ioew.de](mailto:vertrieb(at)ioew.de)



| i | ö | w

INSTITUT FÜR  
ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

GESCHÄFTSTELLE BERLIN

MAIN OFFICE

Potsdamer Straße 105

10785 Berlin

Telefon: + 49 – 30 – 884 594-0

Fax: + 49 – 30 – 882 54 39

BÜRO HEIDELBERG

HEIDELBERG OFFICE

Bergstraße 7

69120 Heidelberg

Telefon: + 49 – 6221 – 649 16-0

Fax: + 49 – 6221 – 270 60

[mailbox@ioew.de](mailto:mailbox@ioew.de)

[www.ioew.de](http://www.ioew.de)