

Jan Nill

Die Brennstoffzelle im Auto – Antrieb eines Umweltinnovationswett- bewerbs mit Zukunft

Diskussionspapier des IÖW 48/00

Institut für
ökologische
Wirtschaftsforschung
gGmbH



Jan Nill

Die Brennstoffzelle im Auto – Antrieb eines Umweltinnovationswettbewerbs mit Zukunft?

Diskussionspapier des IÖW 48/00

Das Papier entstand im Rahmen des Projekts "Ökonomische Globalisierung, Internationale Wettbewerbsfähigkeit und Nationale Innovationssysteme. Ökologische Innovationspolitik als Standortfaktor" unter Leitung von Prof. Dr. Kurt Hübner an der Fachhochschule für Wirtschaft Berlin. Das Projekt wurde durch das BMBF im Rahmen des Programms Anwendungsbezogene Forschung an Fachhochschulen (FKZ 1700998) sowie durch interne Mittel der Fachhochschule für Wirtschaft unterstützt.

Der Abschlussbericht des Gesamtprojekts erscheint 2001 in Buchform bei edition sigma: Hübner, Kurt; Nill, Jan (2001): Nachhaltigkeit als Innovationsmotor. Herausforderungen für das deutsche Innovationssystem. edition sigma, Berlin.

Berlin 2000

Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) gGmbH
(Institute for Ecological Economy Research)

Geschäftsstelle Berlin
Potsdamer Str. 105
D-10785 Berlin

Tel. +49-(0)30-884594-0
Fax +49-(0)30-8825439,
E-mail: mailbox@ioew.de,
<http://www.ioew.de>

Zusammenfassung:

In letzter Zeit rückt die Brennstoffzelle für mobile Anwendungen immer stärker in den Mittelpunkt der Diskussion, wenn es darum geht, wie der Autoverkehr umweltverträglicher gemacht werden könnte. Viele hoffen, dass dieser alternative Antrieb den überkommenen Verbrennungsmotor ablösen und damit die Fahrzeugemissionen deutlich reduzieren könnte. Sogar der Traum vom Nullemissionsauto scheint in greifbare Nähe gerückt - und das ohne nennenswerte Einschränkung von Fahrleistung und Komfort. Doch ein genauer Blick lohnt sich. Sowohl die ökologischen als auch die ökonomischen Potenziale dieser technologisch radikalen Innovation sind entscheidend von weiteren Weichenstellungen abhängig.

Vor diesem Hintergrund diskutiert das Papier nach einer Skizze der ökologischen Relevanz die technischen und ökonomischen sowie die politischen und institutionellen Bedingungen der Markteinführung und die potenziellen Wettbewerbswirkungen. Den Abschluss bilden vorläufige politische Schlussfolgerungen.

Der Autor:

Jan Nill ist Diplom-Volkswirt. Studium der Volkswirtschaftslehre an der Universität Trier, in Montpellier, Frankreich und an der Freien Universität Berlin. 1999 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fachhochschule für Wirtschaft Berlin; seit 1999 wissenschaftlicher Mitarbeiter im IÖW, Forschungsfeld „Umweltökonomie und -politik“. Schwerpunkte: Umwelt und Innovation, Ökologischer Strukturwandel, Europäische Integration und Umwelt.

Kontakt: IÖW, Tel. +49-(0)30-884594-28, E-mail: Jan.Nill@ioew.de

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	1
1.1. <i>Umweltinnovationen und Automobilindustrie</i>	1
1.2. <i>Methodik und Vorgehensweise</i>	3
2. Umweltentlastungspotenziale des Brennstoffzellenautos	3
3. Technische und ökonomische Bedingungen der Markteinführung	4
3.1. <i>Technische Herausforderungen</i>	4
3.2. <i>Ökonomische Hemmnisse und Markteinführungsstrategien</i>	5
3.3. <i>Bedeutung unterschiedlicher Firmenstrategien</i>	7
4. Politische und institutionelle Bedingungen der Markteinführung	9
4.1. <i>Die indirekte Rolle der Umweltpolitik</i>	9
4.2. <i>Der Beitrag von Forschungs- und Energiepolitik</i>	10
4.3. <i>Kooperation zwischen politischen und wirtschaftlichen Akteuren</i>	11
5. Wettbewerbswirkungen des Brennstoffzellenantriebs	12
6. Fazit: Die Brennstoffzelle - Antrieb eines Umweltinnovationswettbewerbs mit Zukunft?	14
6.1. <i>Möglichkeiten und Grenzen für eine pfadverändernde Innovation</i>	14
6.2. <i>Vorläufige Schlussfolgerungen zur Rolle der Politik</i>	15
7. Literatur	18

3. Einführung

3.1. Umweltinnovationen und Automobilindustrie

Die Automobilindustrie ist sowohl ökonomisch als auch ökologisch ein bedeutender Sektor der deutschen Wirtschaft. Es handelt sich um weltmarktorientierte Industrie mit einer weit überdurchschnittlichen Exportquote. Innovation spielt auf dem Markt eine wichtige Rolle und zumindest einige Segmente des Weltmarkts sind durch eine starke Bedeutung des Technologie- bzw. Qualitätswettbewerbs geprägt. Die FuE-Intensität der Branche ist in den letzten 25 Jahren von 3 auf etwa 6 % gestiegen, wobei es sich überwiegend um private FuE handelt. Die Automobilindustrie entwickelt sich dabei entlang eines gefestigten technologisch-institutionellen Pfades. Zumindest für die amerikanische Autoindustrie wurde bereits vor längerer Zeit gezeigt, dass hieraus ein Dilemma erwachsen kann: Inkrementelle produktivitätssteigernde Innovationen werden zwar begünstigt, es besteht jedoch die Gefahr, dass weit reichendere Innovationen dadurch blockiert werden (Abernathy 1978).

Gleichzeitig nimmt die Umweltrelevanz der Branche beständig zu. Der Verkehr ist einer der Haupttriebkraft für den Verbrauch fossiler Brennstoffe und die Kohlendioxidemissionen. Die Umweltpolitik wurde dabei erst in den 80-er Jahren eine - dann aber sehr bedeutende - Einflussvariable. Vorher waren von der sogenannten Ölkrise (1973/74) und einer in der Folge veränderten Energiepolitik erste Impulse ausgegangen; zeitweise wurde daher recht intensiv an Alternativen geforscht. Aber sowohl diese als auch die zwanzig Jahre währende Umweltdiskussion konnten die Fortführung des über 100 Jahre bestehenden, auf dem technologischen Paradigma des internen Verbrennungsmotors basierenden Entwicklungspfades nicht dauerhaft in Frage stellen, zumal dieser Pfad durch gesellschaftliche Leitbilder, die im öffentlichen und privaten Bewusstsein stark verankert sind, und durch eine entsprechende staatliche Infrastrukturpolitik gefestigt wird (Canzler 1997). Der bestehende Entwicklungspfad wird jedoch immer problematischer, auch wenn sich die Branche mit steigenden umweltorientierte FuE-Ausgaben um Abhilfe bemüht und vielfältige inkrementelle Verbesserungen erreicht wurden. Während die klassischen Luftschadstoffemissionen wie Kohlenmonoxid oder Schwefeldioxid beträchtlich gesunken sind, steigen die Kohlendioxidemissionen des Verkehrs stetig an. Auch die Steigerung der Ressourcenproduktivität beim Treibstoffverbrauch geht eher schleppend voran; der Abwärtstrend ist hier ziemlich langsam und wurde in den 80-ern durch die Einführung des Katalysators zeitweise unterbrochen. Seit 1990 ist der Normverbrauch neuer Automobile um knapp 13 Prozent gesunken (VDA 1999, S. 127)¹. Damit ist die aus Klimaschutzgründen 1990 eingegangene und 1995 modifizierte erneute Selbstverpflichtung, den durchschnittlichen Neuwagenverbrauch bis 2005 um 25% zu senken, erst knapp zur Hälfte erfüllt.

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass es Veränderungen des Entwicklungspfades und entsprechende pfadverändernde Innovationen bedarf, um die ökologischen Herausforderungen, insbesondere im Bereich Klimaschutz, zu bewältigen. Hier sind prinzipiell verschiedene Innovationsrichtungen von Relevanz²:

¹ Der reale durchschnittliche Kraftstoffverbrauch ist in den letzten 20 Jahren nur um knapp 20 Prozent gesunken; er lag 1996 mit 8,8 l / 100km sogar noch höher als 1960 mit 8,7 Litern (Petersen/ Diaz-Bone 1998, S. 104).

² Eine Innovationsrichtung, die weniger den Klimaschutz als Ressourcenverbrauch und Abfallproblematik berührt, ist das kreislauffähige Auto, d.h. eine konsequente Wiederverwendung und -verwertung gebrauchter Teile und Kompo-

- Strategien zur stärkeren Verbrauchsreduzierung, Stichwort ist hier das Dreiliterauto. Um hier zu einer wirklichen Veränderung des Entwicklungspfades zu gelangen, sind neben technischen Innovationen bei Antrieb und Bauweise auch soziale Innovationen (veränderte Leistungsanforderungen der NutzerInnen) und entsprechende institutionelle Regelungen (Stichwort: Geschwindigkeitsbegrenzung) notwendig (Petersen/ Diaz-Bone 1998)
- Veränderungen im Verkehrssystem und entsprechende soziale und institutionelle Innovationen, d.h. eine veränderte Arbeitsteilung zwischen motorisiertem Individualverkehr und alternativen Verkehrsträgern, Strategien zur Verkehrsvermeidung sowie eine veränderte Nutzung der Fahrzeuge (Stichwort: Car Sharing).
- Alternative Antriebe, die nicht auf dem umweltbelastenden Verbrennungsmotor beruhen, versprechen die Möglichkeit eines zumindest (lokal) abgasfreien Autos. Eine solche ökologisch vorteilhafte Lösung stellt technisch-ökonomisch gesehen eine radikale Innovation dar und hat erhebliche Implikationen auch hinsichtlich Produktion und Treibstoffversorgung. Dabei sind prinzipiell mehrere technische Lösungen bzw. Motor/ Treibstoffkombinationen vorstellbar.

In den letzten Jahren hat insbesondere die Debatte über alternative Antriebe als pfadverändernde Innovation wieder verstärkt eingesetzt. Ein starker Antrieb ist hier die 1990 von Kalifornien postulierte Forderung in absehbarer Zeit zu erreichenden Null-Emissions-Fahrzeug. Und insbesondere ein technisches nach einem Konzept scheint sich im Innovationswettbewerb zwischen den potenziellen Alternativen immer stärker durchzusetzen und langsam zur machbaren Option heran zu reifen: die Brennstoffzelle als Automobylantrieb. Bei der Brennstoffzelle wird aus Wasserstoff und Sauerstoff mittels chemischer Energie Strom und Wasserdampf erzeugt.

Die Durchsetzung pfadverändernder Innovationen ist mit erheblichen Schwierigkeiten behaftet, wie ein kurzer historischer Rückblick gerade auf das Beispiel alternativer Antriebe zeigt. Bereits 1970 wurden in den USA Alternativen zum Verbrennungsmotor intensiv diskutiert; mittels eines ambitionierten Forschungsprogramms sollte innerhalb von fünf Jahren ein praktisch emissionsfreies Auto mit unkonventionellem Motor produziert werden (Moore/ Miller 1994, S. 127). Infolge der ersten Ölkrise 1973 wurden auch in Deutschland in der Forschungspolitik, aber auch in der industriellen FuE zeitweise die Weichen auf neue Fahrzeug- und Antriebskonzepte gestellt. Allerdings waren diese Impulse von begrenzter Dauer, die temporäre Krise des Automobils führte nicht zu einer nachhaltigen Destabilisierung des Entwicklungspfades. Vielmehr überwog bei allen Akteuren die Auffassung, dass die Umweltprobleme mittels inkrementeller Produktverbesserungen und additiven Filtertechniken zu lösen seien. Alternative Antriebe blieben trotz einiger Modellversuche bisher chancenlos. Beispielsweise hat sich die lange favorisierte Lösung Elektromotor u.a. angesichts der damit verbundenen Mobilitätseinschränkungen sowie weiter bestehender Probleme bei der Batteriespeicherung bisher nicht durchsetzen können.

Der Fall des alternativen Antriebs Brennstoffzelle dient im Folgenden als Beispiel, um Möglichkeiten, Bestimmungsfaktoren und Grenzen eines Pfadwechsels durch technische Innovationen etwas detaillierter zu diskutieren. Hierbei handelt es sich allerdings um einen (potenziellen) Pfadwechsel, der innerhalb des Systems Individualverkehr stattfindet, insofern ist die Reichweite eingeschränkt. Weiter ist zu berücksichtigen, dass ökologisch vorteilhafte Veränderungen

des Entwicklungspfad sich in der Regel unter den Bedingungen internationalen Wettbewerbs durchsetzen müssen. Für die Durchsetzung spielen daher neben der Kundenakzeptanz und den politischen Rahmenbedingungen auch die Wettbewerbswirkungen eine entscheidende Rolle. Daher ist es erforderlich, die Wettbewerbswirkungen und insbesondere die Potenziale für Wettbewerbsvorteile (First-Mover-Strategie) genauer zu analysieren.

3.2. Methodik und Vorgehensweise

Die Brennstoffzelle als möglicher alternativer Antrieb ist bisher noch nicht auf dem Markt verfügbar, sondern befindet sich noch in der Inventionsphase des Innovationsprozesses. Bei der Fallstudie handelt es sich bezüglich Markteinführung und Diffusion der Innovation daher um eine ex-ante-Studie; d.h. es geht vornehmlich um Bedingungen und Möglichkeiten, wie sie für die Zukunft gesehen werden; harte Daten gibt es erst wenige.

Dementsprechend vorläufig und explorativ sind natürlich die Ergebnisse. Sie beruhen auf einer Auswertung von Primär- und Sekundärliteratur sowie auf leitfadengestützten Interviews mit wichtigen Akteuren des Innovationsprozesses, z.B. Vertretern von DaimlerChrysler, BMW und Volkswagen sowie des Verbandes der deutschen Automobilindustrie.

Weiter ist zu berücksichtigen, dass das vorliegende Diskussionspapier auf einer Fallstudie beruht, die im Rahmen eines breiter angelegten Forschungsprojektes an der Fachhochschule für Wirtschaft durchgeführt wurde (vgl. hierzu Hübner/ Nill/ Rickert 2000, Nill/ Hübner/ Rickert 2000), und für die nur ein begrenztes Zeitbudget zur Verfügung stand.

Der Rest des Papiers gliedert sich wie folgt: Nachdem zunächst kurz auf das ökologische Entlastungspotenzial eingegangen wird (Abschnitt 2), werden dann die technischen und ökonomischen Bedingungen der Markteinführung und die Rolle verschiedener Herstellerstrategien dabei diskutiert (Abschnitt 3). Danach geht es um die politisch-institutionellen Rahmenbedingungen (Abschnitt 4) sowie die potenziellen Wettbewerbswirkungen (Abschnitt 5). Schlussfolgerungen hinsichtlich den Möglichkeiten und Grenzen eines Pfadwechsels sowie der möglichen Rolle der Politik im sich anbahnenden Umweltinnovationswettbewerbs beschließen das Papier (Abschnitt 6).

4. Umweltentlastungspotenziale des Brennstoffzellenautos

Technisch-ökonomisch und ökologisch bedeutsame Pfadwechsel sind nicht notwendigerweise identisch. Der Brennstoffzellenantrieb ist hier ein gutes Beispiel. Insbesondere zeigt sich, dass die Gewichtung der Umweltprobleme für die Einschätzung eine wichtige Rolle spielt. Außerdem ist der Vergleichsmaßstab von erheblicher Bedeutung.

Auf den ersten Blick sprechen die Daten für sich: Voraussichtlich 50 bis 100 Prozent weniger Kohlendioxid, 99-100 Prozent weniger Kohlenmonoxid, und 93-100 Prozent weniger Schwefeldioxid würde ein Brennstoffzellenauto der Kompaktklasse im Vergleich mit einem herkömmlichen Auto, das die EURO II-Abgasnormen erfüllt, emittieren (Kolke 1999, S. 90). Außerdem ist der technische Wirkungsgrad des Brennstoffzellenantriebs insbesondere im Teillastbetrieb erheblich höher und er ist im Bereich geringerer Geschwindigkeiten bedeutend leiser. Und die Werte für die klassischen Luftschadstoffe sind von einem Otto-Motor auch mit noch so gutem Katalysator nicht zu erreichen. Allerdings hat sich die umweltpolitische Aufmerksamkeit in jüngerer Zeit zunehmend auf den Kohlendioxidausstoß und den Energieverbrauch verlagert. Und hier relativieren sich die Entlastungspotenziale in zweifacher Hinsicht erheblich.

Zum einen sinkt der deutlich höhere Wirkungsgrad gegenüber dem Benziner, wenn man die gesamte Kette inkl. der Treibstoffherstellung mit einbezieht. Letztere ist zumindest mittelfristig mit erheblichen Energieverlusten verbunden, egal ob Wasserstoff oder Methanol Verwendung findet (Kolke 1999). Und bisher ist noch keine Herstellung dieser Treibstoffe aus erneuerbaren Energien in Sicht, sodass auch die Klimaschutzvorteile relativiert werden. Bis dahin bestehen sie im Wesentlichen daraus, dass Öl als Energieträger für den Treibstoff durch das weniger kohlendioxidreiche Erdgas abgelöst wird. Das Ausmaß der möglichen Entlastungen hängt dabei von der gewählten Treibstoffoption und dessen Herstellung ab. In einer amerikanischen Vergleichsstudie der CO₂-Emissionen der verschiedenen Optionen wird deutlich, dass bei einer Gewinnung des Wasserstoffs aus fossilen Quellen die Reformierung von Methanol und Benzin nur relativ bescheidene Vorteile im Vergleich zum Verbrennungsmotor bringt, und eine Gewinnung des Wasserstoffs mittels Elektrolyse praktisch keine; nennenswerte Vorteile von fast 70 % erreicht nur die industrielle Herstellung aus Erdgas (DZF/PI 2000). Legt man den deutschen Strommix zugrunde, führt die Gewinnung des Wasserstoffs mittels Elektrolyse sogar zu erheblich höheren Kohlendioxidemissionen.

Zum anderen handelt es sich bisher um Potenzialwerte, da Brennstoffzellenfahrzeuge frühestens 2004 auf den Markt kommen. Mittelfristig kann die Brennstoffzelle also wenig zu einer Senkung der Kohlendioxidemissionen beitragen. Zum Zeitpunkt des Markteintritts werden außerdem auch die Autos mit konventionellen Motoren deutliche Fortschritte beim Treibstoffverbrauch und damit Kohlendioxidausstoß gemacht haben. Ob die Brennstoffzelle im Vergleich dazu noch deutliche Fortschritte bringt, ist zumindest hinsichtlich des Kohlendioxidausstoßes umstritten. Das Umweltbundesamt argumentiert, dass selbst wenn dies der Fall sein sollte, diese Variante des Klimaschutzes zu teuer ist und dieser effizienter durch konsequente Verbrauchseinsparungen erreicht werden könne (Kolke 1999). Die Einschätzung beruht auf dem Vergleich von Brennstoffzellenfahrzeugen der Kompaktklasse mit einem Dreiliterauto wie dem von Greenpeace vorgestellten Smile³. Die Brennstoffzelle soll nach Ansicht des UBA eher im stationären Bereich zum Einsatz kommen, um fossile Energieträger zu ersetzen.

Schließlich muss natürlich – wie bei anderen Strategien auch – die erreichbare spezifische Umweltentlastung noch in Bezug gesetzt werden zu den Veränderungen der Gesamtfahrleistung.

5. Technische und ökonomische Bedingungen der Markteinführung

5.1. Technische Herausforderungen

Die Basisinvention Brennstoffzelle (BZ) als Form der chemischen Gewinnung von Strom aus Wasserstoff ist schon sehr alt. Verwendung fand sie zunächst in der Raumfahrt. Dennoch schien ein mobiler Einsatz lange Zeit aufgrund der Größe der BZ sowie von Speicherproblemen von Wasserstoff außer Reichweite, obwohl entsprechende Versuche Anfang der 70er Jahre in Amerika stattfanden. Dies hat sich inzwischen geändert. Wesentliche technische Probleme,

³ Für großvolumigere Modelle wurde allerdings keine genauere Berechnung durchgeführt; hingewiesen wird neben dem allgemein höheren Verbrauch solcher Modelle auf das dann deutliche Mehrgewicht von BZ-Fahrzeugen (Kolke 1999, S.68f).

zumindest was den Antrieb als solchen betrifft, sind inzwischen gelöst und die sogenannte PEFC-Brennstoffzelle (Polymer Electrolyte Fuel Cell) ist inzwischen prinzipiell im Auto einsatzfähig. Ballard als Pionier, der bereits in den 80 Jahren einen Brennstoffzellenbus entwickelte, und Daimler als der Hersteller, der in Kooperation mit Ballard die BZ PKW-fähig machte, sind hier zu nennen. Dabei gelang es u.a., das Volumen der Brennstoffzelle innerhalb von wenigen Jahren von Kleinbus- auf Kofferraumgrenze zu reduzieren. Während die Umwandlungstechnik an sich als im Grundsatz fertig angesehen wird; gilt dies allerdings noch nicht für weitere Bestandteile des Systems; schließlich führt ein alternativer Antrieb zu einer ganzen Reihe von Veränderungen auch bei weiteren Komponenten (Demuß 1999). Das Hauptproblem ist die Bereitstellung des Ausgangsstoffes der Reaktion, also von Wasserstoff. Hier gibt es im Grundsatz zwei Optionen:

1. das Mitführen von Wasserstoff in gespeicherter Form, sei es gasförmig in relativ großvolumigen Druckbehältern oder in flüssiger Form in Kryospeichern, wobei allerdings eine Temperatur von unter -252 Grad gewährleistet sein muss, oder
2. das Erzeugen von Wasserstoff an Bord aus einem Trägerstoff mittels eines sogenannten Reformers. Als Ausgangsstoff ist hier insbesondere Methanol im Gespräch; es gibt aber insbesondere in den USA auch Experimente mit Benzin.

Wenn der Wasserstoff aus Erdgas gewonnen wird, weist die erste Lösung deutliche Effizienz- und Klimaschutzvorteile auf, da kein zusätzlicher – und entsprechend teurer - Reformer notwendig ist und lokal dann tatsächlich keinerlei Emissionen entstehen. Sie ist daher das Langfristziel für alle BZ-Fahrzeuge. Sie ist jedoch technisch aufwändiger und aufgrund der hohen Investitionskosten bei der Treibstoffinfrastruktur sowie Speicherproblemen des Wasserstoffs bis 2005 noch nicht realisierbar (Shell 1999, S. 23). Dies kollidiert jedoch mit dem Markteinführungsdatum, das derzeit in den Planungen angestrebt wird, nämlich 2004. Diese Marke hat Kalifornien als Anforderung für Null- bzw. Geringstemissionsautos gesetzt (siehe Abschnitt 4). Daher konzentriert sich derzeit die Entwicklung zumindest für eine Einführungsphase auf die zweite Lösung. Die Technik ist hier zwar auch noch nicht ausgereift; die Entwicklungen laufen aber auf Hochtouren und Daimler hat mit dem NECAR 3 bzw. NECAR 4 bereits einen funktionsfähigen Prototyp präsentiert.

5.2. Ökonomische Hemmnisse und Markteinführungsstrategien

Auch wenn die technischen Lösungen in Sicht sind, und sich somit die Inventionsphase ihrem Ende zuneigt und die Brennstoffzelle auf dem Weg von der experimentellen zur kommerziellen Technologie ist, ist es zur ökonomischen Marktfähigkeit noch ein wesentlich weiterer Weg. Derzeit gibt es im wesentlichen zwei ökonomische Hemmnisse für die Alternativlösung Brennstoffzellenantrieb:

- Der Antrieb selbst ist bezogen auf die selbe Leistung noch mehr als zehn Mal so teuer wie herkömmliche Antriebe (Petersen/ Diaz-Bone 1998, S. 261). Seine Kosten betragen derzeit etwa 1000 US \$ pro Kilowatt; während für die Konkurrenzfähigkeit mindestens 50-100 \$/kw erreicht werden müssen (o.V. 1999, S.63).
- Komplementär ist bei Wasserstoff oder Methanol als Energieträger der Aufbau einer entsprechenden Treibstoffversorgungsinfrastruktur notwendig, der erhebliche Umstellungskosten, aber auch Entwicklungskosten mit sich bringt. Diese werden allein für Deutschland aufsummiert bis 2010 auf 2,4 bzw. 2,7 Milliarden DM geschätzt (Erdmann/ Grahl 2000).

Hierbei handelt es sich um übliche Einführungsprobleme grundlegend neuer Technologien im Technologiewettbewerb. Eine notwendige Bedingung ist es, die Systemkosten deutlich zu verringern. Hier werden auch erhebliche Potenziale gesehen, einerseits durch Skaleneffekte bei Massenproduktion, andererseits durch das Durchschreiten der Lernkurve bei der konkreten Anwendung. Insbesondere für letzteres sind Pilot- bzw. Nischenmärkte von entscheidender Bedeutung, in denen die Technologie am Markt getestet und mit den Nutzeransprüchen in Einklang gebracht werden kann. Allerdings gehen die derzeitigen Untersuchungen nicht davon aus, dass die Brennstoffzellenlösung die konventionelle Lösung allein auf preisliche Faktoren bezogen überflügelt. Beispielsweise rechnen Gossen/ Grahl (1999, S. 1269) in ihrem Szenario damit, dass auch im Jahr 2010 ein Brennstoffzellenfahrzeug der Kompaktklasse in der Anschaffung noch ca. 2500 bis 3000 US \$ teurer ist als ein Benziner.

Für das notwendige Ausmaß der Kostenreduzierung spielen daher auch die politischen Rahmenbedingungen, insbesondere hinsichtlich der Steuerbelastung der Treibstoffe, eine wichtige Rolle⁴. Für die Umstellungskosten spielt neben der Wahl der Treibstofflösung insbesondere auch die Kooperation der Akteure im Innovationssystem eine entscheidende Rolle.

Beim Brennstoffzellenantrieb bietet sich für die Markteinführung zum einen der örtlich gebundene Flottenverkehr an, da sich hier das Treibstoffinfrastrukturproblem verhältnismäßig einfach lösen lässt. Eine zentrale Rolle spielen hier Busse; sowohl DaimlerChrysler als auch Ballard arbeiten daran, entsprechende Fahrzeuge möglichst bald auf den Markt zu bringen, ersterer plant hier die Markteinführung bereits 2002 (Noreikat 2000). Zugleich kann in diesem Marktsegment auch die direkte Wasserstofflösung mittels entsprechender großvolumiger Speicher auf dem Dach der Fahrzeuge bereits gepробt werden.

Zum anderen stellt sich die Frage nach dem geeigneten PKW-Marktsegment für eine Markteinführung. Wichtig ist hier einerseits, dass die Kunden nicht nur auf den Preis schauen, sondern bereit sind, gewisse Mehrkosten für eine neue Technik in Kauf zu nehmen (geringere Preiselastizität der Nachfrage). Dies spricht für die gehobene Klasse, zumal hier auch Leistungen gefordert werden, bei denen die Brennstoffzelle einen echten Zusatznutzen erbringt, nämlich mit Strom zu betreibende Aggregate wie Klimaanlage oder Standheizung (Wengel/ Schirrmeyer 1999). Gossen/ Grahl (1999: 1274) schlussfolgern aus ihrem Szenario, dass sich als Markteintrittspunkt ein Fahrzeug der Oberklasse > 100 kw anbietet, wobei die direkte Wasserstofflösung ökonomische Vorteile bietet, sofern die entsprechende Infrastruktur vorhanden ist.

Andererseits wird verschiedentlich eingewandt, dass es auch eine Obergrenze bei der Leistung gibt, die wiederum eher für kleinere Fahrzeuge spricht. Denn mit zusätzlichen Leistungsanforderungen steigt das Gewicht und Volumen der Brennstoffzelle überproportional an; für Leistungen wie sie derzeit im sportlichen Bereich bzw. im höherklassigen Segment üblich sind; ist sie daher keine geeignete Lösung. DaimlerChryslers Prototyp des Brennstoffzellenfahrzeugs, in dem die Technologie anwendungsreif gemacht werden soll, basiert mit der A-Klasse eher auf einem kleineren Fahrzeug der Kompaktklasse, wo entsprechend geringere Leistungsanforderungen bestehen; der Prototyp NECAR hat derzeit eine Leistung von 70 kw und wiegt noch 1,75 Tonnen (Noreikat 2000).

Insgesamt zeigt sich, dass das Markteinführungsproblem nicht nur eine technisch-ökonomische Frage ist. Insbesondere der Zeitpunkt der Markteinführung sowie die Geschwindigkeit der

⁴ Für eine entsprechende quantitative Sensitivitätsanalyse vgl. z.B. Gossen/ Grahl (1999, S. 1272f).

Marktdurchdringung hängt auch von institutionellen und politischen Faktoren ab. Dies machen auch die derzeit vorhandenen Szenarien deutlich. Diese unterscheiden sich erheblich, je nachdem ob ein "Durchbruch" bzw. eine koordinierte und staatlich unterstützte Markteinführung stattfindet, oder ob sich die Brennstoffzelle unter unveränderten Rahmenbedingungen in der Konkurrenz behaupten muss (Shell 1999, Mannsbart et al. 1999)⁵. Nach Ansicht von VW gäbe es die BZ nicht ohne die kalifornischen Regelungen; die Verbreitung in Europa hängt ebenfalls von veränderten Gesetzen ab. Weiter spielen hierfür Herstellerstrategien und Kundenakzeptanz eine wichtige Rolle. Letztere hängt nicht nur von preislichen Faktoren, sondern auch von (fehlenden) Informationen, Routinen und Einstellungen ab. Dies verdeutlicht auch eine gerade veröffentlichte italienische Studie der Hindernisse der Durchsetzung von Erdgas als Treibstoff, obwohl die technischen und infrastrukturellen Probleme hier geringer ausfallen (Di Pascoli/ Femia/ Luzzati 2000).

5.3. Bedeutung unterschiedlicher Firmenstrategien

Gerade bei einer Umweltinnovation, die sich als "competing technology" durchsetzen muss und (überwiegend) nicht durch eine gesetzliche Zwangsdiffusion einer Lösung wie beim Kat unterstützt wird, ist die Bedeutung der Firmenstrategien sowohl für die Adaption als auch die Diffusion sehr hoch. Die Interviews haben gezeigt, dass sich die Firmenstrategien und Positionen zur Brennstoffzelle deutlich unterscheiden. Ein Erklärungsfaktor ist die unterschiedliche Betroffenheit, je nachdem ob es sich vorwiegend um Massen- oder Oberklassenhersteller handelt. Aber dies erklärt längst nicht alle Divergenzen. Zugleich hat sich die Bedeutung, die der Brennstoffzelle von Firmenseite beigemessen wird, in den letzten Jahren deutlich erhöht, für einige Hersteller ist die BZ heute, oft auf Kosten der Weiterentwicklung von Elektrofahrzeugen, zum strategischen Projekt geworden (Mannsbart et al. 1999).

Der Hauptanstoß für die mobile Anwendung von Brennstoffzellen kam dabei durch ein Unternehmen aus Nordamerika, nämlich den kanadischen Brennstoffzellenhersteller Ballard. Dieser entwickelte die technologische Basislösung. Nicht untypisch für radikale Innovationen handelt es sich dabei um ein kleines Unternehmen, einen "Outsider". Damit eine solche Innovation Marktwirkung erzielen kann, muss sie jedoch von einem wichtigen Marktakteur übernommen und vorangetrieben werden, sie braucht einen "champion" (Kemp 2000).

Die deutschen Hersteller waren allerdings überwiegend noch stark dem traditionellen Pfad verhaftet - mit einer Ausnahme: Als zentraler Adoptionsagent und Bereitsteller einer technologischen Nische hat bisher ein deutscher Hersteller, nämlich Daimler-Benz (heute DaimlerChrysler) fungiert, der, gestützt auf eine umweltpolitisch aufgeklärte strategische Orientierung und die nötigen Ressourcen, bisher das meiste Geld auf die Entwicklung verwandt hat, genannt werden etwa 750 Millionen DM. Weitere 2 Milliarden DM sollen in den nächsten vier Jahren folgen (Lazaroff 2000). Ohne dessen 1990 begonnene Aktivitäten wäre derzeit nicht an eine Markteinführung zu denken. Allerdings kostet der Prototyp NECAR III, eine Eigenentwicklung von Daimler-Benz, die zum ersten Mal mit einem Reformer betrieben wird, noch über eine halbe Million DM. In der angelaufenen Markteinführungsstrategie sollen Raumbedarf, Gewicht und Preis weiter drastisch gesenkt werden. Das erste Vorserienfahrzeug NECAR V auf Basis der A-Klasse wird demnächst vorgestellt, wobei die Entwicklung sich derzeit auf den Methanolfad konzentriert.

⁵ Im Shell-Szenario sind in erstem Fall 2010 700.000 Fahrzeuge mit BZ-Antrieb, im zweiten Fall nur 200.000 auf dem deutschen Markt; die entsprechenden Zahlen für 2020 sind 10,2 Mio. vs. 3,3 Mio. (Shell 1999, S. 4).

Als Kooperationspartner der FuE, in die insgesamt fast eine Milliarde US Dollar investiert werden sollen, sind Ballard, die die zentralen Elemente der Brennstoffzelle, in denen die chemische Reaktion stattfindet (die sogenannten "stacks"), liefern, und - mit einer 400 Millionen US Dollar-Mitgift - Ford, das Vorarbeiten zu den komplementären Technologien des gesamten Antriebsstrang geleistet hat, seit Ende 1997 mit im Boot, um 2004 ein komplettes System anzubieten (Daimler-Benz 1997). Vorher soll es in einem großen Demonstrationsprojekt in Kalifornien erprobt werden.

Der Diffusionserfolg hängt jedoch wegen der notwendigen komplementären Investitionen in die Treibstoffinfrastruktur und sich hieraus ergebenden Kooperationsnotwendigkeiten zentral an den Strategien der anderen Hersteller, die im letzten Jahr ihre Strategie in Richtung pro Brennstoffzelle verändert haben, und den Treibstofflieferanten wie RWE, Shell und Aral. Für diese würde ein Wechsel der Trajektorie erhebliche Investitionen implizieren.

VW als bedeutender Akteur verfolgt dabei eine Mischstrategie, d.h. setzt im unteren Segment weiter auf konventionelle Motoren, gleichzeitig verfolgt es die Brennstoffzellenentwicklung mit wachsender Bedeutung im eigenen Forschungszentrum in Wolfsburg. Dabei verfolgt das Unternehmen, ähnlich wie übrigens auch Toyota, auch Hybridkonzepte, z.B. mit Brennstoffzelle und Batterie, weiter (Hild 1998, S. 225). Von der Einordnung hat laut VW-Vertretern die Entwicklung sparsamerer konventioneller Fahrzeuge Priorität; die Brennstoffzelle stellt aufgrund ihrer Kosten eine Nischenstrategie für die Luxus- und Oberklasse dar. Bei den Treibstoffen wehrt sich VW angesichts der Tragweite der Entscheidung gegen eine zu schnelle und nur deutschlandbezogene Festlegung, wiewohl der Konzern derzeit auf Methanolbasis plant.

Opel ist erst relativ spät dazu gekommen, der Mutterkonzern General Motors war generell eher zögerlich und hatte eher auf Elektrofahrzeuge gesetzt (Moore/ Miller 1994, S. 128f). Inzwischen setzt aber auch Opel/GM auf die BZ-Lösung für 2004 und entwickelt diese im Globalen Zentrum für alternative Antriebe, wobei ein Forschungsstandort von dreien in Mainz angesiedelt ist (Opel 1999, S. 97). Opel setzt dabei wie DaimlerChrysler zur Einführung zunächst auf den Methanolfpfad; die verstärkte Förderung in dieser Richtung geht auf Kosten der Weiterentwicklung von Elektroautos (Opel 1998, S. 86, 88). Inzwischen wurde der Opel Zafira als BZ-Fahrzeug vorgestellt; für die Zukunft wird eine strategische Allianz mit Toyota und Mineralölherstellern angestrebt. Als beste Langfristlösung für den Treibstoff wird aber gespeicherter Wasserstoff angesehen (o.V. 2000c).

Die bisher genannten Konzerne kooperieren auch in breiter angelegten Forschungsprojekten - und sitzen übrigens auch im Rahmen der California Fuel Partnership an einem Tisch (s.u.).

BMW agiert schließlich als wichtigster Gegenakteur der schnellen Einführung der Brennstoffzelle; der Konzern baut seine Alternativstrategie auf Wasserstoff auf, die bis 2010 marktreif werden soll. Zwischen 1986 und 1999 hat BMW mit Partnern dafür 150 Millionen DM investiert, hinzu kamen öffentliche Mittel in Höhe von über 70 Millionen DM. Die Strategie, die am Flughafen München erprobt wird, macht sich primär am Kraftstoff fest und schiebt die Antriebsentscheidung in die zweite Reihe. Dabei wird der Verbrennungsmotor durchaus auch für alternative Kraftstoffe als zukunftsfähig angesehen, BMW setzt hier für die Markteinführung auf die Sequenz Erdgasmotor - Wasserstoffmotor und nimmt in Kauf, bis 2004 noch keine entsprechende Lösung auf dem Markt zu haben. Der Brennstoffzelle räumt BMW im Interview aufgrund Kosten und Gewicht nur eine Nischenchance ein; und sieht die derzeit vorherrschende Dynamik in der Öffentlichkeit als nur zum Teil sachlich fundiert.

Da ein isolierter Innovator allein eine pfadverändernde Innovation wie die Brennstoffzelle nicht durchdrücken kann und vieles auch von der Regulierung und komplementären Maßnahmen wie Kraftstoffbesteuerung, Entwicklung der Infrastruktur abhängt, agieren die Hersteller auch stark im politischen Raum, ein aktuelles Beispiel ist hier die "verkehrswirtschaftliche Energiestrategie", auf die im nächsten Abschnitt noch näher eingegangen wird.

6. Politische und institutionelle Bedingungen der Markteinführung

Bei Umweltinnovationen wird dem regulativen Impuls in der Regel eine erhebliche Bedeutung zugemessen. Im Fall Brennstoffzelle ist das Verhältnis zwischen der Innovation und den politischen Bedingungen vielschichtig und eher indirekt; ein ökologisch vorteilhafter Pfadwechsel wird nicht nur von politischen Impulsen, sondern auch stark von technischen und ökonomischen Faktoren sowie insbesondere Firmenstrategien beeinflusst. Dennoch hängt ein Pfadwechsel bei der Antriebswahl weiter in erheblichem Umfang von den politischen Impulsen, aber auch den institutionellen Bedingungen der Markteinführung ab. Allgemein gesprochen unterscheiden Schot et al. (1994, S. 1074) drei mögliche politische Strategien, um Pfadwechsel, bei ihnen gefasst als Wechsel zwischen technologischen Systemen, zu erreichen:

- "technology forcing", um Innovationen über Erwartungsbildung zu beschleunigen,
- strategisches Nischenmanagement, d.h. die Schaffung von Marktnischen für Experimente unter Praxisbedingungen und die frühzeitige Einbeziehung der Nutzer, und
- die Schaffung eines "technologischen Nexus", um andere Akteure einzubeziehen und neue Netzwerke zu bilden.

Die weitere Analyse wird zeigen, dass Elemente all dieser drei Strategien bei der Brennstoffzelle als alternativem Antrieb eine Rolle spielen.

6.1. Die indirekte Rolle der Umweltpolitik

Bei einer näheren Analyse des Brennstoffzellenfalls ist zunächst festzustellen, dass die Inventionsphase nur indirekt mit umweltpolitischen Faktoren in Verbindung gebracht werden kann. Die Basisinvention stammt bereits von 1839; für die Anwendung auf den mobilen Bereich hat zunächst neben den beiden Ölkrisen Ende der 70er Jahre die allgemeine Energiepolitik weg vom Öl eine Rolle gespielt, die die Forschung der Hersteller in Richtung alternativer Antriebe und Kraftstoffe mit nicht unerheblichen Forschungsmitteln unterstützt hat (Hild 1998, S. 226, Petersen/ Diaz-Bone, S. 248). Allerdings blieb dieser Impuls angesichts wieder sinkender Ölpreise temporär. Erfolge der Umweltpolitik wie der Katalysator wirkten sogar kontraproduktiv, da sie den bestehenden Pfad in erheblichem Maße stabilisierten. Erst Ende der 80er gab es neue Impulse.

Einen wichtigen, wenngleich wiederum nur indirekten Impuls setzte dann 1990 die kalifornische Regulierung mit dem "Californian Low Emission Vehicle Program"⁶. Sie schrieb zunächst vor, dass bis 1998 2 Prozent der Fahrzeuge durch lokale Nullemissionen gekennzeichnet sein sollten. Dieser "technology forcing" Standard schrieb nicht vor, mittels welcher Technologie dies zu

⁶ Die kalifornische Politik wurde inzwischen von weiteren Bundesstaaten wie New York und Massachusetts übernommen.

erreichen sei. Nach damaliger Lage der Dinge kamen aber nur Elektroautos in Frage, die meisten Hersteller reagierten entsprechend (Moore/ Miller 1994, S. 135). Die Invention selbst lässt sich mit dieser Politik nicht erklären; wohl aber gingen von ihr erhebliche Anreize für eine Weiterentwicklung zur Marktreife aus. Dies gilt auch für deutsche Hersteller, da für viele von diesen Kalifornien einen bedeutenden Exportmarkt darstellt, von dem als regionalem Pilotmarkt zudem Diffusionsimpulse erwartet werden. Dieser Anreiz verstärkte sich, als zunehmend deutlich wurde, dass sich insbesondere die Speicherprobleme beim Elektroauto nicht so schnell wie erhofft beheben ließen. Die Hersteller erreichten daher eine Streckung des Zeithorizonts; dafür müssen jetzt 2004 10 Prozent der Neufahrzeuge Nullmissionen oder zumindest "ultra low emissions" aufweisen. Damit soll ein Emissionsrückgang um 50 Prozent erreicht werden. Während die Auswahl der Alternativen damit weiterhin Marktfaktoren überlassen wurde, führte dies faktisch zu einem erheblichen Push bei der Brennstoffzellenentwicklung, da dies nach Auffassung zumindest einiger Hersteller einen realisierbaren Zeithorizont darstellte.

Von der deutschen Umweltpolitik gingen keine direkten Impulse in diese Richtung aus. Allerdings zeitigte die Verpflichtung auf das Kohlendioxidreduktionsziel zumindest indirekte Wirkungen. Zum einen wirkt sie auf die Langfristerwartungen, d.h. macht einen steigenden Druck in diese Richtung plausibel. Zum anderen resultierten daraus entsprechende Selbstverpflichtungen der Hersteller zunächst auf deutscher Ebene, den Treibstoffverbrauch um 25 Prozent zu reduzieren, und später auch auf europäischer Ebene, nämlich die Zusage, bis 2008 durchschnittliche Kohlendioxidmissionen von 140g pro Kilometer bzw. einen durchschnittlichen Flottenverbrauch von 6 Liter pro 100 km zu erreichen.

Zwar lassen diese Regelungen noch weit mehr Wege der Erfüllung insbesondere auch mittels verbesserter Lösungen mit konventionellen Antrieben (Drei Liter Auto etc.) offen. Für Hersteller von Oberklassewagen ist dieser Weg allerdings schwer zu erreichen bzw. wenig attraktiv, da konventionelle Schritte in Richtung Verbrauchsreduzierung tendenziell die Leistungseigenschaften der Fahrzeuge beeinträchtigen. Die Brennstoffzelle (und andere alternative Antriebskonzepte) bietet - neben einem verstärkten Eindringen in das Kleinwagensegment - einen möglichen Ausweg aus diesem Dilemma.

Dennoch zeugt das Beispiel von einem hohen Einfluss der Politik bei der Adaption und ggf. auch Diffusion der pfadverändernden Innovation. Der Nischenmarkt muss also politisch geschaffen werden, da ökonomische Triebkräfte nicht bzw. nicht schnell genug auf die Lernkurve und Skaleneffekte wirken. Zumindes VW ist der Auffassung, dass es ohne weitere gesetzliche Regelungen in Europa nicht zu einer Markteinführung von Brennstoffzellenautos kommen wird (ähnlich auch Shell 1999, S. 24).

Ein wichtiger Faktor ist hier die Steuerbelastung durch Treibstoff- und Kraftfahrzeugsteuern, wie Gossen/ Grahl (1999, S. 1272f) zeigen. Unter der Annahme nicht weiter steigender Ökosteuern sehen sie keinen Durchbruch der BZ-Lösung. Werden hingegen Steuerbefreiungen bei der Kfz-Steuer angenommen, so ändert sich diese Einschätzung und die BZ wird bis 2010 konkurrenzfähig. Allerdings klammern sie in ihrer Analyse weitere potenziell wichtige politische und institutionelle Faktoren aus.

6.2. Der Beitrag von Forschungs- und Energiepolitik

Ein weiterer potenzieller Einflussfaktor ist hier die Forschungspolitik. Drei Faktoren sind im deutschen Fall bemerkenswert. Erstens wird von dieser angewandte Forschung im Bereich

mobiler Einsatz von Brennstoffzellen nicht unterstützt; die entsprechende FuE sei Aufgabe der Industrie (BMBF 1996, S. 228). Zweitens ist die Förderung des Bundes für die allgemeine Brennstoffzellenentwicklung seit 1995, wo sie mit 17,7 Millionen DM einen Höchststand erreichte, deutlich auf 1999 13 Millionen DM gesunken, 2000 ist allerdings ein Wiederanstieg vorgesehen. Bei Wasserstoff ist das Fördervolumen seit 1991, wo es mit 17,5 Millionen einen Höhepunkt erreichte, auf 1999 nur noch 1 Million DM gesunken (o.V. 2000a). Und drittens ist die allgemeine Förderung der Brennstoffzellen- wie der Wasserstofftechnologie deutlich geringer als in den USA und in Japan; dies gilt auch pro Kopf der Bevölkerung; beispielsweise wurde nach kontinuierlichen Anstiegen die BZ in den USA 1996 mit 145 Millionen DM gefördert.

Auch fällt auf, dass die Forschungspolitik in Deutschland im Gegensatz zu USA und Japan weniger auf der Basis gezielter Programme und entsprechender strategischer Zielsetzungen agiert. Die USA benennt hier hingegen ganz klare Prioritäten. Kurzfristig soll eine Lösung mittels der Reformierung von Benzin erreicht werden, um bei der Markteinführung riesige Infrastrukturinvestitionen zu vermeiden. Langfristig liegt der Forschungsschwerpunkt auf der direkten Nutzung von Wasserstoff und der entsprechenden Infrastruktur (Devlin 2000). In Japan besteht ein Programm zur Förderung der PEFC-Brennstoffzelle, das 2000 mit gut 110 Millionen DM dotiert ist. Schwerpunkte liegen in den vier Bereichen FuE, Markteinführung, Wasserstoff als Treibstoff und technische Plattform (Tokushita 2000). Der letzte Bereich, 2000 allein mit gut 35 Millionen DM dotiert, deutet auf einen weiteren indirekten Einfluss der Politik, nämlich bei der Normung bzw. Festlegung von Standards und Testmethoden. Hier besteht im Fall Brennstoffzelle noch Nachholbedarf.

Von großer Bedeutung ist die Energiepolitik, da sowohl die ökologische Vorteilhaftigkeit, aber angesichts der Bedeutung der Treibstoffe, ihrer Gewinnung und der entsprechenden Infrastruktur auch die ökonomischen Chancen von dieser stark beeinflusst werden. Die Hersteller äußern sich hier sehr kritisch und vermissen insbesondere eine abgestimmte Strategie. Sie fordern insbesondere, ähnlich wie beim Katalysator, die steuerliche Begünstigung alternativer Kraftstoffe. Einen Schritt in Richtung einer solchen Langfriststrategie stellt die sogenannte verkehrswirtschaftliche Energiestrategie dar, bei der VW, DaimlerChrysler und BMW sowie Treibstoff-, Energie und Nutzfahrzeughersteller (Shell, RWE, Aral, MAN) und das Verkehrsministerium kooperieren. Die Hersteller einigen sich dabei u.a. auf ausgewählte Kraftstoffe, für die eine Infrastruktur aufgebaut werden soll. Ab 2000 sollen dann Demonstrationsprojekte für diese Kraftstoffe entwickelt werden. Allerdings ist die Einigung sehr mühsam, und die angestrebte Begrenzung auf zwei Kraftstoffe ließ sich bislang nicht erreichen. Außerdem bleibt die europäische Ebene bislang außen vor.

6.3. Kooperation zwischen politischen und wirtschaftlichen Akteuren

Diese Kooperation verweist zugleich auf die Bedeutung von institutionellen Faktoren; neben der Politikintegration geht es dabei auch um die Kooperation zwischen politischen und wirtschaftlichen Akteuren des Innovationssystems, also um das, was Schot et al. (1994) unter technologischem Nexus fassen (siehe oben). Hier ist darauf hinzuweisen, dass diese in Deutschland eher noch in den Anfängen steckt. Einen entsprechenden Rahmen bieten im Wesentlichen nur Forschungsprojekte; beispielsweise der Internationalen Energieagentur unter Beteiligung des BMBF, die insbesondere auf System- und Infrastrukturaspekte zielen.

Zudem bestehen zwischen den Akteuren erhebliche Differenzen. Wie insbesondere die Interviews deutlich machten, war das Verhältnis zwischen Industrie und Politik historisch lange Zeit

von latentem Misstrauen geprägt; die Industrie wandte sich energisch - aber z.T. vergeblich - gegen Technologie erzwingende Politiken und zu starke forschungspolitische Akzente. Auch bestehen, aufgrund der unterschiedlichen Herstellerstrategien nicht überraschend, unter den wirtschaftlichen Akteuren erhebliche Differenzen. Ähnliches gilt für die politischen Akteure; insbesondere das Umweltbundesamt nimmt hier explizit eine deutlich kritische Position ein (z.B. Kolke 1999).

In Kalifornien ist dies anders. Im Rahmen der stetig wachsenden California Fuel Cell Partnership haben sich die Protagonisten sowohl der gesamten wirtschaftlichen Kette (Methanol-, Brennstoffzellen- und Fahrzeughersteller wie z.B. DaimlerChrysler und Ford, aber auch Toyota und Nissan) und von Forschungseinrichtungen als auch politische Institutionen wie das California Air Resource Board und seit kurzem auch das US Energieministerium zusammengetan, um die Lösung in Demonstrationsvorhaben auf Praxistauglichkeit zu testen (CARB 2000), das CARB fungiert hier als Organisator des Netzwerks, um den technologischen Nexus herzustellen. Auch auf Ebene des Bundesstaats versucht das PNGV-Programm ("Partnership for a new generation of vehicles"), in dessen Rahmen Regierung und Automobilhersteller zusammenarbeiten, neue Optionen für eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs zu erschließen (Ziel: 2,9 l/100 km bis 2005), wobei die BZ als eine Option gesehen wird, die mit entsprechend ambitionierten Kostenzielen verfolgt wird (Petersen/ Diaz-Bone 1998, S. 261). Bisher wurde in diesem Rahmen 1 Milliarde US Dollar investiert; die vorliegenden Konzeptfahrzeuge erfüllen allerdings die Kalifornischen Super ULEV Normen nicht (Lazaroff 2000b).

Zusammenfassend sind die politisch-institutionellen Bedingungen der Markteinführung in Deutschland bisher nicht besonders förderlich; zumindest fallen sie im Vergleich zur USA eher bescheiden aus. Da kein Innovator die Innovation allein auf dem Markt durchsetzen können, ist dies auch für die Wettbewerbswirkungen von Bedeutung.

7. Wettbewerbswirkungen des Brennstoffzellenantriebs

Da sich BZ-Fahrzeuge noch nicht am Markt befinden, lässt sich über die tatsächlichen Wettbewerbswirkungen am Markt noch wenig sagen. Anzunehmen ist, dass sie im bei einer Fortsetzung des derzeitigen Trends im Technologiewettbewerb der Zukunft eine wichtige Rolle spielen wird. Dabei spielt auch das entsprechende Image in der Kundenwahrnehmung gerade in Deutschland eine wichtige Rolle ("Vorsprung durch Technik"). Erste positive Spuren zumindest der Imagewirkung sind nach Auffassung von DaimlerChrysler bei ihnen selbst bereits sichtbar; allerdings noch weit davon entfernt, dass dies in Umsätzen deutlich werden könnte. Zu beachten ist allerdings, dass die Brennstoffzelle bzw. der Antrieb letztlich nur ein (zwar wichtiger) Teil des am Markt verkauften Produkts ist, und die Wettbewerbsfähigkeit des Produkts daher auch von vielen anderen Faktoren abhängt. Sektorale Wettbewerbsvorteile können daher insbesondere auch in der Zulieferindustrie entstehen. Insbesondere in diesem Segment erhofft sich auch Kalifornien Wettbewerbsvorteile, da es zugleich über einen großen Markt verfügt (Schot et al. 1994, S. 1065f). Bezogen auf Deutschland mit seiner starken Zuliefererindustrie müsste die Frage eher lauten, inwieweit eine BZ-Entwicklung und Produktion von Komponenten im Ausland die sektorale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Zuliefererindustrie gefährdet. Schließlich bringt das BZ-Fahrzeug in allen Komponenten des Antriebsstrangs wesentliche Veränderungen mit sich, insbesondere in Motorelektronik und -elektrik, aber auch bezüglich Getriebe und Abgasanlage (Demuß 1999). Beim Verbrennungsmotor sind deutsche Betriebe mit bis zu 90 Prozent an der Wertschöpfung beteiligt (Wengel/ Schirrmeister 1999).

Weiter ist davon auszugehen, dass es sich in erster Linie um First-mover-Wettbewerbsvorteile handelt, d.h. der zeitliche Vorsprung eine Rolle spielt. Die Frage ist, wie Moore/ Miller (1994, S. 139f) äußern, welches Land zuerst das emissionsärmere Auto baut, ob die USA, Japan oder EU-Staaten. Allerdings ist das Ausmaß umstritten und hängt von der Appropriierbarkeit der Renten und der Diffusionsgeschwindigkeit ab. Die Herstellerinterviews haben hier, selbst bei Protagonisten der neuen Lösung, eher vorsichtige Einschätzungen zu Tage gebracht.

Fraglich ist allerdings, inwieweit die positiven sektoralen Wettbewerbsvorteile angesichts globaler Kooperationen tatsächlich noch national wirksam werden. Entscheidend ist insbesondere, wo sich die Zuliefererindustrie ansiedelt und wie dies mit der Lokalisierung der entsprechenden FuE zusammenhängt. Während sich FuE in letzter Zeit neben Amerika und Japan insbesondere auch in Deutschland massiert, wird angenommen, dass der Standort der Zulieferindustrie wohl stark vom ersten Pilotmarkt abhängt (Wengel/ Schirrmeister 1999). Hier spricht vieles für die USA, wenngleich verschiedentlich angemerkt wurde, dass die US-Firmen den home market und bestehenden Zeitvorteil bisher noch nicht genutzt hätten (Moore/ Miller 1994, S. 130). Inzwischen plant z.B. Ballard allerdings für den Aufbau einer großen BZ-Fabrik für 300.000 Fahrzeuge im Jahr mit dem Standort Nordamerika (o.V. 2000b).

Wengel/ Schirrmeister (1999) haben versucht, diesbezüglich verschiedene Szenarien durchzurechnen. Sie unterscheiden in Anlehnung an Mannsbart et al. (1999) die Alternativen

- "Durchbruch Inland", hier werden alle Komponenten in Serie in Deutschland gefördert, Wichtige Annahmen sind hier die wirtschaftliche Großserienfertigung im Mittelklassebereich, beginnend mit einer Serienfertigung 2005. 2010 wird von 250 000 in Deutschland produzierten BZ-Fahrzeugen ausgegangen.
- "Durchbruch Ausland", hier stellen USA und Japan den Leadmarkt dar, deutsche Pkw werden dadurch teilweise vom Markt verdrängt sowie
- "Konkurrenz", bei dem es 2010 weltweit noch keine BZ-Massenfertigung gibt und alle Systemkomponenten aus dem Ausland importiert aber in Deutschland eingebaut werden. BZ-Antriebe finden vorerst nur in der gehobenen Klasse Verwendung, nur 50000 werden 2010 in Deutschland produziert.

Das Szenario "Durchbruch" beruht dabei auf folgenden Eckpfeilern:

- kurzfristige technische Reife,
- kurzfristige Verfügbarkeit von Methanol über die Infrastruktur durch eine willige Mineralölindustrie,
- hohe Käuferakzeptanz sowie
- einer Umweltpolitik, die im Gegensatz zur bisherigen Politik die BZ tendenziell bevorzugt und Emissionsreduzierung zum erklärten politischen Ziel macht (Mannsbart et al. 1999).

Während in letzterem Fall 2010 keine nennenswerten sektoralen Wettbewerbswirkungen entstehen, kommen Wengel/ Schirrmeister (1999, S. 2f) im ersten Fall zu positiven Wirkungen für die Autoindustrie in Deutschland, nämlich einem relativen Anstieg der PKW-Produktion um 1 Prozent und einem Umsatzplus von 700 Mio. DM, im zweiten Fall hingegen durch Verdrängungseffekte zu negativen Wirkungen, einem Produktionsrückgang um 2 Prozent und einer Umsatzeinbuße von 300 Mio. DM.

8. Fazit: Die Brennstoffzelle - Antrieb eines Umweltinnovationswettbewerbs mit Zukunft?

8.1. Möglichkeiten und Grenzen für eine pfadverändernde Innovation

An dem untersuchten Beispiel des Brennstoffzellenantriebs lassen sich übergreifend folgende *Haupthindernisse* für eine pfadverändernde Innovation aufzeigen:

- Neue technische Lösungen haben in ihren frühen Entwicklungsphasen generell ein gemeinsames Kennzeichen: Die innovative Lösung ist noch sehr viel teurer als die etablierte Technologie, und das durch das Ausnutzen von Lernkurven und Skaleneffekten realisierbare Kostensenkungspotenzial ist für die beteiligten Akteure unsicher.
- Auch ein weiteres Hindernis ist allgemeinerer Natur, wenngleich in diesem Fall von besonderer Bedeutung: Das institutionelle Umfeld und komplementäre Technologien, hier insbesondere die Treibstoffinfrastruktur, sind an die bestehenden Lösungen angepasst, Veränderungen bringen deshalb relativ hohe Umstellungskosten mit sich. Das geringere Ausmaß dieser Kosten ist ein Hauptgrund dafür, dass ein Methanolreformer derzeit die wahrscheinlichste Markteinführungsstrategie ist, auch wenn diese Lösung gegenüber der reinen Wasserstofflösung ökologische Nachteile aufweist und perspektivisch wahrscheinlich eine erneute Umstellung der Infrastruktur in Richtung Wasserstoff nach sich ziehen wird.
- Eine dritte Grenze erscheint eher fallspezifisch: Das Ausmaß der Umweltentlastung durch die Brennstoffzellenstrategie ist umstritten, die politische Unterstützung ist daher ungewiss. Dies verstärkt die sowieso vorhandenen Probleme des Aufbaus von neuen unterstützenden Akteurskooperationen. Diese Grenze verweist jedoch auf eine wichtige allgemeine Erkenntnis: Eine pfadverändernde technische Innovation kann nicht umstandslos mit einer umfassenden, weitreichenden Entlastung der Umwelt gleichgesetzt werden.
- Schließlich ist die Akzeptanz der KonsumentInnen gerade im Bereich der individuellen Mobilität unsicher, da Ausmaß und Verteilung des spürbaren Nutzens noch unklar sind.

Eine Markteinführung der neuen Technologie scheint, wägt man alle dargelegten Gesichtspunkte gegeneinander ab, für die nahe Zukunft am ehesten in der gehobenen Klasse vorstellbar. Wichtig ist hier einerseits, dass die Kunden bereit sind, gewisse Mehrkosten für eine neue Technik in Kauf zu nehmen (geringere Preiselastizität der Nachfrage). Im Gegenzug werden dafür auch Leistungen gefordert, bei denen die Brennstoffzelle einen echten – allerdings ökologisch nicht unproblematischen - Zusatznutzen erbringt, nämlich mit Strom zu betreibende Aggregate wie Standklimaanlage oder Standheizung (Wengel/ Schirrmeyer 1999).

Das skizzierte Innovationsmuster schließt unstrittig auch einige *Potenziale* ein, die Dynamik in das Innovationsgeschehen bringen können:

- Es gibt mit DaimlerChrysler einen gewichtigen Innovations"champion", der fest entschlossen ist, die Brennstoffzelle als erster auf den Markt zu bringen.
- Ein wichtiger Faktor ist hier die Steuerbelastung durch Treibstoff- und Kraftfahrzeugsteuern (vgl. Gossen/ Grahl 1999). Werden z.B. Steuerbefreiungen bei der Kfz-Steuer angenommen, kann die Brennstoffzelle bis 2010 konkurrenzfähig werden. Die Dynamik der Ökosteuern mag hier in dieselbe Richtung wirken.

- Es gibt Anzeichen dafür, dass ein anfänglicher Impuls, der auch in der Debatte über die Ausgestaltung der Infrastruktur neue Akzente setzt, eine selbsttragende Innovationsdynamik entfachen kann. Auch die Selbstverpflichtungen der Unternehmen könnten in diese Richtung wirken, da sie insbesondere Oberklassehersteller unter Druck setzen, entweder verstärkt im Kleinwagensegment aktiv zu werden oder alternative Antriebsoptionen einzuführen.

Insgesamt zeigt sich, dass ein Durchsetzen der Brennstoffzelle am Markt möglich, aber nicht zwingend ist. Nach einer aktuellen Marktstudie von Roland Berger besteht eine gewisse Diskrepanz zwischen öffentlichen Ankündigungen und der technischen und ökonomischen Realität. Neben den Szenarien kontinuierliche Marktdurchdringung und Durchbruch scheint daher auch noch das Negativszenario Teufelskreis im Bereich des Möglichen (Reiss 2000). Noch befindet sich die Lösung am Anfang der Lernkurve. Ob sie diese – anders als andere alternative Antriebe bisher - erfolgreich durchschreitet hängt auch davon ab, welche Unterstützung sie durch die Politik erfährt.

8.2. Vorläufige Schlussfolgerungen zur Rolle der Politik

Die radikale technische Innovation alternativer Antrieb und speziell Brennstoffzelle ist ein Beispiel für die Bedeutung von politischen Strategien, die über die Setzung allgemeiner Rahmenbedingungen hinausgehen. Dies zeigt der kalifornische Fall. Rahmensetzungen allein scheinen an Grenzen zu stoßen, wenn pfadverändernde Innovationen angestoßen werden sollen. Vielmehr muss dazu die Technologieentwicklung, ihre institutionellen Bedingungen sowie die möglichen Wirkungen politischer Maßnahmen genauer betrachtet werden. Sollte Deutschland daher eine speziell auf die Markteinführung von alternativen Antrieben bzw. konkret der Brennstoffzelle ausgerichtete Strategie verfolgen?

Die Analyse legt nahe, dass dies rein industriepolitisch durchaus zu Vorteilen führen könnte, und hierdurch zumindest in der Automobilindustrie Wertschöpfung und Arbeitsplätze vermehrt oder zumindest gesichert werden. Handelt es sich damit um ein Paradebeispiel für die Möglichkeit eines Pfadwechsels, der zugleich Umwelt und Wettbewerbsfähigkeit stärkt? Die vorgestellten ökologischen Argumente lassen hier Zweifel aufkommen. Bei näherem Hinsehen wirken die zunächst erreichbaren Umweltentlastungen wenig beeindruckend sowie nur um einen hohen Preis zu haben. Der für den Klimaschutz äußerst relevante Vorteil des Wechsels der Energiebasis von fossilen zu erneuerbaren Energien scheint erst längerfristig zu greifen, nämlich dann wenn eine solare Wasserstoffwirtschaft aufgebaut ist⁷.

Andere Strategien zur Steigerung der Ressourcenproduktivität wie das Dreiliterauto scheinen in dieser Hinsicht erfolgsversprechender und vor allem, zumindest in der Kompaktklasse, für die entsprechende Berechnungen durchgeführt wurden, auch deutlich effizienter (Kolke 1999). Allerdings setzt die Durchsetzbarkeit dieser Strategien eine Akzeptanz beim Kunden voraus; hier besteht bisher wenig Anlass zu übermäßiger Hoffnung. Für den Bereich der Mittelklasse- und Luxusfahrzeuge, in denen deutsche Hersteller traditionell stark vertreten sind, und in der Faktoren wie Fahrleistung, Ausstattung, Komfort eine große Rolle spielen, scheint die z.B. Petersen/Diaz-Bone (1998, S. 116) vorgeschlagene Strategie des "Faktor 2"-Autos, d.h. eine Halbierung des Treibstoffverbrauchs in allen Segmenten, nur bedingt attraktiv, da sie die genannten Fakto-

⁷ Allerdings dürften bei einem großflächigem Aufbau weitere Nutzungskonkurrenzen mit anderen Formen der Landbewirtschaftung entstehen, so dass dann die Frage der Ressourcenproduktivitätssteigerung wieder stärker auf die Agenda rückt.

ren nicht unbeeinflusst lässt. Gerade für die Oberklasse scheint die BZ unter Umständen eine leichter realisierbare Lösung, um zu ökologischen Vorteilen zu kommen.

Auch ist die Frage von Bedeutung, inwieweit die BZ-Technologie weitere ökologische Produktivitätsfortschritte verhindert. Hier sind gewisse Befürchtungen nicht von der Hand zu weisen, da ökologische Vorteile hier nicht notwendig durch Effizienzvorteile erreicht werden und, z.B. durch die generelle Verfügbarkeit von Strom, im Gegenteil sogar weitere Anreize zu Mehrverbrauch geben können. Auch werden großvolumige Autos, die ceteris paribus die Umwelt stärker belasten, als Lösung stabilisiert und damit weitergehende Fortschritte, die Veränderungen im gesamten Verkehrssystem betreffen, evtl. eher behindert (Petersen/ Diaz-Bone 1998). Große Technologiesprünge müssen also nicht notwendigerweise mit großen Umweltentlastungen zusammenfallen. Andererseits ist mit der BZ jedoch ein Potenzial für Umweltentlastungen verbunden, und die mobile Anwendung kann vielleicht auch einen Träger für die breite Markteinführung erneuerbarer Energien darstellen.

Solange ökologische First-Best-Lösungen wie Veränderungen im Verkehrssystem oder ein wirkliches "Downsizing" der bestehenden Fahrzeugflotte aufgrund fehlender Akzeptanz außer Reichweite scheinen, erscheint eine politische Unterstützung der BZ unter gewissen Bedingungen als Second-Best-Strategie, die immerhin gewisse Vorteile verspricht. Allerdings sind hinsichtlich der Ausgestaltung einer solchen Strategie einige Punkte zu beachten:

- Eine industriepolitisch motivierte technology forcing Strategie wie in Kalifornien, um einen Inlandsdurchbruch zu erreichen, ist für Deutschland nicht angezeigt. Zum einen besteht keine akute umweltpolitische Notwendigkeit für eine schnelle Markteinführung, da die geltenden Umweltqualitätsziele bei Luftschadstoffen auch durch konventionelle Fahrzeuge, die die zukünftige Euro IV-Norm erfüllen, erreicht werden. Zum anderen ist die technische Lösung, die sich aufgrund des kalifornischen Drucks zunächst kurzfristig am Markt durchzusetzen scheint, klimapolitisch sehr fragwürdig. Zudem sprechen innovationspolitisch auch die bestehenden Widersprüche im Innovationssystem sowie die Dynamik in den USA, die einen Erfolg unsicher machen, gegen eine solche Strategie.
- Es kann allerdings sinnvoll sein, alternative Antriebe wie die Brennstoffzelle in gewissem Umfang politisch zu unterstützen, um den Technologie- bzw. Umweltinnovationswettbewerb und die Markteinführung überhaupt in Gang zu bringen. Für eine Strategie des strategischen Nischenmanagements, wie sie übrigens auch vom holländischen "Sustainable Technology Development" Programm vorgeschlagen wurde (Weaver et al. 2000), spricht bei einer entsprechenden Ausgestaltung einiges. Dabei scheinen temporäre Impulse ausreichend, um eine dann selbsttragende Marktdynamik in Gang zu setzen.
- Bereits jetzt finden sich einige Anzeichen, dass die kalifornische Politik, aber auch die europäischen Rahmenbedingungen, zumindest als ein Antrieb für einen ökologisch förderlichen Umweltinnovationswettbewerb dient. Beispielsweise steigen laut Aussage der Interviewpartner die umweltorientierten FuE-Ausgaben. BMW hat angekündigt, die Umsetzung seiner alternativen Wasserstoffstrategie erheblich zu beschleunigen und selbst eine entsprechende Treibstoffinfrastruktur aufzubauen. Auch Hybridlösungen werden z.B. in Japan verstärkt verfolgt. Schließlich kommt es auch zu entsprechenden Reaktionen bei der Weiterentwicklung der konventionellen Otto- bzw. Dieselmotoren; hier werden z.T. erstaunliche Sprünge konstatiert, die lange diagnostizierte "Innovationslethargie" (Weaver et al., S. 253) scheint beendet, wie z.B. die aktuellen Entwicklungen im Bereich Dreiliterauto zeigen.

- Einen allgemeinen politischen Ansatzpunkt stellen politische Maßnahmen dar, die alle Alternativen unterstützen; die Ökosteuer wirkt zum Beispiel entsprechend und sollte als unterstützende Hintergrundvariable für verschiedene pfadverändernde Innovationen kontinuierlich angehoben werden. Aber auch ein Tempolimit würde in diese Richtung wirken, da es tendenziell gegen den Trend kontinuierlich steigender Leistungsanforderungen wirkt. Dies nützt im unteren Marktsegment Dreiliter- oder noch sparsameren Autos, im oberen Marktsegment Brennstoffzellenfahrzeugen.
- Als ein spezifischer politischer Ansatzpunkt bietet sich insbesondere der Bereich Energiepolitik an; dabei sollten jedoch nur langfristig vielversprechende Lösungen, also Wasserstoff und insbesondere dessen solare Erzeugung, unterstützt werden. Forschungspolitisch ist dies insbesondere hinsichtlich der Frage möglicher Speichertechniken zu flankieren. Auch Normungs- und Standardisierungsaktivitäten erscheinen ein sinnvolles politisches Handlungsfeld. Eine politische Unterstützung des Aufbaus einer neuen Treibstoffinfrastruktur erscheint hingegen jenseits von ersten Demonstrationsvorhaben bzw. Marktnischen (wie etwa Bussen) für die direkte Wasserstofflösung vorerst nicht vordringlich. Hier können zunächst die Erfahrungen aus Kalifornien sowie weitere Entwicklungen im Forschungsbereich abgewartet werden. Bei den ggf. notwendigen Mitteln wäre aber unbedingt darauf zu achten, dass diese über die bestehende Treibstoffinfrastruktur zusätzlich erhoben werden (z.B. im Sinne einer Steuerdifferenzierung bei gleichem Gesamtsteueraufkommen), und so nicht der Verkehrsträger Auto weiter subventioniert wird. In die begleitenden netzwerkorientierten Diskussionsprozesse sind die potenziellen Nutzer sowie andere Anspruchsgruppen dabei unbedingt einzubeziehen.
- Sofern sich dieses Szenario eines dynamischen, ökologisch ausgerichteten Wettbewerbs konkurrierender Technologien, bei dem nicht notwendigerweise einseitig eine spezielle Lösung gefördert wird, mit einem weltweiten KonkurrenzszENARIO im Sinne von Mannsbart et al. verknüpft, wofür derzeit einiges spricht, scheinen die Wettbewerbswirkungen zumindest nicht negativ. Eine mittelfristige Fast Follower Strategie im Bereich Brennstoffzelle, verbunden mit einer First Mover Strategie bezüglich den zukunftsfähigen Langfristlösungen regenerativ erzeugter Wasserstoff und Verbrauchseinsparung, scheint daher angemessen.

Insofern sollte das sich andeutende politische Handlungsfenster, durch ein geschicktes Ansetzen an laufenden Innovationsdynamiken auch im oberen Marktsegment ökonomisch tragfähige ökologische Fortschritte zu erreichen, geschickt genutzt werden. Voraussetzung ist eine Ausgestaltung, bei der weitere komplementäre Optionen wie das Dreiliterauto, aber auch weitreichendere Lösungen, die das *gesamte* Verkehrssystem betreffen, nicht aus dem Auge verloren werden.

9. Literatur

- Abernathy, William J. (1978): The Productivity Dilemma. Roadblock to Innovation in the Automobile Industry. Baltimore/ London.
- Canzler, Weert (1997): Der Erfolg des Automobils und das Zauberlehrlings-Syndrom. In: Dierkes, Meinolf (Hg.): Technikgenese. Befunde aus einem Forschungsprogramm. Edition Sigma, Berlin, S. 99-129.
- [CARB] California Air Resources Board (2000): Zero-Emission Vehicle Program.
<http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/>
- Daimler-Benz (1997): Daimler-Benz, Ford und Ballard entwickeln gemeinsam die Brennstoffzellentechnik für Fahrzeuge. Mitteilung vom 15.12.1997. Stuttgart.
- Demuß, Lutz (1999): Technologische Veränderungen beim Übergang vom konventionellen Antriebsstrang zur mobilen Brennstoffzelle. Kurzdarstellung,
<http://www.brennstoffzellensymposium.de/...ktergebnisse/komponenten/>
- Devlin, Peter R. (2000): Technoeconomic Challenges and Political Implications. Vortrag auf der Tagung Politische Aspekte von Brennstoffzellen am 28./29. Juni in Berlin.
- Di Pascoli, S./ Femia, A./ Luzzati, T. (2000): Natural Gas, cars, and the environment. A (relatively) "clean" and cheap fuel looking for users. In: Proceedings of the 3rd ESEE Conference, 3.-6. Mai 2000, Wien (CD ROM).
- [DZF/PI] The David Suzuki Foundation/ The Pembina Institute (2000): Fuel Cells – A Green Solution? Internet Download unter www.davidsuzuki.org
- Erdmann, Georg/ Grahl, Marc (2000): Markets for Fuel Cell Vehicles. In: IAAE/ GEE: Workshop Fuel Cell Policy/ Politische Aspekte von Brennstoffzellen. Materialien zur gleichnamigen Tagung am 28./29. Juni in Berlin.
- Gossen, F./ Grahl, Marc (1999): Vergleich von Brennstoffzellen- und weiteren zukünftigen Antrieben hinsichtlich Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit. In: Proceedings des 8. Aachener Kolloquiums Fahrzeug- und Motorentechnik, 4.-6. Oktober 1999, S. 1251-1276.
- Hild, Reinhard (1998): Brennstoffzelle. In: Sprenger, R.-U. et al.: Abschätzung der innovativen Wirkungen umweltpolitischer Instrumente - dargestellt am Beispiel des Systems Straßenverkehr. ifo Institut, München, S. 203-232.
- Hübner, Kurt/ Nill, Jan/ Rickert, Christian: Greening of the innovation system? Opportunities and obstacles for a path change towards sustainability. The case of Germany. IÖW-Diskussionspapier 48/00. Berlin.
- Kemp, René (2000): Possibilities for a Green Industrial Policy from an Evolutionary Technology Perspective. In: Binder, M./ Jänicke, M./ Petschow, U. (eds.): Green Industrial Restructuring, Springer: Berlin/ Heidelberg/ New York, im Erscheinen.
- Kolke, Reinhard (1999): Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastungen. Brennstoffzellenfahrzeuge im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. UBA-Texte 33/99, Berlin.

- Lazaroff, Cat (2000a): DaimlerChrysler Commits \$1 billion to Fuel Cell Vehicles. In: Environmental News Service vom 20.6.2000, <http://ens.lycos.com/ens>.
- Lazaroff, Cat (2000b): Fuel Squeeze Drives Interest in Concept Cars. Environmental News Service vom 30.3.00, <http://ens.lycos.com/ens>.
- Moore, Curtis/ Miller, Alan (1994): Green Gold. Japan, Germany, the United States, and the Race for Environmental Technology. Beacon Press, Boston.
- Mannsbart, Wilhelm/ Marscheider-Weidemann, Frank/ Schirrmeister, Elna (1999): Zeitliche Abschätzung der künftigen Nutzung der Brennstoffzelle im PKW. Szenarien zur Markteinführung. Kurzfassung, <http://www.brennstoffzellensymposium.de/...ergebnisse/marktchancen>
- Nill, Jan/ Hübner, Kurt/ Rickert, Christian (2000): Ökologisierung des Innovationssystems? Möglichkeiten und Grenzen eines Pfadwechsels in Richtung Nachhaltigkeit am Beispiel Deutschland. Erscheint in: Dybe, Georg/ Rogall, Holger (Hrsg.): Die ökonomische Säule der Nachhaltigkeit. Berlin.
- Noreikat, Karl (2000): Politische Aspekte von Brennstoffzellen. Vortragsmanuskript der gleichnamigen Tagung am 28./29. Juni in Berlin.
- Opel (1998): Umweltbericht. Rüsselsheim.
- Opel (1999): Geschäftsbericht 1998. Rüsselsheim.
- o.V. (1999): Fuel cells meet big business. The Economist vom 24.7.1999, S. 63-64.
- o.V. (2000a): Förderung von Wasserstoff und Brennstoffzellen: Vergleich Deutschland - USA. In: Wasserstoff-Gazette, 14.3.2000, <http://www.hydrogen.org/Neuigkeiten/gazette.htm>
- o.V. (2000b): Ballard-Neuigkeiten. In: HyWeb-Gazette, 1.2.00, <http://www.hydrogen.org/Neuigkeiten/gazette.htm>
- o.V. (2000c): Opel präsentiert fahrfertigen Brennstoffzellen-Zafira mit Wasserstoffantrieb auf Genfer Automobilsalon. In: HyWeb-Gazette, 1.3.00, <http://www.hydrogen.org/Neuigkeiten/gazette.htm>
- Petersen, Rudolf/ Diaz-Bone, Harald (1998): Das Drei-Liter-Auto. Birkhäuser, Berlin u.a.
- Reiss, Jürgen (2000): Perspektiven für Fahrzeuganwendungen. Vortrag auf der Tagung Politische Aspekte von Brennstoffzellen am 28./29. Juni in Berlin.
- Schot, Johan/ Hoogma, Remco/ Elzen, Boelie (1994): Strategies for shifting technological systems. The case of the automobile system. In: Futures, Vol. 26, Nr. 10, S. 1060-1076.
- Shell Pkw Szenarien (1999): Mehr Autos – weniger Emissionen. Szenarien des Pkw-Bestands und der Neuzulassungen in Deutschland bis zum Jahr 2020. Deutsche Shell, Hamburg.
- Tokushita, Y. (2000): The PEFC Programm in Japan. Vortrag auf der Tagung Politische Aspekte von Brennstoffzellen am 28./29. Juni in Berlin.
- [VDA] Verband der Automobilindustrie e.V. (1999): Auto 1999. Jahresbericht. Frankfurt/ Main.
- Weaver, P./ Jansen, L./ Grootveld, G. v./ Spiegel, E. v./ Vergragt, P. (2000): Sustainable Technology Development. Sheffield.
- Wengel, Jürgen/ Elna Schirrmeister (1999): Auswirkungen des Innovationsprozesses auf die baden-württembergische Industrie. Kurzdarstellung, <http://www.brennstoffzellensymposium.de/...ergebnisse/auswirkungen>