

Der Open-Access-Publikationsserver der ZBW – Leibniz-Informationzentrum Wirtschaft
The Open Access Publication Server of the ZBW – Leibniz Information Centre for Economics

Weider, Marc; Metzner, André; Rammler, Stephan

Working Paper

Das Brennstoffzellen-Rennen: Aktivitäten und Strategien bezüglich Wasserstoff und Brennstoffzelle in der Automobilindustrie

Discussion papers // Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB), Abteilung: Innovation und Organisation, Forschungsschwerpunkt: Organisationen und Wissen, No. SP III 2004-101

Provided in cooperation with:

Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB)

Suggested citation: Weider, Marc; Metzner, André; Rammler, Stephan (2004) : Das Brennstoffzellen-Rennen: Aktivitäten und Strategien bezüglich Wasserstoff und Brennstoffzelle in der Automobilindustrie, Discussion papers // Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB), Abteilung: Innovation und Organisation, Forschungsschwerpunkt: Organisationen und Wissen, No. SP III 2004-101, <http://hdl.handle.net/10419/47946>

Nutzungsbedingungen:

Die ZBW räumt Ihnen als Nutzerin/Nutzer das unentgeltliche, räumlich unbeschränkte und zeitlich auf die Dauer des Schutzrechts beschränkte einfache Recht ein, das ausgewählte Werk im Rahmen der unter

→ <http://www.econstor.eu/dspace/Nutzungsbedingungen> nachzulesenden vollständigen Nutzungsbedingungen zu vervielfältigen, mit denen die Nutzerin/der Nutzer sich durch die erste Nutzung einverstanden erklärt.

Terms of use:

The ZBW grants you, the user, the non-exclusive right to use the selected work free of charge, territorially unrestricted and within the time limit of the term of the property rights according to the terms specified at

→ <http://www.econstor.eu/dspace/Nutzungsbedingungen>
By the first use of the selected work the user agrees and declares to comply with these terms of use.

Marc Weider, André Metzner, Stephan Rammler

Das Brennstoffzellen-Rennen

Aktivitäten und Strategien bezüglich Wasserstoff und
Brennstoffzelle in der Automobilindustrie

SP III 2004-101

weider@wz-berlin.de

andre.metzner@daimlerchrysler.com

st.rammler@hbk-bs.de

ZITIERWEISE/CITATION:

Marc Weider, André Metzner, Stephan Rammler

Das Brennstoffzellen-Rennen.

Aktivitäten und Strategien bezüglich Wasserstoff und Brennstoffzelle in der Automobilindustrie

Discussion Paper SP III 2004-101
Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (2004)

Forschungsschwerpunkt:

Organisationen und
Wissen

Research Area:

Organizations and
Knowledge

Abteilung:

Innovation und
Organisation

Research Unit:

Innovation and
Organization

Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung gGmbH (WZB)

Reichpietschufer 50, D-10785 Berlin

Telefon: +49 30 25491-201, Fax: +49 30 25491-209

www.wz-berlin.de/ow/inno

Zusammenfassung

Technologische Durchbrüche, die kalifornische Null-Emissions-Gesetzgebung, Innovationswettbewerb und die Vision einer nachhaltigen Automobilität haben seit den späten 1990er Jahren zu milliardenschweren Entwicklungsanstrengungen geführt und die wasserstoffbetriebene Brennstoffzelle zu der Zukunftstechnologie in der Automobilindustrie gemacht. Vertreter der Automobilindustrie sehen in der Brennstoffzelle eine erste echte Alternative zum etablierten Verbrennungsmotor. Doch die Etablierung einer radikal neuen Antriebstechnologie und die Transformation des großtechnischen Systems Automobil erweisen sich, wie alle grundlegenden Innovationen, eher als ein Marathon- denn als ein Kurzstreckenrennen – mit ergebnisoffenem Ausgang. Die langfristige Perspektive eröffnet die Möglichkeit für die sozialwissenschaftliche Mobilitäts- und Innovationsforschung den Versuch eines grundlegenden Technologiewechsels in der Automobilindustrie in „Echtzeit“ zu begleiten. Die vorliegende Studie bietet mit einer umfassenden Darstellung der Aktivitäten und Strategien der Automobilhersteller bezüglich Wasserstoff und Brennstoffzelle eine fundierte Grundlage für weitergehende vertiefende Untersuchungen zum Thema.

Abstract

Technological breakthroughs, California's zero emission vehicle regulation, competition in innovation, and the vision of sustainable automobility have led to developmental efforts worth billions of dollars since the late 1990s and made the fuel cell operating on hydrogen the future technology in the automobile industry. Representatives of the automobile industry see the fuel cell as the first real alternative to the firmly established internal combustion engine. However, the establishment of this radical new drive-train technology as well as the required transformation of the large technological system of the automobile proved to be, like all basic innovations, more like a marathon than a short track race – with an outcome that is not yet known. These now extended perspectives present the opportunity for social scientists specialising in research on mobility and innovation to assess the attempt to change the basic technology in the car industry in “real-time”. The following study gives a comprehensive account of the activities and strategies of the automakers relating to hydrogen and fuel cells and offers a sound empirical basis for further and more specific studies on the subject.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	9
2	BRENNSTOFFZELLE UND AUTOMOBILINDUSTRIE	11
2.1	Der gesellschaftliche Diskurs um Wasserstoff und Brennstoffzelle in Deutschland	11
2.2	Geschichte und Treiber des Themas Brennstoffzelle in der Automobilindustrie	16
2.3	Die zunehmende Dynamik des Themas Brennstoffzelle in den 1990er Jahren	19
2.4	Ungelöste Fragen: Marktreife der Technik, Wasserstoffspeicherung und Wasserstoffinfrastruktur	22
3	WASSERSTOFF- UND BRENNSTOFFZELLENAKTIVITÄTEN DER AUTOMOBILHERSTELLER – DARSTELLUNG	25
3.1	BMW	26
3.1.1	Überblickstabelle BMW	26
3.1.2	Einleitung	26
3.1.3	Sechs Generationen von Fahrzeugen mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren	27
3.1.4	Wasserstoff verbrennen und Strom von der Brennstoffzelle	32
3.2	DaimlerChrysler	35
3.2.1	Überblickstabelle DaimlerChrysler	35
3.2.2	Einleitung	36
3.2.3	Der Pionier und Demonstrator	37
3.2.4	Technologieführer	45
3.2.5	Weitere Brennstoffzellen- und Wasserstoffaktivitäten im DaimlerChrysler-Konzern	49
3.2.5.1	Chrysler	49
3.2.5.2	Freightliner	51
3.2.5.3	Mitsubishi Motors	52

3.3	Fiat	54
3.3.1	Überblickstabelle Fiat	54
3.3.2	Das Brennstoffzellen-Stadtfahrzeug	54
3.4	Ford	56
3.4.1	Überblickstabelle Ford	56
3.4.2	Einleitung	56
3.4.3	TH!NK	57
3.4.4	Direkt-Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeug als Ziel und Wasserstoffverbrennung als Übergangstechnologie	63
3.4.5	Weitere Brennstoffzellen- und Wasserstoffaktivitäten im Ford-Konzern	66
3.4.5.1	Wasserstoff-Wankelmotoren und methanolbetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge – Aktivitäten von Mazda	66
3.4.5.2	Volvo	69
3.5	General Motors/Opel	70
3.5.1	Überblickstabelle GM	70
3.5.2	Einleitung	71
3.5.3	Vom ältesten zum zukunftsfähigsten Brennstoffzellenfahrzeug in der Automobilindustrie	72
3.5.4	Benzinreformierung, Purpose Design und frühe Märkte	83
3.5.5	Weitere Brennstoffzellen- und Wasserstoffaktivitäten im General Motors-Konzern	87
3.5.5.1	Suzuki	87
3.6	Honda	89
3.6.1	Überblickstabelle Honda	89
3.6.2	Einleitung	89
3.6.3	Auf der Überholspur dank Technologietransfer	90
3.6.4	Technologiewettbewerb mit Toyota	96
3.7	Hyundai	98
3.7.1	Überblickstabelle Hyundai	98
3.7.2	Spätstart und Erwerb von externem Know-how	98
3.8	PSA Peugeot Citroen	100
3.8.1	Überblickstabelle PSA	100
3.8.2	Einleitung	101
3.8.3	Die Brennstoffzelle als Range Extender für Elektrofahrzeuge	101
3.8.4	Vom Batterie- zum Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug	104

3.9	Renault-Nissan	105
3.9.1	Überblickstabelle Renault	106
3.9.2	Einleitung	106
3.9.3	EU-Projekte und strategische Partnerschaften	106
3.9.4	Brennstoffzellen-APU und Benzin-Brennstoffzelle	108
3.9.5	Überblickstabelle Nissan	109
3.9.6	Einleitung	109
3.9.7	Zwischen „Turnaround“ und „Green Program“	110
3.9.8	Nissans unfreiwillige Folger-Strategie	112
3.10	Toyota	114
3.10.1	Überblickstabelle Toyota	114
3.10.2	Einleitung	114
3.10.3	Der Brennstoffzellen-Hybridantrieb	115
3.10.4	Über Umweltschutz zum Marktführer in der Automobilindustrie	119
3.10.5	Weitere Brennstoffzellen- und Wasserstoffaktivitäten im Toyota-Konzern	121
3.10.5.1	Daihatsu	121
3.10.5.2	Hino Motors	122
3.11	Volkswagen	123
3.11.1	Überblickstabelle VW	123
3.11.2	Einleitung	124
3.11.3	Brennstoffzellenentwicklung mit begrenzter Kraft	124
3.11.4	„Sunfuel“ – VWs alternative Kraftstoffstrategie	126
4	H2-/ BZ-AKTIVITÄTEN UND STRATEGIEN DER AUTOMOBILHERSTELLER – KOOPERATIONEN UND STRATEGIEVERGLEICH	128
5	H2-/ BZ-AKTIVITÄTEN UND STRATEGIEN DER AUTOMOBILHERSTELLER – AUSBLICK	133

Abkürzungsverzeichnis

APU	=	Auxiliary Power Unit
BZ	=	Brennstoffzelle
CaFCP	=	California Fuel Cell Partnership – Demonstrationsprojekt für Brennstoffzellenfahrzeuge in Kalifornien seit April 1999
CARB	=	California Air Resource Board – Kalifornische Umweltbehörde
CEP	=	Clean Energy Partnership – Demonstrationsprojekt für Brennstoffzellen- und Wasserstofffahrzeuge in Berlin ab 2003 (Beginn Fahrzeugdemonstration 2004)
CGH ₂	=	Compressed Gaseous Hydrogen – Druckwasserstoff
CH ₃ OH	=	Chemische Formel von Methanol
CHF	=	Clean Hydrocarbon Fuel – „sauberes“ Spezialbenzin
EV	=	Electric Vehicle – Elektrofahrzeug
FC	=	Fuel Cell – Brennstoffzelle
FCV	=	Fuel Cell Vehicle – Brennstoffzellenfahrzeug
F&E	=	Forschung & Entwicklung
H ₂	=	Chemische Formel für Wasserstoff
H&FCL	=	Hydrogen & Fuel Cell Letter – das amerikanische Fachblatt für die Entwicklung bei den Themen Wasserstoff und Brennstoffzelle
ICE	=	Internal Combustion Engine – Verbrennungsmotor
JHFC	=	Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project – Demonstrationsprojekt u.a. für Brennstoffzellenfahrzeuge in Japan seit März 2003
LH ₂	=	Liquid Hydrogen – Flüssiger Wasserstoff
MCFC	=	Molton Carbonate Fuel Cell – Schmelzkarbonat Brennstoffzellen arbeiten im Hochtemperaturbereich (ca. 650 Grad Celsius), und sollen in großen stationären Anwendungen (Kraftwerk) eingesetzt werden
NaBH ₄	=	Chemische Formel von Natriumborhydrid
NO _x	=	Stickoxid-Emissionen
PZEV	=	Partial Zero Emission Vehicle – Klassifizierung innerhalb der kalifornischen Null Emissions-Gesetzgebung
PEM(FC)	=	Proton Exchange Membran (Brennstoffzelle) Brennstoffzelle mit protonenleitender Membran als Elektrolyt; Arbeitstemperatur 60 bis 80°C; notwendiger Brennstoff: reiner Wasserstoff
SOFC	=	Solid Oxid Fuel Cell Festoxid-Brennstoffzelle mit sauerstoffionenleitendem Keramikelektrolyten; Arbeitstemperatur 800 bis 1000°C; Brennstoff: neben reinem Wasserstoff auch kohlenstoffhaltige Brenngase (Erdgas, Synthesegas)
SULEV	=	Super Ultra Low Emission Vehicle – Klassifizierung innerhalb der kalifornischen Emissions-Gesetzgebung
SUV	=	Sport Utility Vehicle
ZEV	=	Zero Emission Vehicle – Null Emissions Fahrzeuge

1 Einleitung

„Werden wir in 20 Jahren ohne schlechtes Gewissen Auto fahren können?“ fragt der Spiegel in einem Interview¹ und bringt damit die Attraktivität des wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenautos sowohl für die Industrie als auch für die Nutzer auf den Punkt. Die Aussicht auf individuelle Mobilität ohne Verzicht, dank eines nur Wasserdampf emittierenden Fahrzeuges und der Möglichkeit, von knapper werdenden und geopolitisch unsicheren fossilen Energieressourcen unabhängig zu werden, haben die Brennstoffzelle zu der Zukunftstechnologie in der Automobilindustrie gemacht. Seit Mitte der 1990er Jahre haben die Themen Wasserstoff und Brennstoffzelle, ausgelöst durch technische Durchbrüche bei der Brennstoffzellentechnologie und angetrieben von der kalifornischen Null-Emissions-Gesetzgebung, in der Automobilindustrie eine Dynamik gewonnen, die noch vor wenigen Jahren undenkbar schien. Inzwischen haben weltweit alle führenden Automobilunternehmen eigene Competence Center zur Entwicklung und zur Markteinführung der Brennstoffzellentechnologie aufgebaut. Momentan werden die ersten Kleinserien von Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb für den Test in weltweiten Demonstrationsprojekten aufgebaut. Daneben sind einzelne Brennstoffzellenfahrzeuge schon in Kundenhand übergeben worden. Wird die Brennstoffzelle die einhundertjährige Herrschaft des Verbrennungsmotors brechen, wie einzelne Vertreter der Automobilindustrie es verkünden? Vielleicht – denn noch sind zahlreiche Probleme und Fragen im Zusammenhang mit der neuen Technologie zu lösen und zu beantworten. Die Etablierung einer radikal neuen Antriebstechnologie in der Automobilindustrie erweist sich aber, nachdem die erste Euphorie verflogen ist, als Marathon- und nicht als Kurzstreckenrennen. Die Metapher des Rennens, die im Titel dieser Studie gewählt wurde, spielt aber auch auf den Wettbewerb als entscheidenden Treiber für die Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen der Automobilkonzerne an. „The best way to get the auto industry to stop dragging its feet is to have us race against each other. We love to do that, and we’re good at it“², so beschreibt der Vorstandsvorsitzende der Ford Motor Company, Bill Ford, die Bedeutung des Wettbewerbs für das Vorantreiben von Umwelt-Innovationen in der Automobilindustrie.

Zielsetzung dieser Studie ist es, diesen Wettbewerb bzw. die Aktivitäten und Strategien der einzelnen Wettbewerber darzustellen. Zusammen mit einer weiteren Studie zur Wasserstoff- und Brennstoffzellenförderpolitik in Deutschland, der EU, Japan und den USA³ ergibt sich damit eine fundierte empirische Grundlage für weitergehende Fragestellungen der Innovationsforschung, der Techniksoziologie und der sozialwissenschaftliche Mobilitätsforschung.

¹ Vgl. Traufetter, Gerald/Wüst, Christian (2000): Mikrowelle Serienmäßig. Spiegel-Gespräch mit Ferdinand Panik, dem damaligen Leiter des Brennstoffzellenprojektes bei DaimlerChrysler. In: Der Spiegel 36/2000, S. 168-170.

² Aus eine Rede anlässlich der 5th Annual Greenpeace Business Conference am 5. Oktober 2000 in London. Online-Dokument: [www.ford.com/en/ourCompany/environmentalInitiatives/environmentalActions/billFords SpeechToGreenpeace.htm](http://www.ford.com/en/ourCompany/environmentalInitiatives/environmentalActions/billFords%20SpeechToGreenpeace.htm).

³ Vgl. Weider, Marc/Metzner, André/Rammler, Stephan (2003): Die Brennstoffzelle zwischen Umwelt-, Energie- und Standortpolitik: Darstellung der öffentlichen Förderprogramme für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in Deutschland, der Europäischen Union, den USA und Japan. WZB Discussion paper SP III 2003-114. Berlin: WZB.

Die Letztere beschäftigt sich seit über 10 Jahren mit dem Automobil und der dazugehörigen Industrie. Im Blickfeld war dabei insbesondere die Beharrungskraft der einmal etablierten Gerätekonfiguration, die von Canzler und Knie mit dem Begriff „Rennreiselimousine“ beschrieben wurde. Nach und nach gerieten unterschiedliche Aspekte der Inertia dieses Paradigmas ins Blickfeld. Die ersten Ergebnisse dieser Forschung führten zur Prognose, dass das Ende des Automobils gekommen sei⁴, da die Automobilindustrie an einem überholten Produktleitbild festhielte und sich nicht von einem einmal etablierten „Stand der Technik“ lösen könne. Diese Prognose aus der ersten Hälfte der 1990er Jahre, in der das Auto auch sonst im Fokus der ökologischen Kritik stand und insbesondere die deutsche Automobilindustrie in einer tiefen strukturellen Krise steckte, erwies sich als falsch. Die Automobilindustrie und ihr Produkt überstanden Kritik und Krise mit erheblichen Prozessinnovationen, aber ohne radikale Produktinnovation. Im Folgenden geriet die kulturelle Verankerung des Automobils beim Nutzer und die Affinität von Selbstbeweglichkeit und Moderne in den Blick⁵. Da die Automobilindustrie in einem Zustand beharrte, den Canzler und Marz als „Stagnation“⁶ bezeichneten, löste sich die Mobilitätsforschung vom Fokus auf die technische Innovation und begann sich für soziale Innovationen in Bezug auf die Nutzung des Autos zu interessieren (Stichwort: vom privaten zum öffentlichen Automobil). Dies erklärt, warum die aktuellen technologiegetriebenen Entwicklungen in der Automobilindustrie noch wenig Beachtung in der sozialwissenschaftlichen Mobilitätsforschung gefunden haben. Dabei bieten die Entwicklungen rund um die Brennstoffzelle, die von Vertretern der Automobilindustrie als erste echte Alternative zum Verbrennungsmotor bezeichnet wird, vielleicht die einmalige Chance, den Transformationsprozess des großtechnischen Systems Automobil und einen lang geforderten grundlegenden Technologiewechsel in „Echtzeit“ sozialwissenschaftlich zu begleiten. Die vorliegende Studie bietet mit einer umfassenden Darstellung des empirischen Geschehens zu Wasserstoff und Brennstoffzelle in der Automobilindustrie die Möglichkeit eines Einstiegs in das Thema.

Dabei beruht die Studie, der Aktualität des Themas geschuldet, auf einer Auswertung und Analyse von zugänglichen Veröffentlichungen und Internet-Publikationen der Hersteller, auf der nur sehr begrenzt vorhandenen Literatur zum Thema, auf Zeitungs- und Zeitschriftenartikel, Konferenzberichten, einschlägigen Infodiensten, wie Hydrogen & Fuel Cell Letter, HyWeb-Gazette, Wasserstoff-Spiegel und Brennstoffzellen Newsletter⁷ und zahlreichen Internetquellen mit Stand vom 30.11.2003.

⁴ Vgl. Canzler, Weert/Knie, Andreas (1994): Das Ende des Automobils: Fakten und Trends zum Umbau der Autogesellschaft. Heidelberg: Müller.

⁵ Vgl. Buhr, Regina/Canzler, Weert/Knie, Andreas/Rammler, Stephan (1999): Bewegende Moderne: Fahrzeugverkehr als soziale Praxis. Berlin: edition sigma; Rammler, Stephan (2001): Mobilität und Moderne: Geschichte und Theorie der Verkehrssoziologie. Berlin: edition sigma.

⁶ Vgl. Canzler, Weert/Marz, Lutz (1996): Festgefahren? Der Automobilpakt im 21. Jahrhundert. WZB Discussion paper: FS II 96-108. Berlin: WZB.

⁷ Der Hydrogen & Fuel Cell Letter veröffentlicht die monatlichen Top-Stories online unter: www.hfcletter.com. Wasserstoff-Gazette, Wasserstoff-Spiegel und Brennstoffzellen Newsletter sind alle komplett im Internet zu finden: www.hyweb.de/Neuigkeiten/main-h2gazetd.html; www.dwv-info.de/wss.htm; www.fuelcelltoday.com.

Die Studie ist wie folgt aufgebaut: In dem dieser Einleitung folgenden Kapitel wird zunächst der gesellschaftliche Diskurs in Deutschland zum Thema automobiler Anwendung von Wasserstoff und Brennstoffzelle nachgezeichnet. Darauf folgt ein kurzer historischer Abriss zur Brennstoffzelle und wie diese zum Automobil kam. Eine Beschreibung der Entwicklung in den 1990er Jahren zum Thema alternative Antriebe in der Automobilindustrie und der entstehenden Dynamik des Themas Brennstoffzelle in den letzten Jahren schließt sich an. Im dritten Kapitel, dem Hauptteil dieser Studie, werden in alphabetischer Reihenfolge die Aktivitäten und Strategien der einzelnen Automobilkonzerne, die sich im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzelle engagieren, beschrieben. Dabei spiegeln die jeweiligen Abschnitte auch die Informationspolitik und Vermarktung des eigenen Engagements der Automobilunternehmen wieder. Dieses Kapitel versteht sich eher als ‚Nachschlagewerk‘, wobei den einzelnen Abschnitten vorangestellte Überblickstabellen Basisinformationen zu jedem Hersteller geben. Im vierten Kapitel werden in Schaubildern vorhandene Kooperationen dargestellt und die Strategien der verschiedenen Hersteller verglichen. Im abschließenden Kapitel wird ein kurzer Ausblick über die weitere Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie gegeben. Hierzu wird zum einen ein Marktszenario für die Verbreitung von Brennstoffzellenfahrzeugen vorgestellt und zum anderen ein wahrscheinlicher Diffusionspfad der Brennstoffzellentechnologie aufgezeigt.

Die Studie bemüht sich um eine balancierte Darstellung des Geschehens bezüglich Wasserstoff und Brennstoffzelle in der Automobilindustrie. Falls dies an einzelnen Stellen nicht gelungen sein sollte, ist dies dem Erstautor zuzuschreiben, der wesentliche Inhalte und Einschätzungen dieser Studie erarbeitet hat. Den Autoren ist bewusst, dass die Breite der Thematik sowie die Dynamik im Geschehen mit Sicherheit keine vollständige Darstellung zulässt. Für Hinweise, Ergänzungen und Anregungen sind die Autoren von daher dankbar.

2 Brennstoffzelle und Automobilindustrie

2.1 Der gesellschaftliche Diskurs um Wasserstoff und Brennstoffzelle in Deutschland

Solare Wasserstoffwirtschaft und Brennstoffzellentechnologie umgibt in der öffentlichen Debatte das Mythos von Utopie und Zukunftstechnologie. In der gesellschaftlichen Diskussion, festgemacht an Presse- und Medienbeiträgen, sind beide äußerst positiv besetzt und mit großen Erwartungen und Hoffnungen versehen. So wird seit einigen Jahren bei Diskussionen um Verknappung der Erdölreserven, Treibhauseffekt und der geopolitischen Unsicherheiten in erdölfördernden Regionen immer wieder die Vision einer solaren Wasserstoffwirtschaft und die Zukunftstechnologie Brennstoffzelle in den Medien beschworen. Zuletzt hat dies mit hoher medialer Resonanz der amerikanische Wissenschaftsjournalist Jeremy Rifkin

anlässlich der Veröffentlichung seines aktuellen Buches „Die H₂-Revolution“ getan⁸. Aber auch in der Werbung oder in Kinofilmen wird dieses positive Image genutzt⁹.

Besondere Aufmerksamkeit in der öffentlichen Diskussion genießen dabei die inzwischen milliardenschweren und mit entsprechender Öffentlichkeitsarbeit versehenen Entwicklungsanstrengungen der Automobilindustrie. Dabei ist der Automobilantrieb von allen möglichen Anwendungsfeldern der Brennstoffzelle die Applikation, die technisch am schwierigsten umsetzbar ist¹⁰. Trotzdem ist das Interesse aufgrund der hohen Symbolik und Bedeutung des Automobils und der Automobilität für die moderne Gesellschaft in diesem Bereich besonders hoch. Zudem verspricht das wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeug „Genuss ohne Reue“, für das, seit der erheblichen ökologischen Kritik und intensiven Umweltdiskussion um das Automobil Anfang der 1990er Jahre, ökologisch sensibilisierte Gewissen der Industrie und der Nutzer. Das wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeug wäre als Null-Emissionsfahrzeug, insbesondere wenn der Wasserstoff regenerativ hergestellt würde, das Öko-Auto schlechthin. Neben den ökologischen Folgeproblemen der Automobilnutzung wären mit Wasserstoffwirtschaft und Brennstoffzellenfahrzeug auch die Abhängigkeitsproblematik von knapper werdenden fossilen Brennstoffen lösbar. Was das Brennstoffzellenauto zudem besonders attraktiv für Hersteller und Nutzer macht, ist, dass wesentliche Elemente des Paradigmas der „Rennreiselimousine“¹¹ nicht verlassen werden müssen. Zwar handelt es sich beim Wechsel des Antriebes vom Verbrennungsmotor zu Brennstoffzelle und Elektromotor um einen disruptiven Technologiesprung, und dieser Wechsel des technischen Kerns eines Automobils würde den Paradigmenwechsel in der Automobiltechnik von Mechanik zu Elektronik erheblich befördern, aber Brennstoffzellenfahrzeuge werden sich in den Nutzungseigenschaften nicht, so das erklärte Ziel der Automobilindustrie, vom etablierten Universalauto unterschei-

⁸ Für Rifkin sind die „meisten Probleme der Menschheit ... mit drei Dingen verknüpft“, und zwar „Öl, Öl und Öl“ (Zitiert in Wüst, Christian (2002): Knallgas im Irrgarten. In: Der Spiegel 38/2002, S. 173). Rifkin sieht die Gesellschaft am Anfang einer radikalen Energierevolution weg von fossilen Brennstoffen hin zu Wasserstoff. Dabei ist Wasserstoffenergie für ihn nicht nur ein Ausweg aus der Abhängigkeit von zunehmend umkämpften, knapper werdenden Erdölressourcen und der zunehmenden globalen Erwärmung, sondern dank der Dezentralität der Brennstoffzellentechnik auch eine Form der Demokratisierung der Energietechnik (Vgl. Rifkin, Jeremy (2002): Die H₂-Revolution: Wenn es kein Öl mehr gibt. Mit neuer Energie für eine gerechte Weltwirtschaft. Frankfurt/New York: Campus; Lehming, Malte (2002): „Wir brauchen eine Energierevolution“: Wasserstoff statt Öl oder Die Lehren aus dem 11. September. Ein Gespräch mit Jeremy Rifkin. In: Tagesspiegel 03.09.2002). Kritik an der einseitigen Fixierung von Rifkin auf die Wasserstofftechnologie als Deus ex Machina der künftigen Weltenergieversorgung übt Hermann Scheer, Solarenergieexperte der SPD-Bundestagsfraktion (Scheer, Hermann (2002): An der Wasser(stoff)scheide: Der Ökorevolutionär Jeremy Rifkin setzt bei der Energiegewinnung einseitig auf die H₂-Option. Aber warum kompliziert, wenn es auch einfacher geht? In: ZeitLiteratur Oktober 2002, S. 87-88).

⁹ So wirbt der Energiekonzern RWE in seiner „Imagine“-Kampagne mit Brennstoffzelle im Einkaufswagen und Wasserschlauch in der Tanköffnung eines Autos. Im Kino fährt in Steven Spielbergs „Minority Report“ der Schauspieler Tom Cruise ein Zukunftsmobil mit Brennstoffzellenantrieb der Marke Toyota Lexus.

¹⁰ Den höchsten Wirkungsgrad erreicht die Brennstoffzelle, wenn sie konstant im optimalen Lastenbereich, dem so genannten „Sweet Spot“, läuft. Im Vergleich zu stationären Anwendungen erweisen sich die dynamischen Bedingungen im Automobil – häufiger Wechsel zwischen Minimal- und Höchstleistung – für den Einsatz der Brennstoffzelle als wesentlich schwieriger.

¹¹ Vgl. Canzler, Weert/Knie, Andreas (1994): Das Ende des Automobils: Fakten und Trends zum Umbau der Autogesellschaft. Heidelberg: Müller.

den. Denn im Gegensatz zu Batterie-Elektrofahrzeugen mit ihrer geringen Reichweite hofft man mit dem brennstoffzellenbetriebenen Automobil die Reichweite, Beschleunigung und das Raumangebot des herkömmlichen Automobils zu erreichen. Damit wäre man aber weiterhin im bekannten Paradigma. Der Kunde hätte weiter ein Universalfahrzeug mit den gewohnten Eigenschaften, und die Automobilindustrie könnte weiter ihr Kerngeschäft betreiben – Autos verkaufen.

Neben diesem visionären Charakter, den Wasserstoffwirtschaft und Brennstoffzelle in der öffentlichen Diskussion angenommen haben, verspricht der Einsatz der Brennstoffzelle im Automobil auch tatsächliche technische Vorteile. Hier ist in besonderer Weise die höhere Energieeffizienz, also den höheren Wirkungsgrad der Brennstoffzelle im Vergleich zum Verbrennungsmotor, zu nennen. Brennstoffzellen sind elektrochemische Energieumwandler, die die chemische direkt in elektrische Energie umwandeln. Damit vermeiden sie den Umweg konventioneller Motor-Generator-Einheiten über Wärme und kinetische Energie. Zudem sind Brennstoffzellen nicht durch den so genannten Carnot-Faktor eingeschränkt, der aus thermodynamischen Gründen den Wirkungsgrad aller Wärmekraftmaschinen, wie den Verbrennungsmotor, begrenzt¹². Konkret heißt dies, dass der Verbrennungsmotor einen Antriebs-Nutzungsgrad von 22 % (Benzinmotor) bzw. 25 % (Dieselmotor) hat. Die Brennstoffzelle hat mit Wasserstoff betrieben in der mobilen Anwendung einen Nutzungsgrad von fast 40 %¹³. Ein weiterer Vorteil der Brennstoffzelle an sich ist ihr modularer Aufbau, der eine sehr gute Anpassung an unterschiedliche Leistungs- und Größenanforderungen ermöglicht¹⁴. Da der Brennstoffzellen-Antrieb zudem über weniger bewegliche Mechanik (Kolben, Kurbel- oder Nockenwelle) verfügt, ist der Verschleiß und die Wartungsintensität, aber auch die Lärmemission bedeutend geringer. Brennstoffzellenfahrzeuge sind Elektrofahrzeuge. Die Elektromotoren haben zahlreiche Vorteile gegenüber dem Verbrennungsmotor, wie eine sehr gute Fahrdynamik, hohen Komfort des Antriebsstranges und lineare Leistungsentwicklung. Neben diesen inhärenten Eigenschaften, dem schon angesprochenen Vorteil der Emissionsfreiheit und der längerfristigen Option, die benötigten Kraftstoffe aus regenerativen Quellen zu gewinnen, ermöglicht die Brennstoffzelle auch bei Fahrzeugarchitektur und Fahrzeugaufbau Neuerungen. Zum einen ist durch die Brennstoffzelle elektrische Energie während der Fahrt und im Stillstand im Fahrzeug in hohem Maße verfügbar, was dem wachsenden Anteil an Elektronikkomponenten im Automobil entgegenkommt. Zum anderen ermöglicht der Wechsel von Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle und Elektromotor eine größere Designfrei-

¹² Vgl. Kohlhoff, Jürgen (1997): Brennstoffzellen. Bericht des Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (INT) über Neue Technologien. Online-Dokument: www.z-punkt.de/download/brennstoffzellen.pdf; Dietrich, Philipp/Scherer, Günter G./Boulouchos, Konstantinos (2002): Antriebsstrategien für eine umweltfreundliche Mobilität. In: Automobiltechnische Zeitung Jahrgang 104 7-8/2002, S. 622-641.

¹³ Vgl. Paulus, Ingrid (2003): Innovation und Effizienzsteigerung – Evolution der Fahrzeugkonzepte. In: TÜV Süddeutschland (Hrsg.): Energiewelt Wasserstoff: Wissen, Technologie, Perspektive. Brennstoffzellen und Verbrennungsmotoren. München, S. 44/45. Der theoretisch maximale Wirkungsgrad läge beim Benzinmotor bei 30 %, beim Dieselmotor bei 40 % und bei der Brennstoffzelle (nur der elektrische Wirkungsgrad) bei 60 %. Bei stationären Anwendungen kann die Brennstoffzelle wegen der Nutzung der Abwärme sogar einen Gesamtwirkungsgrad von bis zu 90 % erreichen.

¹⁴ Vgl. TÜV Süddeutschland (2003): Energiewelt Wasserstoff: Wissen, Technologie, Perspektive. Brennstoffzellen und Verbrennungsmotoren. München.

heit. Während beim herkömmlichen Automobil das Fahrzeug um die mechanischen Notwendigkeiten, wie Motorblock, Getriebe und Lenkung, herumgebaut werden muss, kann ein Brennstoffzellenfahrzeug wesentlich flexibler gestaltet werden. In Verbindung mit der Drive-by-wire-Technologie, dies zeigt das von GM präsentierte Fahrzeugkonzept „Autonomy“, entsteht das Potential für revolutionär neue Fahrzeugkonzepte (vgl. Kapitel 3.5.3). Diese Möglichkeit eines Purpose-Designs ist aber von den Automobilherstellern bis dato nur in begrenztem Maße realisiert worden.

Trotz dieser Vorteile ist das Brennstoffzellen-Automobil im gesellschaftlichen Diskurs in Deutschland nicht unumstritten¹⁵. Ohne hier die gesamte Diskussion darstellen zu wollen, sollen doch die Argumente der Gegner einer Förderung der Brennstoffzellen-Technologie im automobilen Bereich genannt werden. Der prominenteste Kritiker ist das deutsche Umwelt-Bundesamt (UBA). In einer Ende der 1990er Jahre gemachten Studie, in der Eigenschaften des Brennstoffzellenfahrzeuges und eines verbesserten konventionellen Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor für das Jahr 2005 verglichen werden, nennt das UBA zwei Hauptkritikpunkte gegen den Einsatz der Brennstoffzelle im Automobil¹⁶. Zum einen sei dies die Energieeffizienz über die gesamte Energiekette von Wasserstoff und zum zweiten die Kosteneffizienz aus Umweltsicht. Der Energiegewinn durch den höheren Wirkungsgrad der Brennstoffzelle gehe durch den Energieaufwand bei der Bereitstellung des Wasserstoffs wieder verloren. Die Herstellung des Wasserstoffs mittels Elektrolyse oder durch Reformierung von Kohlenwasserstoffen sei, so das UBA, äußerst ineffizient. Je nach Herstellungsart wäre der Energieaufwand für die Bereitstellung des Wasserstoffs zwei- bis viermal höher als beim Benzin. Zudem soll regenerativ erzeugte Elektrizität, die zur Zeit sowieso erst einen kleinen Anteil am Energiemarkt ausmacht, nicht für die verlustreiche Herstellung von Wasserstoff sondern als Ersatz für andere fossile Energieträger bei der Elektrizitätsherstellung eingesetzt werden. „Aus Sicht des Umweltschutzes ist daher nach heutigem Kenntnisstand der Einsatz von Wasserstoff im Verkehr aufgrund der hohen Energieverluste bei der Herstellung und Aufbereitung des Energieträgers nicht zu befürworten“, so das Fazit des UBA. Auch bei der Kosten-Nutzen-Analyse schneidet der Brennstoffzellenantrieb in der UBA-Studie schlecht ab. Das UBA kommt bei seinen Berechnungen zu dem Ergebnis, dass in den nächsten 10 bis 20 Jahren „Emissionsminderung und Ressourcenschutz wesentlich kostengünstiger [und schneller] durch verbrauchsoptimierte Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor mit niedrigsten Abgasemissionen (ULEV- „Ultra Low Emission Vehicle“ bzw. EURO 4-Standard) realisiert werden können als durch Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb¹⁷.

¹⁵ In den USA werden von Kritikern ähnliche Argumente, wie sie auch in der deutsche Debatte auftauchen, genannt.

¹⁶ Vgl. o.V. (1999): Reduktionspotentiale der Vergleichsfahrzeuge während der Lebensdauer von 10 Jahren. Chance für die Umwelt? Online Dokument: umweltbundesamt.de/uba-info-daten/brennstoffzelle.htm; Frühschütz, Leo (1998): Noch Klärungsbedarf bei der Energie-Bilanz: Kritik des Umwelt-Bundesamtes am Brennstoffzellen-Auto/Daimler-Benz sieht dagegen große Chancen. In: Frankfurter Rundschau vom 25./07.1998.

¹⁷ Zu einem ähnlichen Resümee kommt das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie in einer im September 2003 veröffentlichten Studie zu zukünftigen Kraftstoffalternativen (vgl. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (2003): Bedeutung von Erdgas als neuer Kraftstoff im Kontext einer nachhaltigen

Kritisch zu Wasserstoff und Brennstoffzelle im Automobil stehen auch die Umweltverbände. So ist für Greenpeace das Wasserstoffauto eine „Scheinlösung“, die bewusst von Interessensgruppen wie Automobilindustrie, Mineralölkonzernen und Stromversorgern zur „Verwirrung der Öffentlichkeit“¹⁸ genutzt wird. Besonders der Automobilindustrie macht Greenpeace den Vorwurf, „mit der Diskussion um die Brennstoffzelle die Frage der Lösungsansätze für unsere Probleme hier und jetzt zu vernebeln“. Anstatt diejenigen Techniken zur Verbrauchs- und Emissionsminderung zu nutzen, die heute vorhanden und wie das von Greenpeace vorgestellte SmILE-Konzeptfahrzeug auch umsetzbar sind, würde eine Illusion vermarktet. Diese Manipulation habe dazu geführt, so stellt Greenpeace fest, dass die „Schlagworte ‚Wasserstoff‘ und ‚Brennstoffzelle‘ [...] sich in der breiten Öffentlichkeit eines ausgesprochenen Positiv-Images“ erfreuen. Dabei würde die Problematik der großflächigen Wasserstoffherstellung, die besonderen Schwierigkeiten des Einsatzes der Brennstoffzelle im mobilen Bereich und die ungewissen Erfolgsaussichten der Forschungsaktivitäten zur Brennstoffzellentechnologie von den Protagonisten der Wasserstoffwirtschaft ausgeblendet. Greenpeace kommt schlussendlich zu einer ähnlichen Forderung wie das UBA: Wenn Wasserstoff und Brennstoffzelle, dann in stationären Anwendungen. Für den Verkehrsbereich sei eine Erhöhung der Effizienz mit vorhandenen Technologien und eine Reduzierung des motorisierten Individualverkehrs vorzuziehen.

Auch wenn die Kritik an vielen Punkten, wie der Frage nach der großflächigen (regenerativen) Wasserstoffproduktion, berechtigt ist, greift die Argumentation der Kritiker an zwei Punkten zu kurz. Zum einen brauchen radikale Innovationen, wie sie die Brennstoffzelle darstellt, einen langfristigen Horizont, denn ihr Potential wird nur erfahrbar im langfristigen Innovationsprozess. Zum zweiten wird besonders von Greenpeace die Rolle der Nutzer bei dem Siegeszug der individuellen Mobilität in der modernen Gesellschaft unter- und die der Automobilhersteller überschätzt. Unter dieser Fehleinschätzung litt schon die Kritik am Automobil und der Automobilindustrie Anfang der 1990er Jahre. Der Automobilnutzer ist nicht Opfer der Manipulation der Autoindustrie, sondern trägt mit dem Wunsch nach Selbstbeweglichkeit seinen Teil zum Beharrungsvermögen des etablierten Paradigmas „Rennreiselimousine“ bei¹⁹. Diese Erkenntnis hat mit dazu beigetragen, dass die Grünen „nach langen Diskussionen eine behutsame Wende im Umgang mit dem Auto vollzogen. Es wuchs die Einsicht, dass grüne Verkehrspolitik nicht gegen die Bedürfnisse von Millionen von Bürgern

Energieversorgung. Wuppertal. Kurzzusammenfassung als Online-Dokument:
www.erdgasfahrzeuge.de/starhtml/pdfs/WI_Report_deu.pdf.

¹⁸ Vgl. Lohbeck, Wolfgang/Hubmann, Günter (2000): Die Brennstoffzelle aus Sicht von Greenpeace. In: Flotow, Paschen/Steger, Ulrich (Hrsg.): Die Brennstoffzelle – Ende des Verbrennungsmotors? Automobilhersteller und Stakeholder im Dialog. Bern/Stuttgart/Wien: Haupt, S. 79-85.

¹⁹ „Insgesamt ist davon auszugehen, dass es nur eine sehr kleine Gruppe von Kunden gibt, die zugunsten von Umweltverträglichkeit Qualitäts- und Komforteinbußen hinnehmen. ... Vom Kunden jedenfalls ist nicht zu erwarten – dies zeigen Erfahrungen mit anderen alternativen Antrieben-, dass es für einen neuen Antrieb eine höhere Zahlungsbereitschaft als für einen konventionellen Antrieb hat; es sei denn, er hat ein sehr spezifisches Interesse, sein Umweltbewusstsein dadurch zu dokumentieren“ (Flotow, Paschen von (2000): Die Brennstoffzelle – Stand und Perspektiven der Debatte. In: Flotow, Paschen von/Steger, Ulrich (Hrsg.): Die Brennstoffzelle – Ende des Verbrennungsmotors? Automobilhersteller und Stakeholder im Dialog. Bern/Stuttgart/Wien: Haupt, S. 138/139).

gemacht werden kann²⁰. Im Bezug auf Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik im Automobil, bzw. Effizienzsteigerung und größere CO₂-Einsparungen in der Automobiltechnik fordern die Grünen, und dem schließen sich die Autoren an, eine Doppelstrategie: „Effizienzverbesserung und Systemwechsel sind keine Alternativen, sondern bilden einen Zusammenhang und gleichzeitig eine förderliche Konkurrenzsituation. Also: Effizienzentwicklung der Verbrennungsmotoren weiter forcieren und zugleich Null-Emissions-Fahrzeuge entwickeln und einführen“²¹.

Nach dieser überblicksartigen Darstellung des gesellschaftlichen Diskurses um die Brennstoffzelle in Deutschland soll vor dem Blick auf die Aktivitäten und Strategien der einzelnen Automobilunternehmen in Kapitel 3 noch ein allgemeiner Überblick über die Anfänge und die zunehmende Dynamik der Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten in der Automobilindustrie gegeben werden.

2.2 Geschichte und Treiber des Themas Brennstoffzelle in der Automobilindustrie

Schon vor Erfindung des Otto- und Dieselmotors war das Prinzip der Brennstoffzelle bekannt. Bereits 1839 entwickelte und demonstrierte der englische Physiker Sir William Grove das Prinzip der Brennstoffzelle. Es dauerte aber über ein Jahrhundert, bis es zur ersten kommerziellen Anwendung kam. Im Rahmen des amerikanischen Raumfahrtprogramms der NASA wurde die Brennstoffzelle in den 1960er Jahren zunächst an Bord von Satelliten und später im Rahmen des Apollo-Programms eingesetzt. Die Versuche der Nutzung der Brennstoffzelle im mobilen Bereich unter irdischen Bedingungen waren bis Mitte der 1990er Jahre an einer Hand abzählbar. 1959 baute der amerikanische Hersteller für landwirtschaftliche Fahrzeuge Allis-Chalmers das weltweit erste terrestrische Brennstoffzellenfahrzeug – einen Traktor. Der einzige Autokonzern, der sich schon damals mit der Brennstoffzelle beschäftigte war GM. Nachdem das Unternehmen in den 1960ern Erfahrungen mit der Brennstoffzellentechnologie gesammelt hatte, baute man 1968 das erste fahrfähige Brennstoffzellenfahrzeug der Automobilindustrie – den Electrovan (vgl. Kapitel 3.5.3).

Erste Vorläufer der Beschäftigung mit Wasserstoff als Treibstoff für Automobile gab es hingegen schon am Anfang des letzten Jahrhunderts. 1929 ließ der deutsche Ingenieur Rudolf Erren seinen Wasserstoff-Knallgasmotor mit Zweitaktarbeitsverfahren in Berlin patentieren²². Relevanz gewann das Thema Wasserstoff als alternativer Treibstoff für die Automobilindustrie aber erst nach den beiden Ölpreisschocks Anfang der 1970er Jahre. Drei Automo-

²⁰ Rezzo, Schlauch (2003): Unsägliche Vehikel: Die deutsche Autoindustrie setzt mit Geländewagen nach US-Muster ihren Ruf aufs Spiel. In: Die Zeit vom 13.02.2003.

²¹ Bundestagsfraktion Bündnis90/Die Grünen (2002): Solarwasserstoff – Energie für die Welt von Morgen. Thesen von Michael Hustedt, Albert Schmidt und Rezzo Schlauch. Online-Dokument: www.gruene-fraktion.de/rsvgn/rs_datei/o,,355,00.pdf.

²² Vgl. Burmeister, Wolfgang (2003): Der Weg zum Wasserstoff – ein historischer Rückblick. In: TÜV Süddeutschland (2003): Energiewelt Wasserstoff: Wissen, Technologie, Perspektive. Brennstoffzellen und Verbrennungsmotoren. München

bilunternehmen beschäftigten sich in der Folgezeit mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren²³. Der japanische Hersteller Mazda baute Anfang der 1990er Jahre zwei wasserstoffbetriebene Prototypen mit Wankelmotoren (vgl. Kapitel 3.4.5.1). Schon früher hatten sich zwei deutsche Unternehmen dem Wasserstoffthema angenommen. Unmittelbar nach der Ölkrise starteten BMW und Daimler-Benz mit ihren Wasserstoffaktivitäten. Ein Jahr nach dem Beginn der Aktivitäten präsentierte BMW 1979 den ersten Prototypen. Diesem sind bis heute fünf weitere Generationen von Fahrzeugen mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren gefolgt (vgl. Kapitel 3.1.3). Daimler-Benz begann 1974 mit eigenen Wasserstoffaktivitäten und rüstete Anfang der 1980er Jahre zehn Fahrzeuge auf den Betrieb mit Wasserstoff um. Diese nahmen von 1984 bis 1988 an einem Demonstrationsprojekt in Berlin teil (vgl. Kapitel 3.2.3). Nach dem Auslaufen mehrerer öffentlich geförderter Großforschungsprojekte in Deutschland und der Abnahme der Dringlichkeit Alternativen zum Erdöl zu finden, geriet Anfang der 1990er Jahre ein anderer alternativer Antrieb ins Blickfeld. Das Hauptaugenmerk der weltweiten Automobilindustrie richtete sich nun auf das Batterie-Elektrofahrzeug. Der Vorteil der lokalen Emissionsfreiheit von Elektrofahrzeugen machte diesen Antrieb, bei zunehmender Kritik an den ökologischen Folgewirkungen des Automobils, wie der klimarelevanten CO₂-Emissionen und des Smogs in Ballungsgebieten, attraktiv. Als besonderer Treiber für die Automobilindustrie erwies sich dabei die kalifornische Zero Emission Vehicle (ZEV)-Gesetzgebung²⁴. Das vom California Air Resource Board (CARB) formulierte und von der kalifornischen Regierung 1990 verabschiedete ZEV-Gesetz verpflichtet alle Automobilunternehmen auf dem kalifornischen Automobilmarkt zum Verkauf eines gewissen Prozentsatzes an Nullemissionsfahrzeugen. Kalifornien hat für die Automobilindustrie eine besondere Relevanz, da der amerikanische Bundesstaat zu den größten Automobilmärkten der Welt zählt, und zudem für den US-amerikanischen Markt Vorreiterwirkung hat. Auch wenn der Start dieser Verpflichtung von 1998 auf 2005 verschoben und die Anforderungen mit der Möglichkeit der Anrechnung von Partial Zero Emission Vehicle (PZEV) und Advanced Technology-Partial Zero Emission Vehicle (AT-PZEV) abgeschwächt wurden²⁵, trägt die kalifornische Gesetzgebung des „technology forcing“ doch entscheidend zu den Entwicklungsanstrengungen der Automobilindustrie bei. Diese konzentrierten sich Anfang der 1990er wie gesagt zunächst auf batteriebetriebene Elektrofahrzeuge, der Antriebsoption, die damals als einzige den Anforderungen der kalifornischen Nullemissions-Gesetzgebung entsprach. In Europa wurden in der ersten Hälfte der 1990er Jahre mehrere Großversuche mit Elektrofahrzeugen durchgeführt²⁶. Der

²³ Neben den drei Autokonzernen baut in Japan auch das Musashi-Forschungsinstitut zehn Fahrzeugprototypen mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren (vgl. www.herc.musashi-tech.ac.jp/main/HYDROCAR_e.html).

²⁴ Vgl. Cowley, Alison (2001): California's Zero Emission Vehicle Program: A Driving Force Behind Fuel Cell Development. Online-Dokument: www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/FCTFiles/FCTArticleFiles/Article_304_AlisonCowleyZEV0901.pdf.

²⁵ Vgl. Pressemitteilung des California Air Resources Board vom 24.04.2003: „ARB Modifies Zero Emission Vehicle Regulation“. Online-Dokument: www.arb.ca.gov/newsrel/nr042403.htm; vgl. auch Hydrogen & Fuel Cell Letter, Mai 2003.

²⁶ Einen Überblick über Entwicklungsanstrengungen zum Elektrofahrzeug und die Großversuche in Europa ist zu finden in: Hoogma, Remco/Kemp, Renè/Schot, Johan/Truffer, Bernhard (2002): Experimenting for Sustainable Transport. The Approach of Strategic Niche Management. London/New York: Spon Press.

deutsche Großversuch auf der Insel Rügen (1992-1996) mit einer Flotte von 60 Elektrofahrzeugen verschiedener deutscher Automobilhersteller bestätigte aber eher die Kritiker der Technologie und bedeutete das Ende der staatlichen Förderung. Der Misserfolg des Demonstrationsprojektes auf Rügen setzte sich aus verschiedenen Elementen zusammen²⁷. Als besonders problematisch erwies sich die Batterietechnologie selbst, die sich trotz jahrelanger staatlich geförderter Forschungsbemühungen zur Entwicklung von High-Performance-Batterien, während des Versuches als unausgereift herausstellte. So waren die Batterien zu teuer, zu schwer und ermöglichten nicht annähernd die Reichweite eines konventionellen Fahrzeuges, an dem die Fahrzeugperformance des Batterie-Elektrofahrzeug gemessen wurde. Damit war das Urteil der Automobilindustrie über das Batterie-Elektrofahrzeug gefällt: Die Technologie ist nicht marktfähig, da der Autokunde kein ‚Verzichtsauto‘ kauft²⁸. Die wenigen Elektroautomobile, die seitdem von einzelnen Automobilunternehmen zumeist im Hinblick auf die kalifornische Gesetzgebung doch auf den Markt gebracht werden, erreichen nur minimale Verkaufszahlen. Am erfolgreichsten ist dabei noch das französische Unternehmen PSA, das seit 1995 10.000 Elektrofahrzeuge verkauft hat. Dieser ‚Erfolg‘ ist aber in erster Linie einer gesetzlichen Verpflichtung von Flottenbetreibern in Frankreich zum Kauf von emissionsarmen Fahrzeugen zuzuschreiben.

Nach dem das Batterie-Elektrofahrzeug an der doppelten Hürde lokaler Emissionsfreiheit bzw. Nullemission und bewährter Eigenschaften des etablierten Automobils (Reichweite, Zuladung, Beschleunigung) gescheitert war, gewinnen ab Mitte der 1990er Jahre zwei andere Antriebsoptionen, bei denen es sich ebenfalls vollständig bzw. teilweise um Elektrofahrzeuge handelt, an Relevanz. Dies ist zum einen die Hybridtechnologie, die Verbrennungsmotor und Batterie verknüpft, bei der der japanische Hersteller Toyota Pionier mit der Markteinführung des ersten massengefertigten Hybridfahrzeuges, dem Toyota Prius, 1997 in Japan ist²⁹. Und

²⁷ Zu der Halbherzigkeit der Hersteller und der ausschließlichen Fokussierung auf die Antriebstechnologie kam ein mangelhaftes Erwartungsmanagement und eine gewisse „Konzeptlosigkeit“ der Politik (vgl. Schmid, Oliver (1996): Das E-Mobil ins Aus gerollt. In: Die Woche).

²⁸ Auch andere gesellschaftliche Akteure beurteilen die Technologie negativ. Politik und Umweltverbände kommen zum Schluss, dass beim deutschen Energiemix, die Gesamtemissionsbilanz von Elektrofahrzeugen gegen die Technologie spricht (vgl. Legat, Wilfried (1998): Elektroautos im Aufwind. In: Internationales Verkehrswesen (50) 6/98, S. 265-266).

²⁹ Ohne an dieser Stelle das Thema ICE-Hybridantrieb, also die Verknüpfung von konventionellem Verbrennungsmotor und Batterie-Elektroantrieb, vertiefen zu wollen, soll doch wegen der zunehmenden Relevanz dieser Technologieoption mit ein paar kurzen Anmerkungen auf diese eingegangen werden. Als Vorteile des ICE-Hybridantriebs erweisen sich die Möglichkeit der teilweisen Emissionsfreiheit, wenn das Fahrzeug im reinen Batteriebetrieb fährt, und die höhere Effizienz des Antriebs, durch das Zusammenspiel von Verbrennungsmotor und Batterie und der Energierückgewinnung bei Bremsen des Fahrzeugs. Diesen Vorteilen steht das höhere Gewicht und die höheren Kosten, die insbesondere durch die zusätzliche Batterie verursacht werden, als Nachteil gegenüber. Trotz dieser Nachteile sind inzwischen über 150.000 Hybridfahrzeuge weltweit verkauft worden, und sowohl Toyota wie auch Honda bringen Ende 2003 die zweite Generation ihres Hybridfahrzeuges auf den Markt. Insbesondere mit Blick auf den US-amerikanischen und speziell den kalifornischen Markt haben auch andere Automobilhersteller die Einführung von Hybridfahrzeugen angekündigt. In den USA könnte der Hybridantrieb, aufgrund seiner höheren Umweltverträglichkeit und der höheren Energieeffizienz, in die Rolle schlüpfen, die der Dieselmotor in Europa inne hat. Unklar ist, ob der ICE-Hybridantrieb nur eine Brückentechnologie bis zur Markteinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen bleibt oder sich längerfristig sogar als dominierender alternativer Antrieb durchsetzt (vgl. Kapitel 3.10.4).

zum anderen ist dies die Brennstoffzellentechnologie, bei der Daimler-Benz als Vorreiter auftritt. Beide Technologiepfade gewinnen in der Automobilindustrie seit Ende der 1990er Jahre zunehmend an Dynamik. Hierfür sind verschiedene „Treiber“ verantwortlich. Dies ist erstens die kalifornische ZEV-Gesetzgebung, die schon skizziert wurde. Zweitens sind es die ökologischen Folgewirkungen der weltweit zunehmenden Mobilität, wie globale Erwärmung bzw. der Treibhauseffekt, die zu verschärften Umweltgesetzgebungen aber auch zu einer Selbstverpflichtung zur CO₂-Reduktion der europäischen Automobilindustrie führen. Drittens die drohende Verknappung billiger fossiler Brennstoffe durch schwindende Erdölreserven und die zunehmende geopolitische Instabilität erdölfördernder Regionen. Als vierter und ganz wesentlicher Treiber erweist sich aber der Wettbewerb um die Technologie- bzw. Imageführerschaft zwischen den Automobilherstellern. So wird auf der einen Seite die Umweltperformance der Automobile zunehmend ein Feld des Technologiewettbewerbs. Automobilunternehmen sind an einer Sicherung des technischen Wissens und insbesondere an der Systemführerschaft im Antriebsbereich interessiert. Ein Wissensrückstand und mangelnde Kompetenz könnten, falls sich eine neue ökologisch effizientere Technologie durchsetzen sollte, zu erheblichen wirtschaftlichen Nachteilen führen³⁰. Auf der anderen Seite stehen Automobilunternehmen wegen des vorhandenen öffentlichen und politischen Drucks unter zunehmendem Zug- bzw. Rechtfertigungszwang, besonders wenn andere Hersteller Umwelt- und Effizienztechnologien auf dem Markt bringen und diese sich durchsetzen. Historisches Beispiel hierfür ist der Katalysator. Ein aktuelles Beispiel einer solchen Dynamik für den europäischen Markt ist der Rußpartikelfilter für Dieselfahrzeuge von Peugeot³¹. Ein weiteres Beispiel ist das Hybridfahrzeug selbst und dessen Markteinführung durch Toyota. In beiden aktuellen Fällen führt die demonstrierte Machbarkeit verbunden mit einer entschlossenen Markteinführung dazu, dass andere Automobilhersteller eigene Entwicklungsanstrengungen beginnen und die Markteinführung angekündigt haben.

2.3 Die zunehmende Dynamik des Themas Brennstoffzelle in den 1990er Jahren

Auch bei der Brennstoffzelle spielt der Wettbewerb eine entscheidende Rolle bei der zunehmenden Dynamik des Themas in der Automobilindustrie. Die Entwicklung in den letzten zehn Jahren lässt sich dabei in verschiedene Phasen einteilen. Bis Mitte der neunziger Jahre hatten sich alle großen Automobilkonzerne neben anderen alternativen Antrieben auch mit der Option Brennstoffzelle als Automobilantrieb befasst. „Eine realistische Chance wurde diesem

³⁰ Vgl. Flotow, Paschen von (2000): Die Brennstoffzelle – Stand und Perspektiven der Debatte. In: Flotow, Paschen von/Steger, Ulrich (Hrsg.): Die Brennstoffzelle – Ende des Verbrennungsmotors? Automobilhersteller und Stakeholder im Dialog. Bern/Stuttgart/Wien: Haupt, S. 137-148.

³¹ Auf dem Genfer Autosalon 2003 kündigten Toyota, Renault und nahezu alle deutschen Autohersteller an noch in diesem Jahr Partikelfiltersysteme vorzustellen (vgl. Wüst, Christian (2003): Brikett unterm Bodenblech. In: Der Spiegel 11/2003).

Antrieb allerdings nicht eingeräumt³². Zudem war die Euphorie um eine solare Wasserstoffwirtschaft, die den Treibstoff für die Brennstoffzelle liefern sollte, verflogen. Erst technologische Fortschritte in der Brennstoffzellentechnologie, die vor allem von dem kanadischen Unternehmen Ballard Power Systems erzielt wurden, das Engagement des Automobilherstellers Daimler-Benz und die strategische Allianz zwischen beiden Akteuren veränderten die Situation. Ballard³³ beschäftigte sich, zunächst im Auftrag des kanadischen Militärs, seit 1983 mit der Proton Exchange Membran (PEM)-Brennstoffzellentechnologie. Dabei knüpfte das Unternehmen an Entwicklungen und Patente an, die der US-Konzern General Electric im Rahmen ihrer Brennstoffzellenaktivitäten für die amerikanische Raumfahrt gemacht hatte. Die Entwickler von Ballard schafften es, die PEM-Brennstoffzelle leichter, kleiner und billiger zu machen. Dabei hatte man als Anwendung frühzeitig den Fahrzeugantrieb im Blick. Daimler-Benz beschäftigte sich seit Anfang der 1990er Jahre mit der Brennstoffzellentechnologie. Auch hier griff man auf die Erfahrungen zurück, die im Bereich Raumfahrt von der damaligen Konzerntochter Dornier in den 1980ern gemacht worden waren³⁴ (vgl. Kapitel 3.2.3). Nicht zuletzt durch die wirtschaftliche Krisensituation bei Mercedes Anfang der 1990er, entstand im Unternehmen die notwendige Offenheit für grundsätzliche Innovationen. Seit 1993 kooperiert Daimler-Benz mit dem damals noch relativ unbekanntem Unternehmen Ballard Power Systems. Diese Kooperation mündete 1997 in die sogenannte „Fuel Cell Alliance“ zwischen Daimler-Benz und Ballard. Nach sechs Monaten schloss sich auch Ford dieser Allianz an. Beide Autokonzerne investierten zusammen 750 Mio. US\$ in das kanadische Brennstoffzellen-Start up Unternehmen (vgl. Kapitel 3.2.3 & 3.4.4). Ebenfalls 1997 präsentierte Daimler-Benz erneut zwei Prototypen. Zum einen war dies der NECAR3, ein methanolbetriebener Brennstoffzellen-Pkw basierend auf der damals neu eingeführten A-Klasse, der im Gegensatz zu seinen beiden Vorgängern alltagstauglicher ist, und zum anderen den ersten Brennstoffzellenbus mit Namen „NEBUS“ („New Electric Bus“). Im selben Jahr stellte auch Toyota ein methanolbetriebenes Brennstoffzellenfahrzeug der Öffentlichkeit vor. Die Mischung aus Durchbrüchen bei der Brennstoffzellentechnologie, dem (finanziellen) Commitment von Daimler-Benz und Ford³⁵ und ersten Brennstoffzellenfahrzeugen auf der Straße³⁶, führte dazu, dass auch andere Wettbewerber begannen, die neue Technologie ernst

³² Flotow, Paschen von (2000): Die Brennstoffzelle – Stand und Perspektiven der Debatte. In: Flotow, Paschen von/Steger, Ulrich (Hrsg.): Die Brennstoffzelle – Ende des Verbrennungsmotors? Automobilhersteller und Stakeholder im Dialog. Bern/Stuttgart/Wien: Haupt, S. 139.

³³ Vgl. www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/FCTFiles/FCTArticleFiles/article_445_ballard.pdf.

³⁴ Vgl. Breuer, Reinhard/Deker, Uli (1994): Ohne Brennstoffzellen könnte unsere Mobilität in zwanzig Jahren in Frage stehen. Interview mit Forschungsdirektoren Dr. Michael Krämer und Dr. Volker Lehmann. In: Daimler-Benz HighTechReport 3/1994, S. 22-25.

³⁵ “‘It was an announcement to the industry that there was a technology here that we were very serious about,’ says Ross P. Witschonke, president of Ecostar Electric Drive Systems Co., created by Ford’s investment in the Ballard-Daimler Partnership. ‘\$ 420 million is like doing a car line’” (zitiert in All, Jeffrey (1998): Auto Makers Race to Sell Cars Powered by Fuel Cells. In: Wall Street Journal vom 15. März 1998).

³⁶ “‘Other auto makers began to take notice. ‘You started to see driveable hardware, and that really does gather attention,’ recalls Robert C. Purcell Jr., GM’s executive director of advanced-technology vehicles. ‘People started gaining confidence that maybe this technology could work’” (zitiert in All, Jeffrey (1998): Auto Makers Race to Sell Cars Powered by Fuel Cells. In: Wall Street Journal vom 15. März 1998).

zu nehmen und eigene Anstrengungen zu starten. Das „Wettrennen“³⁷ und die Euphorie um die Brennstoffzelle in der Automobilindustrie hatte begonnen.

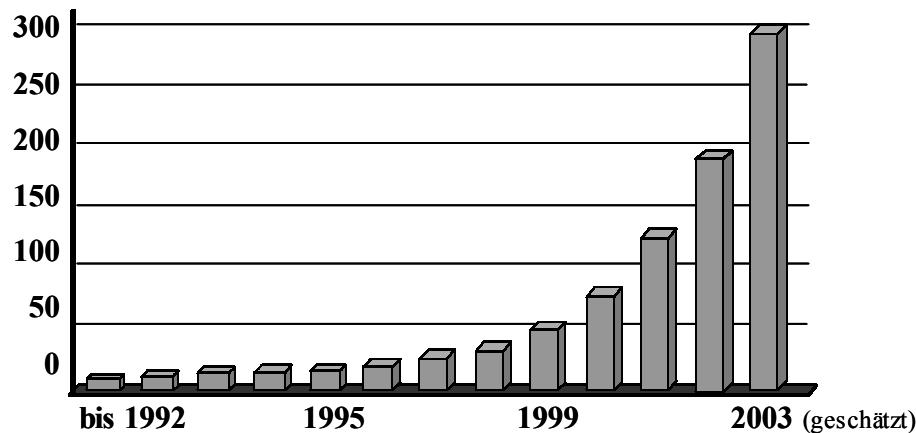


Bild 1: Kumulierte Anzahl von Brennstoffzellenfahrzeugen weltweit (Quelle: Fuel Cell Today³⁸)

Dass die Automobilhersteller die Brennstoffzelle ernster nehmen, als alle anderen bisherigen alternativen Antriebskonzepte, bestätigt ein Brancheninsider. „Doch dieses Mal, beteuert Bernd Gottschalk, Präsident des Verbandes der Automobilindustrie, ist es ernst. Wasserstoffantrieb und Brennstoffzellen seien ‚keine Eintagsfliegen, sondern Teil einer langfristigen Strategie‘ – die derzeit größte Baustelle der Autoindustrie“³⁹. In den Folgejahren präsentierten die meisten Automobilhersteller eine zunehmende Anzahl von Brennstoffzellen-Prototypen. Als Gegenstück zur Fuel cell alliance von DaimlerChrysler, Ford und Ballard bildete sich 1999 eine weitere Industriallianz mit der Kooperation von GM und Toyota. Die Dynamik des Themas Brennstoffzelle in der Automobilindustrie wurde zusätzlich angeheizt durch den Start der von DaimlerChrysler und Ford mitinitiierten California Fuel Cell Partnership im April 1999, der sich nach und nach fast alle großen Automobilunternehmen, auch die zunächst kritischen, anschlossen. Zusätzlich kündigten mehrere Automobilunternehmen für das Jahr 2004 die Markteinführung und den Beginn der Serienfertigung von Brennstoffzellenfahrzeugen an. Der Hype um die Brennstoffzelle in der Automobilindustrie erreichte seinen ersten Höhepunkt um die Jahrhundertwende. Die Brennstoffzelle wurde als „ganz große

³⁷ „We’re feeling we are out front right now,” says Ferdinand Panik, the frizzy-haired director of ... [DaimlerChrysler’s] fuel-cell program in Germany. ‘But it’s a race’” (zitiert in All, Jeffrey (1998): Auto Makers Race to Sell Cars Powered by Fuel Cells. In: Wall Street Journal vom 15. März 1998).

³⁸ Grafik ist folgendem Artikel entnommen: Cropper, Mark (2003): Fuel Cell Market Survey: Light Duty Vehicles. Online-Dokument: www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/FCTFiles/FCTArticleFiles/Article_546_MarketSurveyLightDutyVehicles.pdf.

³⁹ Vgl. Rosenkranz, Gerd (2001): Größte Baustelle. In: Der Spiegel 37/2001, S. 126-129. „Es scheint auch, dass derzeit der Wille, den Antrieb zur Serienreife zu bringen, eine höhere Dynamik hat, als bei der Entwicklung batteriegetriebener Elektrofahrzeuge und anderer alternativer Antriebe. Insofern spricht einiges dafür, dass der Technologiewettbewerb im Bereich Verbrauchs- und Emissionsreduktion aufgrund der Durchbrüche bei der Brennstoffzelle insgesamt einen deutlichen Schub bekommen hat“ (Flotow, Paschen von (2000): Die Brennstoffzelle – Stand und Perspektiven der Debatte. In: Flotow, Paschen von/Steger, Ulrich (Hrsg.): Die Brennstoffzelle – Ende des Verbrennungsmotors? Automobilhersteller und Stakeholder im Dialog. Bern/Stuttgart/Wien: Haupt, S. 148).

Alternative“ (DaimlerChrysler-Chef Jürgen Schrempp) für das 21. Jahrhundert bezeichnet und mit ihr werde „die einhundertjährige Vorherrschaft des Verbrennungsmotors“ beendet werden, wie Ford-Chairman Bill Ford damals verkündete⁴⁰.

2.4 Ungelöste Fragen: Marktreife der Technik, Wasserstoffspeicherung und Wasserstoffinfrastruktur

Die vorhandene Euphorie wich aber Anfang des neuen Jahrhunderts zunehmend einer realistischeren Einschätzung und einer längerfristigeren Perspektive. Zur Änderung der Perspektive trug insbesondere bei, dass die technische Entwicklung doch nicht so schnell voranschritt wie ursprünglich angenommen. Zwar gelten alle grundlegenden technischen Probleme als lösbar bzw. sind gelöst, aber für den Schritt zur Serienfertigung müssen neben Gewicht und Zuverlässigkeit besonders die Kosten noch erheblich reduziert werden. Das Brennstoffzellensystem allein kostet laut GM zur Zeit noch mindestens 375.000 US\$⁴¹. Auch Mercedes-Chef Jürgen Hubbert benennt die derzeitigen Kosten eines Brennstoffzellensystems mit „mehrere[n] hunderttausend Dollar pro Stück“⁴². Allein die Skaleneffekte einer Massenproduktion werden zur Kostenreduktion nicht ausreichen. Hierzu ist es notwendig, kostengünstigere Materialien für die Brennstoffzelle zu finden. Besonders das für die Beschichtung der Membranen benötigte Edelmetall Platin ist ein erheblicher Kostenfaktor⁴³.

Eine andere technische Frage, die noch nicht zufriedenstellend gelöst ist, ist die Wasserstoffspeicherung⁴⁴. Zwar hat Wasserstoff auf seine Masse bezogen einen großen Energieinhalt; auf das Volumen bezogen ist seine Energiedichte unter Normalbedingungen, insbesondere im Vergleich zu Benzin und Diesel, jedoch nur sehr gering (vgl. Bild 2). Um auf eine akzeptable Energiedichte zu kommen, die annähernd die Reichweite konventioneller Fahrzeuge ermöglicht, muss Wasserstoff entweder verflüssigt, also auf -253 Grad Celsius abgekühlt, oder extrem komprimiert werden. Beide Varianten der Wasserstoffspeicherung haben Vor- und Nachteile. Bei der Verflüssigung gehen bis zu 30 % der Energie verloren. Zudem bedarf es einer hocheffizienten Isolation, um Abdampfverluste durch Erwärmung und Diffusionsverluste zu verhindern. Mit flüssigem Wasserstoff (LH_2) lassen sich aber aufgrund der höheren Energiedichte deutlich höhere Reichweiten erzielen als mit komprimiertem Wasserstoff

⁴⁰ Beide Zitate aus Rosenkranz, Gerd (2001): Größte Baustelle. In: Der Spiegel 37/2001, S. 126-129.

⁴¹ Vgl. Fahey, Jonathan (2003): The \$375,000 Engine. In: Forbes Magazin vom 20.01.2003. Online-Dokument: www.forbes.com/forbes/2003/0120/046a_print.html.

⁴² Zitiert in Fritscher, Otto (2002): A-Klasse der Extra-Klasse: DaimlerChrysler startet Kleinserie mit Brennstoffzelle. In: Süddeutsche Zeitung vom 12./13. Oktober 2002. Im selben Artikel werden die Kosten des aktuellen DaimlerChrysler Brennstoffzellenfahrzeugs „F-cell“ mit gut einer Million Euro beziffert.

⁴³ „Im Brennstoffzellenmodul eines Forschungs-Pkw steckt derzeit etwa ein Pfund des Edelmetalls. Das allein kostet derzeit 10.000 Euro. Und dieser Preis könnte noch drastisch steigen, denn die Massenproduktion würde die weltweiten Platin-Reserven rasch schwinden lassen“ (Wüst, Christian (2002): Knallgas im Irrgarten. In: Der Spiegel 38/2002, S. 174).

⁴⁴ Vgl. zum Thema Wasserstoffspeicherung TÜV Süddeutschland (2003): Energiewelt Wasserstoff: Wissen, Technologie, Perspektive. Brennstoffzellen und Verbrennungsmotoren. München; DaimlerChrysler Communications (2002): Die Brennstoffzelle – Antrieb für die Zukunft.

(CGH₂). Die Komprimierung von Wasserstoff ist technisch einfacher zu handhaben. Nachteile sind der große Platzbedarf des Tanks und die nicht frei wählbare Tankform. Zudem müssen enorm hohe Drücke gehandhabt werden. Aktuell sind erste 700 bar-Wasserstofftanks vorgestellt worden. Die Entwicklung beider Arten von Wasserstofftanks bewegt sich dabei in einem Spannungsfeld zwischen der Erzielung einer maximalen Reichweite bei gleichzeitiger Minimierung von Gewicht, Tankvolumen und Kosten.

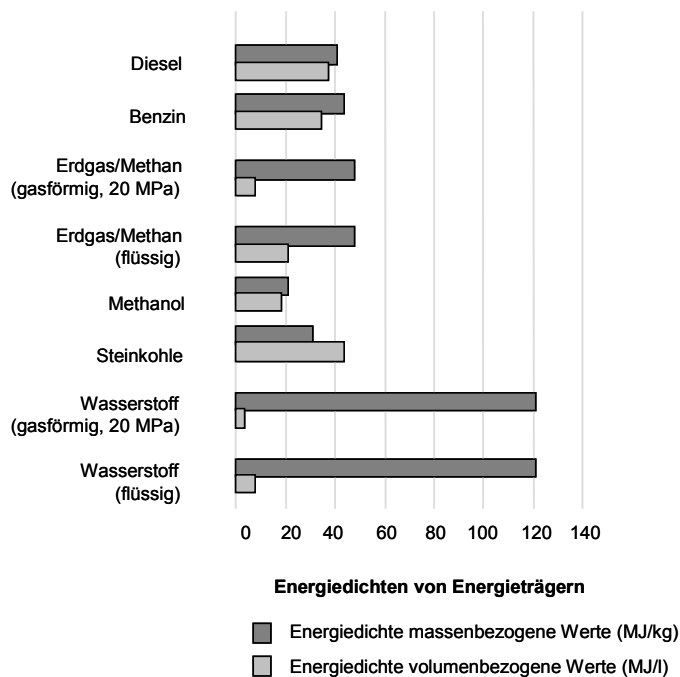


Bild 2: Energiedichte von Energieträgern (Quelle: TÜV Süddeutschland)

Eine andere schon erprobte Form der Wasserstoffspeicherung ist der Metallhydrid-Speicher. Dabei wird der Wasserstoff an Metalle gebunden, das heißt beide Stoffe bilden ein Metallhydrid. Durch Erhitzen wird der Wasserstoff wieder aus der Verbindung mit dem Metall gelöst. Der Vorteil dieses Speichers ist der niedrige Druck bei der Handhabung. Als Nachteil erweist sich bisher, dass der Speicher zu schwer und zu teuer für die praktische Anwendung ist. Im Forschungsstadium ist dagegen noch eine andere Alternative – die Wasserstoffspeicherung in Kohlenstoff-Nanoröhren (Fullerene). Hierbei handelt es sich um Kohlefaserröhrchen, in die Wasserstoffatome eingelagert werden. Die bisherigen Forschungsergebnisse zeigen jedoch noch keine Ansatzpunkte für eine praktische Anwendung. Neben der Einlagerung von Wasserstoff in Metallhydriden und Kohlenstoff-Nanoröhren gibt es noch weitere Formen der chemischen Wasserstoffspeicherung. Diese haben zwar den Nachteil, dass Reformersysteme an Bord der Brennstoffzellenfahrzeuge mitgeführt werden müssen, der Wirkungsgrad nicht so hoch ist und die völlige Emissionsfreiheit verloren geht, aber da es sich um flüssige chemische Wasserstoffspeicher handelt, lässt sich die Speicherung des Kraftstoffes wesentlich leichter gestalten. Schon demonstrierte Möglichkeiten dieser Form der chemischen Wasserstoffspeicherung sind Methanol, Benzin und Natriumborhydrid. Methanol (CH₃OH) lässt sich prinzipiell aus jeder Kohlenstoffquelle gewinnen (Rohöl, Erdgas), kann aber auch aus regene-

rativen Quellen, wie nachwachsenden organischen Rohstoffen (Holzabfälle, Biomasse), gewonnen werden. Der Wasserstoff für die Brennstoffzelle wird über eine bordeigene Methanolreformierung bei ca. 260 Grad Celsius erzeugt, wobei geringe Emissionen entstehen. Benzin als flüssiger Wasserstoffspeicher hat den Vorteil einer vorhandenen Kraftstoff-Infrastruktur. Allerdings wird für den Einsatz in der Brennstoffzelle ein ‚Spezialbenzin‘ benötigt. Dieses so genannte ‚saubere‘ Benzin darf erstens nur einen bestimmten Ausschnitt aus der Kohlenwasserstoff-Palette aktueller Kraftstoffe enthalten und muss zweitens entschwefelt sein⁴⁵. Zudem erfordert die bordeigene Benzinreformierung sehr hohe Temperaturen (600 Grad Celsius), was diese im Gegensatz zur Methanolreformierung technisch aufwendiger und weniger effizient macht. Natriumborhydrid (NaBH_4) ist ein trockenes Pulver, das in Wasser gelöst einen flüssigen Kraftstoff darstellt. Mit Hilfe eines Katalysators wird aus der Natriumhydridlösung an Bord Wasserstoff produziert. Das zurückbleibende Natriumborat, eine dem Borax verwandte Substanz, wird nach Gebrauch wieder hydriert, das heißt mit Wasserstoff aufgeladen und kann erneut als Kraftstoff genutzt werden. Für Natriumborhydrid als Wasserstoffspeicher sprechen der sichere und leichte Transport und die deutlich höhere Volumenspeicherdichte als komprimierter Wasserstoff. Dagegen spricht, dass der Hydrierungsprozess zurzeit noch sehr energieintensiv ist.

Hinter der Frage der Wasserstoffspeicherung steckt aber auch die Frage nach der notwendigen Infrastruktur. Zwar herrscht in der Automobilindustrie weitgehend Einigkeit über die längerfristige Perspektive – eine regenerative Wasserstoffinfrastruktur und die Brennstoffzelle als Fahrzeugantrieb – aber für die Zwischenschritte und den Übergang verfolgen die einzelnen Unternehmen unterschiedliche Strategien, wie im nächsten Kapitel noch deutlich wird. Generell ist der Aufbau einer komplett neuen Infrastruktur mit enormen Kosten verbunden. So hat die Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie, eine Initiative, der verschiedene deutsche Automobil- und Energieunternehmen und die deutsche Bundesregierung angehören, in einem Bericht im Februar 2002 die Kosten des Aufbaus eines flächendeckenden Netzes von rund 2000 öffentlichen Wasserstoff-Tankstellen in Deutschland auf 120 Milliarden Euro beziffert⁴⁶. Auch die notwendige Zeit für die Transformation der Infrastruktur von Benzin zu Wasserstoff, die zudem mit dem klassischen „Henne-Ei-Problem“ zu kämpfen hat, ist ein weiterer Grund für die gebremste Euphorie. Von einer Serienfertigung ab 2004 oder den Verkauf von 100.000 Brennstoffzellenfahrzeugen bis 2006, wie dies noch der damalige Brennstoffzellen-Entwicklungschef von DaimlerChrysler Ferdinand Panik 1999 ankündigte⁴⁷, ist keine Rede mehr. Heute sprechen die meisten Automobilunternehmen fast unisono von folgendem Zeitplan:

⁴⁵ Vgl. Ewe, Thorwald (1999): Streit um Sprit: Fährt das Brennstoffzellen-Auto der Zukunft mit Benzin oder Methanol? In: Bild der Wissenschaften 8/1999, S. 30-34.

⁴⁶ Vgl. o.V. (2002): Wie fahren wir in Zukunft? In: Spiegel-Online vom 27. Februar 2002. Online-Dokument: www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,177662,00.html.

⁴⁷ Vgl. All, Jeffrey (1998): Auto Makers Race to Sell Cars Powered by Fuel Cells. In: Wall Street Journal vom 15. März 1998.

- Von 2002 bis 2004 werden erste Kleinserien von Brennstoffzellenfahrzeugen in Demonstrationsprojekten in USA, Japan und Europa getestet. Erste Fahrzeuge werden an Flottenkunden verleast.
- Ab ca. 2006/2007 werden Fahrzeuge mit einer zweiten Generation von Brennstoffzellensystemen ausgestattet. Eine größere Anzahl von Brennstoffzellenfahrzeugen werden in Demonstrationsprojekten und in Kundenhand getestet.
- Ab 2010 beginnt die Markteinführung der ersten kommerziell erwerbbaaren Brennstoffzellenfahrzeuge. Der Durchbruch der Brennstoffzellenautomobile wird aber erst ab 2020 erwartet.

Auch wenn über das längerfristige Ziel inzwischen Einigkeit herrscht und sich die zeitliche Perspektive weitgehend angenähert hat, entwickeln die einzelnen Automobilunternehmen, wie sich im folgenden Kapitel zeigen wird, doch sehr unterschiedliche Strategien beim Umgang mit dem Einsatz von Wasserstoff und Brennstoffzelle im Automobil. Die unterschiedlichen Strategien sind wohl die Konsequenz unterschiedlicher Erwartungen und Einschätzungen bezüglich der Technologieentwicklung, der Frage des Infrastrukturaufbaus, der notwendigen Übergangstechnologien und Randbedingungen, sowie ihrer zeitliche Relevanz⁴⁸. Zudem haben diese Einordnungen und die einhergehenden Schwerpunktsetzungen ihre Wurzeln in sehr unterschiedlichen Unternehmens- und Managementkulturen, Eigentums- und Stakeholderkonstellationen und regionalen Umfeldern.

3 Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten der Automobilhersteller – Darstellung

Dieses Kapitel verfolgt das Ziel, die Aktivitäten und Strategie der einzelnen Automobilhersteller, die sich mit Wasserstoff und Brennstoffzelle beschäftigen, darzustellen. Dies geschieht in alphabetischer Reihenfolge der Automobilhersteller, wobei Konzerne und Unternehmensallianzen zusammengefasst sind. Zur einfacheren Handhabung ist den einzelnen Kapiteln eine Überblickstabelle mit den wesentlichen Fakten zu Aktivitäten und Strategie des jeweiligen Automobilherstellers vorangestellt.

⁴⁸ Vgl. Flotow, Paschen von (2000): Die Brennstoffzelle – Stand und Perspektiven der Debatte. In: Flotow, Paschen von/Steger, Ulrich (Hrsg.): Die Brennstoffzelle – Ende des Verbrennungsmotors? Automobilhersteller und Stakeholder im Dialog. Bern/Stuttgart/Wien: Haupt, S. 137-148.

3.1 BMW

3.1.1 Überblickstabelle BMW

Beginn der Wasserstoff-/Brennstoffzellen-Aktivitäten Angekündigte Serienproduktion	Fahrzeuge [Konzept- (K) Prototyp- (P) Demonstration- (D) Seriennahes- (Sn) Serienfahrzeug (S)]	Höhe der Investitionen/ Anzahl der involvierten Mitarbeiter	Teilnahme an Demonstrationsprojekten [Kalifornien (CaFCP) Japan (JHFC) Deutschland/Berlin (CEP)]	Partnerschaften/ Kooperationen	Strategie
<p>BMW betreibt seit 1978 F&E an Wasserstoff-Verbrennungsmotoren</p> <p>1999 wird erstes Fahrzeug mit Brennstoffzellen-APU vorgestellt</p> <p>BMW hat Serienfahrzeuge mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor noch für die Laufzeit der aktuellen BMW 7er-Reihe angekündigt</p>	<p>BMW 520h (1979) bivalenter LH₂-ICE (P)</p> <p>BMW 745i Turbo (1984) bivalenter LH₂-ICE (P)</p> <p>BMW 735i (1988) bivalenter LH₂-ICE (P)</p> <p>BMW 728 hL (1996) bivalenter LH₂-ICE (D)</p> <p>BMW 750 hL (1999) bivalenter LH₂-ICE mit PEM-BZ-APU (Sn)</p> <p>BMW 745 h (2001) bivalenter LH₂-ICE mit PEM-BZ APU (Sn)</p> <p>MINI Cooper Hydrogen (2001) monovalenter LH₂-ICE (K)</p>	Beides unbekannt	<p>BMW nimmt am Solar-Wasserstoff-Bayern Projekt (1986-2000) teil</p> <p>BMW hat das seit 1999 laufende Demonstrationsprojekt am Münchener Flughafen (H2MUC), u.a. eine H₂-Tankstelle, mitinitiiert. Im Rahmen des H2MUC wird der BMW 728 hL im Shuttle-Service eingesetzt</p> <p>BMW nahm an der EXPO 2000 mit dem „CleanEnergy Projekt“ teil, in dessen Rahmen 15 BMW 750 hL im Shuttle-Service eingesetzt wurden</p> <p>BMW demonstrierte im Jahr 2001 und 2002 die 15 BMW 750 hL auf der „CleanEnergy World Tour“</p> <p>Teilnahme an der CEP ab Ende 2003, in dessen Rahmen zwei BMW 745h getestet werden sollen</p>	<p>Kooperation bei ersten beiden Fahrzeugen mit der Deutschen Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR)</p> <p>Kooperation mit Firma Linde zum Thema H₂-Tank und -Betankung</p> <p>Kooperation mit Infrastrukturanbieter BP/Aral bei H2MUC und bei „CleanEnergy World Tour“</p> <p>Seit 1999 bzw. 2000 Kooperation zur Entwicklung einer benzinbetriebenen SOFC-APU mit Delphi Automotive Systems und Renault</p> <p>Seit April 2003 Kooperation mit GM zur Entwicklung von LH₂-Betankungstechnologie</p>	<p>BMW setzt auf den Wasserstoff-Verbrennungsmotor</p> <p>Dabei haben bis heute alle H₂-Fahrzeuge von BMW einen bivalenten Modus, d.h. sie fahren sowohl mit Benzin wie auch mit flüssigem Wasserstoff</p> <p>Die Brennstoffzelle wird bei BMW zur Bordnetz-Energieversorgung im Automobil eingesetzt. Brennstoffzellen-APUs sollen die konventionelle Batterie ersetzen. BMW will als erster Automobilhersteller konventionelle Fahrzeuge, die mit Brennstoffzellenbatterien ausgestattet sind, anbieten</p> <p>Von der ursprünglich propagierten Kraftstoffstrategie „Über Erdgas zu Wasserstoff“ scheint BMW inzwischen abgerückt</p>

Tabelle 1: Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten von BMW

3.1.2 Einleitung

BMW's Strategie bezüglich Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie unterscheidet sich deutlich von den anderen Automobilherstellern. BMW setzt die Brennstoffzelle nicht als Antrieb sondern anstatt der konventionellen Batterie zur Stromversorgung des Fahrzeug-Bordnetzes ein. Wasserstoff wird dagegen als Treibstoff für den bekannten Verbrennungsmotor genutzt. Damit setzt BMW „auch langfristig auf die dynamische Leistungsfähigkeit des Verbrennungsmotors. Denn in der Summe seiner Eigenschaften hat er als Fahrzeugantrieb nach wie vor die meisten Vorteile und bietet jede Menge Fahrspaß“⁴⁹. Seit über 20 Jahren

⁴⁹ Zitat entnommen aus BMW Firmenprospekt.

engagiert sich BMW zum Thema Wasserstofftechnologie im Automobil. Dieses Engagement ist in den letzten Jahren mit der Eröffnung des Wasserstoff-Demonstrationsprojektes am Münchener Flughafen („H2MUC“), der „Clean Energy-Initiative“ zur EXPO 2000 und der seitdem stattfindenden „Clean Energy-World-Tour“, die mit viel öffentlichkeitswirksamer Publicity begleitet wird, verstärkt worden. Zudem hat BMW für die Transformation von einer auf fossilen Kraftstoffen basierenden Energieinfrastruktur zu einer Wasserstoff-Energiewelt eine klare Übergangsstrategie formuliert.

3.1.3 Sechs Generationen von Fahrzeugen mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren

Seit 1978 arbeitet BMW am Wasserstoff-Verbrennungsmotor. Schon 1979 baute das Unternehmen in Zusammenarbeit mit der Deutschen Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR) den ersten Prototypen⁵⁰. Dieser auf der Basis der damaligen BMW 5-Reihe (BMW 520) beruhende Prototyp war ein reines Forschungsfahrzeug. Auf die Frage, wie dieser erste Prototyp im Vergleich zu aktuellen BMW Wasserstofffahrzeugen lief, antwortete der heutige Leiter der Forschung im Bereich Energiesysteme von BMW, Wolfgang Strobl, in einem Interview folgendermaßen: „Well, not very frequently. We were glad if the engine ran for a few yards. It was always rather daredevil, and you needed three or four development engineers around the car to make sure it kept moving“⁵¹. Als Treibstoff benutzte BMW vom ersten Prototypen an flüssigen Wasserstoff, der in einem modifizierten bivalenten Verbrennungsmotor eingesetzt wurde. Bivalent heißt, dass der Verbrennungsmotor sowohl mit Benzin als auch mit Wasserstoff betrieben werden kann, und das Fahrzeug sowohl über einen Benzin- als auch über einen Wasserstofftank verfügt. Der Wasserstofftank ist bei BMW hinter der Rückbank im Kofferraum untergebracht. Die drei Grundprinzipien – Flüssigwasserstoff, bivalenter Verbrennungsmotor und kryogener⁵², zylinderförmiger Wasserstofftank hinter Rücksitzbank – hat BMW bei seinen weiteren Wasserstofffahrzeugen beibehalten.

⁵⁰ Laut Wolfgang Strobl, kam der entscheidende Impuls für das Wasserstoffautoprojekt vom damaligen BMW-Vorsitzenden Eberhard von Kuenheim, der zum einen das Potential von Wasserstoff sah und zum anderen gute Kontakte zur Deutschen Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR) hatte (BMW CleanEnergy update, No. 1/2002, Online-Dokument: www.bmwgroup.com/cleanenergy).

⁵¹ Vgl. BMW CleanEnergy update, No. 1/2002, Online-Dokument: www.bmwgroup.com/cleanenergy.

⁵² Kryogen heißt, der Tank ist für tiefkalte Temperaturen geeignet, denn Wasserstoff wird erst bei Minus 252,4 Grad Celsius flüssig.



Bild 3: Die ersten vier Generationen von BMW Wasserstofffahrzeugen (Quelle: BMW)

1984 präsentierte BMW einen zweiten Prototypen mit Wasserstoffantrieb. Dabei handelte es sich um einen BMW 745i Turbo, der wiederum in einem Gemeinschaftsprojekt von DLR und BMW auf den Wasserstoff-Antrieb umgerüstet wurde. Wie beim ersten Wasserstofffahrzeug nimmt der Wasserstofftank den gesamten Kofferraum ein. Die dritte Generation von Wasserstofffahrzeugen wird 1988 mit dem auf Wasserstoff-Antrieb modifizierten BMW 735i präsentiert. Das Fahrzeug verfügt über einen bivalenten 3,5-Liter-Sechszylinder-Reihenmotor, dank neuer Einbautechnik für den Tank über einen teilweise freien Kofferraum und erstmals über automatische Gasdetektoren, die im Fall des Austretens von Wasserstoffgas den Wagen automatisch lüften.



Bild 4: Kryogener Wasserstofftank hinter Rückbank (Quelle: BMW)

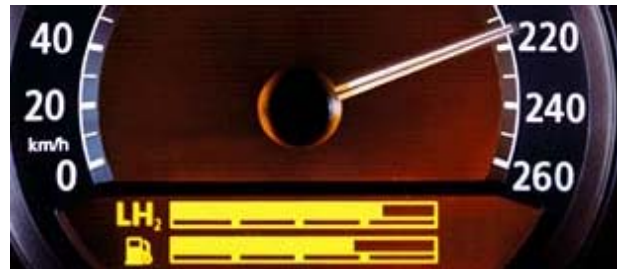


Bild 5: Wasserstoff- und Benzin-Tankanzeige (Quelle: BMW)

Mit dem BMW 728 hL wird 1996 die vierte Generation von Wasserstofffahrzeugen präsentiert. Der BMW 728 hL ist seit der Eröffnung der ersten vollautomatischen Wasserstoff-Tankstelle der Welt auf dem Münchener Flughafen⁵³ im Mai 1999 im alltagsnahen Einsatz. Er dient als VIP-Shuttle-Service auf dem Vorfeld des Flughafens sowie zwischen Flughafen und der Stadt München. Der 1999 vorgestellte BMW 750 hL wurde unter seriennahen Bedingungen entwickelt. Dabei ist die fünfte und aktuelle Generation von Wasserstofffahrzeugen mit einem bivalenten 5,4-Liter-Zwölfzylinder-V-Motor mit zirka 150 kW (205 PS) ausgerüstet und hat eine Spitzengeschwindigkeit von 226 km/h. Das Auto verfügt über einen sicherheitsoptimierten 140 l Kryo-Tank für Flüssigwasserstoff, dessen Inhalt eine Reichweite von 350 km ermöglicht (weitere 650 km im Benzinmodus). Im Fahrzeug befinden sich vier selbstdiag-

⁵³ Informationen zum Wasserstoff-Demonstrationsprojekt am Münchener Flughafen („H2MUC“) sind zu finden unter www.hyweb.de/h2muc.

nostizierende Wasserstoff-Sensoren, die per Funk mit der Einsatzzentrale in München verbunden sind. Anlässlich des EXPO 2000-Projektes „Clean Energy“ baute BMW eine Kleinserie von fünfzehn 750 hL. Anstelle einer konventionellen Batterie sind diese Fahrzeuge mit einer Brennstoffzellen Auxiliary Power Unit (APU) (5 kW; 42 Volt) ausgestattet. Die PEM-Brennstoffzelle von International Fuel Cell (IFC)⁵⁴ dient zur Versorgung des Bordnetzes mit elektrischer Energie⁵⁵.



Bild 6: Brennstoffzellen APU im BMW 750 hL (Quelle: UTC Fuel Cells)

Auch diese Fahrzeuge wurden zunächst als Shuttledienste während der EXPO 2000 eingesetzt. Im Anschluss an den EXPO Einsatz starteten die 15 Fahrzeuge zur „BMW Clean Energy World Tour“. Diese weltweite Demonstrations- und Promotion-Tour fand sowohl 2001 wie auch 2002 statt und wurde von den Projektpartnern Linde und BP unterstützt⁵⁶. Dabei sind alle Fahrzeuge insgesamt über 170.000 km im Alltagsverkehr auf öffentlichen Straßen gefahren.

Zusammen mit der neuen BMW 7er-Reihe präsentierte BMW auf der IAA 2001 in Frankfurt auch den auf der neuen Reihe basierenden wasserstoffbetriebenen BMW 745h. Der bivalente Wasserstoffverbrennungsmotor mit 4,4-Liter-Achtzylinder-V-Motor und zirka 135 kW (184 PS) schafft eine Spitzengeschwindigkeit von 215 km/h. Mit dem 140l-Kryo-Tank hat das Fahrzeug im Flüssigwasserstoff-Betrieb 300 km Reichweite (650 km im Benzinbetrieb). Das Fahrzeug verfügt ebenfalls über eine Brennstoffzellen-APU. Mit diesem Fahrzeug begann für BMW die Phase der Serienentwicklung für Fahrzeuge mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren. Noch während der Laufzeit der aktuellen BMW 7er-Reihe, so die Ankündigung des

⁵⁴ International Fuel Cells ist eine Tochter der United Technologies Corporation (UTC) und der älteste und größte Brennstoffzellenhersteller in den USA. Im Dezember 2001 wurde IFC in UTC Fuel Cells umbenannt.

⁵⁵ Die PEM-Brennstoffzelle wird mit Wasserstoff betrieben und hat neben der höheren Leistung und Ausdauer gegenüber den herkömmlichen Energiespeichern auch funktionale Vorteile, wie Standklimatisierung ohne laufenden Motor und das bei Emissionsfreiheit.

⁵⁶ 2001 wurden die Wasserstoffflotte in Dubai, Brüssel, Mailand, Tokio, Los Angeles und Berlin vorgestellt. 2002 präsentierte BMW seine Fahrzeuge in Sacramento, London, Stockholm, Montreal, Johannesburg und Singapur.

Münchener Automobilkonzerns, soll das erste Wasserstoff-Serienfahrzeug von BMW in Kundenhand übergeben werden⁵⁷.

Neben dem 745h wurde auf der IAA 2001 auch eine Studie eines wasserstoffbetriebenen MINI Cooper präsentiert. Im Gegensatz zu den bisherigen wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen von BMW kommt im MINI Cooper Hydrogen erstmals ein monovalenter Wasserstoffverbrennungsmotor zum Einsatz. Zudem fördert der Einbau eines Kryo-Formtanks unter der Rücksitzbank die Alltagstauglichkeit des Fahrzeuges, da der gesamte Kofferraum zur Verfügung steht.



Bild 7: BMW 745h (Quelle: BMW)



Bild 8: MINI Cooper Hydrogen (Quelle: BMW)

Neben dem Aufbau von Prototypen und der weltweiten Demonstration von Wasserstoff-Fahrzeugen, hat BMW in den letzten beiden Jahren weiter an der Verbesserung des Wasserstoff-Verbrennungsmotors gearbeitet. Mit einem von BMW entwickelten „Wasserstoff-Direkteinblasungsverfahren“ konnte mit dem Wasserstoff-Verbrennungsmotor eine Leistung erreicht werden, die über dem heutiger Benzinmotoren liegt⁵⁸. Mit einer weiteren Optimierung des Wasserstoff-spezifischen Brennverfahrens, durch Motormaßnahmen, einer Optimierung der Nebenaggregate sowie des Gesamtenergiemanagements zielt BMW auf die Realisierung eines Gesamtwirkungsgrades von 50 %. Durch die optimale Ausnutzung der Kraftstoffigenschaften des Wasserstoffs eröffnet sich, laut BMW, ein völlig neues Leistungspotenzial für den Verbrennungsmotor.

Im Laufe der zwanzigjährigen Forschung und Entwicklung an Wasserstoff-Fahrzeugen bei BMW, die im BMW Forschungs- und Ingenieurszentrum (FIZ) in München durchgeführt wurden, stand neben dem Motormanagement besonders die Frage der Sicherheit im Mittelpunkt. In der Sicherheitsfrage sind zum einen die schon erwähnten Wasserstoffsensoren in den Fahrzeugen installiert worden. Daneben kam es zu den üblichen Fahrzeug-Crashtests und

⁵⁷ So erklärte der BMW-Entwicklungsvorstand Burkhard Göschel bei der Vorstellung der BMW-Wasserstoffflotte in Berlin im November 2001: „Wir gehen nun aus der Fahrzeugforschung mit dem Wasserstoff in die Serienentwicklung. Wir werden noch im Produktionszyklus des neuen BMW 7er eine Wasserstoffvariante in Kundenhand geben“ (zitiert in: o.V. (2001): BMW verfeuert Wasserstoff direkt. Spiegel-Online vom 20.11.2001. Online-Dokument: www.spiegel.de/auto/news/0,1518,168649,00.html); vgl. auch BMW-Pressemitteilung vom 27.10.2003: „Wasserstoff gibt Vollgas“. Online-Dokument: www.bmwgroup.com.

⁵⁸ Vgl. BMW-Pressemitteilung vom 27.10.2003: „Wasserstoff gibt Vollgas“. Online-Dokument: www.bmwgroup.com; vgl. auch www.bmwgroup.com/d/0_0_www_bmwgroup_com/4_news/4_4_aktuelles_lexikon/pdf/3wasserstoff.pdf.

insbesondere wurde die Sicherheit des Tanks in mehreren Versuchsreihen zusammen mit dem TÜV Süddeutschland getestet. So wurden mit Wasserstoff gefüllte Tanks in vielfältiger Weise mechanisch beschädigt, Feuer bzw. Hitze (1000 Grad Celsius) ausgesetzt und mit dem sechsfachen zulässigen Betriebsdruck überlastet⁵⁹. Neben der Sicherheit stellt der Tank auch in anderer Beziehung eine der größten technischen Herausforderungen dar. Um einen vergleichbaren Umgang wie beim gewohnten Benzin zu ermöglichen, muss der Tank zum einen schnell zu füllen sein, zum zweiten der Tankinhalt so groß sein, dass eine ähnliche Reichweite wie mit Benzin erreicht werden kann, und zum dritten muss der Tank den leicht flüchtigen Wasserstoff für einen längeren Zeitraum ohne Verluste speichern können. Diese Ziele können, so BMW, am ehesten mit Flüssigwasserstoff erreicht werden. Flüssig wird Wasserstoff aber erst bei $-252,4$ Grad. Um Flüssigwasserstoff zu tanken, muss der Tank also für solche tiefkalten Temperaturen geeignet sein. Zusammen mit dem Unternehmen Linde hat BMW einen hochisolierten Wasserstofftank entwickelt. Der ultrakalte Inhalt wird dort, dank eines Hoch-Vakuums zwischen den doppelten Tankwänden, in dem sich 70 Lagen Glasfasermatten mit Aluminiumfolie befinden, vor Erwärmung geschützt⁶⁰. Für die Serienproduktion hat BMW 2002 eine Absichtserklärung mit dem österreichischen Automobilzulieferer Magna Steyr über die Entwicklung und Lieferung von kryogenen Wasserstoff-Treibstofftanks vereinbart. Zudem verkündete BMW auf der Hannover Messe im April 2003, mit dem amerikanischen Automobilunternehmen GM bei der Frage der Betankungstechnik für flüssigen Wasserstoff zusammenarbeiten zu wollen⁶¹.

BMW hat sich im Rahmen seiner Wasserstoff-Aktivitäten auch mit der Frage nach den Rahmenbedingungen einer Wasserstoff-Energiewelt und mit der Frage der Transformation beschäftigt⁶². Eine besonders wichtige Rolle spielt dabei die Frage nach der Infrastruktur. Im Rahmen des Solar-Wasserstoff-Bayern Projektes (SWB), an dem BMW partizipierte, wurde von 1986 bis 2000 versucht in einer Demonstrationsanlage ein geschlossenes Solar-Wasserstoffsystem darzustellen. Auf Betreiben von BMW ist das seit 1999 laufende Wasserstoff-Demonstrationsprojekt am Münchener Flughafen (H2MUC) zu Stande gekommen. Teil des Projektes ist eine Wasserstoff-Tankstelle für gasförmigen und flüssigen Wasserstoff, bei der die Betankung dank eines Tankroboters vollautomatisch abläuft. Die Tankstelleninfrastruktur wurde von Aral, der Tankroboter von Aral, BMW und Linde erstellt. Auch auf politischer und gesellschaftlicher Ebene versucht BMW durch die Clean Energy Projekte⁶³ in der deutschen

⁵⁹ Vgl. www.hydrogen.org/bmw/sicherhe.htm

⁶⁰ Das führt dazu, dass beim aktuellen Tank von BMW und Linde der Wasserstoff sich nur um 1 Grad pro Tag erwärmt und der Innendruck nur um 1 bar steigt. Steigt der Druck bis auf 4 bar wird Wasserstoff durch ein Sicherheitsventil abgelassen. Bei längerem Parken gingen bisher täglich zwei Prozent des Tankinhalts verloren. Der neueste Tank-Prototyp von Linde, der über ein aktives Kühlungssystem verfügt, ermöglicht eine verlustfreie Speicherung von 12 Tagen (Vgl. BMW CleanEnergy update No. 1/2002. Online-Dokument: www.bmwgroup.com/cleanenergy).

⁶¹ Vgl. Wasserstoff-Spiegel Nr. 2/03.

⁶² Vgl. Pehr, Klaus u.a. (2002): Mit Wasserstoff in die Zukunft – der BMW 750hL. In: *Automobiltechnische Zeitung* 2/2002 Jahrgang 104, S. 120-131.

⁶³ Im Rahmen der CleanEnergy-Initiative hat BMW die Wasserstoffkonferenz HYFORUM 2000 in München unterstützt und andere Konferenzen gesponsert.

Verkehrswirtschaftlichen Energiestrategie (VES), die von BMW mit initiiert wurde, und im Rahmen des EU-Projektes European Integrated Hydrogen Project (EIHP), das sich mit Fragen der Standardisierung und Normierung der neuen Technologie beschäftigt, Rahmenbedingungen für den Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur zu fördern. Ergänzend zu den Bemühungen des EIHP hat BMW im April 2003 mit GM ein offenes Konsortium zur Entwicklung einer standardisierten automobilgerechten Flüssigwasserstoff-Kupplung zur Betankung von Wasserstoff-Fahrzeugen gegründet⁶⁴. BMW ist aber nur an einem der drei großen aktuellen Brennstoffzellen- und Wasserstoff-Demonstrationsprojekte, nämlich an der Clean Energy Partnership in Berlin, beteiligt. Im Rahmen der CEP sollen ab 2004 zwei Fahrzeuge der aktuellen BMW 7er-Reihe mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren getestet werden⁶⁵. In Kalifornien hat BMW aber im Rahmen der CleanEnergy World-Tour über einen längeren Zeitraum (seit Juni 2001) sieben BMW 750 hL getestet. Diese waren auf dem firmeneigenen Emission Control Test Center (ECTC) in Oxnard bei Los Angeles stationiert, auf dem auch eine Tankstelle für Flüssigwasserstoff von Linde installiert wurde⁶⁶.

3.1.4 Wasserstoff verbrennen und Strom von der Brennstoffzelle

BMWs Strategie bezüglich Wasserstoff und Brennstoffzelle, die vom Unternehmen, im Gegensatz zu einigen anderen Wettbewerbern, auch sehr deutlich kommuniziert wird, beruht auf folgenden Prämissen:

- BMW favorisiert als Antrieb den Wasserstoff-Verbrennungsmotor⁶⁷. Als Gründe für den Verbrennungsmotor sprechen laut BMW die Bekanntheit der etablierten Technologie, die mit vertretbaren Kosten auf den Betrieb mit Wasserstoff umgerüstet werden kann und das Verbesserungspotential, das der Verbrennungsmotor noch hat. Dieses Potential kann sogar, wie aktuelle Tests von BMW zeigen, durch den Einsatz von Wasserstoff noch erweitert werden. Zum anderen glaubt BMW, dass die Brennstoffzelle technisch noch nicht ausgereift ist und auf absehbare Zeit zu teuer sein wird.
- Für BMW ist der gleichzeitige Übergang von Verbrennungsmotor zu Brennstoffzelle/Elektromotor und fossilem Treibstoff zu Wasserstoff zu groß. Der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur und einer regenerativen Wasserstoff-Energiewirtschaft wird nach Einschätzung von BMW Jahrzehnte in Anspruch nehmen und immense Kosten verursachen.

⁶⁴ Vgl. HyWeb-Gazette vom 29.04.2003; Hydrogen & Fuel Cell Letter, Mai 2003.

⁶⁵ Vgl. Pressemitteilung des deutschen Bundesverkehrsministeriums vom 26.11.2003: „Mobil mit Wasserstoff“. Online-Dokument: www.pressrelations.de/i.cfm?r=140624.

⁶⁶ Vgl. BMW CleanEnergy update No. 1/2002. Online-Dokument: www.bmwgroup.com/cleanenergy.

⁶⁷ Zwar haben auch andere Hersteller wie Ford Prototypen mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor gebaut, aber nur BMW setzt ausschließlich auf den Wasserstoff-Verbrennungsmotor als Antrieb.

- Für BMW ist deutlich, dass „unsere Kunden auch in Zukunft Wert auf Reichweite, Dynamik und Komfort legen“ (BMW Entwicklungsvorstand Burkhard Göschel⁶⁸). Neue Technologien werden sich erst durchsetzen, wenn sie einen Benefit für den Nutzer bringen.

Auf Grundlage dieser Prämissen hatte BMW eine Übergangsstrategie vom Erdöl zum Energieträger Wasserstoff mit dem Ziel entwickelt, Infrastrukturaufbau und Fahrzeugentwicklung zu entkoppeln⁶⁹. Dabei sah diese Strategie, die inzwischen, ohne dass dies BMW explizit formuliert hätte, aufgegeben worden zu sein scheint, Erdgas sowohl als technologisch wie ökologisch idealen Zwischenschritt an. Erdgas, das im wesentlichen aus Methan (CH₄) besteht, verfügt in seinen Stoffeigenschaften über eine hohe Verwandtschaft zu Wasserstoff: denn beide, unter Umgebungsbedingungen gasförmigen Energieträger, müssen bei der Verwendung als Fahrzeugkraftstoff unter hohem Druck oder bei tiefen Temperaturen flüssig gespeichert werden und verfügen über eine erheblich geringere volumenbezogene Energiedichte als konventionelle Kraftstoffe.

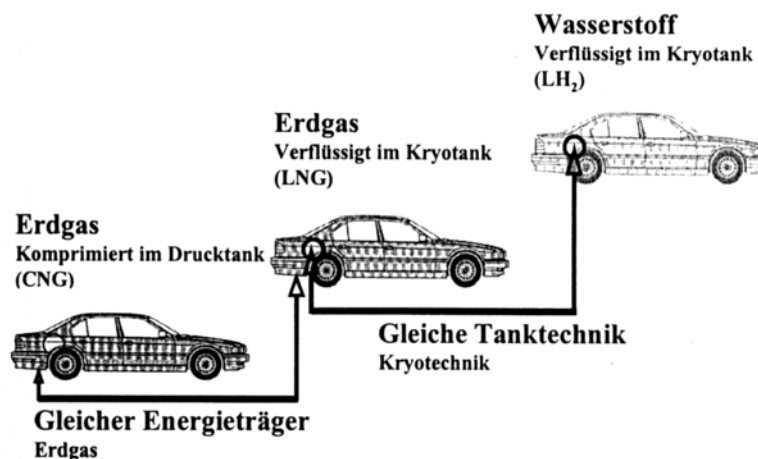


Bild 9: BMW Übergangsstrategie „Über Erdgas zum Wasserstoff“ (Quelle: BMW)

Für Erdgas sprechen dabei zwei weitere Vorteile: Verfügbarkeit und geringere Emissionen. BMW wollte auf eine evolutionäre Entwicklung, wie in Bild 9 dargestellt, setzen. Mit der bivalenten Fahrzeugtechnologie sollte zudem ein „weicher“ Übergang ermöglicht werden. Denn das „Henne und Ei“-Problem bei der Etablierung einer neuen Infrastruktur wird mit einem bivalenten Fahrzeugkonzept abgemildert. Konsequenterweise hatte BMW als erster europäischer Pkw-Hersteller ab 1995 ein Serienfahrzeug mit Erdgasantrieb, den BMW 316g, eingeführt. Dieses bivalente Fahrzeug wurde mit gasförmigem Erdgas und Benzin betrieben.

⁶⁸ Vgl: o.V. (2001): BMW verfeuert Wasserstoff direkt. Spiegel-Online vom 20.11.2001. Online-Dokument: www.spiegel.de/auto/news/0,1518,168649,00.html.

⁶⁹ Vgl.: Geier, Martin (2000): Über Erdgas zum Wasserstoff – die BMW Strategie zur Einführung der Wasserstofftechnologie für Pkw-Antriebe. In: Flotow, Paschen von/Steger, Ulrich (Hrsg.): Die Brennstoffzelle – Ende des Verbrennungsmotors? Bern/Stuttgart/Wien: Haupt, S. 17-29. Vgl. auch Strobl, Wolfgang (1998): Über Erdgas zum Wasserstoff. In: Internationales Verkehrswesen (50) 4/98, S. 151-154.

Ergänzt wurde die Erdgasflotte um eine Flüssigerdgas-Variante, den ebenfalls bivalenten BMW 320g. Bis zum Jahr 2000 wurden aber nur, zumeist an Flottenbetreiber, annähernd 1000 Fahrzeuge verkauft. Aufgrund der geringen Nachfrage hat BMW den Vertrieb von Erdgasfahrzeugen deswegen inzwischen eingestellt⁷⁰. Erdgas spielt für BMW heute nur noch für die Herstellung von Wasserstoff eine Rolle.

Anlässlich der Präsentation des neuen BMW 750hL in Berlin im Mai 2000 zeichnete der BMW Entwicklungsvorstand Dr. Burkhardt Göschel jetzt folgende Entwicklungsschritte auf⁷¹: Ab 2005 rechnet BMW damit, dass im Umfeld jeder Niederlassung in allen europäischen Hauptstädten eine Wasserstoff-Tankstelle zur Verfügung stehen wird. Ab diesem Zeitpunkt will BMW auch damit beginnen, Wasserstoffautos regulär zu verkaufen. 2010 soll bereits in ganz Europa ein ausreichendes Netz von Wasserstoff-Tankstellen vorhanden sein. Ab da wird es auch wasserstoffbetriebene Fahrzeuge der 3er-Reihe geben. Zehn Jahre später wird nach den Vorstellungen von BMW die Entwicklung der Wasserstoff-Infrastruktur so weit voran geschritten sein, dass die Hälfte der in Europa und Japan verkauften BMW bereits Wasserstoff verbrennen werden.

Die Brennstoffzelle spielt in der BMW-Strategie nur die Rolle, für die sie laut BMW am besten geeignet ist – als Stromlieferant. Hier hat sie gegenüber der traditionellen Batterie deutliche Vorteile. BMW wird nach eigenen Aussagen weltweit der erste Automobilhersteller sein, der eine Brennstoffzellenbatterie (APU) zur Stromerzeugung im Fahrzeug in Serie anbieten wird. Dazu hat man schon Erfahrungen mit der wasserstoffbetriebenen PEM-Brennstoffzelle von IFC gemacht. Zusätzlich hat BMW seit 1999 eine Kooperation mit Renault und Delphi Automotive System abgeschlossen. Gemeinsames Ziel ist die Entwicklung einer SOFC-Einheit, die mit Benzin mittels eines Reformers betrieben werden kann. Die SOFC-APU soll in BMW-Fahrzeugen mit konventionellen Antrieb eingesetzt werden und einen „Paradigmenwechsel“ in der Bordnetz-Stromversorgung herbeiführen⁷². In 5 Jahren soll die APU, so die Ankündigung von BMW, serienreif sein.

⁷⁰ So ist auch auf der Homepage der aktuellen Initiative für Erdgasfahrzeuge kein Erdgas-Fahrzeug von BMW als Serienfahrzeug aufgeführt (vgl.: www.erdgasfahrzeuge.de/starthtml/erdgasfahrzeug_fahrz_werk.html).

⁷¹ Vgl. Dahlen, Ingo von (2000): Etappen und Visionen für das Wasserstoffauto. In: Der Tagesspiegel 12.05.2000.

⁷² Vgl. BMW-Pressemitteilung vom 07.10.2003: „Mehr Leistung weniger Verbrauch“. Online-Dokument: www.bmwgroup.com.

3.2 DaimlerChrysler

3.2.1 Überblickstabelle DaimlerChrysler

Beginn der Wasserstoff-/Brennstoffzellen-Aktivitäten Angekündigte Serienproduktion	Fahrzeuge [Konzept- (K) Prototyp- (P) Demonstration- (D) Seriennahes- (Sn) Serienfahrzeug (S)]	Höhe der Investitionen/ Anzahl der involvierten Mitarbeiter	Teilnahme an Demonstrationsprojekten [Kalifornien (CaFCP) Japan (JHFC) Deutschland/Berlin (CEP)]	Partnerschaften/ Kooperationen	Strategie
<p>DaimlerChrysler betreibt seit 1974 F&E am Wasserstoff-Verbrennungsmotor</p> <p>Seit 1993 F&E zur Brennstoffzelle als Automobilantrieb</p> <p>Beginn der Serienproduktion für 2010 angekündigt</p>	<p>5 MB Transporter 310 (1984) H₂-ICE (D) + 5 MB Pkw 280 TE (1984) Benzin/H₂-ICE (D) (alle Fahrzeuge mit Metallhydrid-Speichern)</p> <p>NECAR 1 MB 180 Transporter (1994) CGH₂-BZ (P)</p> <p>NECAR 2 MB-V-Klasse (1996) CGH₂-BZ (P)</p> <p>NECAR 3 MB A-Klasse (1997) CH₃OH-BZ (P)</p> <p>NECAR 4 MB A-Klasse (1999) LH₂-BZ (P)</p> <p>NECAR 4a MB A-Klasse (2000) CGH₂-BZ (D)</p> <p>NECAR 5 MB A-Klasse (2000) CH₃OH-BZ (D)</p> <p>F-Cell MB A-Klasse (2002) CGH₂-BZ (Sn) (Kleinserie von 60 F-Cell ab 2003)</p> <p>NEBUS MB-Stadtbus (1997) CGH₂-BZ (D)</p> <p>Citaro – MB Stadbus (2002) CGH₂-BZ (Sn) (Kleinserie von 33 Bussen ab 2003)</p> <p>2 MB Sprinter (2001&2003) CGH₂-BZ (D)</p> <p>Jeep Commander Chrysler SUV (1998) benzinbetriebener Hybrid-BZ (K)</p> <p>Jeep Commander 2 Chrysler SUV (2001) CH₃OH-Hybrid-BZ (P)</p> <p>Natrium Chrysler Town & County Minivan (2001) NaBH₄-Hybrid-BZ (P)</p> <p>Jeep Treo (2003) BZ-Stadtfahrzeug (K)</p> <p>FreightlinerTruck (2000) LH₂-BZ-APU (K)</p>	<p>Bis heute Investitionen von rund 1 Mrd. Euro in die Entwicklung der BZ-Technologie</p> <p>500 Mitarbeiter sollen insgesamt im DC-Konzern an BZ-Technologie arbeiten</p>	<p>Teilnahme mit 10 H₂-Transportern und H₂-Pkw an Demonstrationsprojekt von 1984-1988 in Berlin</p> <p>Seit 04/1999 Teilnahme an der CaFCP, in deren Rahmen der NECAR 4a, NECAR 5 und ab 2004 auch die F-Cell getestet werden</p> <p>Zusammen mit Mazda führt DC in 2001 Demonstrationsprojekt für Methanol-Brennstoffzellenfahrzeuge (NECAR 5) in Japan durch</p> <p>Seit 03/2003 Teilnahme an dem JHFC, in dessen Rahmen 8 F-Cell getestet werden sollen</p> <p>Teilnahme an der CEP ab Ende 2003, in dessen Rahmen 10 F-Cell getestet werden sollen</p> <p>Ab 2004 Demonstrationsprojekt in Singapur mit 7 F-Cell</p> <p>Insgesamt will DC bis Ende 2004 60 F-Cell weltweit testen</p> <p>Zudem werden insgesamt 30 BZ-Busse von DC beginnend ab März 2003 in den EU-Projekten CUTE & ECTOS demonstriert. Weitere BZ-Busse sollen im australischen Perth (3 Stück) und im Rahmen des UNDP/GEF-BZ-Bus-Projektes getestet werden</p> <p>Praxistest des brennstoffzellenbetriebenen MB Transporters „Sprinter“ seit 2001 beim Hermes-Versand in Hamburg. Ab 11/2003 wird ebenfalls ein brennstoffzellenbetriebener MB „Sprinter“ im Rahmen eines Demonstrationsprojektes mit der US-amerikanischen Umweltbehörde EPA bei UPS in den USA getestet</p>	<p>Seit 1993 F&E-Partnerschaft mit kanadischem Brennstoffzellenhersteller Ballard</p> <p>Ab 1997/bzw. 1998 Brennstoffzellen-Allianz mit Ballard und den Automobilherstellern Ford und Mazda</p> <p>Seit dem Erwerb von Anteilen an Mitsubishi Motor Co. im Jahr 2000 arbeiten DC und das japanische Automobilunternehmen auch im Bereich Brennstoffzellen zusammen</p> <p>Seit 2003 Kooperation mit Hyundai, Ford, Nissan, PSA und Toyota zur Entwicklung eines 700 bar Druckwasserstofftanks</p>	<p>Ziel ist Technologieführerschaft</p> <p>Enge Kooperation mit Brennstoffzellenhersteller Ballard, an dem DC mit 24,2% beteiligt ist</p> <p>Konzentration auf gasförmigen Wasserstoff, nachdem DC jahrelang eine Zwei-Kraftstoff-Strategie (Wasserstoff und Methanol) vertreten hat</p> <p>Im Bereich alternative Antriebe/ Kraftstoffe hat DC sein Portfolio erweitert. Neben der Brennstoffzelle sind jetzt auch Hybridantriebe und Bio-Kraftstoffe getreten</p>

Tabelle 2: Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten von DaimlerChrysler

3.2.2 Einleitung

„TODAY the race to develop the fuel-cell car is over [...]. Now we begin the race to lower the cost to the level of today's internal combustion engine. We'll do it by 2004“⁷³. Dieses Zitat vom DaimlerChrysler-Vorsitzenden Jürgen Schrempp von 1999 spiegelt in gewisser Weise die Situation des DaimlerChrysler-Konzerns bezüglich des Engagements im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen wieder. Zum einen ist DaimlerChrysler – oder genauer Daimler-Benz – der Pionier in der Nutzung der Brennstoffzelle im automobilen Bereich. So hat das Unternehmen sich seit Anfang der 1990er Jahre intensiv mit der Forschung und Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie beschäftigt. Zudem ist man frühzeitig mit einem der führenden Brennstoffzellenhersteller, Ballard Power Systems, eine strategische Partnerschaft eingegangen. DaimlerChrysler hat von allen Automobilkonzernen die größte Flotte an Prototypen und Demonstrationsfahrzeugen aufgebaut. Auch die California Fuel Cell Partnership (CaFCP), das weltweit wichtigste Brennstoffzellen-Demonstrations-Projekt, ist von DaimlerChrysler zusammen mit dem California Air Resource Board (CARB) initiiert worden. Mit diesen Aktivitäten und der Ankündigung schon 2004 mit Brennstoffzellenfahrzeugen in Serie zu gehen⁷⁴, hat man entscheidend dazu beigetragen, die Dynamik des Themas Brennstoffzelle in der Automobilindustrie zu entfachen⁷⁵. Das hat dazu geführt, dass sich inzwischen alle großen Automobilhersteller intensiv mit Wasserstoff und Brennstoffzelle beschäftigen. Was sich seit der Ankündigung von Schrempp, die in der Euphorie der großen Fortschritte der Anfangszeit gemacht worden ist, verändert hat, ist der Vorsprung, den sich DaimlerChrysler im Entwicklungsrennen um die Brennstoffzellentechnologie erarbeitet hatte⁷⁶. Diesen deutlichen Vorsprung hat man laut Einschätzung von Branchenkennern inzwischen wohl eingebüßt.

⁷³ Bei der Präsentation des neuen NECAR 4 in den USA zitiert in The Economist vom 22.03.1999 Online-Dokument: www.economist.com/editorial/justforyou/current/wb9885.html (Hervorh. im Original).

⁷⁴ „Wir wollen die ersten sein, die ein Serienfahrzeug mit Brennstoffzellenantrieb am Markt anbieten“, verkündet Jürgen Hubbert, der sich im Daimler-Benz-Vorstand für Personenwagen verantwortlich zeichnet“ (zitiert in Berliner Illustrierten Zeitung 31.01/01.02.1998).

⁷⁵ Vgl. Woodruff, David/Symonds, William C. (1997): The Hottest Thing in 'Green' Wheels: Daimler's huge bet on fuel cells lights a fire under rivals. In: Business Week 28.04.1997, S. 38.

⁷⁶ „Wir liegen momentan an der Spitze,“ sagt der Direktor des Brennstoffzellen-Programms Deutschland, Ferdinand Panik: „Aber es ist ein offenes Rennen“ (zitiert im The Wall Street Journal. In: Tagesspiegel vom 26.03.1999).

3.2.3 Der Pionier und Demonstrator⁷⁷

Die Forschung am Thema Wasserstoff als alternativer Treibstoff begann bei Daimler-Benz schon 1974 mit dem Aufbau eines ersten Wasserstoff-Forschungsfahrzeugs. Anfang der 1980er Jahre wurde das Thema bei Daimler-Benz in Folge der Ölpreiskrise vertieft. Für ein großes deutsches Demonstrationsprojekt zur Erprobung alternativer Antriebe rüstete Daimler-Benz zehn konventionelle Fahrzeuge auf den Wasserstoffbetrieb um. In diesem weltweit ersten Flottenversuch von Wasserstofffahrzeugen wurden die Fahrzeuge über vier Jahre (1984-1988) im Alltagseinsatz (Taxi/Notarzt/Krankentransport/Stadtverwaltung) in Berlin getestet⁷⁸. Bei den Fahrzeugen handelte es sich um fünf Mercedes-Pkw 280 TE, die mit einem Wasserstoff-Benzin-Kraftstoffgemisch liefen (Reichweite: 150 km) und fünf Mercedes Transporter 310, die mit reinem Wasserstoff betrieben wurden (Reichweite: 120 km). Als Kraftstoffspeicher für den Wasserstoff wurde in allen Fahrzeugen ein Metallhydridspeicher genutzt. Alle Fahrzeuge liefen bei Tests und im Alltagseinsatz insgesamt fast 680.000 km.



Bild 10: Wasserstoffbetriebener Mercedes 280 TE (Quelle: TÜV Rheinland⁷⁹)

Die Brennstoffzellenentwicklung für den automobilen Bereich bei Daimler-Benz ist eine der „ersten nützlichen Ausgeburten“⁸⁰ der Vision vom integrierten Technologiekonzern des ehemaligen Vorstandsvorsitzenden Edzard Reuter. Angestoßen durch die Erfahrungen der Konzerntöchter Dornier und MBB mit Brennstoffzellen in der Raumfahrtforschung und mit

⁷⁷ Die Informationen zu den Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten des DaimlerChrysler Konzerns beruhen falls nichts anderes angegeben auf folgenden Quellen:

a) Special zur Brennstoffzellenaktivitäten auf DaimlerChrysler Homepage:

www.daimlerchrysler.de/specials/fuelcell2002/development_g.htm

b) DaimlerChrysler Broschüren: „Die Brennstoffzelle – Antrieb der Zukunft“; „Mit neuem Antrieb auf der Überholspur“; „Wir setzen Fortschritt in Bewegung“; „NECAR 3: A Methanol Car Hits The Road“; „NECAR 4: The Alternative“ und „Energy for the Future“

c) Den Internetquellen: www.h2cars.de und www.fuelcells.org/fct/carchart.pdf.

⁷⁸ Vgl. TÜV Rheinland (Hrsg.) (1989): Alternative Energien für den Straßenverkehr – Wasserstoffantrieb in der Erprobung. Köln: TÜV Rheinland.

⁷⁹ Bild 10 ist dem Projekt-Abschlussbericht des TÜV Rheinland entnommen: TÜV Rheinland (Hrsg.) (1989): Alternative Energien für den Straßenverkehr – Wasserstoffantrieb in der Erprobung. Köln: Verlag TÜV Rheinland.

⁸⁰ Vgl. o.V. (1994): Zartes Zischeln. In: Der Spiegel 14/1994, S. 226-227.

Hilfe von AEG-Experten (Elektromotor, Leistungselektronik), begann man 1993 ein Forschungsfahrzeug mit Brennstoffzelle aufzubauen. Dieses sollte die Prinzip-tauglichkeit der Brennstoffzelle als Fahrzeugantrieb nachweisen⁸¹. Von Anfang an kooperierte Daimler-Benz mit dem damals noch relativ unbekanntem kanadischen Brennstoffzellenhersteller Ballard Power Systems.



Bild 11: NECAR 1 (Quelle: DaimlerChrysler)



Bild 12: NECAR 2 (Quelle: DaimlerChrysler)

Nach knapp einem Jahr wurde 1994 der erste Brennstoffzellen-Prototyp, der NECAR 1 (New Electric Car), präsentiert. Die gesamte Ladekapazität des Mercedes-Benz-Transporters (MB 100) war mit den ca. 800 Kilogramm schweren Komponenten des Brennstoffzellensystems ausgefüllt. Nur die Sitze für Fahrer und Beifahrer blieben frei. Das Fahrzeug glich damit eher einem „rollenden Labor“. Die Brennstoffzelle des NECAR 1 kam von Ballard (50 kW), das Fahrzeug fuhr mit gasförmigen Wasserstoff, hatte eine Reichweite von 130 km und eine Höchstgeschwindigkeit von 90 km/h. Der zwei Jahre später vorgestellte Nachfolger NECAR 2, eine Mercedes-Benz V-Klasse, war dagegen mit sechs Sitzplätzen, einer Reichweite von rund 250 Kilometern und einer Höchstgeschwindigkeit von 110 km/h ein vollwertig nutzbares Fahrzeug. Das Brennstoffzellensystem konnte dabei so komprimiert werden, dass die Brennstoffzellentechnik (Ballard 50 kW) unter die Hecksitzbank passte. Außerdem waren die beiden Tanks (250 bar) für den gasförmigen Wasserstoff auf dem Dach des Fahrzeuges platziert.

Der 1997 auf der IAA in Frankfurt vorgestellte NECAR 3 ist das erste Methanol-Brennstoffzellenfahrzeug von Daimler-Benz. Das auf der damals in den Markt eingeführten A-Klasse basierende Fahrzeug verfügte weltweit erstmalig über eine bordeigene Wasserstoff-Erzeugung. Aus dem flüssigen Wasserstoffspeicher Methanol, der ähnlich wie Benzin getankt werden kann, wird im Fahrzeug mittels eines Reformers Wasserstoff gewonnen. Der Methanol-reformer, eine Eigenentwicklung von Daimler-Benz, macht sich das Prinzip der Wasserdampf-reformierung zu eigen. Zwar konnte im NECAR 3 das Brennstoffzellensystem erneut verkleinert werden (anstatt 12 Brennstoffzellen-Stacks wie beim NECAR 1, braucht der NECAR 3 nur noch zwei Stacks für eine elektrische Leistung von 50 kW), aber durch den

⁸¹ Zu den Anfängen der Daimler-Benz Forschung an der automobilen Brennstoffzelle vgl. o.V. (1994): Mobil mit Power aus dem All. In: Daimler-Benz HighTechReport 3/1994, S. 12-25.

umfangreichen Reformer haben in dem Fahrzeug nur zwei Fahrgäste Platz. Mit 38 l Methanol erreicht der NECAR 3 eine Reichweite von ca. 400 km und eine Spitzengeschwindigkeit von ca. 120 km/h.



Bild 13: NECAR 3 (Quelle: DaimlerChrysler)



Bild 14: NECAR 4 (Quelle: DaimlerChrysler)

Auch der NECAR 4, der 1999 in Washington, von dem nach der Fusion mit dem amerikanischen Automobilhersteller Chrysler in DaimlerChrysler umbenannten Konzern, der Weltöffentlichkeit vorgestellt wurde, beruht auf dem Mercedes A-Klasse Serienmodell. Die A-Klasse eignet sich wegen ihres Sandwichbodens besonders gut für eine platzsparende Unterbringung der Brennstoffzellen-Stacks⁸². Der NECAR 4 ist wieder ein direkt mit Wasserstoff betriebenes Brennstoffzellenfahrzeug. Im Vergleich zu einer regulären A-Klasse ist das Fahrzeug zwar ca. 300 kg schwerer, verfügt aber wegen der erstmaligen Unterbringung des gesamten Antriebssystems im Sandwichboden über das gleiche Platzangebot im Innenraum. Nur der Kofferraum wird durch den Wasserstoff-Tank (kyrogen; 5 kg Wasserstoff; Hersteller: Linde AG) etwas reduziert. Die Brennstoffzellen stammen wiederum von Ballard (Mark 700; 70 kW). Der NECAR 4 fährt mit flüssigem Wasserstoff, erreicht eine Höchstgeschwindigkeit von 145 km/h und hat eine Reichweite von bis zu 450 km. Die ein Jahr später von DaimlerChrysler präsentierte überarbeitete Version des NECAR 4, der so genannte NECAR 4 advanced, ist gezielt für den Einsatz bei der California Fuel Cell Partnership gebaut worden. Das Fahrzeug ist mit einer weiterentwickelten Antriebstechnik, bei der die Antriebskomponenten wesentlich kompakter sind, ausgestattet. Der im Gegensatz zum NECAR 4 mit gasförmigem Wasserstoff angetriebene NECAR 4a verfügt über einen Ballard-Brennstoffzellen-Stack (Mark 900; 75 kW), fährt mit einer Tankfüllung von zwei Kilogramm Wasserstoff rund 200 km weit und erreicht eine Höchstgeschwindigkeit von 145 km/h.

⁸² Der Sandwichboden, also der Raum zwischen Fahrzeugunterboden und Fahrgastzelle, der durch die spezielle Konstruktion der A-Klasse geschaffen wurde, zielte auf die Unterbringung von Batterien.



Bild 15: NECAR 5 (Quelle: DaimlerChrysler)

Ebenfalls im Jahr 2000 wurde der NECAR 5 in Anwesenheit des deutschen Bundeskanzlers Gerhard Schröder in Berlin vorgestellt. Das methanolbetriebene Brennstoffzellen-Fahrzeug NECAR 5 ist der technologische Nachfolger des NECAR 3. Im Gegensatz zu seinem Vorgänger ist beim NECAR 5 aber das komplette Antriebssystem samt Methanolreformer im Sandwichboden untergebracht, und bietet damit den Platz einer konventionellen Mercedes A-Klasse. Zudem konnte das Gewicht des Systems im Vergleich zum NECAR 3 um rund 300 kg verringert werden. Zusammen mit einem verbesserten Motor und einer höheren Leistung der Ballard-Brennstoffzelle ist der Antrieb des NECAR 5 nicht nur kompakter, sondern auch um 50% leistungsstärker. Im NECAR 5 liefert ein einzelner Brennstoffzellen-Stack 75 Kilowatt elektrische Leistung. Mit 25 Liter Methanol kommt der NECAR 5 auf eine Reichweite von ca. 450 km. Das Fahrzeug erreicht Geschwindigkeiten von über 150 Stundenkilometern. Eine überarbeitete Version dieses Fahrzeuges, den NECAR 5.2, stellte DaimlerChrysler 2001 vor. Der NECAR 5 wurde an verschiedenen Orten weltweit getestet. In Japan erhielt das Fahrzeug, neben dem Premacy FC-EV von Mazda (vgl. Kapitel 3.4.5.1), als erstes Brennstoffzellenfahrzeug überhaupt, die staatliche Zulassung für den öffentlichen Straßenraum. Beide Fahrzeuge wurden im Jahr 2001 in einem vom japanischen Wirtschaftsministerium (METI) geförderten Demonstrationsprojekt im Großraum Tokio getestet. Projektpartner war neben Mazda auch Nippon Mitsubishi Oil Co., Japans größte Mineralölgesellschaft. In den USA ist der NECAR 5 im Rahmen der California Fuel Cell Partnership eingesetzt worden und hat außerdem im Mai/Juni 2002 auf einer Transkontinentalfahrt von der Westküste zur Ostküste der USA mit 5250 km einen Langstreckenrekord für Brennstoffzellenfahrzeuge aufgestellt⁸³. DaimlerChrysler forscht auch an einer zweiten Generation von Methanol-Brennstoffzellen-Fahrzeugen. Ziel ist die Entwicklung einer Direktmethanol-Brennstoffzelle, die ohne Reformer auskommt. Damit würde das Antriebssystem wesentlich vereinfacht, kleiner und leichter. 2001 präsentierte DaimlerChrysler auf dem Gelände seines Forschungszentrums Ulm ein Gokart mit Direktmethanol-Brennstoffzelle (3 kW), das mit einer Tankfüllung 15 km weit kommt und eine Spitzengeschwindigkeit von 35 km/h erreicht.

Den aktuellsten Brennstoffzellen-Pkw präsentierte DaimlerChrysler am 8. Oktober 2002. Mit diesem Fahrzeug verlässt das Automobilunternehmen acht Jahre nach der Vorstellung des ersten Konzeptfahrzeugs NECAR 1 das reine Forschungsstadium. Das so genannte F-Cell wurde unter seriennahen Bedingungen aufgebaut und soll weltweit im Rahmen von Demonstrationsprojekten von Kunden im Alltag gefahren und erprobt werden. Dem Fahrzeug liegt

⁸³ Vgl. www.dcx.com/news/top/2002/t20605_g.htm.

die Langversion des Serienfahrzeugs A-Klasse zu Grunde. Das Brennstoffzellensystem (Ballard Mark 902; 85 kW) und die Wasserstoff-Drucktanks (350 bar; 1,8 kg Wasserstoff) finden komplett im Sandwichboden Platz. Das Fahrzeug wird mit gasförmigen Wasserstoff angetrieben, verfügt über eine Reichweite von ca. 150 km und eine Höchstgeschwindigkeit von 140 km/h.



Bild 16: Das aktuellste Brennstoffzellenfahrzeug von DaimlerChrysler – das „F-Cell“ (Quelle: DaimlerChrysler)

DaimlerChrysler hat angekündigt bis Ende 2004 eine Kleinserie von 60 F-Cells zu bauen, die in Japan, Singapur, Deutschland und USA/Kalifornien im Rahmen von Demonstrationsprojekten u.a. von Flottenkunden getestet werden sollen. Acht der Fahrzeuge werden im Rahmen des „Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project“ (JHFC) eingesetzt. Anstatt die Fahrzeuge wie Toyota (vgl. Kapitel 3.10.3) oder Honda (vgl. Kapitel 3.6.3) zu verleasen, schließt DaimlerChrysler in Japan mit seinen ersten „Kunden“ Partnerschaftsverträge ab, die auch eine Beteiligung der Partner an den laufenden Kosten des Fahrzeugeinsatzes, die so genannte Partnerschaftsgebühr, in Höhe von 1,2 Mio. Yen pro Monat (ca. 9250 €) beinhalten⁸⁴. Bis November 2003 hat DaimlerChrysler mit drei japanischen Firmen, u.a. Tokyo Gas Co. und Bridgestone Corp., Verträge abgeschlossen. In Singapur sollen sieben Brennstoffzellen-Pkws von DaimlerChrysler ab 2004 getestet werden⁸⁵. Weitere zehn F-Cell-Fahrzeuge werden im Rahmen der Clean Energy Partnership in Berlin ab 2004 demonstriert werden⁸⁶. Der größte Teil der Fahrzeuge wird aber vermutlich im Rahmen der California Fuel Cell Partnership eingesetzt werden. Die Fahrzeuge kosten jeweils gut eine Million Euro, wobei sich die Kosten der Brennstoffzelle alleine auf mehrere hunderttausend Dollar pro Stück belaufen⁸⁷.

⁸⁴ Vgl. HyWeb-Gazette 4. Quartal 2003.

⁸⁵ Vgl. HyWeb-Gazette 3. Quartal 2003.

⁸⁶ Vgl. Pressemitteilung des deutschen Bundesverkehrsministeriums vom 26.11.2003: „Mobil mit Wasserstoff“. Online-Dokument: www.pressrelations.de/i.cfm?r=140624.

⁸⁷ Vgl. Fritscher, Otto (2002): A-Klasse der Extra-Klasse: DaimlerChrysler startet Kleinserie mit Brennstoffzelle. In: Süddeutsche Zeitung vom 12-13.10.2002.



Bild 17: Daimler-Benz Brennstoffzellenbus NEBUS (Quelle: DaimlerChrysler)

Parallel zu der Forschung und Entwicklung von Brennstoffzellen-Pkws hat sich DaimlerChrysler bzw. Daimler-Benz auch mit dem Einsatz der Brennstoffzelle in Bussen und Transportern beschäftigt. Schon 1997 stellte Daimler-Benz seinen ersten Brennstoffzellen-Bus vor. Der „NEBUS“ („New Electric Bus“), basierend auf einem Mercedes-Benz-Stadtlinienomnibus O 405 N in Niederflerbauweise, ist mit einer 250 kW PEM Brennstoffzelle von Ballard/XCELLSiS⁸⁸ ausgerüstet. Der Bus wird mit gasförmigem Wasserstoff angetrieben und erreicht eine Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h. Die auf dem Dach angebrachten Wasserstofftanks (350 bar) ermöglichen eine Reichweite von 250 km. Der NEBUS demonstrierte im jeweils mehrwöchigen Linienbetrieb in Oslo, Hamburg, Perth, Melbourne, Mexico City und Sacramento seine Einsatzfähigkeit. Die zweite Generation von Brennstoffzellenbussen präsentierte DaimlerChrysler gleichzeitig mit dem Brennstoffzellen-Pkw F-Cell im Oktober 2002. Dabei war der präsentierte Mercedes-Benz Bus Citaro der erste einer Kleinserie von 33 Brennstoffzellen-Bussen, die ab 2003 in 10 europäischen und ab 2004 in der australischen Stadt Perth⁸⁹ im städtischen Linienbetrieb für zwei Jahre getestet werden sollen. Die europäischen Busse werden zum einen im Rahmen des EU-geförderten Programms CUTE (Clean Urban Transport for Europe) in Amsterdam, Barcelona, Hamburg, London, Luxemburg, Madrid, Porto, Stockholm und Stuttgart und im Rahmen des EU-geförderten Programm ECTOS (Ecological City Transport System)⁹⁰ in Reykjavik demonstriert⁹¹. In allen Städten erwerben die lokalen Verkehrsbetriebe mit öffentlicher Förderung jeweils ein Kontingent von drei Brennstoffzellen-Bussen (1,25 Mio. Euro pro Fahrzeug). Die Demonstrationsprojekte dienen zum einen dazu, die Brennstoffzellenbusse unter verschiedensten klimatischen und geographischen Bedingungen zu testen, und zum anderen, um verschiedene Möglichkeiten der Wasserstoffgewinnung und -infrastruktur zu demonstrieren.

⁸⁸ XCELLSiS war eine gemeinsame Tochterfirma von DaimlerChrysler und Ballard (s.u.).

⁸⁹ Weitere Informationen zum Demonstrationsprojekt in Perth finden sich unter www.dpi.wa.gov.au/fuelcells/outline.html.

⁹⁰ In Island testet DaimlerChrysler nicht nur Brennstoffzellen-Busse im Rahmen des ECTOS Projektes, sondern das Unternehmen beteiligt sich auch an dem Vorhaben der isländischen Regierung, das Energiesystem Island komplett auf Wasserstoff umzustellen. Zusammen mit dem norwegischen Energieversorger Norsk Hydro, dem Mineralölkonzern Shell und der isländischen Investitionsgesellschaft Vistorka hat man dafür 1999 ein gemeinsames Unternehmen namens „Icelandic New Energy“ gegründet.

⁹¹ Weitere Informationen zu CUTE und ECTOS unter www.fuel-cell-bus-club.com/



Bild 18: Citaro Brennstoffzellenbus von DaimlerChrysler in Hamburg (Quelle: Hamburger Hochbahn)

Der Citaro Brennstoffzellenbus ist ausgestattet mit einer Ballard Brennstoffzelleneinheit (205 kW). Die Druckwasserstofftanks (350 bar) sind wie beim Vorgänger NEBUS auf dem Dach untergebracht. Der Bus verfügt über eine Reichweite von 200 km, eine Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h und eine Beförderungskapazität von bis zu 70 Personen. Die ersten Brennstoffzellenbusse im Rahmen des CUTE Programms sind im Mai 2003 nach Madrid, im September 2003 nach Hamburg⁹² und im November 2003 nach Stuttgart⁹³ geliefert worden. Geplant ist, Brennstoffzellenbusse von DaimlerChrysler auch im Rahmen eines UN-Programms in fünf sich entwickelnden Ländern (Brasilien, Mexiko, Ägypten, Indien und China) einzusetzen⁹⁴.

Auch für den Einsatz in einem Transporter hat DaimlerChrysler eine Brennstoffzellen-Applikation entwickelt. Auf Anregung des Hamburger Hermes-Versand-Service („Otto-Versand“), einem DaimlerChrysler-Großkunden, ist ein Mercedes-Benz Sprinter mit einem Brennstoffzellenantrieb ausgestattet worden. Da Brennstoffzellensystem (75 kW) und Druckwasserstofftanks (250 bar) im Unterboden untergebracht werden konnten, wird der Laderaum des Fahrzeugs nicht eingeschränkt. Das Fahrzeug wird von DaimlerChrysler in Kooperation mit dem Hermes Versand seit 2001 für 2 Jahre im Alltagsbetrieb anfänglich in Stuttgart und später in Hamburg getestet. Damit ist der Transporter weltweit das erste Brennstoffzellen-Fahrzeug, das von einem Kunden im Alltagsbetrieb eingesetzt wird.

⁹² Vgl. www.hh2wasserstoff.de

⁹³ Vgl. DaimlerChrysler-Pressemitteilung vom 04.11.2003: „DaimlerChrysler übergibt drei Brennstoffzellen-Busse an die Stuttgarter Straßenbahnen AG“. Online-Dokument: www.daimlerchrysler.com/dccom/0,,0-5-7179-49-151532-1-0-0-0-0-0-66-7165-0-0-0-0-0-0,00.html

⁹⁴ Das Programm ist initiiert von der Global Environment Facility (GEF), eine Einrichtung des United Nations Development Program (UNDP). Es ist geplant, 30 bis 40 Busse in den genannten fünf Ländern zu testen. Die Kosten werden von der UN, der Industrie und den beteiligten Ländern getragen (Vgl. Wasserstoff-Spiegel Nr. 1/2001).



Bild 19: Brennstoffzellen-Transporter (Mercedes Sprinter) im Einsatz beim Hamburger Hermes Versand Service (Quelle: DaimlerChrysler)

Das Fahrzeug verfügt über eine Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h und einer maximalen Reichweite von 150 km. Im ersten Jahr hat das Fahrzeug 16.000 km im städtischen Lieferdienst mit einem „hervorragenden Gesamteindruck“ (DaimlerChrysler) zurückgelegt. Im Mai 2003 hat DaimlerChrysler mit dem amerikanischen Paketzustelldienst UPS und der US-amerikanischen Environmental Protection Agency (EPA) ebenfalls ein Testprogramm für Brennstoffzellenfahrzeuge vereinbart⁹⁵. Nachdem ursprünglich für 2003 geplant war zunächst ein F-Cell-Fahrzeug an UPS zu übergeben, um dann 2004 ein oder mehrere Brennstoffzellenbetriebene Transporter an UPS zu liefern, ist schon im Oktober 2003 der erste Mercedes-Benz Sprinter an den amerikanischen Lieferdienst übergeben worden⁹⁶. UPS will den Brennstoffzellen-Transporter, der mit baugleichen Brennstoffzellensystem wie der beim Hamburger Hermes-Versand eingesetzte Sprinter ausgerüstet ist, im täglichen Lieferdienst einsetzen. Eine Wasserstofftankstelle wird auf dem Gelände des EPA in Michigan von der Firma Air Products and Chemicals errichtet werden.

DaimlerChrysler, oder genauer der deutsche Teil des Konzerns, hat in den letzten zehn Jahren erhebliche Anstrengungen in der Entwicklung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen unternommen. So hat das Unternehmen nach eigenen Aussagen rund eine Milliarde Euro in die Entwicklung der neuen Technologie investiert. Ende 1996 hat DaimlerChrysler ein eigenes Entwicklungszentrum für die Forschung und Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie in der Nähe von Stuttgart eingerichtet. Laut DaimlerChrysler sind durch die Brennstoffzellentechnologie über 1000 High-Tech-Arbeitsplätze in Deutschland entstanden, davon rund 500 bei DaimlerChrysler und seinen Tochterunternehmen. Das hohe Engagement des Unternehmens hat auch zu einer beträchtlichen Anzahl von Demonstrationsfahrzeugen in verschiedenen Fahrzeugkategorien geführt, so dass DaimlerChrysler phasenweise (Ende der 1990er Jahre) mehr Prototypen aufgebaut hatte als alle anderen Automobilhersteller zusammen. Das Brennstoffzellen-Engagement von DaimlerChrysler ist besonders durch die Kooperation mit Ballard geprägt. Seit 1993 gibt es eine vertraglich fixierte Forschungs- und Entwicklungspartnerschaft mit Ballard, die 1997 in eine Kooperation überführt worden ist. „Wir wollen gemeinsam alle

⁹⁵ Vgl. www.daimlerchrysler.com/news/top2003/t30519_g.htm.

⁹⁶ Vgl. UPS-Pressemitteilung vom 09.10.2003: “DaimlerChrysler fuel cell Sprinter to be field-tested by UPS”. Online-Dokument: pressroom.ups.com/pressreleases/current/0,1088,4344,00.html.

Autofirmen der Welt beliefern⁹⁷, so benannte Ballards Präsident, Firoz Rasul, ein Ziel der Kooperation. 1998 wurde die Partnerschaft mit Blick auf Massenfertigung und Kostenreduzierung, wie auch zur globalen Lösung der Infrastrukturfrage, um den Partner Ford Motor Company erweitert. Sowohl DaimlerChrysler (320 Mill. US\$) wie auch Ford (420 Mill. US\$) erwarben Anteile an Ballard. Zudem gründeten DaimlerChrysler und Ballard 1997 zwei gemeinsame Firmen. Die dbb (Daimler-Benz Ballard) Fuel Cell Engines GmbH, die später in XCELLSIS umbenannt wurde, war verantwortlich für die Entwicklung, Produktion und Kommerzialisierung von Brennstoffzellen-Antrieben für Busse, Automobile und Lkws. Die Marketingfirma Ballard Automotive sollte Brennstoffzellen-Antriebe für den mobilen Bereich an Autohersteller vermarkten. Eine dritte Firma, die Ecostar Electric Drive Systems, wurde vom neuen Partner Ford in die Kooperation mit eingebracht. Ecostar liefert auch für die DaimlerChrysler-Brennstoffzellenfahrzeuge, seit dem NECAR 4, die Elektromotoren und -Antriebskomponenten. Im November 2001 kam es zur Umstrukturierung dieses Netzwerkes von Unternehmen und der gegenseitigen Beteiligungen. Die drei ausgegründeten Gesellschaften wurden ins Unternehmen Ballard eingegliedert, mit dem Ziel Systemlösungen aus einer Hand entwickeln und anbieten zu können. Zudem wurde die Laufzeit der strategischen Partnerschaft um 20 Jahre verlängert. DaimlerChrysler hält heute 24,2% der Anteile an Ballard Power Systems, und kooperiert auch personell eng mit dem kanadischen Unternehmen. Neben der Kooperation mit Ballard und Ford ist DaimlerChrysler Anfang dieses Jahres eine gemeinsame Entwicklungspartnerschaft mit fünf weiteren Automobilunternehmen und einigen Zulieferern zur Entwicklung eines 700bar Hochdrucktanks zur Speicherung von Wasserstoff eingegangen⁹⁸. Die Projektpartner aus der Automobilindustrie, neben DaimlerChrysler noch Hyundai, Ford, Nissan, PSA und Toyota, reagieren damit auf den von GM und Quantum Technologies 2002 präsentierten und schon im GM's aktuellen Brennstoffzellenfahrzeug HydroGen3 compressed 700 genutzten 700 bar Wasserstofftank. Der verbesserte Tank soll unter der Leitung des kanadischen Unternehmens Powertech Labs bis Januar 2004 entwickelt und ab Anfang 2005 kommerziell genutzt werden.

3.2.4 Technologieführer

DaimlerChryslers Strategie im Bereich Brennstoffzellen-Antrieb bzw. alternative Antriebe und Treibstoffe hat sich im Laufe des letzten Jahres verändert und erweitert. Am deutlichsten wird diese Veränderung bei der Frage nach dem (Übergangs-) Kraftstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge. So vertrat das Unternehmen jahrelang eine Zwei-Kraftstoffstrategie. In dieser Strategie war Wasserstoff das langfristige Ziel und die angestrebte Ideallösung im Bezug auf Emissionen und Wirkungsgrad beim Einsatz in der Brennstoffzelle. Kurz- und mittelfristig hielt man Methanol für den geeignetsten Treibstoff zum Einsatz in Brennstoffzellenfahrzeu-

⁹⁷ Vgl. Karisch, Karl-Heinz (1997): Ein wenig Wasserdampf und für 40 Mark Hoffnung: Daimler-Benz will gemeinsam mit einer kleinen kanadischen Firma den Öko-Automarkt der Zukunft aufrollen. In: Frankfurter Rundschau vom 09.09.1997.

⁹⁸ Vgl. o.V. (2003): Wasserstoff mit 700 bar. In: Tagesspiegel vom 26.04.03; o.V. (2003): Hyundai and Five Global Automakers Team Up on Fuel Cell Project. Online-Dokument: www.eyeforfuelcells.com/PrintVersion.asp?ReportID=1875 .

gen. Insbesondere da Methanol über mehrere Vorteile verfügt. So ist der Kraftstoff flüssig und damit leichter handhabbar, er lässt sich auch regenerativ herstellen und wäre damit CO₂ neutral, die vorhandene Kraftstoff-Infrastruktur ließe sich mit relativ geringen Änderungen an Methanol anpassen bzw. ergänzen und die An-Bord-Reformierung von Methanol ist technisch einfacher umsetzbar und ausgereifter als die Benzinreformierung. Diese praktischen Vorzüge von Methanol machten DaimlerChrysler in der Automobilindustrie jahrelang zu dem entschiedensten Befürworter dieser Kraftstoffoption. Inzwischen hat der Automobilkonzern aber (zunächst einmal) von der Methanolooption Abstand genommen und setzt beim Treibstoff für die eigenen Brennstoffzellenfahrzeuge auf gasförmigen Wasserstoff. Andreas Truckenbrodt, Verantwortlicher bei DaimlerChrysler für alternative Antriebe, erläutert die aktuelle Kraftstoffstrategie auf dem Internationalen Elektrofahrzeug Symposium (EVS-20) im November 2003 wie folgt: „The first generation of vehicles will be fueled with compressed hydrogen [...]. Reformers to extract hydrogen from other fuels, such as gasoline or methanol, add complexity and reduce the efficiency of fuel cell systems“⁹⁹.

Auch bei der Frage inwieweit die Brennstoffzellen-Aktivitäten in eine Gesamtstrategie im Bereich alternative Antriebe und Kraftstoffe eingebunden sind, was u.a. einen Technologietransfer zwischen den verschiedenen Optionen ermöglicht, hat es bei DaimlerChrysler Veränderungen gegeben. Hatte man seit Mitte der 1990er Jahre beim Thema alternative Antriebe auf die Entwicklung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen¹⁰⁰ fokussiert, und damit, wie andere Automobilhersteller auch, den frühen Einstieg in die Hybridtechnologie verpasst, ist das Portfolio im Bereich umweltfreundliche und nachhaltige Mobilität jetzt deutlich erweitert worden¹⁰¹. Dieses setzt sich jetzt aus fünf Elementen zusammen: Weitere Optimierung der Verbrennungsmotoren, weltweite Verbesserung konventioneller Kraftstoffe, Entwicklung und Einsatz weitgehend CO₂-neutraler Bio-Kraftstoffe, Weiterentwicklung von Hybridantrieben und der Brennstoffzellentechnologie. Im Bereich alternative Antriebe wird der ICE-Hybridantrieb jetzt vom neuen Forschungs- und Technologievorstand Thomas Weber als „Zwischenschritt“ auf dem Weg zur Brennstoffzelle bezeichnet¹⁰². Neben Brennstoffzelle und dem Hybridantrieb haben für das Unternehmen inzwischen auch alternative umweltfreundlichere

⁹⁹ Vgl. o.V. (2003): DaimlerChrysler to expand Fuel Cell Vehicle Fleet to more than 100 in 2004. Online-Dokument: www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/IndustryInformation/IndustryInformationExternal/NewsDisplayArticle/0,1602,3644,00.html.

¹⁰⁰ So hat DaimlerChrysler im Gegensatz zu Wettbewerbern wie Toyota, Honda oder Ford seit Anfang an auf einen reinen Brennstoffzellenantrieb gesetzt, d.h. zur Unterstützung der Brennstoffzelle wurden keine Batterien oder Hochleistungskondensatoren genutzt. Andere Hersteller, als die genannten, versuchen durch Hybridkonzepte die Schwächen der Brennstoffzelle (Start und plötzliche Beschleunigung) auszugleichen. Laut eines Berichtes des Hydrogen & Fuel Cell Letters vom November 2002 soll DaimlerChrysler seine aktuellen Brennstoffzellenfahrzeuge F-Cell inzwischen aber auch mit einer Batterie ausgestattet haben.

¹⁰¹ Vgl. zu dem im Folgenden Gesagten die ausführliche Darstellung der Gesamtstrategie im Bereich nachhaltige Mobilität in der aktuellen (2003) DaimlerChrysler-Broschüre „Energy for the Future“. Die Online-Fassung der Broschüre findet sich unter: www.daimlerchrysler.com/dccom/0,,0-5-7166-49-142465-1-0-0-0-0-0-1372-7166-0-0-0-0-0-0-0,00.html.

¹⁰² Vgl. DaimlerChrysler-Pressemitteilung vom 20.03.2003: „Visionen für die Fahrzeuge von morgen“. Online-Dokument: www.daimlerchrysler.com/dccom/0,,0-5-7145-49-67176-1-0-0-0-0-0-9-0-0-0-0-0-0-0,00.html.

Kraftstoffe an Relevanz gewonnen, da sie kurzfristiger als regenerativ hergestellter Wasserstoff einsetzbar sind und zudem vom konventionellen Verbrennungsmotor genutzt werden können. Dies sind zum einen Gas-To-Liquid-Kraftstoffe (GTL), also aus Erdgas hergestellte hochwertige und emissionsarme Dieselmotorkraftstoffe, und zum anderen Biomass-To-Liquid-Kraftstoffe (BTL), also aus Biomasse hergestellte synthetische Kraftstoffe. Im Juni 2003 stellte DaimlerChrysler den BTL-Kraftstoff „Biotrol“ in Stuttgart vor¹⁰³. Dieser Kraftstoff wird im Rahmen eines vom deutschen Bundeswirtschaftsministerium geförderten Forschungsprojektes von der Firma Choren in Sachsen aus Biomasse (Holzreste) hergestellt und kann an einer neu eingerichteten Tanksäule in Stuttgart von Forschungsfahrzeugen getankt werden. Der Automobilkonzern sieht in BTL-Kraftstoffen langfristig auch einen Weg zur umweltfreundlichen Gewinnung von Wasserstoff. Damit nähert sich die Kraftstoffstrategie von DaimlerChrysler dem Pendant von Volkswagen an. Auch bei Volkswagen steht ein aus Biomasse gewonnener synthetischer Kraftstoff, nämlich „SunFuel“, im Fokus (vgl. Kapitel 3.11.4)¹⁰⁴. So ist es auch kein Zufall, dass Volkswagen sich im Herbst 2002 dem BTL-Forschungsprojekt in Sachsen angeschlossen hat.

Neben diesen sich verändernden Bausteinen weist die Gesamtstrategie von DaimlerChrysler im Bereich Brennstoffzelle auch zwei Konstanten auf. Diese sind die frühzeitige und enge strategische Partnerschaft mit dem Brennstoffzellenhersteller Ballard und das Ziel der Technologieführerschaft. Seit den Anfängen der Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen von DaimlerChrysler im Bereich Brennstoffzelle gibt es die schon beschriebene enge Kooperation mit dem kanadischen Brennstoffzellen-Hersteller Ballard Power Systems. Diese strategische Partnerschaft war ein Element des Vorsprungs, den der Konzern jahrelang hatte. Auch heute noch zählen die Brennstoffzellensysteme von Ballard zu den weltweit technisch am ausgereiftesten. Aber auch wenn die Beteiligung von DaimlerChrysler an Ballard bei fast 25 % liegt und es zudem eine enge Kooperation gibt, hat DaimlerChrysler damit doch eine der Kernkompetenzen eines Automobilherstellers, die Entwicklung und Produktion des Fahrzeugantriebes, zu einem Zulieferer ausgelagert, der zudem auch andere Automobilhersteller beliefert. Inwieweit dies zukünftig ein strategischer Nachteil ist, wird sich erweisen.

Der zweite konstante Baustein der DaimlerChrysler Brennstoffzellen-Strategie ist das Bewusstsein und der Anspruch des Unternehmens auch bei der Zukunftstechnologie „Brennstoffzelle“ die Rolle der Technologieführerschaft¹⁰⁵ einzunehmen. Ziel des Unternehmens ist es bei der Brennstoffzellen-Technologie, die für DaimlerChrysler „langfristig die größten Entwicklungspotentiale aller alternativen Antriebe“ hat, die Spitzenposition, die man sich Mitte bis Ende der 1990er Jahre erarbeitet hatte, zu erhalten und auszubauen, und die Marktführerschaft im Bereich Brennstoffzellen-Fahrzeuge zu erringen. Diese technologiegetriebene, besonders auf die Antriebstechnologie fixierte „first-to-market“-Strategie hat in den

¹⁰³ Vgl. DaimlerChrysler-Pressemitteilung vom 30.06.2003: „Erster CO2-neutraler Designer-Dieselmotorkraftstoff der Welt vorgestellt“. Online-Dokument: www.daimlerchrysler.com/dccom/0,,0-5-7145-49-73167-1-0-0-0-0-0-9-0-0-0-0-0-0-0,00.html.

¹⁰⁴ Auch die in der DaimlerChrysler-Broschüre „Energy for the future“ dargestellte „Kraftstoff-Roadmap“ ähnelt der evolutionären Kraftstoffstrategie von Volkswagen.

¹⁰⁵ Dieses Bewusstsein bzw. dieser Anspruch ist wohl ein wesentlicher Bestandteil der Unternehmenskultur von DaimlerChrysler, genauer von Mercedes-Benz.

letzten beiden Jahren einige Dämpfer erhalten. Zum einen hat sich die Entwicklung der Technologie als schwieriger erwiesen als zunächst gedacht. Zweitens haben andere Hersteller, die erst aufgrund der Dynamik, die durch die Aktivitäten von DaimlerChrysler beim Thema Brennstoffzelle ausgelöst wurde, begonnen haben, eigene Anstrengungen zu unternehmen, inzwischen aufgeholt. Ob eine „first-to-market“-Strategie bei einer potenziell disruptiven Technologie, wie der Brennstoffzelle, die einen umwälzenden Transformationsprozess bei einem großtechnischen Systems wie dem Automobil mit den dazugehörigen Koordinierungsproblemen und den notwendigen erheblichen Investitionen notwendig macht, gangbar ist, ist nicht einfach zu beantworten¹⁰⁶. Andererseits hat DaimlerChrysler aber gerade durch diese Strategie, die Initiierung von Demonstrationsprojekten¹⁰⁷ und den Aufbau von strategischer Partnerschaften den Wettbewerb industrieweiter Entwicklungsanstrengungen ausgelöst und damit die Technologieentwicklung entscheidend vorangetrieben. Mit den Dämpfern, die diese Strategie erhalten hat, hat sich auch die angekündigte Markteinführung verschoben. Nachdem DaimlerChrysler den Beginn der Serienfertigung jahrelang für das Jahr 2004 avisiert hatte, verkündet man heute einen anderen Zeitplan, der in fünf Phasen unterteilt ist:

- „Phase 1: Feasibility (1997-2000)
- Phase 2: Market Preparation (2000-2003)
- Phase 3: ‘Fit for Daily Use’ (2003-2007)
- Phase 4: ‘Ramp-Up’ (2007-2010)
- Phase 5: Commercialization (starting 2010)“¹⁰⁸.

In Rahmen dieser Zeitplanes befindet man sich zur Zeit in der dritten Phase „Fit for Daily Use“¹⁰⁹. Mit 100 Brennstoffzellen-Demonstrationsfahrzeugen (Pkw, Transporter, Busse), die DaimlerChrysler bis Ende 2004 aufbauen und weltweit in unterschiedlichen Einsatzfeldern unter realen Alltagsbedingungen testen will, unterstreicht das Unternehmen auch in dieser Phase seinen Anspruch der Technologieführerschaft. Als strategischer Vorteil bei der Markteinführung der mobilen Anwendung der Brennstoffzelle könnte sich erweisen, dass DaimlerChrysler mit Pkws, Transportern und Bussen ein breites Portfolio an Brennstoffzellenfahrzeugen hat. Gerade Brennstoffzellenbusse, die im städtischen Flottenbetrieb eingesetzt wer-

¹⁰⁶ „Und wer weiß schon, wie wichtig es sein wird, der Erste auf dem Markt für diese neue Technologie gewesen zu sein,“ sagt Mark J. Amstock, der Projektmanager für Umweltautos bei Toyota“ (aus dem Wall Street Journal, abgedruckt im Tagesspiegel 26.03.1999).

¹⁰⁷ Die Initiierung von Demonstrationsprojekten und der durch das Vorantreiben des Themas in der Öffentlichkeit ausgelöste Wettbewerb ist zudem wohl auch hilfreich für die Gewinnung von konzerninterner Legitimität und konzerninternen Ressourcen.

¹⁰⁸ Der zeitliche Plan wurde so von Prof. Dr. Ferdinand Panik, damals noch Leiter des Projekthauses Brennstoffzelle, in seinem Vortrag „Visions for the Fuel Cell Future – DaimlerChrysler Strategies“ auf der f-cell-Konferenz am 14. Oktober 2002 in Stuttgart vorgestellt.

¹⁰⁹ Vgl. o.V. (2003): DaimlerChrysler to expand Fuel Cell Vehicle Fleet to more than 100 in 2004. Online-Dokument: www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/IndustryInformation/IndustryInformationExternal/NewsDisplayArticle/0,1602,3644,00.html.

den, könnten sich als früher Markt für die mobile Anwendung der Brennstoffzelle herausstellen (Vgl. Kapitel 5).

3.2.5 Weitere Brennstoffzellen- und Wasserstoffaktivitäten im DaimlerChrysler-Konzern

3.2.5.1 Chrysler

Auch beim amerikanischen Teil des DaimlerChrysler Konzerns arbeitet man, wenn auch im geringeren Maße, am Thema Brennstoffzelle. Chrysler hat, wie die beiden anderen amerikanischen Automobilkonzerne auch, erst relativ spät begonnen, sich mit der Brennstoffzelle intensiv zu beschäftigen. 1997 präsentierte der Hersteller auf der Detroit Motor Show ein erstes Mock-up eines Brennstoffzellenfahrzeugs und kündigte an, in zwei Jahren ein benzinbetriebenes Brennstoffzellenfahrzeug zu präsentieren. Das Fahrzeug sollte einen Multi-reformer zur Reformierung des Benzins nutzen, der von der amerikanischen Firma Arthur D. Little im Rahmen der US-amerikanischen Partnership for a New Generation Vehicle (PNGV) entwickelt worden war.



Bild 20: Jeep Commander 2 (Quelle: DaimlerChrysler)

1999 wurde von Chrysler dann tatsächlich der Jeep Commander, ein Konzeptfahrzeug mit Benzinreformer, in den USA vorgestellt. Der Jeep Commander war aber technisch nicht ausgereift, so dass das Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug nur im Batteriemodus fuhr¹¹⁰. Ein Jahr später, im November 2000, stellt Chrysler den in Form und Design fast identischen Jeep Commander 2 vor. Dieses auf dem Jeep Grand Cherokee basierende Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug ist im Gegensatz zu seinem Vorgänger mit einem Methanolreformer ausgestattet. Die Ballard Brennstoffzelle (50 kW) wird ergänzt durch eine Nickel-Metall-Hybridbatterie, die zusätzliche Energie bei Leistungsspitzen und bei Kaltstarts liefert. Zudem speichert die Batterie die zurückgewonnene Bremsenergie. Brennstoffzelle und Batterie treiben zwei Wechselstrom-Induktionsmotoren an, je einen pro Achse. Damit verfügt das Fahrzeug über einen permanenten Allradantrieb.

¹¹⁰ Vgl. www.h2cars.de.



Bild 21: Chrysler Natrium (Quelle: DaimlerChrysler)

Bei der dritten Generation von Chrysler Brennstoffzellenfahrzeugen erprobt Chrysler wiederum eine andere Möglichkeit der Wasserstoffversorgung. Der „Natrium“, basierend auf dem Chrysler Serienfahrzeug Town & Country Minivan, fährt mit Natriumborhydrid (NaBH_4), ein weißes Salz, in dessen Molekülen relativ viel Wasserstoff steckt. Mit Hilfe eines Katalysators des amerikanischen Unternehmen Millennium Cell entsteht elementarer Wasserstoff, der die Energie für die Brennstoffzelle (Ballard Mark 901; 75 kW) liefert. Als Beiprodukt entsteht Borax¹¹¹, das wieder zu Natriumborhydrid aufgearbeitet werden kann. Das Fahrzeug ist wie der Jeep Commander 2 ein Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug, das mit einer Batterie (Lithium-Ion; 40 kW) ausgestattet ist. Die Bremsenergie wird bei diesem Fahrzeug ebenfalls zurückgewonnen. Das Brennstoffzellensystem ist komplett im Unterboden des Fahrzeugs untergebracht, so dass es keine Raum- oder Nutzungseinschränkungen gibt. Das Fahrzeug erreicht mit einer Tankfüllung Natriumborhydrid 500 km Reichweite. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 129 km/h.



Bild 22: Jeep Treo Konzeptfahrzeug (Quelle: Der Spiegel)

Ein weiteres Brennstoffzellenfahrzeug stellte Chrysler auf der Tokyo Motor Show 2003 vor¹¹². Das Konzeptfahrzeug Jeep Treo ist ein dreisitziges Stadtfahrzeug, dass von zwei

¹¹¹ Borax wird ‚normalerweise‘ als Bestandteil von Waschmitteln benutzt.

¹¹² Vgl. o.V. (2003): Da Waren's nur noch drei. In: Spiegel Online vom 25.10.2003. Online-Dokument: www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,271066,00.html; vgl. auch www.h2cars.biz/artman/publish/article_307.shtml.

Elektromotoren, je einer für Vorder- und Hinterachse, angetrieben wird. Das Fahrzeug ist so konstruiert, dass es Brennstoffzellen- und X-by-Wire-Technologie nutzen kann.

3.2.5.2 Freightliner

Die US-amerikanische Lkw-Hersteller Freightliner, ein DaimlerChrysler Tochterunternehmen, hat Mitte 2000 eine weitere mögliche Anwendung der Brennstoffzellentechnik im mobilen Bereich vorgestellt¹¹³. Um auch im Stand über elektrische Energie beim Lkw zu verfügen, wird i.d.R. der Motor im Leerlauf betrieben, was zu Emission von Abgasen und Lärm und zu einem erheblichen Verbrauch von Diesel-Kraftstoff führt. Die elektrische Energie wird besonders bei Standzeiten in der Nacht und in Anbetracht zunehmender Ausrüstung der Fahrzeuge mit elektrischen Geräten gebraucht.



Bild 23: Freightliner Century Class S/T Heavy-duty Truck (Quelle: University of California Davis)

Bild 24: Freightliner Brennstoffzellen APU (Quelle: University of California Davis)

Für die Stromversorgung hat Freightliner deswegen im Rahmen eines vom US-amerikanischen Verteidigungsministerium geförderten Projektes einen „Freightliner Century Class S/T Heavy-duty Truck“ mit einer Brennstoffzellen-APU, bestehend aus zwei Ballard PEM-Brennstoffzellen, ausgestattet. Die Brennstoffzellen werden mit Flüssigwasserstoff betrieben. Sie leisten über 1,4 kW bei 12 Volt Gleichspannung oder 120 Volt Wechselspannung. Das APU-Brennstoffzellensystem ist von Freightliner und XCELLSiS entwickelt worden und soll 2005 marktreif sein.

¹¹³ Vgl. Freightliner Pressemeldung vom 18/07/2000. Online-Dokument: www.freightliner.com/news/detail.asp?id=24; Wasserstoff-Spiegel Nr. 4/00. DaimlerChrysler hat im Jahr 2000 auch eine APU für einen Pkw (S-Klasse) vorgestellt.

3.2.5.3 Mitsubishi Motors

Beginn der Wasserstoff-/Brennstoffzellen-Aktivitäten Angekündigte Serienproduktion	Fahrzeuge [Konzept- (K) Prototyp- (P) Demonstration- (D) Seriennahes- (Sn) Serienfahrzeug (S)]	Höhe der Investitionen/ Anzahl der involvierten Mitarbeiter	Teilnahme an Demonstrationsprojekten [Kalifornien (CaFCP) Japan (JHFC) Deutschland/Berlin (CEP)]	Partnerschaften/ Kooperationen	Strategie
Mitsubishi hat erstes BZ-Konzeptfahrzeug 1999 vorgestellt Keine Ankündigung	Mitsubishi Fuel Cell Vehicle (1999) CH ₃ OH-BZ (K) Mitsubishi Space Liner (2001) CH ₃ OH-BZ (K) Mitsubishi FCV Grandis Minivan (2003) CGH ₂ -BZ (D)	Beides unbekannt	Seit 2003 Teilnahme an dem JHFC, in dessen Rahmen das Mitsubishi FCV getestet werden soll	Seit 2000 Kooperation mit DaimlerChrysler bei der Entwicklung von BZ-Fahrzeugen	Keine verkündete Strategie

Tabelle 3: Wasserstoff –und Brennstoffzellenaktivitäten von Mitsubishi

DaimlerChrysler ist am japanischen Pkw-Hersteller Mitsubishi Motors Corporation (MMC) seit dem Jahr 2000 bzw. 2001 mit 37,3 % beteiligt. MMC ist Teil der japanischen Mitsubishi-Gruppe. Bis zum Jahr 2003 hat Mitsubishi im Bereich Brennstoffzelle nur ein Mock-up und ein Konzeptfahrzeug vorgestellt. Auf der Tokyo Motor Show 1999 wurde das Mitsubishi Fuel Cell Vehicle (MFCV) präsentiert¹¹⁴. Das mit Methanol betriebene Fahrzeug ist mit einem von MMC selbst entwickeltem Brennstoffzellensystem ausgestattet, das in den Fahrzeugboden passt. Bei der Entwicklung des Brennstoffzellenfahrzeuges arbeiteten MMC mit Mitsubishi Heavy Industries (Brennstoffzellensystem und Reformer) und mit Mitsubishi Electric (Elektro-Motor und Kontroll-System) zusammen. Nachdem DaimlerChrysler Anteile von MMC erworben hatte, verkündeten die Mitsubishi-Gruppe und DaimlerChrysler, in Zukunft bei der Entwicklung von Brennstoffzellensystemen für die automobilen Anwendung zusammenarbeiten zu wollen. Beide Firmen wollen die fortgeschrittene Brennstoffzellentechnik von Mitsubishi Heavy¹¹⁵ und Nippon Mitsubishi mit der Autotechnik von Mitsubishi Motors und DaimlerChrysler kombinieren. Das angestrebte Gemeinschaftsprojekt dürfte laut der Zeitschrift „Handelsblatt“ einen Kostenrahmen haben, der die Milliardengrenze überschreitet¹¹⁶.

¹¹⁴ Vgl. www.mitsubishi-motors.co.jp/docs1/Tokyo_Motor_Show/technology/index.html.

¹¹⁵ U.a. hat Mitsubishi Heavy Industries Mitte 2002 verkündet, dass die Firma einen kompakten Brennstoffzellen Elektro-Generator entwickelt hat.

¹¹⁶ Vgl. Wasserstoff-Spiegel 6/00; Wasserstoff-Spiegel Nr. 3/01.



Bild 25: Mitsubishi Space Liner (Quelle: H&FCL)

Auf der Tokyo Motor Show 2001 stellte MMC dann das Brennstoffzellen-Konzeptfahrzeug „Mitsubishi Space Liner“ vor. Das methanolbetriebene Brennstoffzellen-System (75 kW) ist übernommen von DaimlerChrysler NECAR 5. Das Fahrzeug verfügt mit zwei Elektromotoren, jeweils an Vorder- und Hinterachse, über einen Vierradantrieb.

Im September 2003 stellte die Mitsubishi Motor Corporation den ersten fahrfähigen Prototypen eines Brennstoffzellenfahrzeuges vor¹¹⁷. Das Mitsubishi FCV beruht auf dem im Mai 2003 in Serie gegangenen Mitsubishi Grandis Minivan. Das Fahrzeug übernimmt das aktuelle Brennstoffzellensystem von DaimlerChrysler, ist mit einer 68 kW PEM-Brennstoffzelle von Ballard ausgestattet und wird mit Druckwasserstoff (350 bar) betrieben. Die Reichweite des Fahrzeuges beträgt 150 km und die Höchstgeschwindigkeit 140 km/h. Anfang November erhielt MMC die staatliche Zulassung vom japanischen Ministerium für Land, Infrastruktur und Verkehr, das Mitsubishi FCV in Japan auf öffentlichen Straßen zu testen. Die Straßentests werden auch im Rahmen des Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstrationsprojekts stattfinden, an dem MMC mit dem FCV teilnimmt¹¹⁸.



Bild 26: Mitsubishi FCV (Quelle: Mitsubishi Motor Corporation)

¹¹⁷ Vgl. Mitsubishi-Pressemitteilung vom 17.09.2003: „Mitsubishi Motors Builds Fuel-Cell Vehicle“. Online-Dokument: media.mitsubishi-motors.com/pressrelease/e/corporate/detail32.html.

¹¹⁸ Vgl. Mitsubishi-Pressemitteilung vom 05.11.2003: „Mitsubishi FCV Receives Vehicle Type Certification“. Online-Dokument: media.mitsubishi-motors.com/pressrelease/e/corporate/detail915.html.

3.3 Fiat

3.3.1 Überblickstabelle Fiat

Beginn der Wasserstoff-/Brennstoffzellen-Aktivitäten Angekündigte Serienproduktion	Fahrzeuge [Konzept- (K) Prototyp- (P) Demonstration- (D) Seriennahes- (Sn) Serienfahrzeug (S)]	Höhe der Investitionen/ Anzahl der involvierten Mitarbeiter	Teilnahme an Demonstrationsprojekten [Kalifornien (CaFCP) Japan (JHFC) Deutschland/Berlin (CEP)]	Partnerschaften/ Kooperationen	Strategie
Fiat präsentiert erstes Brennstoffzellen-Fahrzeug 2001 Keine Ankündigung	Seicento Elettra H2 Fuel Cell (2001) Batterie-Elektrofahrzeug mit CGH ₂ -BZ als Range Extender Seicento FCV (2003) CGH ₂ -BZ (P) Panda Hydrogen (2003) CGH ₂ -BZ (P)	Fiat investiert 7 Mio. Euro pro Jahr in die F&E der BZ-Technik Anzahl der Mitarbeiter unbekannt	Keine Teilnahme	Förderung des Forschungsprojekts durch das italienische Umweltministerium und die EU Fiat bezieht Brennstoffzelle von Nuvera	Nachdem Fiat die Brennstoffzelle zunächst als Range Extender für Elektrofahrzeuge eingesetzt hat, hat man inzwischen auch Fahrzeuge mit BZ-Antrieb aufgebaut Fiat prüft mehrere Kraftstoffoptionen

Tabelle 4: Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten von Fiat

3.3.2 Das Brennstoffzellen-Stadtfahrzeug

Der italienische Autokonzern Fiat, an dem GM seit 2000 mit 20 % beteiligt ist, beschäftigt sich in begrenztem Maße mit der Brennstoffzelle. Die Entwicklungen des Automobilunternehmens stecken aber noch in den Anfängen. Im Februar 2001 stellte Fiat den ersten Prototypen, den Seicento Elettra H2 Fuel Cell, vor¹¹⁹. Das Fahrzeug basiert auf Fiats Batterie-Elektrofahrzeug-Serienmodell Seicento Elettra, von dem Drehstrom-Motor, Batterien und Elektroantrieb übernommen wurden. Die vom Brennstoffzellenhersteller Nuvera erworbene PEM-Brennstoffzelle (7 kW) dient dem Elektro-Fahrzeug als Range Extender. Das Brennstoffzellensystem ist unter dem Kofferraum des Fahrzeuges und die sechs Druckwasserstoff-Gasflaschen (200 bar) sind hinter den Vordersitzen untergebracht. Die Position der Gasflaschen macht aus dem Fahrzeug einen Zweisitzer. Der Seicento Elettra H2 fuel cell ist ein reines Stadtfahrzeug. Das Fahrzeug verfügt über eine maximale Reichweite von 140 km und eine Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h. Das Fahrzeug wurde im Rahmen eines vom italienischen Umweltministerium und der EU geförderten Forschungsprojekt im Fiat Entwicklungszentrum „Centro Ricerche Fiat“ (CRF) entwickelt. Das Fahrzeug ist inzwischen 3000 km ohne erhebliche Probleme gefahren.

¹¹⁹ Vgl. HyWeb-Gazette 2. Quartal 2001; o.V. (2001): Fiat Prototyp: Zweisitzer zum Ausprobieren. In: Spiegel-Online vom 14. März 2001. Online-Dokument: www.spiegel.de/auto/fahrberichte/0,1518,122481,00.html.



Bild 27: Fiat Seicento Elettra H2 FC (Quelle Bild: Der Spiegel)

Im Bezug auf die Frage der Wasserstoffspeicherung beschäftigt sich Fiat mit mehreren Optionen wie dem Metallhydrid-Speicher und der Methanol- bzw. Benzin-Reformierung. Im Oktober 2002 hat Fiat neun weitere Brennstoffzellen-Stacks vom Brennstoffzellenhersteller Nuvera erworben. Anlässlich des Kaufs sagte der Vizepräsident des CRF: „The decision to purchase additional stacks from Nuvera further validates our intentions to advance the investigation of fuel cell vehicles and promote clean technologies to solve the environmental problems of urban city centers“¹²⁰. Diese Ankündigung ist mit der Präsentation von zwei weiteren Brennstoffzellenfahrzeugen im Oktober 2003 von Fiat eingelöst worden¹²¹.



Bild 28: Fiat Seicento FCV (Quelle: www.h2cars.de)

Bild 29: Fiat Panda Hydrogen (Quelle: www.h2cars.de)

Beide Prototypen sind mit Brennstoffzellen (40 kW) der Firma Nuvera ausgestattet. Mit seinem 68 Liter Druckwasserstofftank (350 bar) sollen die Fahrzeuge jeweils eine Reichweite von 220 km und eine Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h haben. Bei der Vorstellung der Fahrzeuge bezifferte Nevi di Gusto, Direktor für die Produktentwicklung bei Fiat Auto, die Höhe der jährlichen Aufwendung von Fiat für die Entwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen auf 7 Millionen Euro¹²².

¹²⁰ Vgl. Nuvera-Pressemitteilung vom 7.10.2002: „Nuvera Supplies Fuel Cell Stacks to Fiat Research Center to Power City Cars“. Online-Dokument: www.nuvera.com/news/pr_fiat.htm.

¹²¹ Vgl. Nuvera-Pressemitteilung vom 29.10.2003: „Nuvera Fuel Cell Stack Technology Demonstrated on FIAT New Generation Hydrogen Cars. Online-Dokument: www.nuvera.com/news/pr_crf.htm; vgl. auch HyWeb-Gazette 4. Quartal 2003.

¹²² Vgl. Brennstoffzellen Newsletter 30-2003.

3.4 Ford

3.4.1 Überblickstabelle Ford

Beginn der Wasserstoff-/Brennstoffzellen-Aktivitäten Angekündigte Serienproduktion	Fahrzeuge [Konzept- (K) Prototyp- (P) Demonstration- (D) Seriennahes- (Sn) Serienfahrzeug (S)]	Höhe der Investitionen n/ Anzahl der involvierten Mitarbeiter	Teilnahme an Demonstrationsprojekten [Kalifornien (CaFCP) Japan (JHFC) Deutschland/Berlin (CEP)]	Partnerschaften/ Kooperationen	Strategie
<p>Ford beschäftigt sich seit den 1980er Jahren mit der Brennstoffzelle. Intensivere F&E zum Wasserstoff-Verbrennungsmotor und zur Brennstoffzelle ab 1998</p> <p>Beginn der Serienproduktion frühestens ab 2010</p>	<p>P2000 HFC Ford Mondeo (1999) CGH₂-BZ (P)</p> <p>TH!NK FC5 Ford Focus (2000) CH₃OH-BZ (P)</p> <p>2 Th!nk FCV Ford Focus (2000) CGH₂-BZ (D)</p> <p>P2000 H2ICE Ford Mondeo (2001) CGH₂-ICE (P)</p> <p>Ford H2ICE Ford Focus (2002) CGH₂-ICE (P)</p> <p>FCV-Hybrid Ford Focus (2002) CGH₂-Hybrid-BZ (Sn)</p> <p>Ford Model U (2003) CHG₂-Hybrid-ICE (K)</p> <p>H²RV Ford Focus Kombi 2003 H₂-Hybrid-ICE (D)</p>	Beides unbekannt	<p>Seit 04/1999 Teilnahme an der CaFCP, in deren Rahmen das FCV und das FCV-Hybrid getestet werden</p> <p>Teilnahme an der CEP ab Ende 2003, in dessen Rahmen 3 FCV-Hybrid getestet werden sollen</p> <p>Ab Anfang 2004 wird Ford fünf FCV-Hybrid in Vancouver in einem 3-jährigen Demonstrationsprojekt testen</p> <p>Seit Mitte 2002 Straßentests mit 2 H²RV in Michigan. Ab 2005 will Ford eine größere Flotte von H²RV in Rahmen eines Demonstrationsprojektes mit US Regierungsbehörden testen</p>	<p>Seit 1998 Brennstoffzellen-Allianz mit kanadischen Brennstoffzellenhersteller Ballard und den Automobilunternehmen DaimlerChrysler. Auch die Ford-Tochter Mazda ist Mitglied der Allianz</p> <p>Seit 2003 Kooperation mit DaimlerChrysler, Hyundai, Nissan, PSA und Toyota zur Entwicklung eines 700 bar Wasserstoff-tanks</p>	<p>Wasserstoffbetriebene Brennstoffzelle als langfristiges Ziel</p> <p>Ford setzt dabei auf Brennstoffzellen-Hybridtechnologie</p> <p>Der Wasserstoff-Verbrennungsmotor ist für Ford Brückentechnologie</p> <p>Enge Kooperation mit Brennstoffzellenhersteller Ballard, an dem Ford mit 20% beteiligt ist</p>

Tabelle 5: Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten von Ford

3.4.2 Einleitung

Die Ford Motor Company ist einer der Automobilkonzerne, die sich in den letzten Jahren im Bereich alternative Antriebe und umweltfreundliche Treibstoffe stark engagiert haben. So beinhaltete die Produktpalette von Ford Ende der 1990er Jahre sowohl Erdgasfahrzeuge¹²³, alkoholbetriebene Fahrzeuge (Methanol und Ethanol) sowie Elektrofahrzeuge. Zu diesem Umweltengagement trägt auch Bill Ford bei, ein Urenkel des Fordgründers, der seit November 2001 als alleiniger Vorstandsvorsitzender von Ford amtiert¹²⁴. Bill Ford, der sich selbst als „life-long environmentalist“ bezeichnet, und der von der amerikanischen Umweltorganisation Sierra Club als „enlighted leader“ bezeichnet wurde, ist mit großem Umwelt-Enthusiasmus an seine Aufgabe gegangen. Der anvisierte strategische Schwerpunkt „Umwelt“ ist aber sehr schnell durch die anhaltenden wirtschaftlichen Schwierigkeiten des Automobilkonzerns in

¹²³ Vgl. Informationen zu Ford-Erdgasfahrzeugen unter: www.ford.de/ie/umweltschutz/-/uumw05/.

¹²⁴ Seit 1999 war Bill Ford schon Vorsitzender des Verwaltungsrates von Ford.

den Hintergrund getreten¹²⁵. Die wirtschaftlichen Probleme haben auch das Engagement bei der Brennstoffzelle beeinflusst. Noch 1999 verkündete eine ganzseitige Anzeige von Ford in mehreren überregionalen deutschen Zeitungen bezüglich der Markteinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen Folgendes: „Was nützen neue technische Entwicklungen, wenn sie nur als Studien oder Prototypen existieren? Eigentlich gar nichts. Die Ford Motor Company nimmt Innovationen gerade auf dem ökologischen Sektor sehr ernst. Die meisten alternativ angetriebenen Fahrzeuge weltweit sind von uns. Aber auf solchen Erfolgen darf man sich nicht ausruhen. Deshalb geht mit dem P2000 in knapp 5 Jahren das erste Brennstoffzellen-Fahrzeug in Serie. Das ist gut für Sie, für uns und für die Umwelt“¹²⁶. Wie andere Automobilhersteller auch, musste Ford inzwischen von der Zielvorgabe 2004, die in der ersten Euphorie über die raschen Fortschritte in der Brennstoffzellentechnologie Ende der 1990er Jahre gemacht wurde, abrücken. Aktuell wird von Ford das Jahr 2010 als frühestes Datum für die breitere Markteinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen genannt.

3.4.3 THINK

Ford arbeitet nach eigenen Angaben seit den 1980er Jahren an der Nutzbarmachung der Brennstoffzellen-Technologie als Fahrzeugantrieb¹²⁷. Ende 1999 hatte Ford alle Elektrofahrzeug- und Brennstoffzellenaktivitäten unter dem Schirm der neugegründeten Marke „TH!NK“ zusammengefasst. Damit war Ford der einzige Automobilhersteller, der eine eigene Marke für die Entwicklung, das Marketing und den Vertrieb von emissionsfreien Fahrzeugen geschaffen hatte. Nachdem der Verkauf von Batterie-Elektrofahrzeugen in den USA nur schleppend anief, hat Ford 2002 beschlossen, die Produktion und den Vertrieb dieser Fahrzeuge einzustellen, und sich in Zukunft auf die Hybrid- und Brennstoffzellentechnologie zu konzentrieren¹²⁸. Damit ist auch das einprägsame Label „Th!nk“ aufgegeben worden. Seit 1998 beschäftigt sich Ford intensiver mit Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie. Die Forschung und Entwicklung findet sowohl im nordamerikanischen Forschungszentrum von Ford wie auch im europäischen Ford Forschungszentrum in Aachen statt. Auf dem Gelände des „Ford North American Research and Engineering Campus“ in Dearborn/Michigan hat Ford als erster US-amerikanischer Automobilkonzern zudem im August 1999 eine Tankstelle für gasförmigen und flüssigen Wasserstoff eröffnet¹²⁹. Mit dem Beginn der intensiveren Beschäf-

¹²⁵ So gibt Bill Ford laut Spiegel angesichts der Lage des Automobilkonzerns folgende Devise aus: „Nun ist nicht die Zeit großer Visionen und vielen Nachdenkens darüber, wie wir die Welt revolutionieren können. [...] Wir müssen unser Kerngeschäft reparieren, einen glaubhaften Geschäftsplan aufstellen und aufregende Autos entwickeln“ (vgl. Schiessl, Michaela (2001): Druck der Dynastie. In: Der Spiegel 45/2001). Zur aktuellen schwierigen wirtschaftlichen Lage von Ford vgl. auch Hawranek, Dietmar (2003): Innige Abneigung. In: Der Spiegel 13/2003.

¹²⁶ Ganzseitige Anzeige von Ford in der Zeit vom 24.06.1999.

¹²⁷ Informationen zu den Ford Brennstoffzellen- und Wasserstofffahrzeugen finden sich unter www.ford.com/en/innovation/engineFuelTechnology/default.htm.

¹²⁸ Vgl. www.ford.com/en/redirect/think/default.htm; vgl. auch Moore, Bill (2003): Th!nk Sunk? Online-Dokument: www.evworld.com/databases/printit.cfm?storyid=401.

¹²⁹ Vgl. Hydrogen & Fuel Cell Letter, September 1999. Wasserstoff wird für die Tankstelle von Air Products und Chemicals geliefert.

tigung wurde Ford 1998 Mitglied der so genannten „Fuel Cell Alliance“ von DaimlerChrysler und Ballard. In diesem Rahmen hat sich das Unternehmen mit 420 Mio. US\$ beim Brennstoffzellenhersteller Ballard eingekauft. Mit dem Tochterunternehmen Ecostar Electric Drive Systems hat Ford außerdem seine Kompetenz im Bereich Elektroantriebe in die Allianz mit eingebracht. Alle Ford-Brennstoffzellen-Prototypen verwenden von daher Brennstoffzellen von Ballard und Elektromotoren und elektronische Steuersysteme von Ecostar.



Bild 30: Fords erstes Brennstoffzellenfahrzeug, der P2000 HFC, vor der Wasserstofftankstelle auf dem Ford-Forschungsgelände in Dearborn, der ersten Wasserstofftankstelle in den USA (Quelle: H&FCL)

Im Januar 1999 präsentiert das Unternehmen auf der Detroit Motor Show dann das erste Brennstoffzellenfahrzeug, den P2000 HFC. Als Plattform für dieses Fahrzeug wurde das P-2000-Fahrzeugkonzept gewählt. Es handelt sich dabei um ein Forschungsfahrzeug auf Basis des US-amerikanischen Serienmodells Ford Mondeo, das für die Integration verschiedener alternativer Antriebssysteme verwendet wurde. Diese Plattform zeichnet sich, dank dem Einsatz von Leichtbauelementen (u.a. Aluminium-Karosserie) durch ein relativ geringes Gewicht aus (1514 kg). Angetrieben wird der Fünfsitzer von einem Ecostar Elektromotor der seine Energie von drei „Ballard Mark 700“-PEM-Brennstoffzellen-Modulen bekommt. Diese haben zusammen eine Leistung von 75 kW und sind unterhalb des Kofferraumbodens angebracht. Die Brennstoffzelle wird mit gasförmigen Wasserstoff betrieben. Die beiden Wasserstofftanks von der Firma Dynetek, die hinter der Sitzbank im Kofferraum untergebracht sind, fassen 1,4 kg Wasserstoff (250 bar), was eine Reichweite von zirka 160 km bedeutet. Seit 1999 wird der P2000 HFC in Fahrversuchen erprobt¹³⁰. Ford plante Mitte 1999 den gasförmigen Wasserstoff beim P2000 HFC durch flüssigen Wasserstoff zu ersetzen, um eine höhere Reichweite zu erzielen. Ein Jahr nach dem P2000 HFC präsentierte Ford, ebenfalls auf der Detroit Motor Show, das methanolbetriebene Brennstoffzellenfahrzeug Ford Focus FC5¹³¹. Dieses auf dem Ford Focus basierende Brennstoffzellenfahrzeug verfügt über eine neuere und verbesserte Version (Gewicht und Größe) einer Ballard Brennstoffzelle (Mark 901; 65 kW). Treibstoff ist Methanol, aus dem mittels eines Reformers Wasserstoff gewonnen wird¹³².

¹³⁰ Vgl. Fahrzeugtest im Hydrogen & Fuel Cell Letter, September 1999.

¹³¹ Schon 1999 auf der IAA in Frankfurt hatte Ford ein methanolbetriebenes Konzeptfahrzeug (P2000 SUV) auf Basis des P2000 HFC präsentiert.

¹³² 2001 präsentiert Ford eine Druckwasserstoff-Version des FC 5.



Bild 31: Ford Focus FC 5 (Quelle: Ford)



Bild 32: Ford Focus FCV (Quelle: Ford)

Ende 2000 wurde der wieder auf dem Serienmodell Ford Focus basierende FCV fertiggestellt. Dieses verfügt über eine direkt mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzelle (Ballard Mark 900; 67 kW). Die Brennstoffzelle befindet sich beim FCV unter dem Beifahrersitz. Die Unterbringung des Komposittantank für den gasförmigen Wasserstoff (250 bar; 2 kg Wasserstoff) hinter der Rückbank führt zu einer erheblichen Platzeinschränkung im Kofferraum. Die Reichweite des Ford Focus FCV beträgt zirka 160 km. Der FCV wurde im Februar 2001 auf einer Promotion-Tour in Europa (u.a. Brüssel und Berlin) vorgestellt¹³³. Ein zweiter Ford Focus FCV wird im Rahmen der California Fuel Cell Partnership einem Praxis-Dauertest unterzogen.

2002 stellte Ford dann das erste „ready to go into production“ Brennstoffzellenfahrzeug vor¹³⁴. Beim Ford Focus FCV-Hybrid handelt es sich um ein Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug. Dabei ist das Fahrzeug sowohl mit einer Ballard-Brennstoffzelle (Mark 902; 68kW) als auch mit Hochleistungs-Batterie (Nickel-Metallhydrid; 18 kW) ausgestattet. Beim verwendeten Hybrid-Konzept handelt es sich um einen so genannten „Mild-Hybrid“, d.h. allein durch die Batterien kann das Fahrzeug nicht angetrieben werden. Die Batterien dienen dazu, Energie zu speichern und diese beim Anfahren und Beschleunigen wieder abzugeben. Dieses neue „hybrid-switching concept“ schont die Brennstoffzelle, die näher am so genannten „Sweet Spot“, also dem optimalen Lastenbereich, laufen kann. Durch das neue Energiemanagement-System konnte der Verbrauch des Ford Focus FCV-Hybrid gegenüber seinem Vorgänger um zirka 20 % gesenkt werden. Energiesparend wirkt zudem die Leichtbauweise und die Rückgewinnung der kinetischen Energie durch ein regeneratives Bremssystem. Der Dynetek-Wasserstofftank ist auch bei diesem Fahrzeug im Kofferraum hinter den Rücksitzen untergebracht. Er fasst 4 kg Wasserstoff bei einem Druck von 350 bar, womit der Wagen eine Reichweite von ungefähr 320 km hat.

¹³³ Vgl. Wasserstoff-Spiegel Nr. 1/01.

¹³⁴ Vgl. Ford-Pressemitteilung vom 11.06.2002: “Ford Combines Hybrid and Fuel Cell Technology in All-New Focus Sedan”. Online-Dokument: media.ford.com/newsroom/release_display_test.cfm?article_id=12235&id=329&art_ids=14173,13645,13559,13567,13426,13358,12516,12395,12260,12235&sec=; Geiger, Stefan (2002): Ford Focus FCEV Hybrid: Bringing Together Propulsion Systems. Online-Dokument: www.fuelcelltoday.com; Wüst, Christian (2002): Knallgas im Irrgarten. In: Der Spiegel 38/2002, S. 173/174.



Bild 33: Ford Focus FCV-Hybrid (Quelle: Ford)

Beim FCV-Hybrid ist auch die Crash-Sicherheit verbessert worden, so dass das Fahrzeug den regulären amerikanischen Fahrzeug-Sicherheitsstandards genügt. Zudem verfügt das Fahrzeug, wie auch schon seine Vorgänger, über Wasserstoff-Sensoren, die bei etwaigem Wasserstoff-Austritt im geringsten Umfang den Fahrer warnen, im schwersten Fall alle Fahrzeugfunktionen herunterfahren. Beim Ford Focus FCV-Hybrid handelt es sich erstmalig um ein Kleinserienfahrzeug. Dies wird auch durch die Vergabe eines konzerninternen Fahrzeug-Entwicklungs-codes (C264) deutlich. Ford hat 2002 zunächst fünf Fahrzeuge aufgebaut, um sie in Kalifornien zu testen. Die Produktion einer größeren Kleinserie ist für 2004 angekündigt.

Wie schon beschrieben, testet Ford seine Brennstoffzellen-Fahrzeuge insbesondere im Rahmen der California Fuel Cell Partnership. Diese hat Ford zusammen mit DaimlerChrysler, dem California Air Resource Board (CARB), Ballard Power Systems und den Mineralölkonzernen BP, Shell und Texaco gegründet. Zudem wird Ford ab Anfang 2004 fünf Ford Focus FCV-Hybrid in einem dreijährigen Demonstrationsprojekt, das im Rahmen des Vancouver Fuel Cell Vehicle Project stattfindet und von der kanadischen Regierung gefördert wird, in Vancouver testen¹³⁵. In Europa bzw. Deutschland wird Ford an der Clean Energy Partnership in Berlin teilnehmen und im Rahmen des Demonstrationsprojektes ab Ende 2004 drei Ford Focus FCV Hybrid-Fahrzeuge testen¹³⁶.

Ford beschäftigt sich, wie schon erwähnt, auch mit dem Einsatz von Wasserstoff im Verbrennungsmotor. Nachdem Ford schon 1998 einen Prototypen eines Wasserstoff-Verbrennungsmotors aufbaut hat¹³⁷, präsentiert das Unternehmen im August 2001 das erste Fahrzeug mit einem Wasserstoff-Verbrennungsmotor, den Ford P2000 H2ICE. Das Fahrzeug beruht auf dem P-2000-Fahrzeugkonzept und ist mit einem modifizierten monovalenten Verbrennungsmotor ausgestattet, der normalerweise im regulären Ford Focus Serienfahrzeug eingesetzt wird. Der P2000 H2ICE fährt mit gasförmigen Wasserstoff, und hat eine Reichweite von 100

¹³⁵ Vgl. Ford-Pressemitteilung vom 08.06.2003: „Ford Fuel Cell Fleet to Be Tested on Vancouver's Streets“. Online-Dokument: media.ford.com/newsroom/release_display.cfm?release=15591.

¹³⁶ Vgl. Ford-Pressemitteilung vom 25.11.2003: Clean Energy Partnership establishes a public hydrogen filling station in Berlin. Online-Dokument: media.ford.com/newsroom/release_display.cfm?release=16965.

¹³⁷ Dabei orientierte man sich zunächst an den schon gewonnenen Erfahrungen von BMW, Mercedes-Benz und dem Musashi Institute of Technology (Japan) mit dem Wasserstoff-Verbrennungsmotor (vgl. Hydrogen & Fuel Cell Letter, September 1999).

km, die aber mit einem veränderten Speichersystem noch auf 250 km gesteigert werden soll. Die Emissionen des Fahrzeugs liegen z.T. erheblich unter denen des amerikanischen SULEV Standards. Einzig die NO_x-Emissionen müssten für Anerkennung als SULEV noch reduziert werden.



Bild 34: Ford P2000 H2ICE (Quelle: Ford)

Bei der Vorstellung des Fahrzeuges verkündet Ford, dass der Wasserstoff-Verbrennungsmotor die Brücke zwischen konventionellem Verbrennungsmotor und Brennstoffzelle sein kann¹³⁸ (vgl. Kapitel 3.4.4). Im Oktober 2002 begann Ford einen weiteren Prototypen mit einem verbesserten turbogeladenen Wasserstoffverbrennungsmotor zu testen¹³⁹. Der Ford Focus H2ICE erreicht mit einer Tankfüllung (350 bar) von fünf Kilogramm komprimiertem Wasserstoff eine Reichweite von fast 300 km. Das Fahrzeug unterschreitet sowohl den amerikanischen SULEV-Standard sowie den kalifornischen PZEV-Standard und Kraftstoffverbrauch und -effizienz sind deutlich besser als beim konventionellen Benzinmotor.

Auf der Detroit Motor Show im Januar 2003 präsentierte Ford eine Konzeptfahrzeug mit dem Namen Ford Modell U¹⁴⁰. Mit Blick auf das 100-jährige Jubiläum von Ford lehnt sich der Name des Konzeptfahrzeugs an das Ford Modell T (U folgt dem T im Alphabet) an, und soll damit die Zukunft des Automobils symbolisieren. Dabei, so beteiligte Ingenieure, ist das Model U kein rein futuristisches Konzept wie der GM Autonomy (vgl. Kapitel 3.5.3), sondern ein pragmatischer Ansatz, der mit heutiger Technologie umsetzbar ist. Beim Model U handelt es sich um ein Hybridfahrzeug, in dem ein aufgeladener wasserstoffbetriebener 2,3-l-Vierzylinder-Verbrennungsmotor und eine Lithium-Ion Batterie einen Elektro-Hybridmotor antreiben. Der Antrieb ist, u.a. durch regeneratives Bremsen und eine Stop-Start-Automatik, 25 % effizienter als ein gleichwertiger Benzinmotor. Die Abgasemissionen sind nahezu Null. Der Wasserstoff-Speicher fasst bis zu sieben Kilogramm gasförmigen Wasserstoff bei einem Druck von knapp 700 bar¹⁴¹, was eine Reichweite von knapp 500 km ermöglicht. Neben dem

¹³⁸ Vgl. HyWeb vom 11.09.2001; o.V. (2001): Ford Unleashes Hydrogen Internal Combustion Auto. Eyeforfuelcells vom 21.08.2001. Online-Dokument: www.eyeforfuelcells.com.

¹³⁹ Vgl. Ford-Pressemitteilung vom 23.09.2003. H2ICE Ford Focus Proves the Viability of Hydrogen Internal Combustion Technology. Online-Dokument: media.ford.com/article_display.cfm?article_id=16375.

¹⁴⁰ Vgl. www.evworld.com/databases/storybuilder.cfm?storyid=481; archiv.tagesspiegel.de/archiv/11.01.2003/386908.asp

¹⁴¹ Ford nimmt zur Zeit auch an einem von der EU geförderten Forschungsprojekt zur Entwicklung eines 700 bar Pkw-Wasserstofftanks unter der Koordination von Dynetek Europe GmbH teil.

Wasserstoffantrieb zeichnet sich das Sport-Utility-Vehicle (SUV) Modell U durch einen variablen Innenraum und der Ausstattung mit neuesten Automobiltechnologien aus. So können Unterhaltungs- und Navigationssysteme, Mobiltelefon und Klimaanlage über eine besonders fortschrittliche Sprachsteuerung bedient werden, und Nachtsichtsysteme, adaptive Hauptscheinwerfer und spezielle Sensortechnologien bilden ein aktives Sicherheitssystem. Das Fahrzeug ist außerdem vollständig recycelbar.



Bild 35: Ford Modell U (Quelle: EV World)



Bild 36: Innenraum des Modell U (Quelle: EV World)

Bei der Vorstellung des Model U kündigte Ford an, das im Model U genutzte Antriebskonzept noch 2003 in Prototypen umsetzen zu wollen. Mit dem H²RV, der während der Feierlichkeiten zum 100-jährigen Jubiläum von Ford im Juni 2003 präsentiert wurde, hat der Automobilkonzern diese Ankündigung umgesetzt¹⁴². Der H²RV, der auf einem regulären Ford Focus Kombi basiert, verbindet wie das Model U einen wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotor, der mit einem Kompressor aufgeladen wird, mit dem von Ford entwickelten „Modular Hybrid Transmission System (MHTS)“. Der Druckwasserstofftank (350 bar) des Fahrzeugs hat ein Tankvolumen von 2,8 kg Wasserstoff, was eine Reichweite von 200 km ermöglicht. Der Schadstoffausstoß des Ford Focus H²RV unterschreitet den US-amerikanischen SULEV-Standard und die CO₂-Fahrzeugemissionen konnten fast komplett reduziert werden. Da die Markteinführung des Brennstoffzellenfahrzeug erst langfristig realisiert werden kann, ist das wasserstoffbetriebene Hybridfahrzeug eine kostengünstige, kurzfristig umsetzbare Alternative, die außerdem eine Brücke für den Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur und der späteren Etablierung von Brennstoffzellenfahrzeugen bildet. Ford führt seit Mitte 2003 mit zwei H²RVs Straßentest in Michigan durch. Für 2005 plant das Unternehmen eine größere Flotte an Wasserstofffahrzeugen mit der im Model U und H²RV genutzten Hybridtechnologie auszustatten, und diese an US-Regierungsbehörden zu verkaufen¹⁴³.

¹⁴² Vgl. Ford-Pressemitteilung vom 10.08.2003: “H²RV – Ford Hydrogen Hybrid Research Vehicle”. Online-Dokument: media.ford.com/newsroom/release_display.cfm?release=16082.

¹⁴³ Vgl. Brennstoffzellen Newsletter 26-2003. Online-Dokument: www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/FCTFiles/FCTArticleFiles/Article_673_denews26.pdf



Bild 37: Ford Focus H²RV (Quelle: Ford)

Ford ist auch Mitglied des seit Anfang 2003 bestehenden Konsortiums zur Entwicklung eines 700 bar Druckwasserstofftankes, an dem auch DaimlerChrysler, Hyundai, PSA, Nissan und Toyota teilnehmen (vgl. Kapitel 3.2.3).

3.4.4 Direkt-Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeug als Ziel und Wasserstoffverbrennung als Übergangstechnologie

Wie schon einleitend angedeutet, hat sich eine deutlichere Strategie von Ford bezüglich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie erst in den letzten Jahren nach und nach herauskristallisiert. Diese ist aber bis heute nicht explizit formuliert worden. Für die langfristige Perspektive gilt immer noch, was Ford-Vorstandschef Bill Ford im Jahr 2000 auf einer Greenpeace-Konferenz gesagt hat: „Longer term, I believe fuel cells will finally end the 100-year-reign of the internal combustion engine“¹⁴⁴. Geändert hat sich aber der Zeithorizont. Kündigte man 1999 noch an, schon 2004 mit der Serienproduktion von Brennstoffzellenfahrzeugen zu beginnen, ist man inzwischen von diesem Plan, so der Spiegel¹⁴⁵, „kleinlaut abgerückt“. Der zeitliche Fahrplan¹⁴⁶ lautet jetzt:

- Aufbau einer größeren Testflotte (50-60 Fahrzeuge)¹⁴⁷ ab 2003/2004 und erster Einsatz bei Flottenkunden
- Ab 2007 Erweiterung der Flotte und Versuche

¹⁴⁴ Aus eine Rede anlässlich der 5th Annual Greenpeace Business Conference am 5. Oktober 2000 in London. Online-Dokument: www.ford.com/en/ourCompany/environmentalInitiatives/environmentalActions/billFordsSpeechToGreenpeace.htm.

¹⁴⁵ Wüst, Christian (2002): Knallgas im Irrgarten. In: Der Spiegel 38/2002, S. 173/174.

¹⁴⁶ Dieser Zeitplan wurde von einem Ford Firmensprecher während der Promotions-Tour Anfang 2001 in Europa so verkündet (Wasserstoff-Spiegel Nr. 1/01); Vgl. auch Geiger, Stefan (2002): Ford Focus FCEV Hybrid: Bringing Together Propulsion Systems. Online-Dokument: www.fuelcelltoday.com.

¹⁴⁷ Ein Firmensprecher von Ford bezifferte die Größe dieser Flotte Anfang 2001 mit 50 Fahrzeugen (vgl. Wasserstoff-Spiegel Nr. 1/01). Rudolf Kunze, Leiter des Aachener Forschungszentrum von Ford, kündigte in einem Interview Ende 2002 an, dass Ford zunächst 60 Focus FCEV bauen würde (vgl. Pander, Jürgen (2002): „Brennstoffzellenautos nicht vor 2015 bezahlbar“. Interview mit Ford-Forschungschef. In: Spiegel-Online vom 10.10.2002. Online-Dokument: www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,217335,00.html).

- Etwa ab 2010 Beginn der Serienproduktion und des Verkaufs von Brennstoffzellenfahrzeugen.

Während auf der einen Seite Ford-Vertreter angekündigt haben, ab 2010 mindestens 50.000 Brennstoffzellenfahrzeuge pro Jahr produzieren zu wollen, sprechen andere von einem längeren Zeithorizont. So sagte 2002 der Leiter des Aachener Forschungszentrums von Ford Europa, Rudolf Kunze¹⁴⁸, dass Brennstoffzellenfahrzeuge erst ab 2015 zu einem normalen Pkw-Preis angeboten werden könnten. Die Brennstoffzelle sei noch lange nicht marktreif, denn es mangle ihr an technischer Robustheit. Auch sei eine vernünftige Wasserstoff-Infrastruktur nicht vor 2025 aufgebaut.

Die Frage in welcher Form und mit welchem Antrieb Wasserstoff im Fahrzeug eingesetzt wird, war für Ford im Jahr 2000 noch unklar. Diese Fragen sollten, so Ford, u.a. im Rahmen der California Fuel Cell Partnership geklärt werden. Nachdem man anfänglich auch an der Methanolreformierung arbeitete, und einen Prototypen, den Ford Focus FC5, aufbaute, entschied man sich Anfang 2001 gegen Methanol als Kraftstoffoption. Auf der schon erwähnten Promotion-Tour von Ford Anfang 2001 in Europa sagte Dr. Wolfgang G. Schneider, Vize-Präsident von Ford Europa: „Wir halten Methanol definitiv für eine Sackgasse, nicht so sehr aus technologischen sondern aus Umweltgründen.“ Zwar wäre die Infrastruktur mit Methanol leichter aufzubauen, aber die langfristige Nachhaltigkeit sei nicht gegeben¹⁴⁹. Als Übergangstrategie wird bei Ford im letzten Jahr immer häufiger der Einsatz von Wasserstoff im Verbrennungsmotor genannt. So bezweifelte Roland Krüger, Ingenieur beim Ford Forschungszentrum Aachen, in einem Vortrag auf dem Deutschen Wasserstoff Energietag 2002, dass ein alternativer Kraftstoff auch zwangsläufig einen alternativen Antrieb bzw., dass Wasserstoff notwendigerweise die Verwendung von Brennstoffzellen bedeuten müsse. Zudem bezweifelte er, ob eine „Chemiefabrik“ zur Kraftstoffreformierung an Bord eines Fahrzeuges die richtige Lösung“ sei¹⁵⁰. Generell sähe er zwar auch das mit Wasserstoff direkt betriebene Brennstoffzellen-Fahrzeug als langfristige Lösung zur nachhaltigen Mobilität, aber mittelfristig sei für ihn der Wasserstoff-Verbrennungsmotor die präferierte Lösung. Dieser verfüge über mehrere Vorteile:

- deutlich geringere Abgasemissionen gegenüber anderen Kraftstoffen,
- kurzfristig verfügbare, beherrschbare und bezahlbare Technologie, und
- mit dem Wasserstoff-Verbrennungsmotor würde der Übergang zu einer Wasserstoffwirtschaft gefördert werden.

¹⁴⁸ Vgl. Pander, Jürgen (2002): „Brennstoffzellenautos nicht vor 2015 bezahlbar“. Interview mit Ford-Forschungschef. In: Spiegel-Online vom 10/10/2002. Online-Dokument: www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,217335,00.html; Wüst, Christian (2002): Knallgas im Irrgarten. In: Der Spiegel 38/2002, S. 173/174.

¹⁴⁹ Zitiert in VDE Dialog 1/2002. Online-Dokument: www.vde.com/de/fg/etg/fachthemen/fa15/autos.htm.

¹⁵⁰ Krüger, Roland (2002): Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten der Ford Motor Company. Vortrag auf dem Deutschen Wasserstoff-Energietag 2002 vom 12-14. November 2002 in Essen. Konferenz-CD-ROM.

Ford plane deswegen, so Krüger, die Übertragung der Wasserstoff-Verbrennungsmotor-Technologie auf eine neue Ford Motorengeneration und die Entwicklung einer Turbo-Aufladung für den neuen Wasserstoffmotor. Mit dem überarbeiteten Motor sollen neue Fahrzeugmodelle ausgestattet werden und parallel dazu soll der Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur gefördert werden. Auch andere Ford-Vertreter sehen in dem Wasserstoff-Verbrennungsmotor eine sinnvolle Brückentechnologie: „Our H2ICE technology could be used to take the chicken out of the chicken and egg debate about which comes first, the hydrogen fueled vehicle or the hydrogen fueling infrastructure.“¹⁵¹

Fords Strategie lässt sich damit also wie folgt zusammenfassen:

- Die langfristige Vision ist der Einsatz der Brennstoffzelle als Fahrzeugantrieb
- Ford wird sich aus zwei Richtungen dieser Vision nähern:
 - Verstärkte Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten an der Brückentechnologie Wasserstoff-Verbrennungsmotor, und der Aufbau einer Testflotte für Demonstrationszwecke.
 - Tests von Direkt-Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeugen in Demonstrationsprojekten und Weiterentwicklung der Technologie, wobei das Ford Focus FCV Hybrid die Entwicklungsrichtung vorgibt.
- Strategische Partnerschaft mit „Fuel Cell Alliance“-Partnern Ballard und Daimler-Chrysler. Seit der Umstrukturierung der Allianz im Oktober 2001 ist Ford mit 20% an dem Brennstoffzellenhersteller Ballard beteiligt¹⁵².

¹⁵¹ Vance Zanardelli, Fords Manager für Transmission- und Motoren Systemforschung, bei der Präsentation des Ford 2000 H2ICE im Sommer 2001 (zitiert in o.V. (2001): Ford Unleashes Hydrogen Internal Combustion Auto. Online-Dokument: www.eyeforfuelcells.com vom 23.08.2001. Vgl. auch Moore, Bill (2003): Ford's Model U For Change. Online-Dokument: www.evworld.com/database/printit.cfm?storyid=481.

¹⁵² Vgl. auch o.V. (2001): Ballard baut um. In: Wasserstoff-Spiegel Nr. 5/01.

3.4.5 Weitere Brennstoffzellen- und Wasserstoffaktivitäten im Ford-Konzern

3.4.5.1 Wasserstoff-Wankelmotoren und methanolbetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge – Aktivitäten von Mazda

Beginn der Wasserstoff- / Brennstoffzellen-Aktivitäten Angekündigte Serienproduktion	Fahrzeuge [Konzept- (K) Prototyp- (P) Demonstration- (D) Serienahes- (Sn) Serienfahrzeug (S)]	Höhe der Investitionen/ Anzahl der involvierten Mitarbeiter	Teilnahme an Demonstrationsprojekten [Kalifornien (CaFCP) Japan (JHFC) Deutschland/Berlin (CEP)]	Partnerschaften/ Kooperationen	Strategie
Mazda beschäftigt sich seit Anfang der 1990er Jahre mit Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie Markteinführung von Wasserstoff-Fahrzeugen mit Drehkolbenmotor ab 2008 angekündigt	Mazda HR-X (1991) H ₂ ICE (Wankelmotor/ Metall-Hydridspeicher) (K) 2 Mazda HR-X 2 Capella Cargo (1993) H ₂ ICE (Wankelmotor/ Metall-Hydridspeicher) (D) Mazda Demio FC-EV (1997) H ₂ BZ (Metall Hydridspeicher) (P) (überarb. Version 1999) Premacy FC-EV (2001) CH ₃ OH BZ (D) Mazda H2 RX-8 (2003) (K)	Beides unbekannt	In 2001 hat Mazda zusammen mit DaimlerChrysler ein Demonstrationsprojekt mit Methanol-Brennstoffzellenfahrzeugen in Japan durchgeführt, in dem das Premacy FC-EV getestet wurde	Brennstoffzellen-Allianz mit Ford, DaimlerChrysler und dem kanadischen Brennstoffzellenhersteller Ballard	Unbekannt

Tabelle 6: Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten von Mazda

Die japanische Tochter der Ford Motor Company Mazda arbeitet seit Anfang der 1990er Jahre an der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie. Dabei hat man sich zunächst mit dem Wasserstoff-Verbrennungsmotor beschäftigt. Mazda nutzt dabei die Wankelmotoren-Technologie, die laut Mazda besonders gut für das Verbrennen von Wasserstoff geeignet ist¹⁵³. Auf der Tokyo Motor Show präsentierte die Firma 1991 das erste Konzeptfahrzeug, den HR-X. Das Fahrzeug war mit einem Metallhydrid-Speicher (37 Nm³) für die Speicherung des Wasserstoff ausgestattet, was eine Reichweite pro Tankladung von 200 km ermöglichte.



Bild 38: Mazda HR-X2 (Quelle: Mazda)

¹⁵³ Vgl. www.mazda.com/environment/2000/p16-5.html.

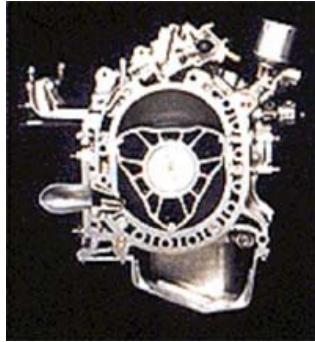


Bild 39: Wasserstoff-Wankelmotor (Quelle: Mazda)

Mit dem HR-X2 stellte Mazda 1993, ebenfalls in Tokio, eine Weiterentwicklung des HR-X vor. Der HR-X2, der auf dem Mazda Serienmodell Capella Cargo beruht, verfügt wieder über einen Wasserstoff-Wankelmotor, einen Metallhydrid-Speicher (43 Nm^3) und eine Reichweite von 230 km. 1994 wurde der HR-X2 zunächst für ein Jahr auf dem Firmengelände der Nippon Steel Corporation getestet. Von 1995 bis 1997 testete Mazda, nach der Zulassung durch das japanische Transportministerium, zwei HR-X2 auf öffentlichen Straßen in Japan. Dabei legten die Fahrzeuge jeweils ungefähr 20.000 km zurück. In der Folge gab es bei Mazda Überlegungen, das Fahrzeugkonzept weiter zu entwickeln und marktfähig zu machen.

Mit der Brennstoffzellentechnologie beschäftigt sich Mazda seit 1991. Nachdem man zunächst mit einer Ballard-Brennstoffzelle experimentierte und u.a. 1992 ein Brennstoffzellen-Gokart aufbaute, stellte Mazda 1997 mit dem Mazda Demio FC-EV sein erstes Brennstoffzellen-Fahrzeug vor. Die PEM-Brennstoffzelle (20 kW) der ersten Generation des Demio FC-EV ist eine Eigenentwicklung von Mazda. Neben der Brennstoffzelle ist das Fahrzeug mit sogenannten „Ultracapacitors“ (Hochleistungskondensatoren) ausgestattet, die Energie speichern, um das Fahrzeug in bestimmten Situationen (Beschleunigung) mit zusätzlicher Leistung zu versorgen. Auch beim Demio FC-EV wird der Wasserstoff in Metallhydrid gespeichert. Die Reichweite des Fahrzeuges beträgt 170 km und die Höchstgeschwindigkeit 90 km/h. 1998 wurde Mazda Mitglied der „Brennstoffzellen-Allianz“ von DaimlerChrysler, Ballard und der Konzernmutter Ford. In Zusammenarbeit mit dieser Allianz entwickelt Mazda eine verbesserte Brennstoffzelle (50 kW), mit der eine zweite Generation des Demio FC-EV ausgerüstet wurde. Dieser wurde Ende 1999 auf der Tokyo Motor Show präsentiert. Das aktuelle im Februar 2001 präsentierte Brennstoffzellenfahrzeug von Mazda ist der Premacy FC-EV¹⁵⁴. Das Fahrzeug ist in einer Kooperation mit Fords Tochter TH!NK entwickelt worden. Der Premacy FC-EV ist ausgestattet mit einer Ballard-Brennstoffzelle (Mark 901; 75 kW) und einem Elektromotor von Ecostar. Wasserstoff wird über Methanolreformierung gewonnen.

¹⁵⁴ Vgl. www.hycar.de/cars/premacy.htm; www.mazda.com/publicity/public/200102/0213e.html.



Bild 40: Mazda Premacy FC-EV (Quelle: Mazda)

Beim Premacy FC-EV konnten alle Komponenten des Brennstoffzellensystems im Fahrzeugboden untergebracht werden. Zusammen mit dem NECAR 5, dem aktuellen Methanol-Brennstoffzellenfahrzeug von DaimlerChrysler, ist der Premacy FC-EV das erste Brennstoffzellenfahrzeug in Japan, das vom japanischen Transportministerium die Zulassung für Fahrzeugtests auf öffentlichen Straßen erhalten hat. In einem Gemeinschaftsprojekt von Mazda, DaimlerChrysler Japan, Nippon Mitsubishi Oil und der japanischen Regierung, durchliefen beide Fahrzeuge im Jahr 2001 ein umfangreiches Testprogramm im Großraum Yokohama City. Ziel war es, das Potential des Brennstoffzellensystems mit Methanolreformer auszuloten. An weiteren Demonstrationsprojekten nimmt Mazda bis heute nicht teil.



Bild 41: Mazda RX-8 Hydrogen RE (Quelle: Mazda)

Auch Mazda setzt, ähnlich wie die Konzernmutter Ford, neben der Entwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen, weiter auf den Einsatz von Wasserstoff in der etablierten Motorentechologie. Auf der Tokyo Motor Show im Oktober 2003 präsentierte das japanische Unternehmen eine Wasserstoffversion seines neuen RX-8 Sportcoupes¹⁵⁵. Das Konzeptfahrzeug RX-8 Hydrogen RE wird wie die Benzinversion des RX-8 mit der neusten Wankelmotoren-Generation, dem Mazda RENESIS Wankelmotor, angetrieben. Neben einer elektronisch gesteuerten Wasserstoff-Direkteinspritzung zeichnet sich das Fahrzeug durch ein bivalentes Kraftstoffkonzept aus. Das RX-8 Hydrogen RE verfügt sowohl über einen kleinen Wasserstofftank

¹⁵⁵ Vgl. Mazda-Pressemitteilung vom 14.10.2003: "Mazda to Unveil Two-Seat Sports Car Concept and Hydrogen Rotary Engine at 2003 Tokyo Motor Show". Online-Dokument: www.mazda.com/publicity/public/200310/1014be.html; vgl. auch Hydrogen & Fuel Cell Letter November 2003.

(350 bar), der im Kofferraum untergebracht ist, als auch über einen Benzintank. Laut Mazda könnte ein wasserstoffbetriebenes Fahrzeug mit Drehkolbenmotor in fünf Jahren in Serie gehen. Das Fahrzeug wäre dabei wesentlich kostengünstiger als ein Brennstoffzellenfahrzeug, da es auf bewährte Technologie setzen kann¹⁵⁶.

3.4.5.2 Volvo

Beginn der Wasserstoff-/ Brennstoffzellen-Aktivitäten Angekündigte Serienproduktion	Fahrzeuge [Konzept- (K) Prototyp- (P) Demonstration- (D) Seriennahes- (Sn) Serienfahrzeug (S)]	Höhe der Investitionen/ Anzahl der involvierten Mitarbeiter	Teilnahme an Demonstrationsprojekten [Kalifornien (CaFCP) Japan (JHFC) Deutschland/Berlin (CEP)]	Partnerschaften/ Kooperationen	Strategie
Volvo beschäftigt sich seit Mitte der 1990er im Rahmen von EU-Projekten mit der Brennstoffzelle Keine Ankündigung	Kein eigenes Brennstoffzellen-Pkw vorgestellt Das kanadische Tochterunternehmen NovaBus hat mehrere BZ-Busse aufgebaut	Beides unbekannt	Keine Teilnahme	Teilnehmer an den EU geförderten Forschungsprojekten CAPRI (Koordinator: VW) und FEVER (Koordinator: Renault)	Unbekannt

Tabelle 7: Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten von Volvo

In sehr begrenztem Umfang beschäftigt sich auch die Ford Tochter Volvo mit der Brennstoffzelle. Dies betrifft zum einen den Einsatz von Brennstoffzellen im Pkw und zum anderen im Bus. In den letzten Jahren fanden mehrere EU-Forschungsprojekte zum Thema automobiler Einsatz der Brennstoffzelle mit Volvo-Beteiligung statt. So war Volvo u.a. ein Projektpartner beim von VW koordinierten EU-Projekt CAPRI (vgl. Kapitel 3.11.3) und auch beim von Renault koordinierten EU-Projekt FEVER (vgl. Kapitel 3.9.3). Im Gegensatz zum schwedischen Automobilhersteller Volvo, der selbst noch kein eigenes Brennstoffzellen-Auto aufgebaut hat, hat die kanadische Tochter, die NovaBus Corporation, schon mehrere Brennstoffzellenbusse in den USA gebaut und war zudem an Brennstoffzellen-Demonstrationsprojekten in den USA beteiligt¹⁵⁷. Volvo/Novabus verhandelt auch mit den Berliner Verkehrsbetrieben (BVG) über die Lieferung von zwei Brennstoffzellenbussen, die im regulären Linienverkehr getestet werden sollen¹⁵⁸. Die Brennstoffzellen für diese Busse sollen vom deutschen Brennstoffzellenhersteller Proton Motor Fuel Cell GmbH kommen, an der Volvo Anteile besitzt¹⁵⁹.

¹⁵⁶ Vgl. o.V. (2003): Mazda to develop hydrogen car. Online-Dokument: www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/IndustryInformation/IndustryInformationExternal/NewsDisplayArticle/0,1602,3270,00.html.

¹⁵⁷ Vgl. www.fuelcells.org/fct/buses.pdf.

¹⁵⁸ Vgl. www.bvg.de/ueber/innovativ1.html.

¹⁵⁹ Vgl. www.proton-motor.de.

3.5 General Motors/Opel

3.5.1 Überblickstabelle GM

Beginn der Wasserstoff-/Brennstoffzellen-Aktivitäten Angekündigte Serienproduktion	Fahrzeuge [Konzept- (K) Prototyp- (P) Demonstration- (D) Seriennahes- (Sn) Serienfahrzeug (S)]	Höhe der Investitionen/ Anzahl der involvierten Mitarbeiter	Teilnahme an Demonstrationsprojekten [Kalifornien (CaFCP) Japan (JHFC) Deutschland/Berlin (CEP)]	Partnerschaften/ Kooperationen	Strategie
<p>GM beschäftigt sich das erstmals mit der Brennstoffzelle in den 1960ern Jahre und baut damals erstes Konzeptfahrzeug. Intensive F&E zur Brennstoffzelle aber erst ab Ende der 1990er Jahre</p> <p>Nachdem noch Ende der 1990er der Durchbruch der Brennstoffzelle im automobilen Bereich erst für den Zeitraum zwischen 2030-2050 prognostiziert wurde, kündigt GM momentan die Markteinführung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen für 2010 an</p>	<p>GM Electrovan (1968) LH₂-BZ (K)</p> <p>EV 1 FC (1998) CH₃OH-Hybrid-BZ (K)</p> <p>GM Sintra FC (1998) CH₃OH-BZ (K)</p> <p>Opel Zafira (1998) CH₃OH-Hybrid- BZ (P)</p> <p>Precept (2000) H₂-BZ (H₂ ist in einem chemischen Hydrid gespeichert) (K)</p> <p>HydroGen 1 Opel Zafira (2000) LH₂-BZ (D)</p> <p>Chevrolet Pickup S 10 FC (2001) H₂-BZ (Benzin-Reformer) (K)</p> <p>GM Shanghai-Phoenix Buick GL8 (2001) CGH₂-BZ (P)</p> <p>GM Autonomy (2002) CGH₂-BZ (Purpose Design/Drive-by-wire Technologie) (K)</p> <p>GM Hy-wire (2002) CGH₂-BZ (Drive-by-wire Technologie) (P)</p> <p>HydroGen 3 liquid Opel Zafira (2001) LH₂-BZ (D)</p> <p>HydroGen 3 compressed 700 Opel Zafira (2002) CGH₂-BZ (D) (Kleinserie 2003 von 7 HydroGen 3)</p> <p>Chevrolet Silverado Crew Cab (militärische Version) (2002) Diesel-Hybrid Fahrzeug mit BZ-APU (K)</p>	<p>In den vergangenen Jahren Investitionen von über einer Milliarde US\$ in die F&E zur Brennstoffzellentechnologie</p> <p>Insgesamt 600 Mitarbeiter arbeiten in den USA und in Deutschland an BZ-Technologie</p>	<p>Seit 10/2000 Teilnahme an der CaFCP, in deren Rahmen der HydroGen 1 und der HydroGen 3 getestet werden</p> <p>Seit 03/2003 Teilnahme an der JHFC, in deren Rahmen ein HydroGen3 liquid seit Juni 2003 in Tokio im Lieferdienst von Federal Express getestet wird</p> <p>Teilnahme an der CEP ab Ende 2003, bei der ein HydroGen3 getestet werden soll</p> <p>Ab 10/2003 für 2 Jahre „Washington Fuel Cell Preview Program“ in Washington/DC zusammen mit Shell, in dessen Rahmen politische Entscheidungsträger die Möglichkeit erhalten die HydroGen 3 BZ-Fahrzeuge zu testen</p> <p>Stationäre Brennstoffzelle von GM werden vom Telefonanbieter Nextel (seit 2001) und vom Chemieunternehmen Dow Chemical (seit Ende 2003) in Demonstrationsprojekten getestet</p>	<p>Seit 1999 strategische Partnerschaft mit Toyota zu BZ-Technologie, Benzinreformer- und Treibstoffentwicklung. Dritter Partner ist seit 2001 das Energieunternehmen ExxonMobil</p> <p>Seit 2001 Kooperationen mit ChevronTexaco und BPAmoco (Benzinreformer- und Treibstoffentwicklung)</p> <p>Seit 2001 Beteiligung an Quantum Technologies (CGH₂-Tanks), an Hydrogenics (BZ-Produktentwicklung & BZ-Notstromaggregate) und an Giner Inc. (Elektrolyseure, Betankung, stationäre Energiesysteme)</p> <p>Seit 2001 Kooperation mit General Hydrogen (Infrastruktur, H₂-Speicherung & BZ-Komponenten)</p> <p>Seit 2001 Kooperation mit japanischer Tochter Suzuki bei Entwicklung eines BZ-Kleinwagens</p> <p>Seit 2003 Kooperation mit Shell Hydrogen (Demonstrationsprojekt)</p> <p>Seit 2003 Kooperation mit BMW zur Entwicklung von LH₂-Betankungstechnologie</p> <p>Kooperation mit chinesischen Joint-Venture Partner Shanghai Automotive Industry Co. zur Entwicklung von BZ-Fahrzeugen</p>	<p>GM hat das Ziel erstes Automobilunternehmen zu werden, dass 1 Millionen BZ-Fahrzeuge verkauft hat</p> <p>Langfristiges Ziel ist das wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Fahrzeug</p> <p>„An-Bord“-Benzinreformierung ist für GM Übergangstechnologie</p> <p>GM hat Brennstoffzellen-technologie selbst entwickelt</p> <p>GM plant Markteinstieg mit Brennstoffzelle im stationären Bereich („Premium Power Markt“)</p> <p>Im mobilen Bereich zielt das Unternehmen auf frühe Märkte wie das amerikanische Militär oder emissions-sensible Schwellenländer wie China</p>

Tabelle 8: Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten von General Motors

3.5.2 Einleitung

Der weltweit größte Automobilhersteller General Motors Corporation (GM)¹⁶⁰, ist in den 1990er Jahren erst relativ spät in das Thema Brennstoffzellen eingestiegen. Nachdem andere Autohersteller, wie DaimlerChrysler, sich schon intensiv mit der Brennstoffzelle beschäftigt haben, blieb GM gegenüber der neuen Technologie noch lange Zeit sehr skeptisch und prognostizierte den Durchbruch der Brennstoffzelle frühestens in 30 oder 50 Jahren¹⁶¹. Auch der California Fuel Cell Partnership (CaFCP) trat man erst im Oktober 2000 als eines der letzten großen Automobilunternehmen bei. Anfang 2000 hatte man sich noch mit dem Argument, dass es sich nur um einen „regional effort“¹⁶² handeln würde, gegen eine Mitgliedschaft bei der CaFCP ausgesprochen. Nach diesem Spätstart hat GM aber in den letzten Jahren sowohl finanziell als auch personell erhebliche Anstrengungen im Bereich Brennstoffzelle unternommen. Inzwischen arbeiten im Konzern in USA und Deutschland insgesamt 600 Mitarbeiter an der Brennstoffzellen-Entwicklung. Bis heute hat GM über eine Milliarde US\$ in die Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie investiert¹⁶³. 2001 benannte das Unternehmen sogar einen Vizepräsidenten für Brennstoffzellen-Aktivitäten im GM-Vorstand. Als Ziel hat GM heute ausgegeben, das erste Automobilunternehmen sein zu wollen, das eine Million Brennstoffzellen-Autos verkaufen wird¹⁶⁴. Den Rückstand zu anderen, frühzeitig engagierten Automobilunternehmen hat GM inzwischen mit der Entwicklung eigener leistungsstarken Brennstoffzellen, der Präsentation der Fahrzeugstudie „AUTOmomy“ – dem ersten konsequent umgesetzten Brennstoffzellen Purpose Design Fahrzeug der Autoindustrie – und dem Eingehen von mehreren strategischen Partnerschaften, u.a. mit Toyota, aufgeholt. So sagte Bryon McCormick, der Co-Direktor des Brennstoffzellen-Programms von GM, Ende 2001: „GM has become a leader in the development of cutting edge hydrogen fuel cell components and has made tremendous progress in integrating these components into vehicles“¹⁶⁵.

¹⁶⁰ Im Folgenden wird der Einfachheit halber nur von GM gesprochen. Die deutsche Tochter Opel hat aber wesentlich Anteil an der Brennstoffzellenentwicklung bei GM. U.a. ist ein Brennstoffzellen-Forschungszentrum bei Opel in Deutschland angesiedelt.

¹⁶¹ Vgl. o.V. (2002): Fuel Cell Vehicles: Automakers Step Up Competition. Online-Dokument: www.eyeforfuelcells.com/ReportDisplay.asp?ReportID=1541.

¹⁶² Vgl. Hydrogen & Fuel Cell Letter, Februar 2000.

¹⁶³ Diese Zahl nannte Klaudia Martini, Mitglied des Vorstandes der Opel AG, bei einer Präsentation der aktuellen GM Brennstoffzellenfahrzeuge im Juli 2003 in Berlin (vgl. Wasserstoff-Spiegel Nr. 4/03). Laut dem Wirtschaftsdienst Bloomberg soll GM sogar 300 bis 400 Millionen US\$ pro Jahr für seine Brennstoffzellen-Aktivitäten ausgeben (Vgl. Cropper, Mark (2003): Fuel Cell Market Survey: Light Duty Vehicles. Online-Dokument: www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/IndustryInformation/IndustryInformationExternal/IndustryInformationDisplayArticle/0,1168,546,00.html).

¹⁶⁴ In einem Interview mit dem Handelsblatt im September 2002 bestätigte Larry Burns, für die Brennstoffzellenentwicklung zuständiger Vizepräsident von GM, dieses Ziel noch mal und hielt es sogar für möglich, dass GM dieses Ziel schon 2010 erreichen könnten (vgl. Donnerbauer, Robert (2002): „Wasserstoff ist für die ganze Welt von Bedeutung“. Interview mit Lawrence D. Burns. Im: Handelsblatt vom 04.09.2002, Beilage Automobilindustrie, S. b01.

¹⁶⁵ So McCormick bei Verkündigung der Brennstoffzellen-Kooperation mit Suzuki Ende 2001 (Vgl. www.globalsuzuki.com/globalnews/2001/1018.html).

3.5.3 Vom ältesten zum zukunftsfähigsten Brennstoffzellenfahrzeug in der Automobilindustrie¹⁶⁶

Schon in den 1960er Jahren beschäftigte sich GM das erste Mal mit der Brennstoffzellentechnologie. Nachdem man 1964 die erste eigene Brennstoffzelle entwickelt hatte, wurde 1968 der GM Electrovan, das erste fahrfähige Brennstoffzellenfahrzeug der Automobilindustrie aufgebaut. Beim Electrovan nahm das Brennstoffzellensystem (Brennstoffzelle von Union Carbide; 5 kW) den gesamten Lade- und den hinteren Fahrgastraum des Van ein, so dass nur die beiden Vordersitze frei blieben. Das Fahrzeug wog fast 3,5 t. Die Brennstoffzelle wurde mit flüssigem Wasserstoff betrieben. Die Reichweite des Fahrzeugs betrug 200 km und die Spitzengeschwindigkeit 105 km/h. Aus Sicherheitsgründen fuhr das Fahrzeug nur auf dem Firmengelände. Die Lebensdauer der Brennstoffzelle betrug damals nur 1000 Stunden.



Bild 42: GM Electrovan – Röntgendarstellung (Quelle: GM)

Die Beschäftigung mit der Brennstoffzelle für den automobilen Antrieb ruhte dann über Jahrzehnte. Erst Ende der 1990er Jahre begann man sich bei GM, zunächst begrenzt und später mit zunehmender Intensität, wieder mit dem Thema auseinander zu setzen. Anfang 1998 wurde von GM das Global Alternative Propulsion Center (GAPC) mit drei Entwicklungszentren an unterschiedlichen Standorten mit anfangs insgesamt 160 Mitarbeiter etabliert. Der US-Standort Warren/Michigan ist dabei für die Grundlagenforschung zuständig. Der zweite Standort in den USA, Honeoye Falls/New York beschäftigt sich mit der Entwicklung der Brennstoffzelle und individueller Komponenten des Brennstoffzellen-Systems. Mitte 2002 eröffnete GM in Honeoye Falls einen Neubau, in dem 100 neu angestellte Forscher und Entwickler sich mit der Möglichkeiten einer Brennstoffzellen-Großserienproduktion beschäftigen. Der dritte Standort Mainz-Kastel (nahe Rüsselsheim) ist seit 1998 verantwortlich für Systementwicklung, die Integration des Brennstoffzellen-Systems ins Fahrzeug und die Fahrzeugtests. Das GAPC ist in den letzten Jahren um zwei weitere Standorte erweitert worden – zum einen durch das Advanced Technology Center in Torrance/Kalifornien, das GM-Kompetenzzentrum für elektrische Antriebskomponenten, und zum anderen um ein Büro in Tokio. Heute arbeiten laut GM mehr als 600 Mitarbeiter in den verschiedenen Entwicklungszentren im Rahmen der Brennstoffzellenaktivitäten des Konzerns. 30 Jahre nach dem Electrovan

¹⁶⁶ Die Informationen zu den Brennstoffzellenfahrzeugen von GM beruhen, falls nicht anders angegeben, auf folgenden Quellen: http://www.gm.com/company/gmability/adv_tech/; www.media.opel.de => Alternative Antriebe; media.gm.com => About GM => Advanced Technology.

präsentierte GM Anfang 1998 sein zweites Brennstoffzellen-Fahrzeug. Auf der Detroit Motor Show wurde eine auf dem GM Elektrofahrzeug EV1 basierende Fahrzeugfamilie von Elektro- und Hybridfahrzeugen vorgestellt, die sich durch eine besonders aerodynamische Form und Leichtbauweise auszeichnete. Eines der Konzeptfahrzeuge war mit einem Brennstoffzellen-Hybridantrieb (Brennstoffzelle und Nickel-Metallhydridbatterie) ausgestattet. Die Brennstoffzelle wurde mit Methanol betrieben. Das Fahrzeug verfügte über eine Reichweite von 480 km und eine Höchstgeschwindigkeit von 128 km/h. Drei Monate später zeigte GM in Genf ein weiteres Methanol-Brennstoffzellenfahrzeug. Bei dem auf dem Serienfahrzeug Sintra basierenden Fahrzeug handelt es sich um ein reines Brennstoffzellenfahrzeug mit methanolbetriebener Brennstoffzelle (50 kW). Angaben über den Hersteller der Brennstoffzelle und des Methanolreformers machte GM nicht. Neben der Methanol- wurde vom Unternehmen damals schon die Benzinreformierung in Erwägung gezogen¹⁶⁷.



Bild 43: Zafira Brennstoffzellenfahrzeug (Quelle: www.h2cars.de)

Ebenfalls 1998 wurde auf dem Pariser Autosalon das erste fahrfähige Brennstoffzellenauto von GM vorgestellt. Das Fahrzeug auf Basis des Serienfahrzeugs Zafira war mit einer 50 kW Brennstoffzelle ausgestattet, die wiederum mit Methanol betrieben wurde. Das Brennstoffzellenfahrzeug war im Vergleich zum Serienfahrzeug 650 kg schwerer. Der Brennstoffzellen-Zafira diente den Ingenieuren des GAPC vorrangig als Versuchsträger für weitere Forschungsarbeiten. Insbesondere verstärkte GM seine Anstrengungen in Bezug auf die Entwicklung einer eigenen Brennstoffzelle.

Anfang 2000 stellt GM, anknüpfend an die EV1-Konzepte von 1998, den Precept auf der North American International Motor Show in Detroit vor. Die Brennstoffzellen-Version zeichnet sich, genauso wie die gleichzeitig präsentierte Diesel-Hybrid-Version des Konzeptfahrzeuges Precept, durch Leichtbauweise (Aluminium-Rahmen und Karosserie) und sehr günstigen Luftwiderstandswert (0,163) aus. Eine GM-Brennstoffzelle (100 kW) treibt das Fahrzeug an. Der Wasserstoff wird in einem speziell entwickelten chemischen Hydrid gespeichert, das eine Reichweite von 800 km erlauben soll. GM wollte aber bei der Präsentation des Fahrzeuges nichts über die Art und Zusammensetzung des Hydrids verraten, welches in Kooperation mit Forschungsinstituten und anderen Firmen entwickelt wurde¹⁶⁸.

¹⁶⁷ Vgl. Wasserstoff-Gazette 1. Quartal 1998.

¹⁶⁸ Vgl. Hydrogen & Fuel Cell Letter, Februar 2000.



Bild 44: GM Precept (Quelle: GM)

Im Frühjahr 2000 stellt GM dann sein erstes wasserstoffbetriebenes Brennstoffzellenfahrzeug, den HydroGen1, beim Genfer Automobilsalon vor. Ebenfalls auf dem Compact Van Zafira basierend, ist das Fahrzeug mit einer von GM selbstentwickelten Brennstoffzelle (80 kW) ausgestattet, die in Bezug auf volumetrische Leistungsdichte (+15%) und Kaltstartfähigkeit gegenüber den vorherigen Brennstoffzellen-Generationen von GM verbessert werden konnte. Zudem verfügt das Fahrzeug über eine Hochleistungs-Pufferbatterie, mit deren Energie Leistungsspitzen abgedeckt werden können. Das Fahrzeug wird mit flüssigem Wasserstoff betrieben. Der Kryotank (5 kg Flüssigwasserstoff) ermöglicht eine Reichweite von 400 km. Die Höchstgeschwindigkeit des HydroGen1 beträgt 140 km/h. Der HydroGen1 wird von GM bei verschiedenen Anlässen präsentiert und durchläuft eine Reihe von Fahrzeugtests¹⁶⁹. Bei den Olympischen Spielen 2000 in Sydney fuhr der HydroGen1 werbewirksam als Vorausfahrzeug bei den Marathonwettbewerben. Ende 2000 stellt GM das Fahrzeug auf einem mehrtägigen Symposium in Peking u.a. chinesischen Regierungsvertretern vor.



Bild 45: HydroGen1 (Quelle: GM)

Im Sommer 2001 wurde das Fahrzeug einer Dauererprobung auf dem GM Testgelände in der Wüste Arizonas unterzogen. Dabei stellte der HydroGen1 laut GM fünfzehn internationale Geschwindigkeits- und Distanzrekorde für Brennstoffzellenfahrzeuge auf. Auch im Rahmen der California Fuel Cell Partnership wird der Prototyp ab Frühjahr 2002 eingesetzt. Bis Ende 2002 legte der HydroGen1 insgesamt ungefähr 75.000 km weltweit zurück.

Nachdem GM anfänglich mehrere Kraftstoff-Optionen für die Brennstoffzelle verfolgte, konzentriert man sich im Weiteren auf zwei Optionen: Wasserstoff als langfristiges Ziel und

¹⁶⁹ Vgl. media.gm.com/about_gm/vehicle_tech/fuel_cell/monaco/hydrogen/.

Benzin-Reformierung als Übergangstechnologie. Ein Teil der strategischen Partnerschaften mit Automobilherstellern, Mineralölindustrie und Zulieferern (s. Kapitel 3.5.4), die GM eingeht, dient auch dazu, die Benzin-Reformierung voranzutreiben. Im Sommer 2001 präsentiert GM dann den ersten Reformer zur Gewinnung von Wasserstoff aus Benzin an Bord eines Automobils, den Chevrolet-Pickup S10 FC¹⁷⁰.



Bild 46: Chevrolet-Pickup S10 FC (Quelle: GM)

Im Gegensatz zu dem rein stationären Versuchsaufbau, den GM im Herbst 2000 präsentiert hatte, konnten die Entwickler bei der mobilen Applikation die Systemgröße des Benzin-Reformers Gen III bei gleicher Energieausbeute um 300 % verringern. Trotzdem nimmt der Reformer immer noch die halbe Ladefläche des Pick up-Fahrzeuges ein. Der ‚Onboard‘-Reformer, der in Kooperation mit ExxonMobil entwickelt wurde, zeichnet sich auch durch eine erhebliche verkürzte Startzeit aus (3 anstatt 12-15 Minuten). Der maximale Wirkungsgrad des Gen III für den Reformierungsprozess liegt bei 80 %. Der Reformer benötigt für den Betrieb ‚sauberes‘ Benzin. Die Brennstoffzellen-Einheit des Chevrolet-Pickup S10 FC leistet 25 kW. Ziel der GAPC-Ingenieure ist ein Wirkungsgrad von knapp 40 % für das komplette System aus Brennstoffzellen-Einheit und Reformer und die Verkürzung der Reformer-Startzeit auf 20 Sekunden.

GM sieht im Brennstoffzellenfahrzeug auch eine Möglichkeit, die nachholende Mobilisierung in den sich entwickelnden Ländern umweltschonend zu gestalten. U. a. zielt GM damit auf den chinesischen Markt. So präsentierte das Pan Asia Automotive Technology Centre (PATAC), ein Joint Venture von GM und dem chinesischen Automobilunternehmen Shanghai Automotive Industry Corp. (SAIC), im November 2001 in Schanghai ein Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug.

¹⁷⁰ Vgl. Opel-Pressemitteilung vom 07.08.2001: „GM präsentiert ersten Versuchsträger mit Onboard-Benzin-Reformer“. Online-Dokument: www.media.opel.de; vgl. auch Hydrogen & Fuel Cell Letter Dezember 2000 und www.sae.org/automag/techbriefs/07-2002/index.htm.



Bild 47 : Das chinesische Brennstoffzellenfahrzeug von GM – der „Phoenix“ (Quelle: GM)

Bei dem Fahrzeug mit dem Namen „Phoenix“ handelt es sich um einen von Shanghai General Motors hergestellten Buick GL8, der von PATAC mit einem Brennstoffzellensystem ausgestattet wurde. Das Projekt wurde unterstützt von GM's Global Alternative Propulsion Center. So liefert GM die Brennstoffzelle (25 kW) und eine portable Wasserstoff-Tankstelle. Das Fahrzeug fährt mit gasförmigem Wasserstoff, hat eine Reichweite von 200 km und eine Höchstgeschwindigkeit von 110 km/h. Der Phoenix soll als Ausgangspunkt für weitere gemeinsame Entwicklungsanstrengungen im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen von SAIC, GM und weiteren Technologiepartnern in China dienen.

Auf der Detroit Motor Show Anfang 2002 präsentierte GM dann das futuristische Konzeptfahrzeug „AUTOnomy“. „Wir begannen mit dem Motto ‚Was wäre, wenn wir das Auto heute erfinden würden, statt vor einem Jahrhundert? Was würden wir anders machen?‘“ sagte GM-Präsident Rick Wagoner bei der Vorstellung des Fahrzeuges. „AUTOnomy ist mehr als nur eine Fahrzeugstudie, er hat das Potential Fahrzeugdesign, -bau und -verwendung zu revolutionieren.“¹⁷¹



Bild 48: „Skateboard“ und Karosserie der Fahrzeugstudie „AUTOnomy“ (Quelle: GM)

¹⁷¹ Zitiert im Online-Dokument:
www.gm.com/company/gmability/environment/products/adv_tech/autonomyTT_052002.html.

Anders als die bisherige Brennstoffzellenfahrzeuge, entstand der AUTOnomy nicht auf Basis eines Serienmodells, sondern wurde sozusagen um den Brennstoffzellenantrieb herum neu konstruiert¹⁷². Dieses Purpose Design wurde ermöglicht durch eine Kombination aus Brennstoffzellen-System und „X-by-Wire“-Technologie. Konstruktives Herzstück des AUTOnomy ist das so genannte „Skateboard“. In diesem sind alle Antriebs- und Steuerungssysteme des Fahrzeugs untergebracht. In dem nur 18 cm hohen Skateboard-Chassis befinden sich auch das Brennstoffzellensystem und der Wasserstofftanks. Das Fahrzeug wird durch vier Elektromotoren (jeweils 25 kW), die sich in den Radnaben der Räder befinden, angetrieben. Eine Schlüsselfunktion im Elektriksystem des AUTOnomy übernimmt der „docking port“ in der Mitte des „Skateboards“. Dieser verbindet alle Karosseriesysteme, wie Steuerung, Strom und Heizung, mit dem Fahrzeuggestell. Da die Steuerung von Lenkung, Bremsen und anderen Fahrzeugfunktionen durch die X-by-Wire-Technologie elektronisch statt mechanisch erfolgt, bietet das Fahrzeugkonzept wesentlich mehr Freiraum für die Karosserie- und Innenraumgestaltung. Das Fahrzeug verfügt weder über Fußpedale noch ein festes Steuerrad, sondern wird über eine Steuerführung, dem so genannten X-Drive, per Hand bedient. Dies ermöglicht die flexible Anordnung der Fahrerposition sowohl rechts, links, zentral, weiter vorne oder hinten. Es ist zudem möglich, je nach Bedarf und Kundenwünschen unterschiedliche Karosserien auf dem Skateboard zu befestigen. Ohne die technischen und gestalterischen Zwänge, die der Verbrennungsmotor und die damit verbundenen mechanischen Fahrzeugkomponenten, wie Getriebe, Lenksäule, Bremsen und Auspuff ausüben, ist der AUTOnomy von traditionellen, 100 Jahre alten Designbedingungen befreit. Dies lässt Larry Burns, den GM Vizepräsident für Forschung, Entwicklung und Planung, zu folgender Prognose kommen: „Wenn sich unsere Vision der Zukunft als richtig erweist – und darin sind wir sehr zuversichtlich – könnte mit dem AUTOnomy das Auto und damit die gesamte Industrie neu erfunden werden. Der AUTOnomy ist nicht nur ein neues Kapitel in der Automobilgeschichte. Er stellt den zweiten Band vor, wobei die ersten hundert Jahre der erste Band waren. Das 20. Jahrhundert war das Jahrhundert des Verbrennungsmotors. Das 21. Jahrhundert gehört der Brennstoffzelle“¹⁷³.

¹⁷² Die Konzeptstudie „AUTOnomy“ gewann mehrere Preise. Neben dem Michelin Challenge Design Award (Vgl. www.eyeforfuelcells.com/ReportDisplay.asp?ReportID=1058) wurde die Studie auch von der englischen Fachzeitschrift „Engine Technology International“ als bestes Konzept prämiert. Der Juryvorsitzende und Chefredakteur der Zeitung, Graham Johnson, sagte bei der Verleihung des Preises: „Endlich ein speziell für die Brennstoffzelle entwickeltes Fahrzeug. AUTOnomy zeigt, dass auch künftige Automobile mit Wasserstoffantrieb attraktiv sein werden.“ (Zitiert in Opel-Pressemitteilung vom 15.05.2002: „AUTOnomy: ‚Antriebskonzept des Jahres‘“. Online-Dokument: www.media.opel.de).

¹⁷³ Zitiert im Online-Dokument: www.gm.com/company/gmability/environment/products/adv_tech/autonomyTT_052002.html.

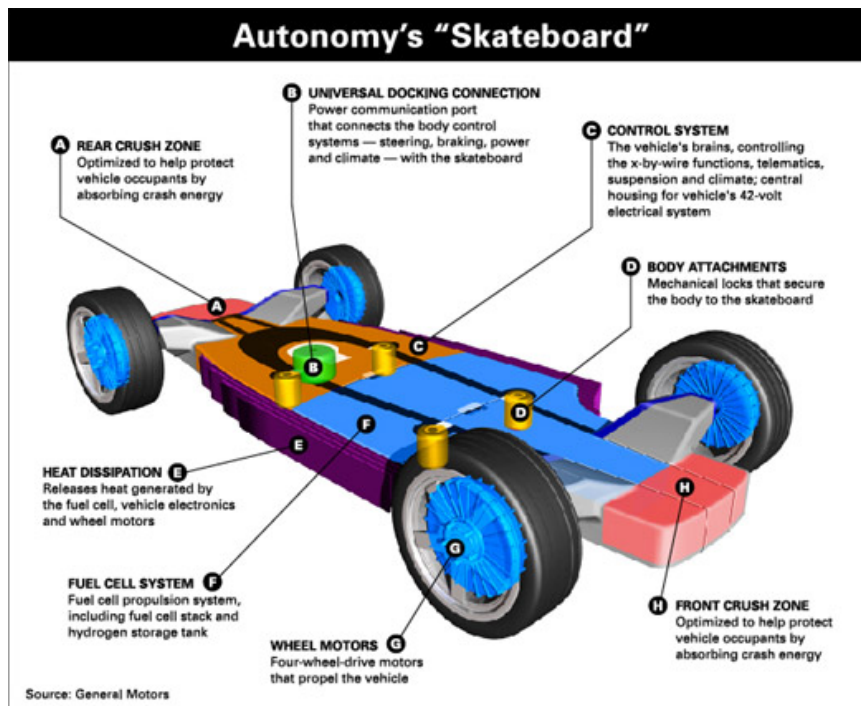


Bild 49: Schematische Darstellung des AUTOnomy „Skateboards“ (Quelle: GM)

Bei der Präsentation des AUTOnomy versprach Burns auch, dass dies keine reine Designstudie bleiben werde, sondern GM innerhalb eines Jahres ein fahrbereites Konzeptfahrzeug präsentieren werde¹⁷⁴. Schon neun Monate später löste GM dieses Versprechen mit der Präsentation des Hy-wire auf der Pariser Motorshow ein. Das fahrfähige Konzeptfahrzeug Hy-wire übernimmt dabei die Konstruktionsprinzipien des AUTOnomy. Der Name „Hy-wire“ symbolisiert die Kombination aus Wasserstoffantrieb („Hydrogen“) und der benutzten Drive-by-Wire-Technologie. Das Fahrzeug zeichnet sich zum einen durch die großzügige und offene Raumgestaltung der Fahrgastzelle aus, die auch durch den Verzicht auf die B-Säule und den fehlenden Motorraum ermöglicht wird, sowie durch die neue Form der Steuerung und Geschwindigkeitskontrolle. Das Fahrzeug hat keine Fußpedale und kein ‚normales‘ Steuerrad. Anstelle dessen gibt es einen Display mit zwei Handgriffen. Beschleunigt wird das Fahrzeug wie beim Motorrad durch das Drehen der Griffe. Gebremst wird der Hy-wire durch das Zusammendrücken und gesteuert durch das Hoch- und Runterbewegen der beiden Handgriffe¹⁷⁵. Der Hy-wire ist mit dem Brennstoffzellensystem des ebenfalls 2002 präsentierten HydroGen3 ausgestattet. Die Brennstoffzelle verfügt über 94 kW. Ein Elektromotor treibt die beiden Vorderräder an. Spätere Versionen sollen, wie beim AUTOnomy angedacht, vier Radnaben-Elektromotoren bekommen. Das Fahrzeug wird mit gasförmigem Wasserstoff betrieben, der in drei Tanks (350 bar) untergebracht ist. Damit ist eine Reichweite von 100 km möglich.

¹⁷⁴ Vgl. o.V. (2002): GM-Studie AUTOnomy: Auf dem Skateboard in die Zukunft. In: Spiegel-Online vom 16.01.2002. Online-Dokument: www.spiegel.de/auto/showroom/0,1518,177368,00.html.

¹⁷⁵ Zur Bewertung diese neuen Form des Autofahrens vgl. Sauer, Heinrich (2002): Schwer auf Draht. In: Auto. Motor und Sport 20/2002, S. 74-75.



Bild 50: Hy-wire (Quelle: GM)



Bild 51: Innenraum des Hy-wire (Quelle: GM)

Die Karosserie wurde von der italienischen Designwerkstatt Stile Bertone gebaut. Die Drive-by-Wire-Technologie hat die schwedische SKF Gruppe entwickelt. Beide Firmen waren schon bei der Entwicklung des AUTOnomy beteiligt. Ähnlich wie bei AUTOnomy setzt GM große Erwartungen in das neue Konzept. „Eines Tages wird der Hy-wire vielleicht im Museum gezeigt, gleich neben den ersten pferdelosen Kutschen von Carl Benz oder Gottlieb Daimler oder Henry Fords Modell T“, so GM Entwicklungschef Larry Burns¹⁷⁶. Im Dezember 2002 wurde der Hy-wire mit dem neu entwickelten HydroGen3 in Monaco präsentiert und Fachjournalisten zu Testfahrten zur Verfügung gestellt¹⁷⁷.

Der HydroGen3, das aktuelle Brennstoffzellenfahrzeug von GM, ist eine Weiterentwicklung des HydroGen1. Ziel bei der Entwicklung des HydroGen3 war es, die Leistungsfähigkeit und Alltagstauglichkeit des Antriebsystems zu verbessern. Beim HydroGen3, ebenfalls auf dem Opel Serienmodell Zafira basierend, konnte zum einen die Antriebseinheit wesentlich kompakter gestaltet werden und zum anderen auch die Brennstoffzelle verbessert werden, so dass die Anzahl der Komponenten reduziert werden konnte. So braucht das Fahrzeug u.a. keine Hochleistungs-Pufferbatterie und keine externe Befeuchtungseinrichtung für die Membranen der Brennstoffzelle mehr. Die gesamte Antriebseinheit kann beim HydroGen3 als komplettes, so genanntes PDU-Modul („Propulsion Dress-up“) vormontiert werden. Damit ist es möglich, wie bei einer herkömmlichen Antriebseinheit, das 300 kg schwere Modul ans Band zu liefern und wie bei einer klassischen „Hochzeit“ auf den vorhandenen Lagerpunkten des Zafiras zu montieren. Die Gewichts- (der HydroGen3 ist 100 kg leichter als der HydroGen1) und Platzeinsparungen führen dazu, dass beim HydroGen3 dasselbe Platzangebot wie in einem Serienfahrzeug vorhanden ist.

¹⁷⁶ Vgl. Wasserstoff-Spiegel Nr. 04/2002; media.gm.com/news/releases/020926_hywire .

¹⁷⁷ Vgl. media.gm.com/about_gm/vehicle_tech/fuel_cell/monaco/hydrogen/.



Bild 52: HydroGen3 liquid (Quelle: GM)

Bild 53: HydroGen3 compressed 700 (Quelle: GM)

Der Brennstoffzellen-Stack des HydroGen3 ist mit 94 kW Dauerleistung und 129 kW Spitzenleistung zudem leistungsstärker als beim Vorgängermodell (Leistungsdichte: 1,6 kW/l oder 0,94 kW/kg). Vom HydroGen3 gibt es sowohl eine Flüssigwasserstoff-Variante, den HydroGen3 liquid, und eine Druckwasserstoff-Variante, den HydroGen3 compressed 700. Die Flüssigwasserstoff-Variante hat ein Tankvolumen von 4,6 kg Wasserstoff und damit eine Reichweite von 400 km. Der HydroGen3 compressed 700 ist mit einem von GM und Quantum Technologies neu entwickelten 700 bar Tank ausgestattet, der 3,1 kg Wasserstoff speichert, was eine Reichweite von 270 km ermöglicht. Der neu entwickelte Druckwasserstofftank, bei dem der Speicherdruck im Vergleich zu den bisher eingesetzten Tanks verdoppelt worden ist, ist vom deutschen TÜV zertifiziert worden. Ergänzend zum 700 bar Tank hat GM Anfang 2003 auch eine Wasserstofftankstelle mit 700-bar-Technologie auf dem Gelände des deutschen Opel-Testzentrums in Dudenhofen bei Offenbach von der Firma Linde errichten lassen.

Im Oktober 2002 kündigte GM für Anfang 2003 an, eine Kleinserie von Brennstoffzellen-Autos auf Zafira-Basis aufzubauen und im Alltagsbetrieb testen zu wollen¹⁷⁸. Erster Partner von GM in Japan ist der Paketdienst Federal Express. Ab Juni 2003 wird der HydroGen3 liquid für ein Jahr im normalen täglichen Einsatz von Federal Express in Tokio eingesetzt und unter Alltagsbedingungen getestet. Der HydroGen3 ist damit das erste Brennstoffzellenauto mit Flüssigwasserstoff-Speicherung, der auf öffentlichen Straßen in Japan fährt. Der Test mit Federal Express ist Teil des Engagement von GM im Rahmen des ‚Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Projektes (JHFC)‘. Auch in den USA wird der HydroGen3 in einem Demonstrationsprojekt eingesetzt. In Kooperation mit Shell Hydrogen wird GM zwei Jahre lang Brennstoffzellenfahrzeuge in Washington/DC im Rahmen des ‚Washington Fuel Cell Preview Program‘ testen¹⁷⁹. Hierzu hat der amerikanische Autokonzern im Mai 2003 sechs HydroGen3 nach Washington gebracht. Im Oktober 2003 will Shell eine von zwei im

¹⁷⁸ Vgl. auch Wasserstoff-Spiegel Nr. 5/02; HyWeb-Gazette 4. Quartal 2002.

¹⁷⁹ Vgl. GM-Pressemitteilung vom 07.05.2003 : ‚GM Launches Washington Fuel Cell Preview Fleet‘. Online-Dokument: www.gm.com/company/gmability/adv_tech/600_tt/650_future/dc_demo_050703.html; vgl. auch Durbin, Dee-Ann (2003): GM Brings Fuel Cell Vehicles to Congress. Online-Dokument: www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/IndustryInformation/IndustryInformationExternal/NewsDisplayArticle/0,1602,2866,00.html.

Rahmen dieses Projektes geplanten Wasserstofftankstellen in der Stadt eröffnen. Dabei wird die Wasserstoff-Tanksäule in einer reguläre Tankstelle integriert. Beide Projektpartner zielen mit ihrem Demonstrationsprojekt auf politische Entscheidungsträger, die im Rahmen des Projektes die Möglichkeit haben die Fahrzeuge zu testen. In Deutschland wird sich GM mit einem HydroGen3 an dem Ende 2003 begonnendem deutschen Clean Energy Partnership Projekt (CEP) in Berlin beteiligen¹⁸⁰.

Im Gegensatz zu Unternehmen wie Ford oder DaimlerChrysler entwickelt GM selbst Brennstoffzellen. Nach eigenen Aussagen hat GM inzwischen andere Wettbewerber bei der Brennstoffzellenentwicklung überholt. So präsentierte GM im Herbst 2001 eine Brennstoffzelle mit einer Leistungsdichte von 1,75 kW/l¹⁸¹, einer Dauerleistung von 102 kW und einer Spitzenlast von 129 kW. Das Gewicht der Brennstoffzelle beträgt 82 kg bei einer Größe von 82 x 14 x 50 cm. Die GM-Brennstoffzelle zeichnet sich durch eine gute Kaltstartfähigkeit aus, eine der größten Hürden zur Alltagstauglichkeit der Brennstoffzelle. Bei einer Temperatur von minus 20 Grad Celsius steht die volle Leistung bereits nach 15 Sekunden zur Verfügung. Die gewonnene Kompetenz bei der Entwicklung der Brennstoffzelle will der Autokonzern auch in anderen Geschäftsfeldern nutzen. Schon im Frühjahr 2001 kündigte man an, auch Märkte abseits der Straße anzupeilen¹⁸². Parallel zur Präsentation des Chevrolet Pickup S 10 FC im August 2001 stellte GM eine stationäre Brennstoffzellen-Einheit (5,3 kW) mit einem Multifuel-Reformer zur Stromversorgung vor. Diese stationäre Brennstoffzelleneinheit hat GM inzwischen weiterentwickelt. 2002 präsentierte das Unternehmen das erdgasbetriebene „GM Regenerative Stationary Fuel Cell Power System“ mit einer elektrischen Leistung von 75 kW, das als Notstromaggregat eingesetzt werden kann¹⁸³. Damit zielt GM auf den sogenannten „Premium Power“-Markt in den USA. Da das Stromnetz in den USA instabiler als das in Europa ist, sind Einrichtungen und Firmen, wie Krankenhäuser, Kreditkarten-Unternehmen und Mobilfunk-Anbieter, auf Notstromaggregate angewiesen, denn Stromausfälle können hohe Kosten verursachen.



Bild 54: GM Vizepräsident Larry Burns präsentiert stationäre Brennstoffzelleneinheit von GM

¹⁸⁰ Vgl. Pressemitteilung des deutschen Bundesverkehrsministeriums vom 26.11.2003: „Mobil mit Wasserstoff“. Online-Dokument: www.pressrelations.de/i.cfm?r=140624.

¹⁸¹ So beträgt die Leistungsdichte des zu der Zeit einzig vergleichbaren Produktes von Ballard, der Mark 902 Brennstoffzelle, 1,13kW/l (vgl.: www.ballard.com/pdfs/Mark_902.pdf).

¹⁸² Vgl. Wasserstoff-Spiegel Nr. 02/01.

¹⁸³ Vgl. www.GMpremiumpower.com.

Deshalb glaubt GM glaubt im Bereich Notstromaggregate eine große Marktchance für seine Brennstoffzelle ausgemacht zu haben, da Kunden wegen der Bedeutung einer kontinuierlichen Stromverfügbarkeit eher bereit sind, einen hohen Preis für zuverlässige Notstromaggregate zu zahlen. Zudem gibt es wenige konkurrierende Anbieter auf dem Premium Power Markt. Für GM bietet dieser Einstieg zum einen die Möglichkeit, mit der Brennstoffzellentechnologie lange vor dem Verkauf von Brennstoffzellen-Fahrzeugen reale Markterfahrungen zu sammeln, und zum anderen die Chance, mit der Brennstoffzelle frühzeitig Geld zu verdienen. Erste Praxiserfahrungen hat GM mit der eigenen stationären Brennstoffzelle bei einem seit 2000 laufenden Versuch im Brennstoffzellen-Entwicklungszentrum in Honeoye Falls/New York gemacht. Außerdem lieferte GM im November 2001 eine stationäre Brennstoffzelle, die zusammen mit dem Partnerunternehmen Hydrogenics gebaut wurde, an den ersten Kunden. Die Pilotanlage wird beim amerikanischen Telefonanbieter Nextel für den Notstrombetrieb von Telefon- und Sendeanlagen eingesetzt. Falls die zweimonatige Testphase des 25 kW Aggregats erfolgreich verlaufen sollte, hat Nextel angekündigt zunächst 35 Systeme zu kaufen, um weitere Sendeanlagen auszurüsten. Sollte dieser Flächenversuch die Erwartungen erfüllen, wird der Kauf weiterer Anlagen erwogen. Eine großflächige Markteinführung seiner stationären Brennstoffzelle plant GM aber erst für 2005¹⁸⁴. Ein Schritt in Richtung Markteinführung ist auch die geplante Zusammenarbeit von GM und dem weltweit größten Chemieunternehmen Dow Chemical. Stationäre Brennstoffzelleneinheiten sollen Wasserstoff, das als Nebenprodukt bei der Chemieproduktion bei Dow Chemical anfällt, in Strom umwandeln. Von Ende 2003 bis 2005 sollen im Dow Chemical-Standort Freeport (Texas) Brennstoffzellen mit einer Gesamtleistung von 35 MW getestet werden. Im Erfolgsfall will Dow Chemical bis Ende des Jahrzehnts bis zu 500 Brennstoffzellenmodule von GM erwerben oder leasen, und den Einsatz von Brennstoffzellen auf andere Chemiewerke ausweiten¹⁸⁵.

Ein anderes frühes potentiell Anwendungsfeld der Brennstoffzelle bietet das amerikanische Militär. Anfang 2002 zeigten GM und die US Army einen Diesel-Hybrid Militär Pickup Truck, basierend auf der militärischen Version des Chevrolet Silverado Crew Cab, der mit einer Brennstoffzellen-APU ausgestattet war¹⁸⁶. Dieser Prototyp könnte des Modell für eine neue Flotte von 30.000 leichten taktischen Armeefahrzeugen werden, die die U.S. Army am Ende des Jahrzehnts erwerben will. Die Brennstoffzellen-APU ist wesentlich leiser als die zur Zeit benutzten motor- und batteriebetriebenen Generatoren. Zudem ist sie wegen der geringeren Wärmeabstrahlung wesentlich schwerer von gegnerischen Wärmesensoren zu entdecken. Die US Army verspricht sich mit der APU, ihre „silent watch“-Fähigkeit zu verbessern. Die 5 kW PEM-Brennstoffzellen-APU wurde von GM's strategischen Brennstoffzellen-Partner Hydrogenics entwickelt und gebaut. Während des Fahrzeugbetriebs wird der mit Hilfe des Dieselmotors erzeugte Strom genutzt, um mittels eines integrierten Elektrolyseurs aus Wasser

¹⁸⁴ Vgl. HyWeb-Gazette 4. Quartal 2001.

¹⁸⁵ Vgl. GM-Pressemitteilung vom 07.05.2003: „Dow Plans to Use GM Fuel Cells in World's Largest Fuel Cell Transaction“. Online-Dokument: www.gm.com/company/gmability/adv_tech/600_tt/650_future/dow_fc_050703.html; vgl. auch www.sustainablemobility.org/news/cat_1/news_141/index.asp.

¹⁸⁶ Vgl. www.motortrend.com/features/news/112_news011003_army/;
www.ecologicinvestor.com/news/printready.asp?ID=232.

Wasserstoff herzustellen. Mit dem gewonnenen Wasserstoff, der in einem Metallhydrid-Speicher gespeichert wird, kann dann im Stand die Brennstoffzelle betrieben werden. GM sieht im Militär einen frühen Kunden, der der neuen Technologie zum Marktdurchbruch verhelfen kann.



Bild 55: Militärische Version des Chevrolet Silverado Crew Cab (Quelle: www.motortrend.com)

Bild 56: GM/Hydrogenics Brennstoffzellen-APU (Quelle: www.motortrend.com)¹⁸⁷

3.5.4 Benzinreformierung, Purpose Design und frühe Märkte

„Zuerst brauchen wir Brennstoffzellensysteme, die bald in Fahrzeugen funktionieren; das sind reformergestützte Brennstoffzellensysteme mit einem allgemein erhältlichen Brennstoff, den der Kunde kennt, so wie Benzin. Zweitens brauchen wir durch fortschreitende Technologie und Innovation sichere und zuverlässige Wasserstoff-Speichersysteme im Fahrzeug. Schließlich brauchen wir ein Vertriebssystem, das Wasserstoff an Stellen bereitstellt, die dem Kunden passen. ... Das ist ein Marathonlauf, kein Sprint“¹⁸⁸, so sieht Bryon McCormick, inzwischen Direktor des GM Brennstoffzellen-Programms, die zeitliche Perspektive der Brennstoffzellenentwicklung. Langfristvision ist auch für GM das brennstoffzellenbetriebene Automobil und die Wasserstoffwirtschaft. Das 21. Jahrhundert werde das Jahrhundert des Brennstoffzellen-Antriebes, davon ist GM's Entwicklungschef Larry Burns, der die treibende Kraft hinter den Brennstoffzellenaktivitäten von GM ist, überzeugt. Auch GM gibt, nachdem man anfänglich ebenfalls von 2004 sprach, inzwischen 2010 als Zeitpunkt der Markteinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen an. Bis 2020 will das Unternehmen mehrere 100.000 Brennstoffzellen-Fahrzeuge verkauft haben. Für den Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur sieht GM aber einen noch längeren Zeithorizont. Deswegen werden aus Sicht von GM Verbrennungsmotor und Brennstoffzelle noch über mehrere Jahrzehnte koexistieren. Bis zum Aufbau einer funktionierenden Wasserstoff-Infrastruktur hält GM deswegen die ‚An-Bord‘-Benzin-Reformierung für die richtige Brückentechnologie. Zwar sei die Methanol-Reformierung technologisch ausgereifter, aber die Kosten des Aufbaus einer Methanol-Infrastruktur

¹⁸⁷ Die Bilder sind dem folgendem Artikel entnommen: o.V. (2002): GM Reveals Hybrid Military Pickup to Army. In: Motor Trend vom 10.01.2002. Online-Dokument: www.motortrend.com/features/news/112_news011003_army/.

¹⁸⁸ Vgl. Wasserstoff-Spiegel Nr. 5/1999.

nur für einen Übergangszeitraum seien zu teuer. Nachdem GM sich anfänglich mit Methanol beschäftigt hat, hat man sich deswegen für die Benzinreformierung bzw. für ‚sauberes‘ Benzin entschieden. Der Direktor des GAPC in Mainz-Kastel, Dr. Ehrhard Schubert, begründet dies damit, dass ‚sauberes‘ Benzin sowieso kommen werde, da es für die Benzin-Direkteinspritzung benötigt wird¹⁸⁹. Gelingt die Benzinreformierung, kann zum einen auf die etablierte Tankstelleninfrastruktur zurückgegriffen werden, und zum anderen ist die Koexistenz von Verbrennungsmotor und Brennstoffzelle möglich. Längerfristig kann dann der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur erfolgen. Diese Entscheidung wird durch zwei Studien, die GM in Auftrag gegeben hat, bestätigt. In beiden umfassenden „Well-to-Wheel“-Studien wurden unterschiedliche Treibstoffpfade auf ihre Effizienz und auf die entstehenden Emissionen von Treibhausgasen für den Zeitraum um 2010 getestet. Für nordamerikanische Bedingungen hat GM mit den Argonne National Labs und amerikanischen Partnern aus der Energieindustrie verschiedene Treibstoffpfade untersucht. Die Studie wurde im Frühjahr 2001 veröffentlicht. Ein Jahr später wurde die europäische Studie veröffentlicht, die GM mit Hilfe der L-B-Systemtechnik GmbH und den europäischen Energieunternehmen BP, ExxonMobil, Shell und TotalFinaElf durchgeführt hat. In der europäischen Studie wurden 88 Treibstoffpfade (14 Kraftstoffe kombiniert mit 22 konventionellen und alternative Antrieben) untersucht¹⁹⁰. Beide Studien kommen zu dem Ergebnis, dass der ideale Antrieb in Bezug auf die Kriterien Energieeffizienz und Emissionen die Direkt-Wasserstoff-Brennstoffzelle ist. Dies gilt auch, wenn der Wasserstoff nicht regenerativ, sondern aus Erdgas gewonnen wird. Ein weiteres Ergebnis der Studien ist die Erkenntnis, dass Methanol keine Vorteile gegenüber dem Einsatz von ‚sauberem‘ Benzin in der Brennstoffzelle hat¹⁹¹.

Eine andere Übergangsstrategie hat GM für die Kommerzialisierung der Brennstoffzelle entwickelt. Diese Strategie fundiert auf der Idee, der Kostenkurve der Brennstoffzelle zu folgen, und jeweils in die Märkte zu gehen, in denen die Brennstoffzelle preislich marktfähig ist (vgl. Bild 57). Deswegen beginnt GM mit der Einführung der Brennstoffzelle in der stationären Anwendung. Vom Premium Power Markt für Notstromaggregate über Haus-Energiezentralen will GM sich zur mobilen Anwendung in den Markt vorarbeiten. Zur Umsetzung dieser Strategie kooperiert GM seit Oktober 2001 mit dem kanadischen Unternehmen Hydrogenics. Im Rahmen dieser Kooperation beteiligt sich GM an Hydrogenics mit 24% (spätere Aufstockung auf 28% ist geplant). Beide Firmen wollen insbesondere bei der Entwicklung von Notstromaggregaten zusammenarbeiten, aber auch generell beim Thema Brennstoffzellen-Produktentwicklung. Diese Kommerzialisierungsstrategie wird auch durch den direkten Zugriff von GM auf die Brennstoffzellentechnologie möglich. Denn im Gegensatz zu Mitbewerbern wie DaimlerChrysler und Ford, hat GM die strategische Entscheidung getroffen, eine eigene Brennstoffzelle zu entwickeln.

¹⁸⁹ Vgl. Donnerbauer, Robert (2002): Mit Wasserstoff in die Zukunft – Brennstoffzellen-Fahrzeuge zeigen Flagge. In: VDE Dialog 1/2002. Online-Dokument: www.vde.com/de/fg/etg/fachthemen/fa15/autos.htm.

¹⁹⁰ Studie ist online erhältlich: www.lbst.de/gm-wtw.

¹⁹¹ Vgl. HyWeb-Gazette 2.Quartal 2002.

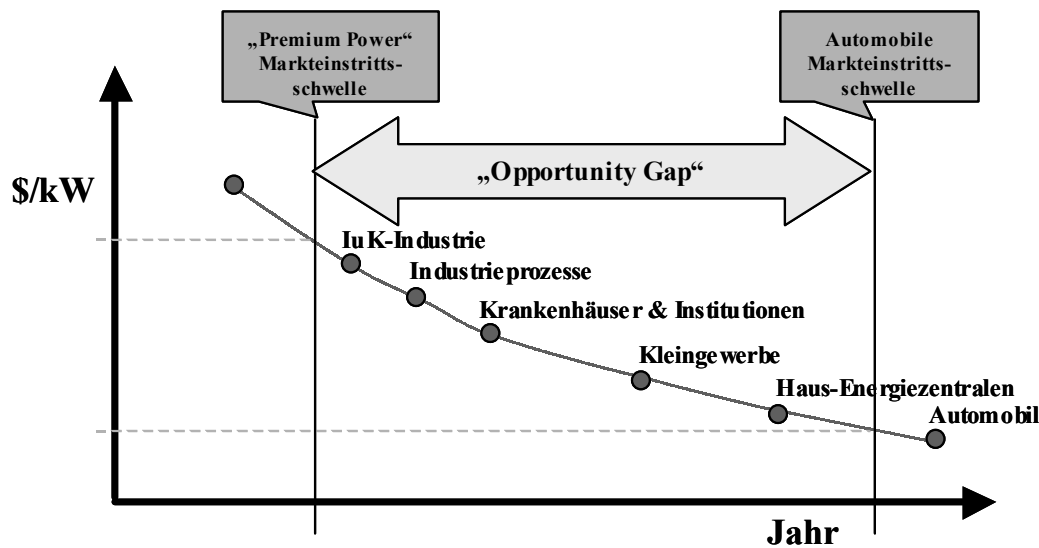


Bild 57: Kostenkurve der Brennstoffzelle und mögliche Marktchancen (Quelle: GM; Layout überarb. (MW))

Unter anderem zur Umsetzung dieses Vorhabens, aber auch zur Entwicklung der Reformertechnologie u.ä., ist GM zahlreiche strategische Partnerschaften mit Automobilherstellern, Energieunternehmen und Zulieferern eingegangen. Im April 1999 hat GM mit Toyota eine Kooperationsvereinbarung abgeschlossen. Beide Automobilunternehmen wollen bei der Entwicklung des Brennstoffzellenautos und beim Thema ‚sauberes‘ Benzin zusammenarbeiten. Bei der Treibstoffentwicklung kooperieren beide Partner mit ExxonMobil¹⁹². Mit mehreren Mineralölkonzernen ist GM eine Partnerschaft bezüglich der Entwicklung eines Benzinreformers und der Forschung an zukünftigen Treibstoffen eingegangen. Neben ExxonMobil, mit dem GM seit 1998 zusammenarbeitet, kooperiert der Autohersteller seit 2001 mit ChevronTexaco und ebenfalls mit BPAmoco. Auch im Bereich Zulieferer für die neue Technologie ist GM strategische Partnerschaften eingegangen. Zum einen ist dies die kalifornische Technologiefirma Quantum Technologies, eine Tochter von Impco Technologies, bei der GM im Juni 2001 eine Minderheitsbeteiligung erworben hat. Quantum ist weltweit einer der führenden Entwickler von mobilen Druckwasserstoff-Speichersystemen. Zum zweiten kooperiert GM seit dem Jahr 2000 mit dem US-amerikanischen Spezialunternehmen Giner Inc. GM und Giner haben ein Joint Venture, Giner Electrochemical Systems, gegründet, an dem GM mit 30 % beteiligt ist. Die gemeinsame Firma entwickelt Elektrolyseure, Betankungsanlagen und stationäre Energiesysteme. Eine dritte Partnerschaft ist die schon beschriebene mit der kanadischen Firma Hydrogenics. Eine weitere Partnerschaft ist GM mit dem ebenfalls kanadischen Unternehmen General Hydrogen Cooperation, das von Ballard Gründer Geoffrey Ballard nach seinem Ausscheiden (Ruhestand) bei Ballard gegründet worden ist, eingegangen. Beide Unternehmen vereinbarten im Juni 2001 eine auf 25 Jahre angelegte Kooperation mit dem Ziel am beschleunigten Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur mitzuwirken. Weitere Inhalte

¹⁹² Auch VW unterstützt die Bemühungen von GM, Toyota und Exxon bei der Entwicklung von ‚sauberm‘ Benzin (vgl. Wasserstoff-Spiegel Nr. 2/01).

der Zusammenarbeit sind die Entwicklung von Speicher- und Tanksystemen für Wasserstoff sowie von neuen Werkstoffen und elektronischen Systemen für Brennstoffzellenfahrzeuge. Auch mit dem deutschen Automobilunternehmen BMW wird GM in Fragen der Betankungstechnologie für flüssigen Wasserstoff zusammenarbeiten, wie beide Unternehmen im April 2003 auf der Hannover Messe verkündeten¹⁹³.

Zwei weitere Aspekte sind unter strategischen Gesichtspunkten bei GM von Interesse. Zum einen betonen Vertreter von GM explizit, dass der Brennstoffzellenantrieb die Möglichkeit ist, die nachholende Mobilisierung in den „emerging markets“ umweltverträglich zu gestalten. So ist GM bis heute das einzige Automobilunternehmen, das sich in einem Automobilmarkt der Zukunft, in China, im Bezug auf die Brennstoffzelle engagiert. Zum anderen hat GM, ebenfalls als erstes Automobilunternehmen, die Möglichkeiten der Brennstoffzelle und der entstehenden Benefits für den Kunden mit dem Konzeptfahrzeug AUTOnomy konsequent zu Ende gedacht, und mit dem Hy-wire dieses Konzept als einziges Automobilunternehmen auch in einen fahrfähigen Prototypen umgesetzt. Beide Fahrzeuge haben ein Purpose Design, also ein Design, das die Möglichkeiten der Brennstoffzelle und der Drive-by-wire-Technologie gezielt nutzt. Der Leiter des AUTOnomy und Hy-wire Projektes, Chris Borroni-Bird, drückt die Vorteile des neuen Fahrzeugkonzeptes so aus: „It is a significant step towards a new kind of automobile that is substantially more friendly to the environment and provides consumers positive benefits in driving dynamics, safety and freedom of individual expression“¹⁹⁴. Die Notwendigkeit von Benefits für die Gewinnung von Kunden betont auch Erhard Schubert, Direktor des deutschen Brennstoffzellen-Entwicklungszentrums von GM: „...we need clearly to find the customer ... We will not find a single customer who will pay one single euro cent extra for the environment ... They want environmentally friendly, but don't want to pay extra for it“¹⁹⁵.

¹⁹³ Vgl. Wasserstoff-Spiegel Nr. 2/03.

¹⁹⁴ Vgl. Hydrogen & Fuel Cell Letter, September 2002.

¹⁹⁵ Vgl. Hydrogen & Fuel Cell Letter, Juli 2000.

3.5.5 Weitere Brennstoffzellen- und Wasserstoffaktivitäten im General Motors-Konzern

3.5.5.1 Suzuki

Beginn der Wasserstoff-/Brennstoffzellen-Aktivitäten Angekündigte Serienproduktion	Fahrzeuge [[Konzept- (K) Prototyp- (P) Demonstration- (D) Seriennahes- (Sn) Serienfahrzeug (S)]	Höhe der Investitionen/ Anzahl der involvierten Mitarbeiter	Teilnahme an Demonstrationsprojekten [Kalifornien (CaFCP) Japan (JHFC) Deutschland/Berlin (CEP)]	Allianzen/ Kooperationen	Strategie
Suzuki hat 2001 mit F&E zur Brennstoffzelle begonnen Serienproduktion voraussichtlich ab 2010	Suzuki Covie (2001) Batterie-EV (Aufladung über GM „Home Fuel Cell Generating System“ (K)) Suzuki Mobile Terrace (2003) CGH ₂ -BZ (K) Suzuki MR Wagon FCV (2003) CGH ₂ -BZ (D)	Beides unbekannt	Teilnahme an der JHFC, in deren Rahmen das MR Wagon FCV getestet werden soll	Seit 2001 Kooperation mit GM bei Entwicklung eines BZ-Kleinwagen	Unbekannt

Tabelle 9: Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten von Suzuki

Anfang 2001 stockte GM seine seit 1998 bestehende Beteiligung an dem japanischem Automobilunternehmen Suzuki von 10 auf 20% auf¹⁹⁶. Seit Oktober 2001 arbeiten die beiden Unternehmen auch in der Entwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen eng zusammen. Dabei bringt Suzuki sein Know-how im Kleinwagensegment in die gemeinsame Entwicklung ein. Andersherum erhält Suzuki Zugriff auf GM's Brennstoffzellen-Technologie und wird mit dem GAPC in Europa zusammenarbeiten¹⁹⁷. Zudem beliefert GM Kooperationspartner Quantum Technologies Suzuki mit Druckwasserstofftanks (350 bar). Ein erstes Resultat dieser Kooperation ist das 2001 auf der Tokyo Motor Show von Suzuki präsentierte Elektro-Konzeptfahrzeug Covie¹⁹⁸. Dessen Lithium-Ion-Batterien werden zur Wiederaufladung an das GM „Home Fuel Cell Generating System“ angeschlossen. Betrieben wird das stationäre Brennstoffzellensystem mit Erdgas aus dem Hausanschluss. Der Covie ist ein Kurzstreckenfahrzeug für zwei Personen, der pro Batterieladung eine Reichweite von 100 km hat.

¹⁹⁶ GM und Suzuki kooperieren seit 1981, besonders in der gemeinsamen Entwicklung von Kleinwagen.

¹⁹⁷ Vgl. Suzuki-Pressemitteilung vom 18.10.2001: „Collaboration in Fuel Cell Technology with GM“. Online-Dokument: www.globalsuzuki.com/globalnews/2001/1018.html.

¹⁹⁸ Vgl. Suzuki-Pressemitteilung vom 11.01.2002: „Suzuki Covie received „Environmental Award of the Concept Car of the Year“ by Automotive News. Online-Dokument: www.globalsuzuki.com/globalnews/2002/0111.html; vgl. auch www.suzukiautoco.com/covie.htm.



Bild 58: Suzuki Covie mit Ladegerät (Quelle: Suzuki)

Bild 59: Suzuki MR Wagon FCV (Quelle: Suzuki)

Zwei weitere Brennstoffzellenfahrzeuge, die der japanische Hersteller in Zusammenarbeit mit GM entwickelt hat, wurden auf der Tokyo Motor Show im Oktober 2003 vorgestellt¹⁹⁹. Während es sich beim Mobile Terrace um ein reines Konzeptfahrzeug handelt, bei dem versucht wurde die Prinzipien des GM Hy-wire auf ein Kleinfahrzeug zu übertragen, ist das MR Wagon FCV ein fahrfähiger Prototyp, der im Rahmen des Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstrationsprojects, an dem auch Suzuki teilnimmt²⁰⁰, eingesetzt werden soll. Das MR Wagon FCV fährt mit Druckwasserstoff und bietet Platz für vier Personen.

Suzuki plant bis 2010, ähnlich wie der Kooperationspartner GM, Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb zur Marktreife zu entwickeln. Dabei erweist sich für einen Kleinwagenhersteller insbesondere die Unterbringung des Wasserstofftanks, die eine gewisse Größe haben müssen, um eine für den Kunden ansprechende Reichweite zu erzielen, als größte Herausforderung²⁰¹.

¹⁹⁹ Vgl. Suzuki-Pressemitteilung vom 23.10.2003: „37th Tokyo Motor Show“: Online-Dokument: www.globalsuzuki.com/globalnews/2003/1023_5.html; www.globalsuzuki.com/globalnews/2003/1023_5.html, vgl. auch Hydrogen & Fuel Cell Letter, November 2003.

²⁰⁰ Vgl. Brennstoffzellen Newsletter 11-2003.

²⁰¹ Vgl. Brennstoffzellen Newsletter 30-2003.

3.6 Honda

3.6.1 Überblickstabelle Honda

Beginn der Wasserstoff-/Brennstoffzellen-Aktivitäten Angekündigte Serienproduktion	Fahrzeuge [Konzept- (K) Prototyp- (P) Demonstration- (D) Seriennahes- (Sn) Serienfahrzeug (S)]	Höhe der Investitionen/ Anzahl der involvierten Mitarbeiter	Teilnahme an Demonstrationsprojekten [Kalifornien (CaFCP) Japan (JHFC) Deutschland/Berlin (CEP)]	Partnerschaften/ Kooperationen	Strategie
<p>Honda beginnt erst relativ spät sich intensiver mit der BZ-Technologie zu beschäftigen. Erster BZ-Prototyp 1999</p> <p>Erste BZ-Fahrzeuge sind von Honda 12/2002 in Kundenhand übergeben worden</p> <p>Größere Serienproduktion wird von Honda-Vertretern erst in 10 bis 15 Jahren gesehen</p>	<p>FCX-V1 Honda EVPlus (1999) H2-FC (Metallhydrid-Speicher) (P)</p> <p>FCX-V2 Honda EVPlus (1999) CH₃OH-BZ (P)</p> <p>FCX (1999) CH₃OH-BZ (K)</p> <p>FCX-V3 Honda EVPlus (2000) CGH₂-BZ (Ultra Capacitors) (D)</p> <p>FCX-V4 Honda EVPlus (2001) CGH₂ BZ (Ultra Capacitors) (D)</p> <p>FCX Honda EVPlus (2002) CGH₂-BZ (Ultra Capacitors) (Sn) (Kleinserie von 30 Fahrzeugen ab Ende 2002)</p> <p>KIWAMI (2003) CGH₂-BZ (K)</p>	<p>Laut einer eigenen Prognose von 1999 wird Honda bis 2003 400 bis 480 Mio. US\$ in die BZ-Technologie investiert haben</p> <p>Anzahl Mitarbeiter unbekannt</p>	<p>Seit 11/1999 Teilnahme an der CaFCP, in deren Rahmen der FCX-V3, FCX-V4 und FCX getestet werden</p> <p>Ab 03/2003 Teilnahme an der JHFC, in deren Rahmen der FCX getestet wird</p> <p>Bis 2005 will Honda 30 FCX aufgebaut und an Kunden verleast haben. Erste Fahrzeuge sind in Kalifornien an die Städte Los Angeles und San Franzisko und in Japan an Regierungsstellen übergeben worden</p>	<p>Seit 2002 Kooperation mit BZ-Hersteller Plug Power zur Entwicklung einer „Home Energy Station“, mit der auch Wasserstoff zur Fahrzeugbetankung erzeugt werden soll</p> <p>Seit 2002 mit Celanese Ventures GmbH (BZ-Membranen)</p>	<p>Hondas Ziel ist die Eigenentwicklung der Brennstoffzelle. Zur Zeit werden noch Ballard-Brennstoffzellen genutzt</p> <p>Konzentration auf Wasserstoff als Treibstoff</p> <p>Beim Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur setzt Honda auf individuelle Wasserstoffversorgungssysteme</p> <p>Honda hat breites Portfolio an alternativen Antrieben, und nutzt dieses bei BZ-Fahrzeugen zum Technologietransfer</p> <p>Frühzeitige Übergabe neuer Technologien in Kundenhand – Erfahrungen unter realen Bedingungen machen.</p> <p>Konkurrenz zu Toyota als Treiber</p>

Tabelle 10: Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten von Honda

3.6.2 Einleitung

"In an environment of intense international competition to develop fuel-cell vehicle technology, I am extremely happy to be able to deliver the world's first fuel-cell passenger vehicle for official use here today. While proud of the performance of this vehicle, we are aware of the challenges to be overcome before the fuel-cell vehicle can enjoy more widespread use. We will continue to show our leadership worldwide in this vital area of technological development." Dieses Statement machte Honda's Präsident und CEO Hiroyuki Yoshino am 2. Dezember 2002 bei der feierlichen Übergabe der ersten Brennstoffzellen-Fahrzeuge an den japanischen Ministerpräsidenten²⁰². Bei diesem Anlass haben sowohl Honda wie auch Toyota die weltweit ersten Brennstoffzellen-Fahrzeuge in Kundenhand übergeben. Obwohl Honda im Vergleich zu DaimlerChrysler erst relativ spät begonnen hat, sich intensiver mit der Brenn-

²⁰² Vgl. Honda-Pressemitteilung vom 3.12.2002: „First Honda FCX Fuel Cell Vehicles Delivered on Same Day in Japan and the U.S.“. Online-Dokument: world.honda.com/news/2002/4021203.html.

stoffzellen-Technologie auseinander zu setzen –den ersten Prototypen präsentierte man erst 1999 – ist es Honda gelungen, in kürzester Zeit erhebliche Fortschritte zu erzielen. Diese Geschwindigkeit hat ihre Ursache zum einen in der Möglichkeit des Technologietransfers und zum anderen auch in der antreibenden Konkurrenz zum japanischen Mitbewerber und traditionellen Erzrivalen Toyota.

3.6.3 Auf der Überholspur dank Technologietransfer

Obwohl sich Honda laut eigenen Angaben seit 1989 mit der Brennstoffzelle beschäftigt hat, sind diese Aktivitäten erst zehn Jahre später sichtbar geworden. 1999 stellte der japanische Automobilhersteller gleich drei Brennstoffzellenfahrzeuge – ein Konzeptfahrzeug und zwei Prototypen – vor. Schon vor der Präsentation der ersten Fahrzeuge im Mai 1999 kündigte Honda die Markteinführung der ersten Brennstoffzellenfahrzeuge für 2003 an. Ab diesem Zeitpunkt wolle man 300 Fahrzeuge pro Jahr verkaufen. Die Entwicklungskosten bis zur Markteinführung wurden von Honda damals auf 400 bis 480 Mio. Euro geschätzt²⁰³.



Bild 60: Honda FCX-V1 (Quelle: Honda)

Die ersten beiden Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb, die Honda zeitgleich im September 1999 präsentierte, unterschieden sich in der Form der Wasserstoffspeicherung²⁰⁴. So transportiert der FCX-V1, der mit einer Ballard Brennstoffzelle (60 kW) angetrieben wird, den Wasserstoff in einem Metallhydrid-Speicher. Das zweite Fahrzeug, der FCX-V2, das mit einer von Honda selbst entwickelten Brennstoffzelle (60 kW) ausgestattet ist, wird hingegen mit Methanol betrieben. Gemeinsam ist beiden Prototypen die Karosserie des Elektrofahrzeuges Honda EV Plus. Diese ist von Honda speziell für Elektrofahrzeuge gestaltet worden (u.a. Sandwichboden). Zudem übernehmen beide Fahrzeuge den Elektromotor, die Batterie und das Kontrollsystem für die Elektronik vom Hondas Elektrofahrzeug²⁰⁵. Im Herbst

²⁰³ Vgl. Wasserstoff-Spiegel Nr. 3/99.

²⁰⁴ Vgl. Honda-Pressemitteilung vom 6.09.1999: "Honda Introduces Prototype Fuel Cell Electric Vehicles". Online-Dokument: world.honda.com/news/1999/4990906b.html.

²⁰⁵ Die Produktion des Elektrofahrzeuges EV Plus wurde nach zwei Jahren Anfang 1999 von Honda wegen schlechter Verkaufszahlen eingestellt. Weniger als 2400 EV-Plus wurden in den USA in diesen zwei Jahren gekauft oder geleast. Die Entwicklungsanstrengungen sollen in Zukunft, so Honda, auf das Brennstoffzellenfahrzeug konzentriert werden (vgl. Wasserstoff-Gazette 2. Quartal 1999. Online-Dokument: www.hydrogen.org/Neuigkeiten/archiv299.html).

desselben Jahres stellt Honda auf der Tokyo Motor Show dann noch das methanolbetriebene Brennstoffzellen-Konzeptfahrzeug FCX vor²⁰⁶. Das mit einer 60 kW Brennstoffzelle betriebene Fahrzeug basiert auf dem von Honda sogenannten „Twin Solid Concept“, d.h. der Wagenboden mit u.a. dem gesamten Brennstoffzellen-System und die Karosserie bilden zwei getrennte Einheiten²⁰⁷.



Bild 61: Das Honda Konzeptfahrzeug FCX mit „Twin Solid Concept“ (Quelle: Honda)

Im November 1999 tritt Honda als erster japanischer Hersteller der im April 1999 gegründeten California Fuel Cell Partnership (CaFCP) bei²⁰⁸. Im Rahmen der CaFCP testet Honda ab Februar 2001 den im September 2000 präsentierten FCX-V3. Waren die vorherigen Generationen von Hondas Brennstoffzellenfahrzeugen noch Zweisitzer bietet der FCX-V3 vier Fahrgästen Platz. Das Brennstoffzellensystem konnte bei diesen Fahrzeugen so kompakt gestaltet, dass dieses, ähnlich wie bei den Brennstoffzellenfahrzeugen von DaimlerChrysler, in einem Sandwichboden unterhalb des Fahrgastraumes untergebracht werden konnte. Gegenüber dem ersten Brennstoffzellenfahrzeug, dem FCX-V1, konnte Honda beim FCX-V3 die Startfähigkeit (von 10 min. auf 10 sek.), die Betankungsgeschwindigkeit und das Gewicht (von 2000 kg auf 1750 kg) verbessern. Im Unterschied zu seinen Vorgängern speichert der FCX-V3 den Wasserstoff in einem Druckwasserstoff-Tank (250 bar, 2 kg Wasserstoff). Die Batterie ist zudem durch neu entwickelte Ultra-Capacitors ersetzt worden. Diese Hochleistungskondensatoren ergänzen zum einen die Brennstoffzelle beim Start und bei hoher Beschleunigung. Zum anderen wird in ihnen die zurückgewonnene Bremsenergie gespeichert. Die Reichweite konnte beim FCX-V3 gegenüber dem FCX-V1 nicht verbessert werden. Beide Fahrzeug fahren mit einer Tankfüllung 180 km weit. Auch die Kaltstartfähigkeit der Brennstoffzelle ist beim FCX-V3 nicht gegeben. Das Fahrzeug kann nur bei +5 Grad Celsius garantiert gestartet werden²⁰⁹. Der FCX-V3, von dem Honda zwei Versionen gebaut hat, wird in der Folgezeit sowohl in Kalifornien als auch in Japan getestet. Der mit einer Honda-Brennstoffzelle (70 kW) ausgestattete FCX-V3 legte von Februar 2001 bis Sommer 2002 13.000 Testkilometer in Kalifornien zurück²¹⁰. Der andere, mit einer Ballard-Brennstoffzelle (62 kW) bestückte, FCX-

²⁰⁶ Vgl. www.honda.co.jp/motorshow/1999/english/auto/fcx/fcx_2.html.

²⁰⁷ Diese Grundidee hat GM mit seinem „AUTOnomy“-Konzept konsequent weitergedacht.

²⁰⁸ Vgl. Hydrogen & Fuel Cell Letter, November 1999.

²⁰⁹ Vgl. Hydrogen & Fuel Cell Letter, November 2000.

²¹⁰ Vgl. Honda-Pressemitteilung vom 13.02.2001: „New Honda Fuel Cell-Powered Vehicle Begins Road Tests in California“. Online-Dokument: world.honda.com/news/2001/c010213.html.

V3 wird von Honda, nach der Zulassung durch das japanische Verkehrsministerium, auf Japans Straßen getestet²¹¹. Das Fahrzeug ist in Japan von Juli 2001 bis Juli 2002 3.300 km gefahren. Auch die dritte Generation von Honda-Brennstoffzellenfahrzeugen profitiert von Technologien anderer alternativer Antriebe, die Honda in den letzten Jahren entwickelt hat. Vom batteriebetriebenen Elektrofahrzeug EV-Plus nutzt der FCX-V3 neben Karosserie auch den elektrischen Antrieb, vom Hybridfahrzeug Insight ist das Energiemanagementsystem und vom erdgasbetriebenen Civic GX der Hochdruck-Tank übernommen worden²¹².



Bild 62: Honda FCX-V3 (Quelle: Honda)



Bild 63: Honda FCX-V4 (Quelle: Honda)

Die vierte Generation von Brennstoffzellenfahrzeugen präsentierte das japanische Unternehmen im September 2001. Der FCX-V4 ist laut Honda mit seiner Fahrperformance, dank der Überarbeitung des gesamten Brennstoffzellensystems, näher an die etablierten massenproduzierten Fahrzeuge herangerückt²¹³. Der von einer Ballard-Brennstoffzelle (Mark 901a; 78 kW) und den Ultra-Capacitors angetriebene FCX-V4 verfügt jetzt über eine Reichweite von 300 km, eine verbesserte Beschleunigung und eine Höchstgeschwindigkeit von 140 km/h. Der verbesserte Druckwasserstofftank (350 bar), der beim FCX-V3 noch den gesamten Kofferraum einnahm, konnte jetzt im Fahrzeugboden untergebracht werden. Zudem wurden in das Fahrzeug erstmalig Maßnahmen zum Aufprallschutz bei Unfällen integriert. Der FCX-V4 wird ebenfalls in Japan und Kalifornien auf öffentlichen Straßen getestet.

²¹¹ Vgl. Honda-Pressemitteilung vom 04.07.2001: „Honda to Begin Testing Fuel Cell Vehicles on Japanese Roads“. Online-Dokument: world.honda.com/news/2001/c010704.html.

²¹² Vgl. HyWeb-Gazette 4. Quartal 2000.

²¹³ Vgl. Honda-Pressemitteilung vom 04.09.2001: „Honda Introduces New Fuel Cell-Powered Vehicle, FCX-V4“. Online-Dokument: world.honda.com/news/2001/c010904_1.html; HyWeb-Gazette 3. Quartal 2001.



Bild 64: Honda FCX (Quelle: Honda)

Das aktuelle Brennstoffzellenfahrzeug von Honda ist der FCX. Erneut konnte Honda die Fahrperformance im Vergleich zum Vorgängermodell verbessern. So hat der FCX eine Reichweite von bis zu 355 km und eine Höchstgeschwindigkeit von 150 km/h. Auch das Gewicht des Fahrzeugs konnte erneut reduziert werden (von 1740 kg auf 1620 kg). Das Antriebskonzept mit Ballard-Brennstoffzelle (Mark 901a; 78 kW), Ultra-Capacitors sowie dem Druckwasserstofftank (350 bar) ist aber vom FCX-V4 übernommen worden. Mit dem FCX führte Honda Anfang 2002 in Japan die für Serienfahrzeuge obligatorischen Crashtests – Front- und Heckcrashtests sowie Seiten- und versetzten Frontkollisionstests – durch²¹⁴. In den USA ist der FCX im Juli 2002 als erstes Brennstoffzellenauto überhaupt von den US-amerikanischen Behörden zertifiziert worden. Sowohl die U.S. Environmental Protection Agency (EPA) als auch das California Air Resource Board (CARB) haben dem FCX die Einhaltung der höchsten Emissionsstandards und aller anwendbaren Sicherheits- und Insassenschutzbestimmungen bestätigt. Der FCX wurde vom CARB als „Zero Emission Vehicle (ZEV)“²¹⁵ und von der EPA als „Tier-2 Bin 1, National Low Emission Vehicle (NLEV)“, die höchste US-amerikanischen Klassifizierung im Bezug auf geringem Emissionsausstoß, eingestuft²¹⁵.

Um die Übergabe der ersten brennstoffzellenbetriebenen Pkws in Kundenhand lieferte sich Honda mit Toyota im Jahr 2002 ein Wettrennen. Schlussendlich übergaben beide japanischen Automobilunternehmen vor allen nicht-japanischen Wettbewerbern sowohl in Japan als auch in Kalifornien am 2. Dezember 2002 die ersten Fahrzeuge. Welche Bedeutung dieser eher symbolische Akt der Fahrzeugübergabe für Honda hatte, macht die Teilnahme des Vorstandsvorsitzenden von Honda an beiden Übergaben deutlich. So übergab Hondas CEO Hiroyuki Yoshino zunächst am Morgen in Japan einen FCX an den japanischen Ministerpräsidenten Junichiro Koizumi. Dann flog er direkt nach Kalifornien, um am Nachmittag des 2. Dezembers dem Bürgermeister von Los Angeles, James K. Hahn, ebenfalls einen FCX zu übergeben²¹⁶.

²¹⁴ Vgl. HyWeb-Gazette 2. Quartal 2002.

²¹⁵ Vgl. HyWeb-Gazette 3. Quartal 2002; Honda-Pressemitteilung vom 24.07.2002: „Honda Fuel Cell Vehicle First To Receive Certification“. Online-Dokument: www.hondacorporate.com/fcx/press.html.

²¹⁶ Vgl. Hydrogen & Fuel Cell Letter, Dezember 2002. Da der Vorstandsvorsitzende von Honda an beiden Fahrzeugauslieferungen teilnahm, war der Konkurrent Toyota mit der Übergabe der ersten Brennstoffzellenfahrzeuge in Kalifornien um ein paar Stunden schneller als Honda.



Bild 65: Übergabe an den japanischen Premierminister (Quelle: Honda)



Bild 66: Übergabe an den Bürgermeister von Los Angeles (Quelle: Honda)

Honda plant in den nächsten zwei bis drei Jahren ungefähr 30 Fahrzeuge an Kunden in Japan und Kalifornien zu verleasen. Davon werden fünf Fahrzeuge an die Stadt Los Angeles gehen, die im Rahmen eines zweijährigen Leasingvertrages dafür pro Monat den symbolischen Preis von 500 US\$ zahlt. Leasingverträge über 12 Monate zu einer monatlichen Leasingrate von 6.500 Euro sind von der japanischen Regierung für insgesamt vier FCX unterzeichnet worden²¹⁷. Die Fahrzeuge sollen wie normale Flottenfahrzeuge von Mitarbeitern im regulären Tagesgeschäft eingesetzt werden. Im September 2003 hat Honda angekündigt, ebenfalls zwei Brennstoffzellenfahrzeuge an die kalifornische Stadt San Francisco auszuliefern²¹⁸. Honda wird mit seinen Fahrzeugen auch an dem großen japanischen Demonstrationsprojekt, dem JHFC, teilnehmen.

Parallel zur Erprobung der ersten Brennstoffzellenfahrzeuge in Kundenhand, die mit Ballard-Brennstoffzellen ausgestattet sind, arbeitet Honda weiter an der technischen Entwicklung und Verbesserung der eigenen Brennstoffzellentechnologie. Im Oktober 2003 präsentierte das japanische Unternehmen einen deutlich verbesserten Brennstoffzellen-Stack als Ergebnis dieser Anstrengungen²¹⁹. Der „Honda FC Stack“ ist im Gegensatz zu seinem von Honda entwickelten Vorgänger wesentlich temperaturunempfindlicher. So lässt sich die neue Brennstoffzelle, laut Honda als erste PEM-Brennstoffzelle überhaupt, auch bei minus zwanzig Grad Celsius starten. Dies ist erreicht worden durch den Einsatz neuer Materialien. Anstatt Bipolarplatten aus Kohlenstoff für die Brennstoffzellen-Stacks zu nutzen, besteht der Honda FC Stack aus gepressten Metallplatten mit Gummidichtungen, die in einem speziellen Verfahren montiert werden. Zudem verwendet Honda anstatt der sonst üblichen fluorhaltigen, neu entwickelte aromatische Elektrolyt-Membranen. Mit dem Einsatz neuer Materialien konnte neben der Kaltstartfähigkeit die Anzahl der Komponenten im Vergleich zum Vorgängermodell um die Hälfte verringert, die Leistungsdichte mehr als verdoppelt, die Haltbarkeit des Systems

²¹⁷ Vgl. HyWeb-Gazette 4. Quartal 2002.

²¹⁸ Vgl. Honda-Pressemitteilung vom 25.09.2003: „San Francisco and Honda to Partner on Fuel Cell Car Program. Honda FCX to join San Francisco Fleet“. Online-Dokument: world.honda.com/news/2003/4030925.html.

²¹⁹ Vgl. Honda-Pressemitteilung vom 10.10.2003: „New Honda Fuel Cell Stack Operates at Low Temperatures; Breakthrough Technology to be Tested in FCX on Public Roads“. Online-Dokument: world.honda.com/news/2003/4031010.html; vgl. auch o.V. (2003): Es geht voran. In: Spiegel-Online vom 22.10.2003. Online-Dokument: www.spiegel.de/auto/werkstatt/0.1518,270662,00.html.

verbessert, das Gewicht von 73 auf 48 kg verringert, die Treibstoffeffizienz um 10 % verbessert und damit die Reichweite des Fahrzeuges von 355 auf 395 km erhöht, sowie die Kosten des Brennstoffzellensystems erheblich reduziert werden. Honda hat eines seiner FCX-Fahrzeuge mit dem neu entwickelten Honda FC Stack ausgerüstet und plant in Kürze Testfahrten.



Bild 67: Honda Konzeptfahrzeug KIWAMI (Quelle: www.h2cars.de)

Angelehnt an das Konzeptfahrzeug AUTOnomy von GM hat auch Honda auf der Tokyo Motor Show 2003 ein futuristisches Brennstoffzellen-Konzeptfahrzeug präsentiert²²⁰. Auch der KIWAMI verbindet Brennstoffzellentechnologie mit einer großzügigen Gestaltung des Innenraumes – ermöglicht durch die Unterbringung des Honda Brennstoffzellensystems aus Brennstoffzelle, Wasserstofftanks und Ultra-Capacitors im Mitteltunnel des Fahrzeuges – und futuristisches, hier japanisches, Design.

Neben der Fahrzeugentwicklung untersucht Honda Möglichkeiten der Wasserstoffproduktion und -infrastruktur. Im Juli 2001 eröffnete Honda auf dem Gelände der Forschungs- und Entwicklungsabteilung von Honda Amerika in Torrance, im Großraum Los Angeles, eine Druckwasserstoff-Tankstelle. Der notwendige Strom zur Wasserstoffgewinnung per Elektrolyse wird in dieser Anlage über Solarzellen gewonnen. Dabei können allein mit dem Solarstrom pro Jahr 8000 Liter Wasserstoff hergestellt werden, was laut Honda ausreicht, ein Fahrzeug mit Wasserstoff zu versorgen²²¹. Eine weitere Option der Wasserstoff-Versorgung, die Honda mit dem US-amerikanischen Brennstoffzellen-Hersteller Plug Power seit Oktober 2002 in einer Entwicklungspartnerschaft vorantreibt, ist die „Home Energy Station“²²². Seit Oktober 2003 wird ein erster Prototyp dieser Hausenergiezentrale von Honda und Plug Power ebenfalls auf dem Gelände in Torrance getestet²²³. Die „Home Energy Station“ gewinnt

²²⁰ Vgl. world.honda.com/Tokyo2003/auto/kiwami/index.html; vgl. auch www.carsdesignnews.com/autoshow/2003/tokyo/highlights/index4.html.

²²¹ Vgl. Honda-Pressemitteilung vom 10.07.2001: „Honda Starts Experiments with Hydrogen Production and Fueling for Fuel Cell Vehicles at New Station in California /U.S.“. Online-Dokument: world.honda.com/news/2001/c010710.html; Hydrogen & Fuel Cell Letter, August 2001.

²²² Vgl. Plug Power-Pressemitteilung vom 17.10.2002: „Plug Power Announces Agreement With Honda R&D To Jointly Develop Home Refueling System“. Online-Dokument: www.plugpower.com/news/details.cfm?prid=84.

²²³ Vgl. Honda-Pressemitteilung vom 02.10.2003: „Honda Begins Experiments with Hydrogen Home Energy Station and Improves Solar-Cell Technology for Production of Hydrogen“. Online-Dokument:

mittels eines Reformers Wasserstoff aus Erdgas. Aus einem Teil dieses Wasserstoffs wird in einer stationären Brennstoffzelle Strom und Wärme gewonnen. Ein weiterer Teil wird mittels eines Kompressors verdichtet und in Druckwasserstofftanks gespeichert. Mit diesem komprimierten Wasserstoff kann dann ein Brennstoffzellenfahrzeug betankt werden. Honda setzt mit der „Home Energy Station“ auf individuelle Wasserstoffversorgungssysteme, anstatt auf den schnellen Aufbau einer flächendeckenden Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur. So glaubt Yuji Kawaguchi, Chefentwickler der Brennstoffzellenabteilung von Honda, dass Hausbesitzer, die heute Solaranlagen, Naturgas oder einen Generator nutzen, in Zukunft auch einen Anschluss für Wasserstoff haben werden, und mit dem gelieferten Wasserstoff sowohl das Haus mit Energie versorgen als auch ihr Auto betanken werden²²⁴.

3.6.4 Technologiewettbewerb mit Toyota

„It’s the most promising technology for future cars power trains. Performance-wise, even today, they’re better than conventional cars. The starting torque is very high and smoother. But we don’t know when it will be practical to sell them in dealership. That’s still a decade or two away. We’ll have to solve several technical challenges before then”, so Hondas Präsident und CEO Hiroyuki Yoshino in einem Interview²²⁵ nach der Übergabe der ersten Honda Brennstoffzellenfahrzeuge in Kundenhand in den USA. In dieser Aussage spiegelt sich die Strategie von Honda im Bereich Brennstoffzelle wieder. Honda hat in relativ kurzer Zeit versucht, Brennstoffzellenfahrzeuge auf die Straße und in Kundenhand zu bekommen. Dieses Lernen unter realen Bedingungen, auch wenn dies erst einmal sehr kostspielig ist – der FCX soll pro Stück ungefähr 1 Mio. US\$ kosten – scheint die Strategie zu sein, mit der Honda, ähnlich wie Toyota, neue Technologien vorantreibt. Hierbei werden auch ‚Fehlschläge‘ in Kauf genommen. In dem schon erwähnten Interview wird der CEO von Honda auf den Produktionsstopp von Hondas Elektrofahrzeug EV-Plus nach nur zwei Jahren angesprochen. Die Entwicklungsanstrengungen seien nicht umsonst gewesen, so Yoshino, da man von den Erfahrungen u.a. bei der Entwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen profitiert. Wie andere Automobilhersteller auch hat Honda bezüglich der Massenproduktion von Brennstoffzellen-Automobilen eine längerfristige Perspektive. Obwohl die Serienproduktion laut Honda noch 10 bis 20 Jahre entfernt ist, investiert man in die neue Technologie und will möglichst schnell Praxiserfahrungen sammeln. Ziel ist dabei zunächst, so der CEO, in den nächsten zwei bis drei Jahren pro Monat ein Fahrzeug fertig zu stellen. Diese Lernstrategie im Umgang mit

world.honda.com/news/2003/c031002.html; vgl. auch Plug Power-Pressemitteilung vom 02.10.2003: „Plug Power and Honda Achieve Major Milestone: Successful Demonstration of Home Energy Station“. Online-Dokument: www.plugpower.com/news/details.cfm?prid=197.

²²⁴ Vgl. o.V. (2003): Herr Kawaguchi. In: Berliner Zeitung Sonderbeilage vom 25.10.2003. Online-Dokument: www.berlinonline.de/berliner-zeitung/archiv/.bin/dump.fcgi/2003/1025/sonderbeilagen/0103/index.html.

²²⁵ Vgl. o.V. (2002): Online Extra: Honda’s CEO on Fuel Cells’ Future. In: BusinessWeek online. 23.Dezember 2002. Online-Dokument: www.businessweek.com/magazine/content/02_51/b3813085.htm; Vgl. auch Dawson, Chester (2002): Commentary: Fuel Cells: Japan’s Carmakers Are Flooring It. In: BusinessWeek online 23.Dezember 2002. Online: Dokument: www.businessweek.com/magazine/content/02_51/b3813084.htm.

einer disruptiven Technologie wird auch durch die gute finanzielle und wirtschaftliche Situation des Unternehmens ermöglicht.

Neben der Lernstrategie und dem gezielten Technologietransfer von anderen alternativen Antrieben (Elektro, Hybrid und Erdgas), zeichnet sich die Brennstoffzellenstrategie von Honda, dem zweitgrößten japanischen Automobilunternehmen, besonders durch die Konkurrenz mit dem japanischen Wettbewerber Toyota (größtes japanisches Automobilunternehmen) um Image und Technologieführerschaft aus.

Bei der Auswahl des Kraftstoffes, mit dem die Brennstoffzelle betrieben wird, hat sich Honda frühzeitig auf gasförmigen Wasserstoff festgelegt. Nachdem man anfänglich auch ein methanolbetriebenes Brennstoffzellenfahrzeug aufgebaut hatte, verkündete Honda im Dezember 2001, man wolle sich in Zukunft auf reinen Wasserstoff als Treibstoff konzentrieren. Die Reformierung von Methanol an Bord sei langfristig unwirtschaftlich, weil technisch zu kompliziert. Mit der Konzentration auf eine Kraftstoffoption hoffe Honda sich einen Wettbewerbsvorsprung erarbeiten zu können²²⁶. Bei der Versorgung der Brennstoffzellenfahrzeuge mit Wasserstoff setzt Honda nicht auf den möglichst schnellen Aufbau einer flächendeckenden Tankstelleninfrastruktur, einen Übergangstreibstoff oder eine Brückentechnologie, sondern auf individuelle Wasserstoffversorgungssysteme, wie die mit Plug Power entwickelte „Home Energy Station“.

In Bezug auf die Brennstoffzelle hat Honda das strategische Ziel, diese selbst zu entwickeln. Mit dem im Oktober 2003 vorgestellten „Honda FC Stack“ ist der japanische Automobilhersteller diesem Ziel ein großes Stück näher gekommen. Im Rahmen der eigenen Entwicklungsanstrengungen unterhält Honda mit dem deutschen Unternehmen Celanese Ventures GmbH eine Partnerschaft zur Entwicklung verbesserter und kostengünstigerer Membranen und Membran-Elektroden-Einheiten²²⁷. Auch mit der Stanford University forscht Honda an der Verbesserung einzelner Brennstoffzellen-Komponenten²²⁸. Bei dem aktuellen Aufbau einer Kleinserie des Brennstoffzellenfahrzeuges FCX ist Honda aber noch auf die technisch ausgereifteren Ballard-Brennstoffzellen angewiesen. Diese seien wie ein Verantwortlicher von Honda in einem Interview sagt sehr „advanced“²²⁹. So hat Honda mit dem kanadischen Brennstoffzellenhersteller Ballard im Dezember 2002 eine Vereinbarung über die Lieferung von 32 Mark 902 Brennstoffzellenmodulen bis 2005 unterzeichnet²³⁰. Auch in Zukunft wird Honda, so Yuji Kawaguchi, Entwicklungschef der Brennstoffzellenabteilung von Honda, mit

²²⁶ Vgl. HyWeb-Gazette 1. Quartal 2002.

²²⁷ Vgl. HyWeb-Gazette 1. Quartal 2001.

²²⁸ Vgl. Honda-Pressemitteilung vom 04.09.2001: „Honda Creates Miniature Fuel Cells to Produce Electricity in Joint Research Effort with Stanford University“. Online-Dokument: world.honda.com/news/2001/c010904_2.html.

²²⁹ Vgl. Hydrogen & Fuel Cell Letter, November 2000.

²³⁰ Vgl. Ballard-Pressemitteilung vom 02.12.2002: „Ballard and Honda Sign Three-Year Supply Agreement“. Online-Dokument: www.ballard.com.

dem kanadischen Brennstoffzellenhersteller Ballard sowohl kooperieren als auch konkurrieren²³¹.

3.7 Hyundai

3.7.1 Überblickstabelle Hyundai

Beginn der Wasserstoff-/Brennstoffzellen-Aktivitäten Angekündigte Serienproduktion	Fahrzeuge [Konzept- (K) Prototyp- (P) Demonstration- (D) Seriennahes- (Sn) Serienfahrzeug (S)]	Höhe der Investitionen/ Anzahl der involvierten Mitarbeiter	Teilnahme an Demonstrationsprojekten [Kalifornien (CaFCP) Japan (JHFC) Deutschland/Berlin (CEP)]	Partnerschaften/ Kooperationen	Strategie
Hyundai baut 1994 ersten Prototypen mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor Seit Ende der 1990er F&E zu Brennstoffzellen Hyundai will ab 2004 erste BZ-Fahrzeuge an Flottenbetreiber in den USA verlesen. Eine begrenzte Markteinführung von BZ-Fahrzeugen ist ab 2010 angekündigt	Hyundai H2 ICE (1994) CGH ₂ -ICE (K) Santa Fe FCEV (2000) H ₂ -BZ (D)	In den vergangenen Jahren Investitionen von 55 Mio. US\$ in die F&E zur Brennstoffzellen-technologie Anzahl der Mitarbeiter unbekannt	Seit 06/2000 Teilnahme an der CaFCP, in deren Rahmen zwei Santa Fe FCEV getestet werden	Seit 2000 Kooperation mit BZ-Hersteller International Fuel Cells (IFC)/UTC Fuel Cells. Beide Unternehmen haben 09/2003 die gemeinsame Entwicklung einer frostbeständigen BZ vereinbart Seit 2002 Entwicklungskooperation mit Quantum Technologies (CGH ₂ -Tank) Seit 2003 Kooperation mit DaimlerChrysler, Ford, Nissan, PSA und Toyota zur Entwicklung eines 700 bar Wasserstofftanks	Ziel von Hyundai ist es die Brennstoffzellentechnologie selbst zu entwickeln. Hyundai hat keine Kraftstoffstrategie kommuniziert

Tabelle 11: Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten von Hyundai

3.7.2 Spätstart und Erwerb von externem Know-how

Hyundai, der größte südkoreanische Automobilhersteller, hat ebenfalls erst relativ spät begonnen, sich im Bereich Brennstoffzelle zu engagieren. Seit dem Beginn der Aktivitäten hat man aber die Bemühungen intensiviert²³² und versucht über den Erwerb von Know-how bzw. Technologiekomponenten, den Entwicklungsrückstand aufzuholen. Mit der Brennstoffzelle beschäftigt sich Hyundai erst seit Ende der 1990er Jahre. Davor hat die Firma 1994 schon einen Prototyp eines Wasserstoff-Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor entwickelt, das das erste seiner Art in Korea war²³³. Das erste und bisher einzige Brennstoffzellenfahrzeug von Hyundai, der Santa Fe FCEV, wurde Ende 2000 präsentiert. Das auf dem Serienfahrzeug Santa Fe, einem SUV, basierende Automobil mit einer Aluminium-Karosserie, ist mit einer 75 kW

²³¹ Vgl. o.V. (2003): Honda develops cheaper fuel cell operable to -20C – report. Online-Dokument: www.just-auto.com vom 10.10.2003.

²³² Ein Industrie-Insider schätzt das jüngste Brennstoffzellen-Engagement als „very aggressive“ ein (vgl. Hydrogen & Fuel Cell Letter, Juni 2000).

²³³ Vgl. www.hyundaiusa.com/about/ahenv.html.

Brennstoffzelle von International Fuel Cell (IFC) ausgestattet, die mit gasförmigem Wasserstoff betrieben wird. Das Fahrzeug erreicht eine Reichweite von 160 km und eine Höchstgeschwindigkeit von 124 km/h. Wesentliche Komponenten des Brennstoffzellenfahrzeuges hat Hyundai eingekauft. So unterzeichnete Hyundai mit dem US-amerikanischen Brennstoffzellen-Hersteller International Fuel Cells (IFC), der seit Dezember 2001 wieder United Technologies Corporation (UTC) Fuel Cells heißt, im Mai 2000 einen Vertrag über die Lieferung von Brennstoffzellen für vier Brennstoffzellenfahrzeuge²³⁴. Den elektrischen Antriebsstrang und das Energie Management System lieferte die kalifornische Firma Enova Systems. Der Wasserstofftank kommt von dem ebenfalls kalifornischen Unternehmen Quantum Technologies. Für den Aufbau des ersten Santa Fe FCEV hat Hyundai 15 Mio. US \$ ausgegeben. Für weitere Prototypen plant Hyundai mit Kosten von 40 Mio. US\$²³⁵. Insgesamt hat das koreanische Unternehmen bis September 2003 sechs Santa Fe FCEV zusammen mit dem Brennstoffzellenhersteller UTC Fuel Cells aufgebaut.



Bild 68: Santa Fe FCEV (Quelle: Hyundai)

Anfang 2002 verlängerten Hyundai und UTC Fuel Cells ihre Partnerschaft um weitere vier Jahre, mit dem Ziel die Brennstoffzellenfahrzeuge marktreif zu machen. Im September 2003 unterzeichneten beide Partner eine Kooperationsvereinbarung zur Entwicklung einer neuen frostbeständigen Brennstoffzelle²³⁶. Anlässlich der Unterzeichnung verkündete Hyundai, ab 2004 Brennstoffzellenfahrzeuge an US-amerikanische Flottenbetreiber zu verlesen. Mit einer begrenzten Markteinführung rechnet man aber erst ab dem Jahr 2010. Hyundai und UTC Fuel Cells sind seit Juni 2000 auch Mitglieder der California Fuel Cell Partnership, in dessen Rahmen zwei Santa Fe FCEV getestet werden. Daneben ist Hyundai auch Teil der Anfang 2003 gegründeten Kooperation von verschiedenen Automobilherstellern und Zulieferern zur Entwicklung eines 700 bar Wasserstoff-Druckwasserstofftanks, der auch DaimlerChrysler, Ford, Nissan, PSA und Toyota angehören²³⁷ (vgl. Kapitel 3.2.3).

²³⁴ Vgl. Hydrogen & Fuel Cell Letter, Juni 2000.

²³⁵ Vgl. www.hyundai-motor.com/eng/intro/world/motor06/motor_mai.

²³⁶ Vgl. UTC Fuel Cells-Pressemitteilung vom 26.06.2003: "Hyundai and UTC Fuel Cells collaborate on all-weather fuel cell vehicle". Online-Dokument: www.utcfuelcells.com/news/archive/062603.shtm.

²³⁷ Vgl. Hyundai-Pressemitteilung vom 07.02.2003 „Hyundai Teams with Industry Leaders in Fuel Cell Storage System“. Online-Dokument: worldwide.hyundai-motor.com/intro/news/new_030207.html.

In der Frage des Kraftstoffes für die Brennstoffzelle forscht Hyundai an verschiedenen Optionen. So hat Hyundai mit seiner Tochter Kia und mit Unterstützung der koreanischen Regierung ein Brennstoffzellenfahrzeug mit Methanolreformer in einem 2-jährigen Projekt aufgebaut (Projektkosten ca. 8 Millionen US\$). Dafür hat Hyundai zunächst eine 2 kW und später eine 10 kW Brennstoffzelle selbst entwickelt²³⁸. Langfristig verfolgt das koreanische Unternehmen das Ziel, eigene Brennstoffzellen herzustellen²³⁹. Denn für Hyundai gehört der Antrieb zur Kernkompetenz eines Autoherstellers.

3.8 PSA Peugeot Citroen

3.8.1 Überblickstabelle PSA

Beginn der Wasserstoff-/Brennstoffzellen-Aktivitäten Angekündigte Serienproduktion	Fahrzeuge [Konzept- (K) Prototyp- (P) Demonstration- (D) Seriennahes- (Sn) Serienfahrzeug (S)]	Höhe der Investitionen/ Anzahl der involvierten Mitarbeiter	Teilnahme an Demonstrationsprojekten [Kalifornien (CaFCP) Japan (JHFC) Deutschland/Berlin (CEP)]	Partnerschaften/ Kooperationen	Strategie
PSA beschäftigt sich seit 1996, anfänglich im Rahmen eines EU-Projektes mit der Brennstoffzellentechnologie PSA will ab 2005 BZ als Range Extender in Batterie Elektrofahrzeugen einsetzen	PSA HYDRO-GEN Peugeot Partner (2000) CGH ₂ -BZ (P) Taxi PAC Peugeot Partner (2001) Batterie-EV mit CGH ₂ -BZ als Range Extender (P) H2O Firefighter Peugeot 206 (2002) Batterie-EV mit NaBH ₄ -BZ als Range Extender (K)	Beides unbekannt	Keine Teilnahme	EU-Projekt (HYDRO-GEN) (1996-2000) und ein französisches BZ-Projekt (seit 1999) u.a. mit Renault, Air Liquide, Nuvera und der französischen Atomenergiebehörde (CEA) Seit 2002 strategische Partnerschaft mit H-Power/Plug Power zur Entwicklung von Brennstoffzellen als Range Extender Seit 2003 Kooperation mit DaimlerChrysler, Hyundai, Ford, Nissan und Toyota zur Entwicklung eines 700 bar Wasserstofftanks	PSA ist größter Produzent von Batterie-Elektrofahrzeugen Brennstoffzelle wird zunächst als Range Extender für Batterie-Stadtfahrzeuge genutzt

Tabelle 12: Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten von PSA

²³⁸ Vgl. www.hyundai-motor.com/eng/innovation/environment/fuel3_2.html.

²³⁹ Vgl. www.hyundai-motor.com/eng/innovation/environment/fuel.html.

3.8.2 Einleitung

Der französische Automobilkonzern PSA Peugeot Citroën ist das Automobilunternehmen mit dem weltweit größten Absatz an Batterie-Elektrofahrzeugen. So hat man seit 1995 rund 10.000 Elektrofahrzeuge verkauft. Zudem hat PSA seit Anfang der 1980er Jahre ein eigenes Entwicklungszentrum für Elektrofahrzeuge. Das Engagement in Forschung und Entwicklung an der Brennstoffzellentechnologie ist beim französischen Unternehmen im Vergleich zu anderen Autokonzernen relativ gering. Die erste Beschäftigung mit der Brennstoffzelle fand im Rahmen des EU-Projektes HYDRO-GEN statt. Das Ergebnis dieses von PSA koordinierten Projektes war der Aufbau eines Prototypen. Nachdem dieser noch ein reines Brennstoffzellenfahrzeug war, die Brennstoffzelle wurde als Antrieb eingesetzt, nutzte PSA im Folgenden die Brennstoffzelle als Range Extender für seine Elektrofahrzeuge.

3.8.3 Die Brennstoffzelle als Range Extender für Elektrofahrzeuge

Von 1996 bis 2000 lief das mit EU-Mitteln geförderte und von PSA koordinierte Forschungsprojekt HYDRO-GEN (Förderung: 3,5 Mio. Euro; Gesamtbudget 7 Mio. Euro)²⁴⁰. Ziel des Projektes war die Entwicklung eines effizienteren und kostengünstigeren PEM-Brennstoffzellensystems und die Integration dieses Systems in ein Fahrzeug. Projektpartner waren die Unternehmen Air Liquide, Nuvera, Ansaldo Ricerche, Renault, Solvay S.A. und die französische Atomenergiebehörde.



Bild 69: Peugeot HYDRO-GEN (Quelle: Peugeot)

Das von den Projektpartner gemeinsam entwickelte Brennstoffzellensystem wurde in die Elektroversion des Peugeot Partner integriert. Das Fahrzeug ist mit einer Nuvera-Brennstoffzelle (PEM; 30 kW) und einer Nickel Metallhydrid-Pufferbatterie ausgestattet. Die Brennstoffzelle wird mit Druckwasserstoff betrieben, der in fünf Behältern (350 bar; insgesamt 3,3 kg Wasserstoff) mitgeführt wird. Das Fahrzeug hat eine Reichweite von 350 km und eine Spitzengeschwindigkeit von 95 km/h.

²⁴⁰ Neben dem Projekt HYDRO-GEN hat PSA noch an weiteren EU-Projekten teilgenommen: NEMECCEL (Direkt Methanol-Brennstoffzelle), FUERO (BZ-Komponenten) und BIO-H2 (Bio-Ethanol Reformierung) (vgl. www.hyweb.de/pro/).

Im Anschluss an das HYDRO-GEN Projekt begann PSA 1999 ein Folgeprojekt mit Renault²⁴¹. Renault hatte neben der Teilnahme am HYDRO-GEN-Projekt von 1994 bis 1998 ebenfalls ein EU-Forschungsprojekt (FEVER) zur Entwicklung eines Brennstoffzellen-Fahrzeuges koordiniert. Beide französischen Automobilunternehmen wollen in dem auf vier Jahre angelegten Projekt ihren Ressourcen und die gemachten Erfahrungen mit der Brennstoffzellentechnologie vereinen, um weitere Fortschritte in Richtung Serienfertigung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen zu machen. Das gemeinsame Forschungsprojekt hat dabei drei Phasen. In der ersten Phase sollen verschiedene Möglichkeiten bezüglich Brennstoffzellen- und Reformertechnologie sowie Kraftstoffe evaluiert und bewertet werden. In der zweiten Phase wollen die Projektpartner die ausgewählte Technologie weiterentwickeln und in der dritten Phase soll ein Prototyp, der mit der gemeinsam entwickelten Technologie ausgestattet ist, in Kleinserie gebaut werden. Projektpartner von PSA und Renault für die Entwicklung des Brennstoffzellensystems sind die französische Atomenergiebehörde CEA, Air Liquide und Nuvera. Partner im Bereich Kraftstoff und Reformierung sind Air Liquide und TotalElfina. PSA und Renault werden zudem im Bereich Flüssigkeitskreisläufe und Energietransfer von den Unternehmen Air Liquide und Valeo unterstützt. Das Projekt findet im Rahmen des französischen Technologie-Netzwerkes Brennstoffzelle statt, das 1999 vom französischen Minister für Bildung, Forschung und Technologie gegründet wurde. In diesem Rahmen wird es auch staatlich gefördert. Im Oktober 2001 gab PSA zwei weitere Partnerschaften zum Thema Einsatz der Brennstoffzelle im Automobil bekannt. Die beiden weitreichenden strategischen Partnerschaften bewegen sich im Rahmen des französischen Netzwerkes zu der Brennstoffzellentechnologie. Partner sind zum einen das Nationale Wissenschaftliche Forschungszentrum (CNRS) und zum andern die Atomenergie-Behörde (CEA). Während mit den Wissenschaftlern des CNRS diverse grundlegende Fragen zum Automobil und zur Brennstoffzelle erforscht werden sollen, beinhaltet die Kooperation mit der CEA praktische Fragen des gesamten Wasserstoff-Energiekreislaufes und der Brennstoffzellentechnologie²⁴².



Bild 70: Peugeot Taxi PAC (Quelle: www.h2cars.de)

²⁴¹ Vgl. Renault-Pressemitteilung vom 08.09.1999 „The joint PSA Peugeot-Citroën – Renault research project to develop a fuel cell powered vehicle has received the approval of the French Fuel Cell network“; vgl. auch Wasserstoff-Gazette 3. Quartal 1999. Online-Dokument: www.hydrogen.org/Neuigkeiten/archv399.html.

²⁴² Vgl. PSA-Pressemitteilung vom 27.06.2001: „PSA Peugeot Citroën Presents Its Alternative Energy Strategy“. Online-Dokument: www.psa-peugeot-citroen.com/en/. Die Abkürzung PAC erklärt sich aus der französischen Bezeichnung für Brennstoffzelle („pile à combustible“).



Bild 71: Wasserstofftank des Taxi PAC (Quelle: Peugeot)

Das zweite Brennstoffzellen-Forschungsfahrzeug von PSA ist das Taxi PAC²⁴³. In dem im Juni 2001 präsentierten Fahrzeug, das auf dem Serienfahrzeug Peugeot Partner Kombi basiert, wird die Brennstoffzelle nicht als Antrieb, sondern als so genannter Range Extender für den Batterie-Elektroantrieb genutzt. Eine 5,5 kW starke Brennstoffzelle von H Power unterstützt die Nickel-Metallhydrid-Batterie. Dabei hat die Brennstoffzelle die Funktion, die Batterie während der Fahrt aufzuladen, und damit die Reichweite des Fahrzeugs zu vergrößern. Diese beträgt beim Taxi PAC 200 bis 300 km. Das Fahrzeug hat eine Höchstgeschwindigkeit von 95 km/h. Die Brennstoffzellen werden mit gasförmigem Wasserstoff betrieben, der in einem auswechselbaren Fach (300 bar, 1,5 kg Wasserstoff), das unter dem Kofferraum angebracht ist, gespeichert ist. Das Fach wird zum Befüllen aus dem Auto entnommen. Die Brennstoffzelle als Range Extender zu nutzen, ist für PSA eine pragmatische Entscheidung. Man erreicht eine Reichweite, die für den durchschnittlichen Gebrauch eines Autos ausreicht und dies zu vertretbaren Kosten²⁴⁴. Das Fahrzeug zielt, wie das Taxikonzept schon suggeriert, auf den Einsatz im stärker emissionsbelasteten städtischen Kontext. Nach dem gleichen Prinzip wie der Taxi PAC funktioniert das auf der Paris Motor Show 2002 präsentierte Konzeptfahrzeug Peugeot H2O Firefighter. Auch bei diesem Fahrzeug wird eine relativ kleine Brennstoffzelle als Range Extender für den Batterieantrieb genutzt. Ungewöhnlich bei dem Fahrzeug, das auf dem Serienmodell Peugeot 206 basiert, ist neben dem anvisierten Einsatzgebiet des Fahrzeugs als Feuerwehrwagen in kleinen Städten und engen Straßen, auch die Wasserstoffspeicherung.

²⁴³ Vgl. www.h2cars.de; Hydrogen & Fuel Cell Letter, Mai 2002.

²⁴⁴ Vgl. Vortrag „PSA Peugeot Citroen’s Fuel Cell Strategy“ von PSA-Entwickler Joseph Beretta auf dem 19. Electric Vehicle Symposium. Online-Dokument::
211.233.26.43/ECAR2002/Full_Paper/Camera/Camera_249.doc.



Bild 72: Peugeot H2O Firefighter (Quelle: www.h2cars.de)

Als Wasserstoffspeicher wird wie beim „Chrysler Natrium“ Natriumborhydrid (NaBH_4) genutzt (vgl. Kapitel 3.2.5.1). Mittels eines Katalysators kann aus NaBH_4 Wasserstoff an Bord gewonnen werden. Das System ist von der amerikanischen Firma Millennium Cell entwickelt worden und wird unter dem Namen „The Hydrogen on Demand (TM) Fuel System“ vertrieben. Im April 2002 hatte PSA zwei Systeme von Millennium Cell erworben, um diese für den Einsatz im Automobil zu testen²⁴⁵. Sowohl im Taxi PAC als auch im H2O Firefighter werden Brennstoffzellen des amerikanischen Brennstoffzellenherstellers H Power eingesetzt. Im Januar 2002 schlossen PSA und H Power ein Entwicklungsabkommen ab. Ziel ist es, 7 kW-Brennstoffzellen zu entwickeln, die als Range Extender in leichten Nutzfahrzeugen mit Batterieantrieb eingesetzt werden können²⁴⁶. Im November 2002 ist H Power mit dem amerikanischen Brennstoffzellenhersteller Plug Power fusioniert. Das gemeinsame Unternehmen firmiert nun unter dem Namen Plug Power²⁴⁷.

3.8.4 Vom Batterie- zum Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug

PSA glaubt, dass die Brennstoffzelle ein erhebliches Wachstumspotential hat. Die Technologie ist aber im heutigen Entwicklungsstadium noch erheblich zu teuer, zu groß und zu schwer. PSA hat von daher eine langfristige, mehrstufige Strategie für die Einführung der Brennstoffzellen-Technologie im Automobil entwickelt²⁴⁸:

- In der ersten Stufe von 2005 bis 2010 wird die Brennstoffzelle als Range Extender in Elektrofahrzeugen eingesetzt. Mögliche Einsatzfelder dieser Fahrzeuge sind städtische Flottenbetreiber wie Taxiunternehmen oder Lieferbetriebe.

²⁴⁵ Vgl. www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/IndustryInformation/IndustryInformationExternal/IndustryInformationDisplayArticle/0,1168,368,00.html.

²⁴⁶ Vgl. HyWeb-Gazette 1. Quartal 2002; H Power-Pressemitteilung vom 03.01.2002 „Joint Development Agreement Nased On PSA Peugeot Citroen’s Prior Successes With H Power’s Fuel Cell Stacks. Online-Dokument: www.hpower.com/cgi-bin/pr.cgi?idPressRelease=51.

²⁴⁷ Vgl. Plug Power-Pressemitteilung vom 02.11.2002 „Plug Power Inc. To Acquire H Power Corp. for Approximately \$50.7 Million in Common Stock“. Online-Dokument: www.plugpower.com/news/press.cfm?sr=1&yr=2002.

²⁴⁸ Vgl. www.autoweb.com.au/cms/news/newsarticle.html?id=PEU&doc=peu0107161.

- In der zweiten Stufe von 2010 bis 2020 wird sich die Brennstoffzelle als Antrieb durchsetzen. Wasserstoff wird aber mittels Reformer ‚On-Board‘ aus Methanol oder Benzin gewonnen werden.
- Erst nach dem Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur setzt sich ab 2020 Wasserstoff als Kraftstoff durch.

Mit seiner Brennstoffzellen-Strategie baut PSA konsequent auf seine Erfahrungen mit Batterie-Elektrofahrzeugen auf und profitiert von diesen. Besonders interessant im französischen Kontext ist die Kooperation der beiden französischen Automobilkonzerne mit der französischen Atomenergie-Behörde. Ein umstrittener, aber möglicher CO₂-freier Weg für die Wasserstoffgewinnung mittels Elektrolyse wäre die Nutzung von Atomstrom.

3.9 Renault-Nissan

Aufgrund der erheblichen wirtschaftlichen und strukturellen Problemen des japanischen Herstellers Nissan, ist dieser im März 1999 mit dem französischen Automobilunternehmen Renault eine Allianz eingegangen²⁴⁹. Renault erwarb zunächst 37 % und später weitere 7% der Anteile des japanischen Herstellers. Im Gegenzug beteiligte sich Nissan mit 15 % am französischen Unternehmen. Neben der wechselseitigen finanziellen Beteiligung wurde der Renault-Manager Carlos Ghosn neuer Nissan-Vorstandsvorsitzender, mit dem „Nissan Revival Plan“ versucht er den Turnaround in einer wirtschaftlich schwierigen Situation zu schaffen. Renault und Nissan arbeiten auch im Bereich der Forschung und Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie zusammen. Im Folgenden sollen zunächst die Brennstoffzellenaktivitäten von Renault und anschließend die von Nissan dargestellt werden.

²⁴⁹ Weitere Informationen zur Allianz vgl. www.renault.com/print_GB/Groupe/alliances_p1.htm und www.nissan-global.com/EN/HOME/ALLIANCE/index1.html.

3.9.1 Überblickstabelle Renault

Beginn der Wasserstoff-/Brennstoffzellen-Aktivitäten Angekündigte Serienproduktion	Fahrzeuge [Konzept- (K) Prototyp- (P) Demonstration- (D) Seriennahes- (Sn) Serienfahrzeug (S)]	Höhe der Investitionen/ Anzahl der involvierten Mitarbeiter	Teilnahme an Demonstration s-projekten [Kalifornien (CaFCP) Japan (JHFC) Deutschland/Berlin (CEP)]	Partnerschaften/ Kooperationen	Strategie
Renault beschäftigt sich seit 1994 anfänglich im Rahmen eines EU-Projektes mit der Brennstoffzellen-Technologie Renault will bis 2010 marktfähiges Brennstoffzellen-Auto entwickelt haben	Renault FEVER Renault Laguna Nevada (1998) LH ₂ -BZ (P)	Die Allianzpartner Nissan und Renault haben 2001 angekündigt in den nächsten 5 Jahren 720 Mio. € in die Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie investieren zu wollen Anzahl Mitarbeiter unbekannt	Keine Teilnahme	EU-Projekt FEVER (1994-1998) Zusammenarbeit u.a. mit Nuvera, Air Liquide, Ansaldo und Volvo Seit 1999 französisches BZ-Projekt u.a. mit PSA Seit 2000 strategische Partnerschaft mit Delphi Motors und BMW zur Entwicklung einer benzinbetriebenen SOFC-APU Seit 2001 Kooperation mit Allianzpartner Nissan im Bereich BZ-Entwicklung Seit 2002 Partnerschaften mit Nuvera (Multi fuel Reformer), 3M (BZ-Membran) und TotalElfFina (Treibstoff)	Keine klare Strategie bis dato formuliert Kooperationen lassen auf strategische Schwerpunkte bei Benzinreformierung und BZ-APU schließen

Tabelle 13: Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten von Renault

3.9.2 Einleitung

„[T]he work carried out by Renault on fuel cells has been relatively low key“²⁵⁰. Im Gegensatz zu seinem Allianzpartner Nissan, der inzwischen mit dem X-Trail FCV ein seriennahes Brennstoffzellen-Fahrzeug präsentiert hat, hat Renault in den 1990er Jahren sich nur im Rahmen von EU-Projekten mit der Brennstoffzelle im Automobil beschäftigt. In diesem Rahmen hat Renault auch den bisher einzigen Prototypen mit Brennstoffzelle präsentiert. In den letzten Jahren ist man aber einige strategische Partnerschaften für die Entwicklung von Brennstoffzellen-Systemen und -Komponenten eingegangen. Erklärtes Ziel von Renault ist es, bis 2010 ein marktfähiges Brennstoffzellen-Auto zu entwickeln.

3.9.3 EU-Projekte und strategische Partnerschaften

Auch bei Renault, ähnlich wie beim anderen französischen Automobilkonzern PSA, stand am Anfang der Beschäftigung mit der Brennstoffzelle ein EU-Projekt. Mit fünf europäischen Partnern arbeitete Renault von 1994 bis 1998 in einem von der EU geförderten Forschungsprojekt an der Entwicklung eines Brennstoffzellen-Fahrzeuges²⁵¹. Das FEVER (*Fuel cell Electric Vehicle of Extended Range*)-Projekt war darauf ausgerichtet, ein Verständnis für die

²⁵⁰ Vgl. www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/IndustryDirectory/IndustryDirectoryExternal/IndustryDirectoryDisplayCompany/0,1411,282,00.html.

²⁵¹ Vgl. Renault-Pressemitteilung vom 17.10.1997 „Renault unveils Fever“. Online-Dokument: www.media.renault.com; Renault-Pressemitteilung vom 27.10.1998 „Renault acquires valuable expertise for the future development of fuel cell vehicles“. Online-Dokument: www.media.renault.com; HyWeb-Gazette 2. Halbjahr 1997.

Anwendung und für die Integration der Brennstoffzelle im Automobil zu bekommen. Neben Renault als Projektkoordinator waren noch die Unternehmen De Nora (heute Nuvera; Brennstoffzelle), Air Liquide (Tank), Ansaldo (Systemintegration), Volvo (Energieflußsimulation, Energiemanagement und Sicherheitsstudie) und die Ingenieursschule Ecole des Mines de Paris (Brennstoffzellen-Teststand) am FEVER-Projekt beteiligt. Das Projekt endete mit der Präsentation des fertiggestellten Brennstoffzellen-Forschungsfahrzeuges auf Basis des Renault Laguna Nevada vor der Europäischen Kommission im Juni 1998.



Bild 73: Renault Laguna FEVER (Quelle: Renault)

Antriebs- und Speichersystem nehmen beim Laguna FEVER noch die gesamte Rückbank und den Kofferraum ein, so dass das Fahrzeug nur zwei Sitzplätze hat. Das 2200 kg schwere Fahrzeug ist mit einer 30 kW PEM-Brennstoffzelle ausgestattet. Diese wird von einer Nickel-Metallhydrid-Batterie beim Start und während Beschleunigungsphasen ergänzt. Die Brennstoffzelle wird mit flüssigem Wasserstoff betrieben, der in einem kryogenen Tank (8 kg Wasserstoff) gespeichert ist. Das Fahrzeug hat eine Reichweite von 400 km und eine Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h.

Im Anschluss an das FEVER-Projekt begann Renault 1999 mit PSA Peugeot Citroen, das seit 1996 ebenfalls ein EU-gefördertes Forschungsprojekt zur Brennstoffzelle im Automobil (HYDO-GEN) koordinierte, bei der Brennstoffzellenentwicklung zu kooperieren²⁵². In einem 4-jährigen gemeinsamen Forschungsprojekt wollen die beiden französischen Automobilunternehmen ihre Ressourcen und die gemachten Erfahrungen mit der Brennstoffzellentechnologie in den jeweiligen EU-Projekten vereinen, um weitere Fortschritte in Richtung Serienfertigung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen zu machen (vgl. Kapitel 3.8.3). Eine weitere strategische Partnerschaft geht Renault Mitte 2000 mit dem amerikanischen Automobilzulieferer Delphi Automotive Systems und mit BMW ein²⁵³. Schon im April 1999 hatten sich BMW und Delphi Motors zusammengetan, um gemeinsam eine Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC) mit integriertem Benzinreformer zu entwickeln. Diese soll als APU im regulären Pkw

²⁵² Vgl. Renault-Pressemitteilung vom 08.09.1999 „The joint PSA Peugeot-Citroën – Renault research project to develop a fuel cell powered vehicle has received the approval of the French Fuel Cell network“. Online-Dokument: www.media.renault.com; vgl. auch Wasserstoff-Gazette 3. Quartal 1999. Online-Dokument: www.hydrogen.org/Neuigkeiten/archv399.html.

²⁵³ Vgl. Renault-Pressemitteilung vom 02.05.2000 „BMW, Renault, Delphi team up to develop fuel cell auxiliary power unit“. Online-Dokument: www.media.renault.com; vgl. auch www.sae.org/automag/techbriefs_09-00/02.htm.

anstatt einer Batterie eingesetzt werden. Mitte 2000 wurde diese Partnerschaft um den französischen Automobilkonzern erweitert. Mit dem neuen Partner wird aber auch das Anwendungsfeld der APU erweitert, denn Renault möchte die APU auch in Klein- und Schwerlastern einsetzen. Ziel ist es, den zunehmenden Energiebedarf im Fahrzeug über die Brennstoffzelle abzudecken. Der Vorteil der Festoxid-Brennstoffzelle ist ihre, durch die höhere Betriebstemperatur (800 Grad Celsius) bedingte, größere Toleranz gegenüber Verschmutzungen im Wasserstoff. Damit wird auch der Reformierungsprozess von Benzin oder Diesel vereinfacht. Während Delphi das Benzin- und Diesel-Brennstoffzellensystem entwickeln wird, wollen BMW und Renault innerhalb der nächsten fünf Jahre das System in ausgewählte Fahrzeuge integrieren. Auch mit dem japanischen Allianzpartner Nissan kooperiert Renault bei der Entwicklung der Brennstoffzelle. 2001 verkündeten die beiden Allianzpartner, in den nächsten fünf Jahren gemeinsam rund 720 Mio. Euro in die Entwicklung einer Brennstoffzelle investieren zu wollen. Auch an der im Februar 2002 abgeschlossenen Entwicklungsvereinbarung von Nissan und dem amerikanischen Brennstoffzellen-Hersteller UTC Fuel Cells ist Renault beteiligt. Die drei Unternehmen wollen gemeinsame Anstrengungen bei der Entwicklung von Komponenten für Brennstoffzellen-Fahrzeuge unternehmen.

Im letzten Jahr ist Renault weitere strategischen Partnerschaften im Bereich Brennstoffzelle eingegangen²⁵⁴. Zum einen kooperiert man mit dem Unternehmen Nuvera, das noch unter dem alten Namen De Nora die Brennstoffzelle für das FEVER-Projekt geliefert hatte. Beide Partner wollen einen „multi-fuel“-Reformer, der aus unterschiedlichen Kraftstoffen Wasserstoff für die Brennstoffzelle gewinnen kann, bis 2004 entwickelt haben. Zudem soll der Reformer für verschiedene Brennstoffzellen-Applikationen in ein Fahrzeug integrierbar sein. Zum zweiten hat Renault mit dem amerikanischen Unternehmen 3M eine Partnerschaft abgeschlossen, die sich mit der Weiterentwicklung eines Kernbestandteils der Brennstoffzelle, der MEA (Membrane-Electrode-Assembly), beschäftigt. Die dritte strategische Partnerschaft ist Renault mit dem französischen Mineralölkonzern TotalElfFina eingegangen. Ziel der Partnerschaft ist es, verschiedene Kraftstoff-Alternativen für den Einsatz in der Brennstoffzelle zu prüfen und ihre Auswirkung auf Fahrperformance und Umwelt zu untersuchen. Zudem sollen die Kraftstoffalternativen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet werden. Schlussendlich soll eine Entscheidung für einen geeigneten Kraftstoff getroffen werden.

3.9.4 Brennstoffzellen-APU und Benzin-Brennstoffzelle

Renault hat bis jetzt keinen langfristigen Fahrplan oder eine Strategie im Bezug auf die Brennstoffzelle vorgestellt. Nur der Termin für den Beginn der Markteinführung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen wird mit dem Jahr 2010 benannt. Insgesamt steckt Renault, was die Brennstoffzellen-Aktivitäten angeht, noch in den Anfängen. So wurde bis heute nur ein einziges Brennstoffzellenfahrzeug vorgestellt. Wenn man sich aber die unterschiedlichen Partnerschaften, die Renault eingegangen ist, ansieht, lassen sich doch Rückschlüsse auf zwei strategische Schwerpunkte schließen. So scheint es, dass Renault in der Frage der Kraftstoffwahl

²⁵⁴ Vgl. Renault-Pressemitteilung vom 04.07.2002 „Renault forges fuel-cell partnerships“. Online-Dokument: www.media.renault.com.

auf die Reformierung von etablierten Kraftstoffen wie Benzin und Diesel setzt. Zudem ist für Renault die Brennstoffzelle nicht nur als Antrieb sondern auch als APU, also als Energielieferant für das Bordnetz des Automobils interessant. Zwei weitere Besonderheiten kann man bei Renault in Bezug auf die Brennstoffzelle noch erwähnen. Einerseits hat das Unternehmen Erfahrungen mit Batterie-Elektrofahrzeugen, die von Renault auch vermarktet werden. Die gemachten Erfahrungen können in die Entwicklung des Elektrofahrzeuges mit Brennstoffzellen-Antrieb einfließen. Andererseits ist die Kooperation mit der französischen Atomenergiebehörde im Rahmen des französischen Technologie-Netzwerkes zur Brennstoffzelle erwähnenswert. Ungeachtet der Gefahren und Risiken der Atomkraft, wäre Atomenergie ein Weg, Wasserstoff emissionsfrei zu gewinnen.

3.9.5 Überblickstabelle Nissan

Beginn der Wasserstoff-/ Brennstoffzellen-Aktivitäten Angekündigte Serienproduktion	Fahrzeuge [Konzept- (K) Prototyp- (P) Demonstration- (D) Seriennahes- (Sn) Serienfahrzeug (S)]	Höhe der Investitionen/ Anzahl der involvierten Mitarbeiter	Teilnahme an Demonstrationsprojekten [Kalifornien (CaFCP) Japan (JHFC) Deutschland/Berlin (CEP)]	Partnerschaften/ Kooperationen	Strategie
Nissan präsentierte 1997 erstes Brennstoffzellen-Konzeptfahrzeugs Ab 2004 will Nissan erste Brennstoffzellenfahrzeuge an Kunden verlesen Serienproduktion sieht das Unternehmen frühestens ab 2010	Nissan R'nessa FCV (1999) CH ₃ OH-Hybrid-BZ (P) Nissan Xterra FCV (2000) CGH ₂ -Hybrid-BZ (D) Nissan X-Trail FCV (2002) CGH ₂ -Hybrid-BZ (Sn) (Kleinserie von 20 Fahrzeugen ab 2003) Nissan Effis (2003) H ₂ -Hybrid-BZ (K)	Die Allianzpartner Nissan und Renault haben 2001 angekündigt in den nächsten 5 Jahren 720 Mio. € in die Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie investieren zu wollen Anzahl Mitarbeiter unbekannt	Seit 03/2000 Teilnahme an der CaFCP, in deren Rahmen das Nissan Xterra FCV getestet wird Seit 03/2003 Teilnahme an der JHFC, bei dem das X-Trail FCV getestet wird	Seit 2001 Kooperation mit Allianzpartner Renault im Bereich BZ-Entwicklung 2002 Vereinbarung mit UTC Fuel Cells zur Lieferung von Brennstoffzellen und gemeinsame BZ-Komponentenentwicklung Seit 2003 Kooperation mit DaimlerChrysler, Hyundai, Ford, PSA und Toyota zur Entwicklung eines 700 bar Wasserstofftanks	Alle Nissan BZ-Fahrzeuge haben einen Hybridantrieb Ansonsten keine langfristige Strategie kommuniziert Nissan bemüht sich den Vorsprung von Toyota und Honda bei Hybrid- und Brennstoffzellen-Technologie aufzuholen

Tabelle 14: Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten von Nissan

3.9.6 Einleitung

Der drittgrößte japanische Automobilhersteller Nissan hat im Vergleich zu den beiden japanischen Konkurrenten Toyota und Honda ein weniger ambitioniertes Brennstoffzellenprogramm. Nissans Brennstoffzellen-Aktivitäten sind zudem nicht von einer durchgängigen Stringenz gezeichnet. Dies ist wohl auch den erheblichen wirtschaftlichen und strukturellen Problemen des Unternehmens in den letzten Jahren geschuldet. Nissan Brennstoffzellen-Aktivitäten laufen zur Zeit mit anderen Umweltaktivitäten des Unternehmens unter dem Label

„Nissan Green Program 2005“²⁵⁵. Neben der Entwicklung von Brennstoffzellen- und Hybrid-Elektro-Fahrzeugen, verpflichtet sich Nissan mit dem Anfang 2002 verkündeten Programm insbesondere dazu, dass ab März 2003 80 % der von Nissan in Japan verkauften Pkws dem japanischen „ultra-low emission vehicle“-Standard genügen müssen.

3.9.7 Zwischen „Turnaround“ und „Green Program“

Mit der Präsentation eines Brennstoffzellen-Konzeptfahrzeuges auf der Tokyo Motor Show 1997 werden Nissans Aktivitäten im Bereich Brennstoffzelle erstmals öffentlich. Den ersten fahrfähigen Prototyp stellte das Unternehmen aber erst im Mai 1999 vor²⁵⁶. Bei dem auf dem Sport Utility Vehicle R'nessa basierenden Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug nahm das Brennstoffzellensystem aber noch den gesamten Laderaum ein. Das methanolbetriebene Fahrzeug ist mit einer Ballard-Brennstoffzelle (10 kW), einer Lithium-Ion Batterie und einem Methanolreformer ausgestattet. Das Fahrzeug kann sowohl im Brennstoffzellenmodus, als auch im Batteriemodus fahren. Die Bremsenergie wird zurückgewonnen.



Bild 74: Nissan R'nessa FCV mit Brennstoffzellensystem im Kofferraum (Quelle: Nissan)

Bei der Präsentation des R'nessa FCV kündigte der damalige Firmensprecher, Takashi Osa-
wa, an, dass Nissan die Kommerzialisierung des Brennstoffzellenfahrzeuges ab 2003/2004 in
Testflotten bei ausgesuchten Kunden, wie Energieunternehmen und Forschungsinstitute,
plane. Ein Massenmarkt würde aber erst ab 2010 entstehen²⁵⁷. Der Termin für den Aufbau
einer ersten Kleinserie hat sich, auch als Reaktion auf das Vorpreschen der japanischen Kon-
kurrenz Honda und Toyota, in der Folgezeit mehrmals verschoben.

²⁵⁵ Vgl. Nissan-Pressemitteilung vom 28.01.2002: „Nissan Announces Mid-term Environmental Action Plan Nissan Green Program 2005 for Japanese Market“. Online-Dokument: www.nissan-global.com/EN/STORY/0,1299,SI9-CH177-LO3-TI525-CI429-IFY-MC109,00.html.

²⁵⁶ Vgl. Nissan-Pressemitteilung vom 13.05.1999: „Nissan Begins Driving Test of a Methanol Fuel Cell Vehicle“. Online-Dokument: www.nissan-global.com/GCC/Japan/NEWS/19990513_0e.html.

²⁵⁷ Vgl. Hydrogen & Fuel Cell Letter, Juni 1999.



Bild 75: Nissan Xterra FCV (Quelle: Nissan)

Bei der zweiten Generation von Brennstoffzellenfahrzeugen wechselte Nissan den Treibstoff und den Zulieferer für die Brennstoffzelle. Das Nissan Xterra FCV, welches auf dem gleichnamigen Serienfahrzeug basiert, wurde im Oktober 2000 präsentiert. Das Fahrzeug wird mit Druckwasserstoff betrieben. Nissan baute zwei Versionen des Brennstoffzellen-SUV. Die erste Version des Xterra FCV ist noch mit einer Ballard Brennstoffzelle (75 kW) ausgestattet, die zweite schon mit einer Brennstoffzelle von United Technologies Corporation (UTC) Fuel Cells. Das Nissan Xterra FCV wird ab April 2001 im Rahmen der California Fuel Cell Partnership getestet, der Nissan im März 2000 als fünfter Autohersteller beigetreten war.

Im Dezember 2002 präsentierte Nissan in Tokio sein aktuelles Brennstoffzellenfahrzeug. Das Nissan X-Trail FCV basiert auf dem gleichnamigen seriengefertigten SUV, und ist wiederum ein Hybridfahrzeug, das sowohl mit einer Brennstoffzelle von UTC Fuel Cells (58 kW) wie auch mit einer Lithium Ionen Batterie ausgestattet ist. Das Fahrzeug wird mit gasförmigem Wasserstoff betrieben. Ende 2002 hat das Fahrzeug die offizielle Betriebserlaubnis für den Test auf öffentlichen Straßen vom japanischen Ministerium für Land, Infrastruktur und Verkehr erhalten²⁵⁸.



Bild 76: Nissan X-Trail FCV (Quelle: Nissan)

Nachdem Nissan schon für das Jahr 2003 den Aufbau einer Kleinserie von 20 Fahrzeugen plante, wird das japanische Unternehmen, laut Ankündigung auf der Tokyo Motor Show im Oktober 2003, nun endgültig die ersten sechs X-Trail FCV ab März 2004 in Kundenhand

²⁵⁸ Vgl. www.h2cars.biz/artman/publish/printer_53.shtml.

übergeben²⁵⁹. Die Fahrzeuge werden wie die von Honda und Toyota an japanische Regierungsstellen, Energieunternehmen und Forschungsinstitute verleast werden.

Auf der Tokyo Motor Show 2003 hat Nissan ein weiteres Brennstoffzellenfahrzeug präsentiert²⁶⁰. Bei dem Nissan Effis handelt es sich um ein Konzeptfahrzeug, das in Zukunft als Pendlerfahrzeug dienen könnte. Das Fahrzeug aus Leitbaumaterialien ist mit einem wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen-Hybridsystem aus PEM-Brennstoffzelle und Lithium Ion Batterie ausgestattet, das komplett im Fahrzeugboden untergebracht ist.

Neben der CaFCP nimmt Nissan auch an dem Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Projekt (JHFC) der japanischen Regierung teil. Seit Anfang 2003 kooperiert Nissan zudem mit fünf weiteren Automobilherstellern (DaimlerChrysler, Hyundai, Ford, PSA und Toyota) und diversen Zulieferern bei der Entwicklung eines 700 bar Wasserstoff-Druckwasserstofftanks, der eine Reichweite von 500 km erlauben würde (vgl. Kapitel 3.2.3).



Bild 77: Nissan Effis-Konzeptfahrzeug (Quelle: www.h2cars.de)

3.9.8 Nissans unfreiwillige Folger-Strategie

Nissan hat bis heute keine längerfristige Strategie zur Einführung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen kommuniziert. Die aktuelle Ankündigung der Auslieferung von Fahrzeugen in Kundenhand ist eine Reaktion auf das Voranschreiten der japanischen Konkurrenz. Auch bei dem bevorzugten Kraftstoff für die Brennstoffzelle hat Nissan keine eindeutige Präferenz. Nachdem man zunächst mit Methanol begann und Methanol auch langfristig für geeignet hielt, gab es zwischendurch Vermutungen, dass man mit Renault auf die Benzinreformierung setzen würde. Die aktuellen Brennstoffzellen-Fahrzeuge von Nissan fahren aber mit Druckwasserstoff. Eine Konstante bei den Brennstoffzellen-Prototypen von Nissan ist aber die Hybridtechnologie. Alle Fahrzeuge sind mit Brennstoffzelle und Batterie ausgestattet. Nissan scheint aber, besonders im Vergleich zu Toyota und Honda, bei der Brennstoffzelle wie auch bei der Hybridtechnologie ins Hintertreffen geraten zu sein. In beiden Fällen versucht man das verloren gegangene Terrain, durch das Einkaufen von Know-how bzw. das Eingehen von strategi-

²⁵⁹ Vgl. Brennstoffzellen Newsletter 30-2003; Hydrogen & Fuel Cell Letter, November 2003.

²⁶⁰ Vgl. Hydrogen & Fuel Cell Letter, November 2003; Brennstoffzellen Newsletter 29-2003.

schen Partnerschaften aufzuholen. Bei der Hybridtechnologie hat Nissan im September 2002 eine Vereinbarung mit Toyota über die Lieferung von langfristig bis zu 100.000 Toyota Hybrid Systemen und über eine zehnjährige Kooperation zum Thema Hybridantrieb abgeschlossen²⁶¹. Im Bereich Brennstoffzelle ist Nissan im Februar 2002 eine Entwicklungsvereinbarung mit dem amerikanischen Brennstoffzellenhersteller UTC Fuel Cells eingegangen. UTC Fuel Cells und Nissan vereinbarten zum einen, dass UTC Fuel Cells Nissan mit PEM Brennstoffzellen zu Evaluationszwecken beliefert. Zudem wollen Nissan und UTC Fuel Cells gemeinsame Anstrengungen bei der Entwicklung von Komponenten für Brennstoffzellen-Fahrzeuge unternehmen²⁶². Auch Renault wird sich an dieser Kooperation beteiligen. Die Allianzpartner Nissan und Renault hatten schon 2001 eine Kooperation im Bereich Brennstoffzelle beschlossen. Beide Unternehmen verkündeten, über die nächsten 5 Jahre gemeinsam 85 Mrd. YEN (rund 720 Mio. Euro) in die Entwicklung einer Brennstoffzelle investieren zu wollen²⁶³.

²⁶¹ Zudem haben Nissan und Toyota eine Vereinbarung über eine technische Zusammenarbeit bei der Hybridtechnologie getroffen. Nissan will mit den erworbenen Toyota Hybridsystemen Fahrzeuge für den amerikanischen Markt ausstatten. Das von Nissan selbstentwickelte Hybridfahrzeug Nissan Tino HEV ist in Japan kaum verkauft worden (vgl. Nissan-Pressemitteilung vom 02.09.2002: Toyota and Nissan Agree to Tie Up on Hybrid Technologies. Online-Dokument: www.nissan-global.com/EN/STORY/0,1299,S19-CH177-LO3-TI655-CI515-IFY-MC109,00.html).

²⁶² Vgl. HyWeb-Gazette 1. Quartal 2002.

²⁶³ Vgl. Hyweb-Gazette 4. Quartal 2000. Dem Bericht einer japanischen Zeitung zur Folge sollen beide Partner anstatt auf Methanol auf die Benzinreformierung setzen.

3.10 Toyota

3.10.1 Überblickstabelle Toyota

Beginn der Wasserstoff-/Brennstoffzellen-Aktivitäten Angekündigte Serienproduktion	Fahrzeuge [Konzept- (K) Prototyp- (P) Demonstration- (D) Seriennahes- (Sn) Serienfahrzeug (S)]	Höhe der Investitionen/ Anzahl der involvierten Mitarbeiter	Teilnahme an Demonstrationsprojekten [Kalifornien (CaFCP) Japan (JHFC) Deutschland/Berlin (CEP)]	Partnerschaften/ Kooperationen	Strategie
<p>Toyota betreibt seit 1992 F&E an Brennstoffzellen-Fahrzeugen</p> <p>Erste BZ-Fahrzeuge sind von Toyota 12/2002 in Kundenhand übergeben worden</p> <p>Beginn der Serienproduktion frühestens ab 2010</p>	<p>RAV 4 FCEV (1996) H₂-Hybrid-BZ (Metallhydrid-Speicher) (P)</p> <p>FCHV-2 RAV4 EV (1997) CH₃OH-Hybrid-BZ (P)</p> <p>FCHV-3 Toyota Kluger-V/ Highlander (2001) H₂-Hybrid-BZ (Metallhydrid-Speicher) (P)</p> <p>FCHV-4 Toyota Kluger-V/Highlander (2001) CGH₂-Hybrid BZ (D) (7 FCHV-4 werden seit 2001 in J (5) und US (2) getestet)</p> <p>FCHV-5 (2001) H₂-Hybrid-BZ (Benzinreformer) (P)</p> <p>FINE-S (2003) CGH₂-Hybrid-BZ (K)</p> <p>FINE-N (2003) CGH₂-Hybrid-BZ (K)</p>	<p>Höhe der Investitionen unbekannt</p> <p>In dem im Jahr 2002 eröffneten "FC System Development Center" arbeiten 450 Mitarbeiter von Toyota an der Entwicklung und Kommerzialisierung der Brennstoffzellentechnologie</p>	<p>Seit 10/2000 Teilnahme an der CaFCP, in deren Rahmen zwei FCHV-4 getestet werden</p> <p>Seit 03/2003 Teilnahme an der JHFC, in dessen Rahmen der FCHV-4 getestet wird</p> <p>Toyota baut seit 2002 eine Kleinserie von 20 FCHV-4 auf, die an Kunden verleast werden sollen. Jeweils 2 Fahrzeuge sind davon Ende 2002 an die Universität von Kalifornien und die japanische Regierung übergeben worden. In 05/2003 sind 6 weitere Fahrzeuge an Regierungsbehörden und Energieunternehmen in Japan verleast worden</p>	<p>Seit 1999 strategische Partnerschaft mit GM zu BZ-Technologie, Benzinreformer- und Treibstoffentwicklung. Dritter Partner ist seit 2001 das Energieunternehmen ExxonMobil</p> <p>Seit 1999 Kooperation mit Konzerntochter Daihatsu bei Entwicklung von BZ-Kleinwagen</p> <p>Kooperation mit Konzerntochter Hino bei Entwicklung von BZ-Stadtbussen</p> <p>Seit 2003 Kooperation mit DaimlerChrysler, Hyundai, Ford, Nissan und PSA zur Entwicklung eines 700 bar Wasserstofftanks</p>	<p>Umweltschutz und Umwelttechnologien als strategisches Unternehmensziel</p> <p>Toyota entwickelt Kerntechnologien, wie Brennstoffzelle, selber</p> <p>Toyota hat sich ein breites Portfolio an alternativen Antrieben aufgebaut, wobei der Hybridantrieb Schlüsseltechnologie ist</p> <p>„An-Bord“-Benzinreformerung ist für Toyota Übergangstechnologie</p> <p>Frühzeitige Übergabe neuer Technologien in Kundenhand – Erfahrungen unter realen Bedingungen machen.</p> <p>Toyotas Markteinführung der Brennstoffzellen-Technologie geschieht auch über stationäre Anwendungen</p>

Tabelle 15: Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten von Toyota

3.10.2 Einleitung

„Toyota will endeavor to become a leader of global regeneration through its outstanding environmental technologies“, so die Ankündigung des Präsidenten der Toyota Motor Corporation, Fujio Cho, im Vorwort des Umweltreportes 2002 des japanischen Konzerns²⁶⁴. Umweltschutz und das Voranbringen von Umwelttechnologien sind ganz wesentliche Bausteine von Toyotas langfristiger Konzern-Strategie "2010 Global Vision". Über die Positionierung beim Thema Umweltschutz hofft Toyota seine Marktposition kontinuierlich zu verbessern. Schlüsseltechnologie für die Entwicklung umweltfreundlicher Fahrzeuge ist für Toyota die Hybridtechno-

²⁶⁴ Vgl. http://www.toyota.co.jp/IRweb/corp_info/eco/message.html.

logie. Auch die Brennstoffzellentechnologie läuft bei Toyota im Grunde unter dem Label „Hybridtechnologie“. Praktisch heißt dies, dass sowohl die Hybridfahrzeuge wie auch die Brennstoffzellen-Prototypen das Toyota Hybrid System (THS) nutzen.

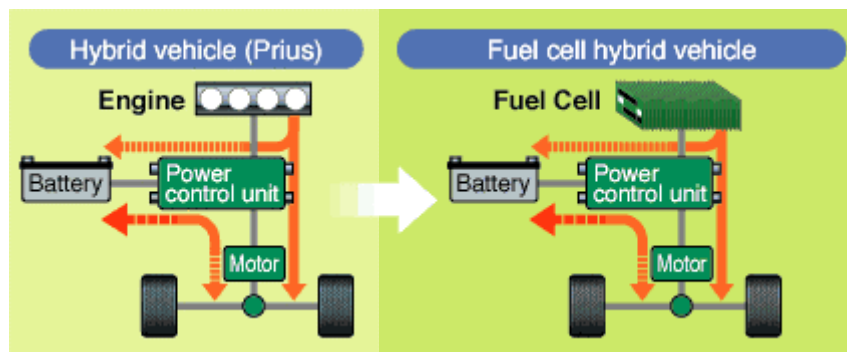


Bild 78: Schematische Darstellung von Toyotas Hybridtechnologie beim Verbrennungsmotor und bei der Brennstoffzelle (Quelle: Toyota)

3.10.3 Der Brennstoffzellen-Hybridantrieb²⁶⁵

Die Forschung und Entwicklung zum Thema Brennstoffzelle geht bei Toyota bis zum Jahr 1992 zurück. Im Januar 2002 eröffnete das Unternehmen in Nagoya, dem Stammsitz von Toyota, das neue „FC System Development Center“. Hier hat Toyota sämtliche Forschungsabteilungen, die bis dahin getrennt an der Brennstoffzelle arbeiteten, an einem Ort vereint. Zum ersten Mal in der 65-jährigen Firmengeschichte hat Toyota in dem neuen Entwicklungszentrum Abteilungen für Produktentwicklung und Produktionsvorbereitung zusammengefasst. Zudem werden hier auch die Schlüssel-Zulieferer in den Entwicklungsprozess neuer Komponenten für das Brennstoffzellenauto integriert. Insgesamt sollen 450 Toyota-Mitarbeiter in dem neu eröffneten Entwicklungszentrum für Brennstoffzellensysteme arbeiten.

Im Oktober 1996, vier Jahre nach dem Start von Toyotas Brennstoffzellen-Fahrzeugentwicklung, präsentierte Toyota auf dem 13. International Electric Vehicle Symposium in Osaka/ Japan den ersten Prototyp. Der FCHV-1, basierend auf Toyotas Elektrofahrzeug RAV4 EV, ist mit einer von Toyota selbst entwickelten 20 kW PEM-Brennstoffzelle (Gewicht: 120 kg) ausgestattet. Der Wasserstoff wird in einem Metallhydrid-Speicher mitgeführt. Das FCHV-1 hat eine Reichweite von 175 km und eine Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h.

²⁶⁵ Die folgenden Ausführungen beruhen falls nicht anders angegeben auf folgenden Quellen: www.toyota.co.jp/en/tech/environment/index.html; www.toyota.co.jp/en/tech/environment/fchv/index.html und www.toyota-europe.com/environment/.



Bild 79: Toyota FCHV-1 (Quelle: Toyota)

Bild 80: Toyota FCHV-2 – Röntgendarstellung (Quelle: Toyota)

Beim zweiten Prototyp, der im September 1997 vorgestellt wird, nutzt Toyota erstmalig Methanol als (flüssigen) Wasserstoffspeicher²⁶⁶. Damit gehört der FCHV-2, neben dem fast zeitgleich präsentierten NECAR 3 von DaimlerChrysler, zu den ersten Brennstoffzellenfahrzeugen mit einem ‚An-Bord‘-Reformer für Methanol. Das Fahrzeug basiert ebenfalls auf der Elektroversion des Serienmodells RAV4 und ist wie sein Vorgänger ein Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug. Neben der Toyota-Brennstoffzelle (25 kW) ist auch eine Nickel-Metallhydrid Batterie Teil des Antriebssystems. Der FCHV-2 verfügt über eine Reichweite von bis zu 500 km und eine Höchstgeschwindigkeit von 125 km/h.



Bild 81: Toyota FCHV-3 (Quelle: Toyota)

Bild 82: Toyota FCHV-4 (Quelle: Toyota)

Nach mehreren Jahren ohne Vorstellung eines Brennstoffzellenfahrzeuges präsentierte Toyota dann 2001 gleich drei neue Prototypen. Die vorgestellten Brennstoffzellen-Hybridfahrzeuge basieren alle auf dem Serienmodell Kluger V-SUV (Japan) bzw. Highlander SUV (USA). Dabei unterscheiden sich die Fahrzeuge in der Art der Wasserstoffspeicherung²⁶⁷. Der im März 2001 auf dem „International Symposium on Fuel Cell Vehicle“ in Tokio vorgestellte FCHV-3 nutzt einen im Vergleich zum ersten Toyota Brennstoffzellen-Prototypen ver-

²⁶⁶ Vgl. Wasserstoff-Gazette 2. Halbjahr 1997. Online-Dokument: www.hydrogen.de/Neuigkeiten/archiv297.html.

²⁶⁷ An einer weiteren Methode zur Wasserstoffspeicherung, der Speicherung in Kohlenstoff-Nanotubes, forscht Toyota, laut einem Bericht des „The Daily Automotive News“ vom 19.07.2002, ebenfalls.

besserten Metallhydrid-Speicher. Trotzdem wiegt dieser Speicher mit allen notwendigen Systemkomponenten immer noch 300 kg. Die Reichweite des mit einer Toyota-Brennstoffzelle (90 kW) und dem Toyota Hybrid-System (Nickel-Metallhydrid-Batterie; regeneratives Bremsen) ausgestatteten Fahrzeuges beträgt 300 km. Die Spitzengeschwindigkeit des FCHV-3 ist 150 km/h.

Der im Juni 2001 vorgestellte FCHV-4 speichert den benötigten Wasserstoff in einem Drucktank (250 bar), was eine Reichweite von 250 km ermöglicht. Auch der FCHV-4 ist mit einer Toyota-Brennstoffzelle (90 kW) und dem Toyota Hybrid System bestückt. Eine weitere Variante der Wasserstoffspeicherung ist die Reformierung von Benzin an Bord des Fahrzeuges. Hierzu ist aber so genanntes ‚sauberes‘ Benzin notwendig, ein Treibstoff, der von Toyota als CHF („Clean Hydrocarbon Fuel“) bezeichnet wird. Aus CHF wird im dritten, von Toyota im Oktober 2001 auf der Tokyo Motor Show präsentierten Brennstoffzellen-Prototyp, der FCHV-5, Wasserstoff an Bord gewonnen. Der Reformer für die Umwandlung des CHF in Wasserstoff ist von Toyota entwickelt worden. Manko dieses Reformers ist, wie Toyota angibt, die Größe, das Gewicht und die lange Startzeit.



Bild 83: Toyota FCHV-5 (Quelle: Toyota)

Mit dem FCHV-4, der Druckwasserstoff-Variante, unternimmt Toyota seit Mitte 2001 Fahrzeugtests auf öffentlichen Straßen. Zum einen werden fünf vom japanischen Verkehrsministerium zugelassene FCHV-4 seit Juni 2001 in Japan und zwei FCHV-4 seit Juli 2001 im Rahmen der California Fuel Cell Partnership getestet. Toyota und GM waren die letzten beiden großen Automobilkonzerne, die im Oktober 2000 der CaFCP beitraten. Auch am japanischen Demonstrationsprojekt, dem Japan Hydrogen & Fuel Cell (JHFC) Demonstrationsprojekt, ist Toyota beteiligt. Alle sieben FCHV-4 haben bis Ende 2002 zusammen über 110.000 km zurückgelegt²⁶⁸. Toyota beabsichtigte ursprünglich, die FCHV-4 unter verschiedenen Bedingungen drei Jahre lang zu testen. Aber im Jahr 2002 beschleunigte sich die Entwicklung. Noch im Februar 2002 hatte Toyota verkündet, im Jahr 2003, ein Jahr früher als die meisten Mitbewerber, die erste limitierte Kleinserie von Brennstoffzellenfahrzeugen auf den Markt zu bringen. Nur fünf Monate später, am 1. Juli 2002, gab Toyota dann bekannt, diesen Termin um ein halbes Jahr vorziehen zu wollen²⁶⁹. Da die Straßentests mit dem FCHV-4 erfolgreich gelaufen seien, wolle man schon Ende 2002 beginnen, die ersten 20 Brennstoffzellenfahrzeuge – eine überarbeitete Version des FCHV-4 (größeres Tankvolumen durch

²⁶⁸ Vgl. HyWeb-Gazette 3. Quartal 2002.

²⁶⁹ Vgl. Wasserstoff-Spiegel Nr. 4/02.

erhöhten Speicherdruck; 350 bar) – in Kundenhand zu übergeben. Diese Ankündigung führte zu einem Wettlauf mit dem japanischen Konkurrenten Honda, der kurze Zeit später nachzog, und ebenfalls die Auslieferung der ersten Brennstoffzellenfahrzeuge für Ende 2002 ankündigte. Der „Showdown“ fand am 2. Dezember 2002 statt. Die Präsidenten beider Automobilunternehmen übergaben in einer gemeinsamen Veranstaltung dem japanischen Ministerpräsidenten in Tokio die ersten Brennstoffzellenfahrzeuge. Die japanische Regierung leaste von Toyota zunächst vier Fahrzeuge für 20 Monate zu einem Preis von 9800 US\$ pro Monat und Fahrzeug. Im Mai 2003 hat Toyota dann sechs weitere Brennstoffzellenfahrzeuge an zwei Regierungsbehörden und vier Energieunternehmen in Japan verleast²⁷⁰. In Kalifornien übergab Toyota ebenfalls am 2. Dezember 2002 die ersten Brennstoffzellen-Fahrzeuge. Toyota lieferte jeweils einen FCHV-4 an die University of California in Irvine (UCI) und einen an die University of California in Davis (UCD). Beide Universitäten, die schon vorher von Toyota bei Forschungsthemen finanziell unterstützt wurden, haben insgesamt 6 Fahrzeuge für 30 Monate zu einem monatlichen Preis pro Fahrzeug von 10.000 US\$ geleast. Die vier restlichen Fahrzeuge will Toyota 2003 ausliefern²⁷¹.



Bild 84: Toyota FINE-S (Quelle: www.fuelcelltoday.com)

Bild 85: Toyota FINE-N (Quelle: www.carsdesignnews.com)

Inspiziert von der Konzeptstudie „AUTOonomy“ bzw. dem Hy-wire-Prototypen von Kooperationspartner GM, mit dem Toyota seit 1999 eine strategische Partnerschaft zur Entwicklung fortgeschrittener Fahrzeugantriebe und eines sauberen Benzins eingegangen ist, hat Toyota 2003 zwei vergleichbare Konzeptfahrzeuge präsentiert. Auf der Detroit Motor Show im Januar 2003 stellte das japanische Unternehmen die Konzeptstudie FINE-S (*Fuel cell Innovative Emotion-Sport*) vor. Das futuristische Fahrzeug mit Brennstoffzellen-Hybridantrieb verfügt über einen Vierrad-Elektroantrieb und das Brennstoffzellen-System ist komplett im Fahrzeugboden angeordnet.

²⁷⁰ Vgl. Toyota-Presseerklärung vom 13.05.2003 „Toyota Set to Market 6 More Fuel Cell Hybrid Vehicles“ Online-Dokument: www.toyota.co.jp/irweb/corp_info/pr/2003/0513_2.html .

²⁷¹ Vgl. www.toyota.com/about/environment/technology/fuelcell.html; Hydrogen & Fuel Cell Letter, Dezember 2002.

Die zweite futuristische Konzeptstudie eines Brennstoffzellenfahrzeugs präsentierte Toyota auf der Tokyo Motor Show im Oktober 2003²⁷². Auch beim Toyota FINE-N (*Fuel cell Innovative Emotion-Next Generation*) ist das gesamte Brennstoffzellensystem (Toyota BZ-Stack, Lithium-Ion Batterie und 700 bar Druckwasserstofftank) im Fahrzeugunterboden untergebracht. Das Fahrzeug wird durch vier Radnabenelektromotoren (25 kW) angetrieben. Mit einer Wasserstoff-Tankfüllung soll das Fahrzeug 500 km Reichweite erzielen. Die Anordnung des Brennstoffzellensystems, der lange Radstand und die genutzte Drive-by-Wire Technologie ermöglicht beim FINE-N eine große Designfreiheit in der Gestaltung des Fahrzeuginnenraums.

Ebenfalls analog zum Kooperationspartner GM hat Toyota verkündet, die entwickelte Brennstoffzellen-Technologie auch im stationären Bereich einzusetzen. Ab 2005 wolle man erdgasbetriebene 1 kW-Brennstoffzellen für die Anwendung im Heizungsmarkt vertreiben²⁷³. Das System, das als das kompakteste in diesem Anwendungsbereich in Japan gilt, wird zur Zeit schon in Kooperation mit einem Erdgasanbieter in Japan getestet. Toyota erhofft sich beim Einstieg in den Markt für stationäre Brennstoffzellen Synergie- und Skaleneffekte.

3.10.4 Über Umweltschutz zum Marktführer in der Automobilindustrie

Toyotas Brennstoffzellenstrategie muss im Zusammenhang mit der allgemeinen Konzernstrategie und der Gesamtstrategie im Bereich alternative Antriebe gesehen werden. Wie schon in der Einleitung dieses Kapitels beschrieben, spielt der Umweltschutz in der langfristigen Gesamtstrategie des Konzerns eine erhebliche Rolle. In einen Special der Zeitschrift „Nikkei Business“ von 1998 über die Zukunft des Autos bezeichnen Vertreter der Produkt-Entwicklung von Toyota die „Umwelt“-Produkte der Firma als zukünftige Achse des Unternehmens. „There is no doubt that the current of thought among the pivotal players at Toyota is that it is now a period of dramatic change in automotive technology, and the company has the change to jump up from its position as the world’s third largest car company to the top position“²⁷⁴. Die Entwicklung und die Vermarktung von „Umwelt“-Autos und die (Image-)Führerschaft im Bereich alternativer Antriebe ist für Toyota der Weg Wettbewerbsvorteile zu erlangen. Toyota soll sogar angekündigt haben, ab 2012 keine Autos mit reinem Verbrennungsmotoren mehr verkaufen zu wollen, sondern nur noch Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeuge²⁷⁵.

²⁷² Vgl. Toyota-Pressemitteilung vom 14.10.2003: „Toyota to Present „Ecology & Emotion“ at 37th Tokyo Motor Show“. Online-Dokument: www.toyota.co.jp/en/news/03/1015b.html; vgl. auch Hydrogen & Fuel Cell Letter, November 2003.

²⁷³ Vgl. HyWeb-Gazette 3. Quartal 2002.

²⁷⁴ Vgl. Tamura, Kenji/Hashimoto, Muneaki/Kaneko, Kenji (1998): Special: “The Future of Cars“. Next Generation Technology Forces Major Changes in the Industrial Structure. In: Nikkei Business vom 12.10.1998.

²⁷⁵ Vgl. www.forum-brennstoffzelle.de/index.php?main=info&news=akt&akt=230).

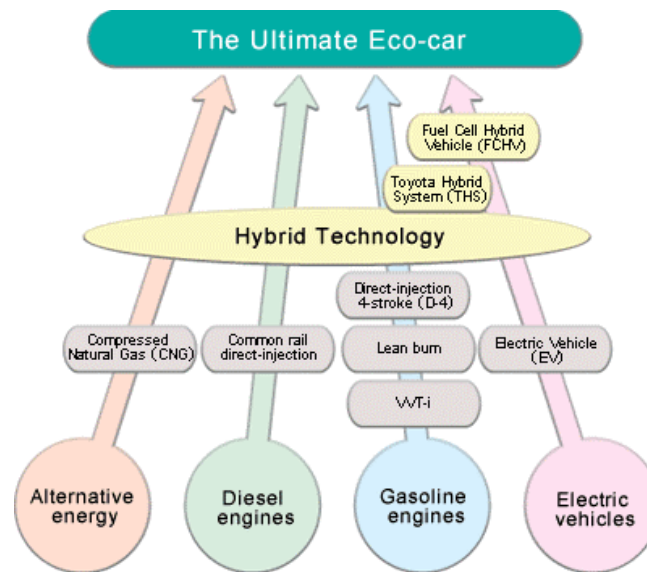


Bild 86: Toyotas „Öko-Auto“-Strategie (Quelle: Toyota)

Kennzeichen der Strategie im Bereich alternativer Antriebe sind neben der Kerntechnologie auch die folgenden zwei Basisprinzipien: „(1) Develop all core technologies on its own without depending on other companies, and (2) Take various approaches to be able to cope with any social circumstances“²⁷⁶. Auch bei der Entwicklung der Brennstoffzelle verfährt Toyota nach diesen Prinzipien und profitiert davon. Zum einen hat das Unternehmen von Anfang an auf die Eigenentwicklung der Brennstoffzelle gesetzt. Zum anderen kann man bei der Entwicklung des Brennstoffzellenantriebs auf Erfahrungen mit anderen alternativen Antrieben zurückgreifen und mögliche Synergieeffekte nutzen. Ein weiterer wesentlicher Baustein von Toyotas Antriebsstrategie wird ebenfalls am Beispiel der Hybridtechnologie bzw. der Markteinführung des ersten seriengefertigten Hybridfahrzeuges, dem Toyota Prius, deutlich. Toyota verfährt bei neuen Technologie nach dem Motto: „[p]ush the technology out the door and onto the streets“²⁷⁷. Zudem ist man bereit, die neue Technologie zunächst zu subventionieren und nach der „buy your way into market“-Strategie zu verfahren. Dieses strategischen Vorgehen ist riskant und ressourcenintensiv, erweist sich aber inzwischen als erfolgreich. Denn trotz der Kritik fast aller anderen Automobilunternehmen, dass die Hybridtechnologie keinen Sinn mache, dass Toyota viel Geld dabei verlieren würde und dass es sich nur um einen Marketing-Trick von Toyota handle, hat Toyota inzwischen mehr als 150.000 Hybridfahrzeuge weltweit verkauft²⁷⁸. Die zweite Generation des Toyota Prius mit einem verbesserten Toyota Hybrid System ist im Herbst 2003 auf den Markt gekommen. Bis 2005 peilt der japanische Hersteller sogar eine Jahresproduktion von 300.000 Hybridfahrzeugen an. Inzwischen haben viele andere Autohersteller die Markteinführung von Hybridfahrzeugen angekündigt. Dabei kaufen einzelne Hersteller, wie Nissan, wegen des eigenen Entwicklungs-

²⁷⁶ Vgl. www.toyota.co.jp/irweb/corp_info/eco/sp.html.

²⁷⁷ Vgl. Rauch, Jonathan (2003): With a Hum Instead of a Roar, the Fuel Cell is Here. In: The Atlantic online vom 08.01.2003. Online-Dokument: www.theatlantic.com/politics/nj/rauch2003-01-08.htm.

²⁷⁸ Vgl. Anzeige „aim: zero emissions“ von Toyota in The Economist vom 06.12.2003.

rückstandes das Toyota Hybrid System ein. Toyota habe inzwischen, wie Koji Endo, ein Analyst der Credit Suisse First Boston, sagt, einen De-facto-Standard bei der Hybridtechnologie gesetzt²⁷⁹. Zudem kann Toyota unter realen Bedingungen Erfahrungen mit der neuen Technologie sammeln. Diese Mischung aus Lern- und „First Mover“-Strategie verfolgt Toyota auch im Bereich der Brennstoffzelle. Toyota ist neben Honda der erste Automobilkonzern der Brennstoffzellen-Pkw in Kundenhand gibt. Dieses frühe Sammeln von Markterfahrungen mit den eigenen Brennstoffzellenfahrzeugen geschieht auch mit dem Wissen, dass frühestens ab 2010, wie alle Verantwortlichen von Toyota in Interviews betonen, mit einer Markteinführung im größeren Stil zu rechnen sei.

Im Bereich Kraftstoffe hält sich Toyota mehrere Optionen offen. Bei Abschluss der strategischen Partnerschaft mit GM und Exxon Mobil Anfang 2001 verkündeten die Beteiligten, dass man Wasserstoff langfristig für die beste Kraftstoffalternative für den Einsatz in der Brennstoffzelle hält, aber kurz- und mittelfristig auf ‚sauberes‘ Benzin (CHR) setze²⁸⁰. Der Vorteil von CHR ist die mögliche Koexistenz von Verbrennungsmotor und Brennstoffzelle (vgl. Kapitel 3.5.4).

3.10.5 Weitere Brennstoffzellen- und Wasserstoffaktivitäten im Toyota-Konzern

3.10.5.1 Daihatsu

Beginn der Wasserstoff-/Brennstoffzellen-Aktivitäten Angekündigte Serienproduktion	Fahrzeuge [Konzept- (K) Prototyp- (P) Demonstration- (D) Seriennahes- (Sn) Serienfahrzeug (S)]	Höhe der Investitionen/ Anzahl der involvierten Mitarbeiter	Teilnahme an Demonstrationsprojekten [Kalifornien (CaFCP) Japan (JHFC) Deutschland/Berlin (CEP)]	Partnerschaften/ Kooperationen	Strategie
Daihatsu beschäftigt sich seit 1996 mit Brennstoffzellen-Technologie Keine Ankündigung	Daihatsu Move EV-FC (1999) CH ₃ OH-Hybrid-BZ (P) Daihtsu Move FCV-K_II (2001) CGH ₂ -Hybrid-BZ (D)	Beides unbekannt	Straßentest von 2 FCV-K_II seit Anfang 2003 in Japan	Seit 1999 Kooperation von Daihatsu und Toyota bei BZ-Anwendungen im Kleinwagensegment	Keine Strategie kommuniziert

Tabelle 16: Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten von Daihatsu

Das japanische Automobilunternehmen Daihatsu, ein Tochterunternehmen von Toyota (Toyota hält 51 % der Anteile), das auf Kleinwagen spezialisiert ist, hat sich seit 1996 ebenfalls verstärkt mit der Brennstoffzellentechnologie beschäftigt. Zwei Brennstoffzellen-Kleinstwagen auf Basis des Serienmodells „Move“ hat Daihatsu bis heute präsentiert. Im Oktober 1999

²⁷⁹ Vgl. Dawson, Chester (2002): Commentary: Fuel Cells: Japan’s Carmakers Are Flooring It. In: BusinessWeek online 23.December 2002. Online: Dokument: www.businessweek.com/magazine/content/02_51/b3813084.htm.

²⁸⁰ Vgl. HyWeb-Gazette 2. Quartal 1999; www.toyota.com/about/environment/partnerships/gm_exxon.html.

auf der Tokyo Motor Show zeigte man den methanolbetriebenen Move EV-FC. Das Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug war mit einer 16 kW Brennstoffzelle und einer Nickel Metallhydrid-Batterie ausgestattet.



Bild 87: Daihatsu Move FCV-K_II (Quelle: Daihatsu)

Seit 1999 kooperieren Daihatsu und Toyota in der Entwicklung der Brennstoffzellen-Technologie. Diese Kooperation wird deutlich beim zweiten Brennstoffzellen-Fahrzeug von Daihatsu, das vom Aufbau dem FCHV-4 von Toyota ähnelt. Das Daihatsu Move FCV-K_II ist ebenfalls ein Brennstoffzellen-Hybridfahrzeug mit Toyota-Brennstoffzelle (30 kW), Toyota Hybrid System und Druckwasserstofftank (250 bar). Das Fahrzeug hat eine Reichweite von 120 km und eine Spitzengeschwindigkeit von 105 km/h. Nach der Zulassung durch die staatlichen Behörden werden seit Anfang 2003 zwei Daihatsu Move FCV-K_II auf öffentlichen Straßen in Japan für 3 Jahre getestet²⁸¹.

3.10.5.2 Hino Motors

Beginn der Wasserstoff-/ Brennstoffzellen-Aktivitäten Angekündigte Serienproduktion	Fahrzeuge [Konzept- (K) Prototyp- (P) Demonstration- (D) Seriennahes- (Sn) Serienfahrzeug (S)]	Höhe der Investitionen/ Anzahl der involvierten Mitarbeiter	Teilnahme an Demonstrationsprojekten [Kalifornien (CaFCP) Japan (JHFC) Deutschland/Berlin (CEP)]	Partnerschaften/ Kooperationen	Strategie
Hino stellt 2001 den ersten Prototypen eines BZ-Busses vor Keine Ankündigung	Hino FCHV-Bus1 (2001) CGH ₂ -Hybrid-BZ (P) Hino FCHV-Bus 2 (2002) CGH ₂ -Hybrid-BZ (D)	Beides unbekannt	Teilnahme an der JHFC, in dessen Rahmen der Hino FCHV-Bus2 im Liniendienst in Tokio ab Mitte 2003 getestet wird	Kooperation mit Toyota bei BZ-Anwendungen für Stadtbusse	Unbekannt

Tabelle 17: Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten von Hino

Auch beim Lkw- und Bushersteller Hino Motor, ebenfalls eine Tochter von Toyota (50,1% Anteil), beschäftigt man sich mit der Brennstoffzelle. Hino Motor hat in Kooperation mit Toyota zwei Brennstoffzellen-Stadtbusse entwickelt und aufgebaut.

²⁸¹ Vgl. Hydrogen & Fuel Cell Letter, November 2001.



Bild 88: Hino/Toyota FCHV-Bus 2 (Quelle: Toyota)

Der FCHV-Bus1, basierend auf dem Hino Niederflrbus HU2PMEE, wurde 2001 vorgestellt. Er wird betrieben von einer Toyota Brennstoffzelle (90 kW) und ist mit dem Toyota Hybrid System ausgestattet. Die Druckwasserstofftanks (250 bar) sind auf dem Dach des Busses untergebracht. Das Fahrzeug hat eine Reichweite von 300 km und eine Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h. Der FCHV-Bus2, der 2002 präsentiert wurde, basiert auf dem Hino HU2PMEE Blue Ribbon City Bus. Der Brennstoffzellen-Hybridbus wird von zwei Toyota-Brennstoffzellen (insgesamt 180 kW) angetrieben. Die Druckwasserstofftanks (350 bar) sind ebenfalls auf dem Dach angebracht. Der FCHV-Bus2 wird ab Sommer 2003 im regulären Liniendienst in Tokio eingesetzt. Dieser Test findet im Rahmen des Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstrationsprojektes statt.

3.11 Volkswagen

3.11.1 Überblickstabelle VW

Beginn der Wasserstoff-/Brennstoffzellen-Aktivitäten Angekündigte Serienproduktion	Fahrzeuge [Konzept- (K) Prototyp- (P) Demonstration- (D) Seriennahes- (Sn) Serienfahrzeug (S)]	Höhe der Investitionen/ Anzahl der involvierten Mitarbeiter	Teilnahme an Demonstrationsprojekten [Kalifornien (CaFCP) Japan (JHFC) Deutschland/Berlin (CEP)]	Partnerschaften/ Kooperationen	Strategie
VW beschäftigt sich seit 1996 im Rahmen eines EU-Projektes mit der Brennstoffzelle Eine Serienproduktion von BZ-Fahrzeugen ist nicht angekündigt	VW Bora HyMotion (2000) LH ₂ -BZ (D) Bora Hy Power (2002) CGH ₂ -BZ (Supercapitors) (P) Audi A2 (2003) LH ₂ -Hybrid-BZ (K)	Beides unbekannt	Seit 11/1999 Teilnahmen an der CaFCP, in dessen Rahmen der VW Bora HyMotion getestet wird	Partner im von VW geleiteten EU-Projekt CAPRI (1996-2000) waren u.a. Volvo und Johnson Matthey Bora HyPower ist in Kooperation mit dem Paul Scherrer Institut (Schweiz) gebaut worden. VW kooperiert bei der Treibstoffentwicklung mit Shell	VW glaubt, dass die Brennstoffzelle sich erst in 20 Jahren durchsetzt Anstatt auf die Brennstoffzelle setzt VW auf die Verbesserung des konventionellen Verbrennungsmotors und auf eine evolutionäre Kraftstoffstrategie, in dessen Mittelpunkt der aus Biomasse hergestellte Designerkraftstoff „Sunfuel“ steht

Tabelle 18: Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten von Volkswagen

3.11.2 Einleitung

Volkswagen (VW) hat sich bis heute nur sehr begrenzt im Bereich Brennstoffzelle engagiert, insbesondere im Vergleich zu allen anderen deutschen Automobilkonzernen. Verschläft VW die Zukunft, wie der Spiegel sich vor dem Hintergrund dieses geringen Engagement fragt?²⁸² Dies würde VW verneinen, und auf eine andere Strategie im Bereich Reduktion von Emissionen und alternative Kraftstoffe verweisen. VW attestiert zwar Brennstoffzellenfahrzeugen „das Potential, eine in allen Nutzungskriterien vollwertige Alternative zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor zu werden“ und sieht Wasserstoff ebenfalls als Kraftstoff der Zukunft, aber der Konzern hat dabei einen anderen Zeithorizont als der überwiegende Teil der Automobilindustrie. Nennenswerte Stückzahlen der Anwendung von Wasserstoff in Kombination mit einem Brennstoffzellenantrieb im Pkw gibt es laut Einschätzung von VW frühestens ab 2015. Reale Chancen einer Produktion in größeren Stückzahlen räumt VW Brennstoffzellenfahrzeugen frühestens ab 2020 ein.

3.11.3 Brennstoffzellenentwicklung mit begrenzter Kraft

VW beschäftigte sich mit der Brennstoffzelle zunächst im Rahmen des EU-geförderten Forschungsprojektes CAPRI (EU-Förderung ca. 2 Mio. Euro; Gesamt: ca. 4 Mio. Euro). Das von VW koordinierte und mit den Projektpartner Johnson Matthey (GB), Volvo und dem niederländischen Forschungsinstitut ECN durchgeführte EU-Projekt (1996-2000) hatte die Entwicklung und den Aufbau eines Brennstoffzellen-Hybrid-Demonstrationsfahrzeuges zum Ziel. Das Fahrzeug sollte mit einem Methanol-Reformer ausgestattet werden. Neben der von Ballard erworbenen Brennstoffzelle war gedacht, das Fahrzeug (VW Bora Variant) mit einer Batterie zu bestücken, die sowohl als Energiespeicher dienen sollte, wie auch bei Spitzenleistungen als zusätzliche Energiequelle.



Bild 89: VW Bora HyMotion (Quelle: VW)

Das erste Brennstoffzellenfahrzeug, das VW im November 2000 tatsächlich präsentiert hat, ist der VW-Bora HyMotion. Dieses mit einer Brennstoffzelle (75 kW) von International Fuel Cell (IFC)/UTC Fuel Cells ausgestattete Konzeptfahrzeug tankt flüssigen Wasserstoff und verfügt über eine Reichweite von 350 km bei einer Höchstgeschwindigkeit von 140 km/h. Der

²⁸² Vgl. o.V. (2002): VW-Brennstoffzellenauto: Über den Berg. Spiegel-Online vom 04.02.2002. Online-Dokument: www.spiegel.de/auto/news/0,1518,180658,00.html .

Bora HyMotion wird im Rahmen der California Fuel Cell Partnership, dem bis dato einzigen Demonstrationsprojekt, an dem VW teilnimmt, getestet.

Einen zweiten VW-Brennstoffzellenprototyp, den Bora HyPower, hat das Schweizer Paul-Scherrer-Institut (PSI) in Zusammenarbeit mit VW und anderen Partner²⁸³ entwickelt²⁸⁴. Der Bora HyPower wurde im Januar 2002 in den Schweizer Alpen einem „Alpenpass-Test“ unterzogen²⁸⁵. Der Prototyp zeichnet sich durch eine von PSI und der ETH Zürich entwickelte Brennstoffzelle (40 kW) aus, die über eine neue Membrantechnik verfügt. Beide Neuentwicklungen machen die Zellen erheblich preiswerter. Anstatt eine Batterie als Pufferspeicher zu nutzen, verfügt der Bora HyMotion über so genannte „Supercaps“. Dies sind zu größeren Gruppen zusammengeschaltete Hochleistungskondensatoren, die mit rekuperierter kinetischer Energie (zurückgewonnener Bremsenergie) aufgeladen werden, und diese Energie konzentriert abgeben können, wenn vom Elektromotor des Brennstoffzellenautos kurzzeitig Spitzenleistungen gefordert werden. Der Bora HyPower verfügt über eine Reichweite von bis zu 150 km und eine Spitzengeschwindigkeit von 115 km/h. Treibstoff ist Druckwasserstoff.



Bild 90: VW/PSI Bora HyPower (Quelle: PSI)

Auch die VW-Tochter Audi beschäftigt sich im Rahmen der Forschung zu alternativen Antrieben mit der Brennstoffzelle²⁸⁶. Ein erstes Konzeptfahrzeug ist ein Audi A2 mit einem Brennstoffzellen-Hybridantrieb. Das Fahrzeug wird mit einer 58 kW-Brennstoffzelle und einer Nickel-Metallhydrid-Batterie betrieben und fährt mit Flüssigwasserstoff. Weitere For-

²⁸³ Die anderen Partner sind die ETA Zürich, FEV Motorentechnik GmbH (Aachen), montena SA, EPF Lausanne. Das Projekt wurde finanziell unterstützt von dem Schweizerischen Bundesamt für Energie und der AMAG Schweiz AG (vgl. http://www.psi.ch/news_events/pressemitteilungen/kurzmit_brennstauto.html).

²⁸⁴ Vgl. www.sunfuel.de/kss_deu/hypower_1.html .

²⁸⁵ Vgl. o.V. (2002): VW-Brennstoffzellenauto: Über den Berg. Spiegel-Online vom 04.02.2002. Online-Dokument: www.spiegel.de/auto/news/0,1518,180658,00.html . Mit dem Bora HyPower wurde gleichzeitig ein Bora TDI, der mit dem synthetisch gewonnenen Flüssigtreibstoff „SunFuel“ betrieben wird, getestet.

²⁸⁶ Vgl. Paulus, Ingrid (2003): Innovation und Effizienzsteigerung – Evolution der Fahrzeugkonzepte. In: TÜV Süddeutschland (Hrsg.): Energiewelt Wasserstoff: Wissen, Technologie, Perspektive. Brennstoffzellen und Verbrennungsmotoren. München, S. 44/45.

schung an dem Fahrzeug wird aus dem Zukunftsinvestitionsprogramm der deutschen Bundesregierung mit 2,4 Mio. € gefördert²⁸⁷.

Obwohl die Konzernmutter VW seit 2001 über ein neugebautes Forschungszentrum Brennstoffzelle in Isenbüttel bei Wolfsburg verfügt, halten sich die Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen im VW-Konzern in Grenzen. Dies wird u.a. an der nur geringen Anzahl vorgestellter Brennstoffzellenprototypen deutlich. Zudem haben sowohl der alte wie auch der neue Vorstandsvorsitzende von VW sich mehr oder weniger gegen Wasserstoff und Brennstoffzelle ausgesprochen. Während Ferdinand Piëch im Frühjahr 2001 erklärte²⁸⁸, er wolle weitgehend vom Wasserstoff abgehen und lieber auf Designer-Sprit aus Biomasse als Treibstoff für die Brennstoffzelle setzen, denkt der neuen Vorstandsvorsitzende Bernd Pischetsrieder, dass die „Alternative zum heutigen Benzinmotor ..., auch wenn es langweilig klingt, ein besserer Benzinmotor“ ist²⁸⁹. Man arbeite zwar auch an der Brennstoffzelle, werde sich aber auf die Entwicklung eines neuen umweltfreundlicheren synthetischen Treibstoffes konzentrieren. Ergänzend zur Entwicklung eines neuen Kraftstoffes entwickelt VW eine neue Motorengeneration (Combined Combustion System), die die Verbrauchsvorteile des Dieselmotors mit den Emissionsvorteilen des Ottomotors verbinden soll. Das begrenzte Engagement von VW in Bezug auf die Brennstoffzelle, lässt sich also mit VWs strategischer Schwerpunktsetzung erklären, die sich aus Verbesserung des konventionellen Fahrzeugmotors und einer alternativen Kraftstoffstrategie zusammensetzt. Die Kraftstoffstrategie soll im Folgenden beschrieben werden.

3.11.4 „Sunfuel“ – VWs alternative Kraftstoffstrategie

VW hat eine Stufenstrategie für die Transformation von fossilen Treibstoffen zu einer Wasserstoffwirtschaft entwickelt²⁹⁰, die auf folgenden Prämissen beruht:

- Die Brennstoffzelle setzt sich als Automobylantrieb erst in zwanzig Jahren durch.
- Wasserstoff als Kraftstoff macht nur zum Betrieb einer Brennstoffzelle Sinn.
- Die Transformation der Kraftstoffinfrastruktur geschieht evolutionär und nicht revolutionär.

Aufgrund dieser Prämissen und um in näherer Zukunft einem umweltfreundlicherem Autofahren näher zu kommen, hat sich VW, neben der Verbesserung des konventionellen Antriebs, die Weiterentwicklung der Kraftstoffe in Zusammenarbeit mit der Mineralölindustrie

²⁸⁷ Vgl. Auflistung der geförderten Projekte des Zukunftsinvestitionsprogramms auf der Homepage des BMWA: www.bmwi.de/textonly/Homepage/Politikfelder/Energiepolitik/Energieforschung/Energieforschung.jsp.

²⁸⁸ Vgl. Rosenkranz, Gerd (2001): Größte Baustelle. In: Der Spiegel 37/2001, S. 126-129.

²⁸⁹ Vgl. Interview mit Bernd Pischetsrieder im Stern. Online-Dokument: www.stern.de/sport-motor/autowelt/index.html?id=504635.

²⁹⁰ Vgl. www.sunfuel.de; vgl. auch König, A./Seyfried, F./Drescher, I. (2000): Fuel Reforming as Part of a Hydrogen Economy. Vortrag auf dem HYFORUM 2000. Konferenzband veröffentlicht von der EFO Energie Forum GmbH, Bonn, S. 315-319.

zur Aufgabe gemacht. Im Mittelpunkt dieser Kraftstoffstrategie steht ein synthetisch hergestellter Kraftstoff, der bezeichnenderweise als SynFuel bezeichnet wird. Da VW beabsichtigt, diesen „Designerkraftstoff“ mittelfristig aus Biomasse zu produzieren, nennt VW diesen Treibstoff „SunFuel“. Dabei hat SynFuel bzw. SunFuel mehrere Vorteile. Zum einen lassen sich laut VW sowohl konventionelle Dieselmotoren als auch die Brennstoffzelle via Reformier mit dem neuem Kraftstoff betreiben. Zum anderen könnte die etablierte Tankstelleninfrastruktur weiter genutzt werden. Und zum dritten kann der Schadstoffausstoß bei SynFuel, dank der Eigenschaften des Kraftstoffes – aromaten- und schwefelfrei –, besonders in Bezug auf Rußpartikel wesentlich verbessert werden. Zunächst plant VW den synthetischen Kraftstoff aus Erdgas zu gewinnen. Später soll das eigentliche „SunFuel“ aus einem Synthesegas hergestellt werden, das über einen Vergasungsprozess von Biomasse, wie Resthölzern, Biomüll oder tierische Abfallprodukte, gewonnen werden kann. Laut VW ist das Potential von Biomasse so hoch, dass in Zukunft ein Großteil des Treibstoffbedarf mit „SunFuel“ gedeckt werden könnte. Besonders dann, wenn gezielt schnellwachsende Pflanzen für die Treibstoffgewinnung angebaut würden. Dies könnte in Europa, laut VW, u.a. auf heute mit EU-Subventionen stillgelegten Ackerflächen geschehen. Die Vorteile der Nutzung von Biomasse wären die CO₂-Neutralität des gesamten Prozesses (well-to-wheel), ohne die Nachteile von Monokulturen, die beim Biodiesel mit dem Rapsanbau entstehen. Die gesamte von VW formulierte evolutionäre Kraftstoffstrategie wird im folgendem Schaubild dargestellt:

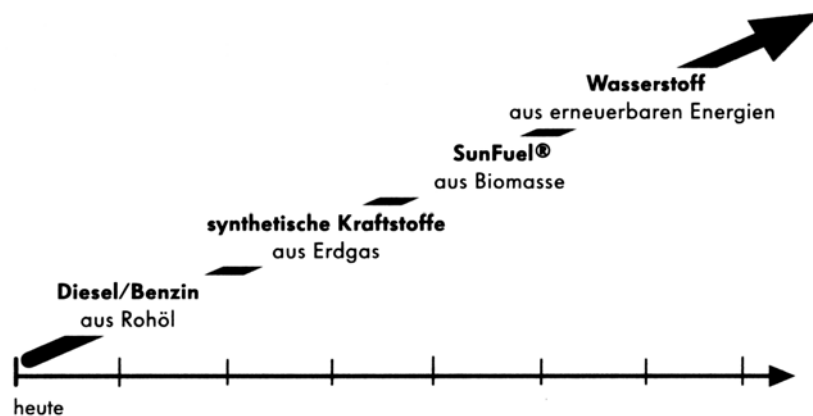


Bild 91: VW Kraftstoffstrategie (Quelle: VW)

Die heute vorherrschenden, aus Rohöl produzierten Kraftstoffe Benzin und Diesel werden nach und nach in einem ersten Zwischenschritt durch synthetische umweltverträglichere Kraftstoffe, die aus Erdgas gewonnen werden, ergänzt. Mit der Synthesegaserzeugung wird eine neue Technologie bei der Treibstoffgewinnung eingesetzt. In einem zweiten Schritt wird Erdgas durch den regenerativen „Rohstoff“ Biomasse ersetzt. Aus Biomasse wird der Designerkraftstoff „SunFuel“ gewonnen. Mit diesem „regenerativen“ Kraftstoff lassen sich auch Brennstoffzellen-Fahrzeuge betreiben. Der Vorteil dieser Stufenstrategie ist aus Sicht von VW, dass sich die Brennstoffzelle als Antrieb im Automobil etablieren könnte, ohne dass eine komplett neue Infrastruktur errichtet werden müsste. Erst wenn eine größere Anzahl von Fahrzeugen mit Brennstoffzelle tatsächlich auf der Straße fahren und regenerative Energie für die Gewinnung von Wasserstoff in ausreichendem Maße zur Verfügung steht, würde auch die Kraftstoff-Infrastruktur umgestellt werden.

Um diese Strategie umzusetzen, kooperiert VW mit dem Mineralölkonzern Shell, der bereits in einer Anlage in Malaysia mit einer „Gas to Liquids (GTL)“ Technologie aus Erdgas den Synfuel „Shell-GTL“ herstellt. In Deutschland baut Shell im sächsischen Freiberg eine Versuchsanlage mit der GTL-Technologie auf, in der ebenfalls Synfuel produziert werden soll. Seit Mai 2003 testen VW und Shell in Berlin den neuen Kraftstoff für fünf Monate in einem Demonstrationsprojekt mit 25 VW Golf TDI²⁹¹. VW kooperiert auch mit DaimlerChrysler in einem vom deutschen Bundeswirtschaftsministerium geförderten Projekt, bei dem aus Biomasse synthetischer BTL-Kraftstoff hergestellt wird (vgl. Kapitel 3.2.4).

In Bezug auf die Einführung von Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie kann VWs strategisches Vorgehen als „follower-strategy“ bezeichnet werden. Ob sich dieses eher abwartende Vorgehen als zu passiv und mit späteren Wettbewerbsnachteilen verbunden oder als realistisch erweist, wird die Entwicklung in den nächsten Jahren zeigen.

4 H2-/ BZ-Aktivitäten und Strategien der Automobilhersteller – Kooperationen und Strategievergleich

Ergänzend zu dem ausführlichen Blick auf die einzelnen Automobilhersteller im letzten Kapitel soll im Folgenden mit Hilfe einer Auswahl von überblicksartigen Schaubildern eine Vergleichbarkeit der Aktivitäten und Strategien der Automobilhersteller ermöglicht werden. Hierzu werden die wesentlichen Fragen rund um die Markteinführung der Brennstoffzellen-Technologie im Automobil beleuchtet. Die verschiedenen Schaubilder ermöglichen auf einen Blick, bestehende strategische Allianzen und Kooperationen sowie unterschiedliche strategische Wege der einzelnen Automobilhersteller zu erfassen. Deutlich wird, dass sich die Unternehmen bei der Einführung einer disruptiven Technologie wie der Brennstoffzelle in einem Spannungsfeld zwischen Konkurrenz und Kooperation bewegen.

²⁹¹ Vgl. www.volkswagen-umwelt.de/_content/magazin_1718.asp .

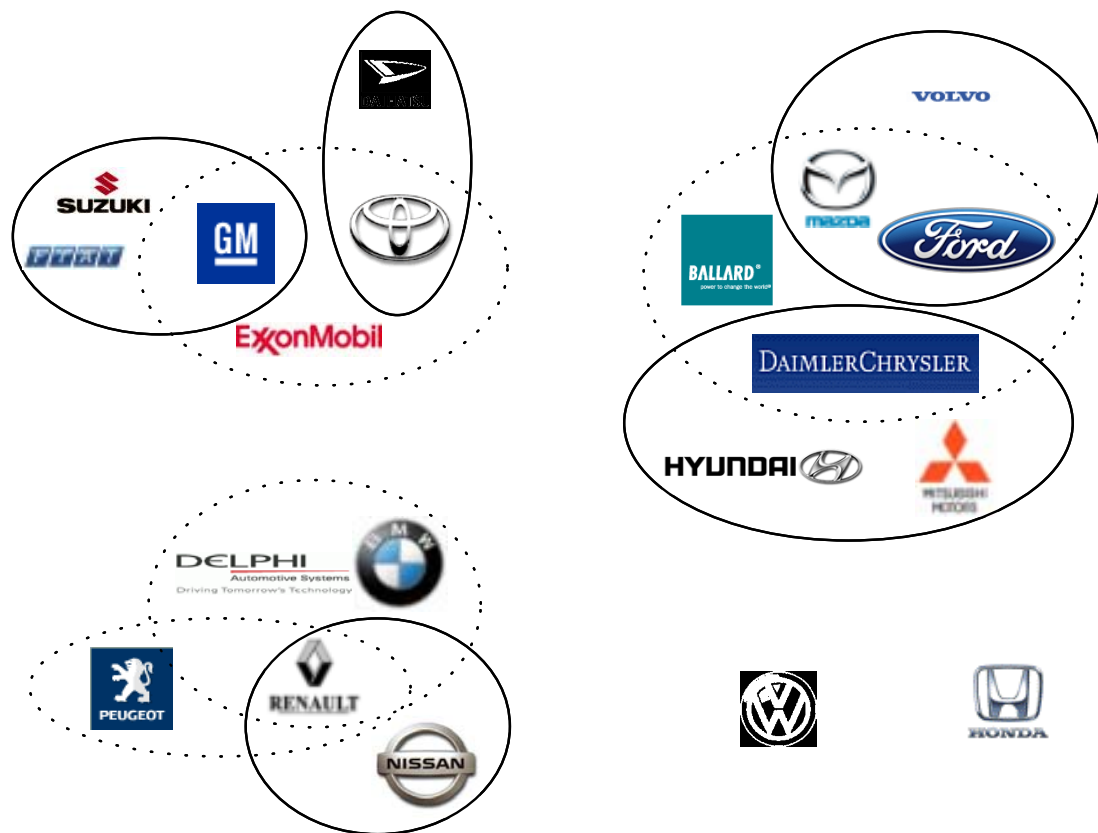


Bild 92: Brennstoffzellen-Allianzen in der Automobilindustrie (eigene Darstellung)

In der Automobilindustrie haben sich im Wesentlichen zwei Hauptallianzen zum Thema Brennstoffzelle gebildet (Bild 92). Dies ist zum einen die „Fuel Cell Alliance“ von DaimlerChrysler, Ford, Mazda und dem Brennstoffzellenhersteller Ballard, die seit 1997 bzw. 1998 existiert. Zum anderen besteht zwischen den beiden Automobilherstellern General Motors und Toyota und dem Mineralölkonzern ExxonMobil eine Allianz. Ziel dieser Allianz, die seit 1999 besteht, ist die Entwicklung von ‚sauberem‘ Benzin und eines Benzinreformers. Neben den beiden großen gibt es noch zwei weitere kleinere Allianzen. So besteht zwischen BMW, Renault und Delphi Automotive Systems seit 1999 bzw. 2000 eine Kooperation zur Entwicklung einer SOFC-Brennstoffzellen-APU und die französischen Automobilhersteller Renault und PSA Peugeot Citroen haben seit 1999 ein gemeinsames Projekt, das im Rahmen des französischen Technologie-Netzwerkes Brennstoffzelle stattfindet. Während diese Allianzen durch eine gestrichelte Kreislinie markiert sind, stellen die geschlossenen Kreise Unternehmensverflechtungen dar. Honda und VW sind bis heute keine strategischen Brennstoffzellen-Allianzen mit anderen Automobilherstellern eingegangen.

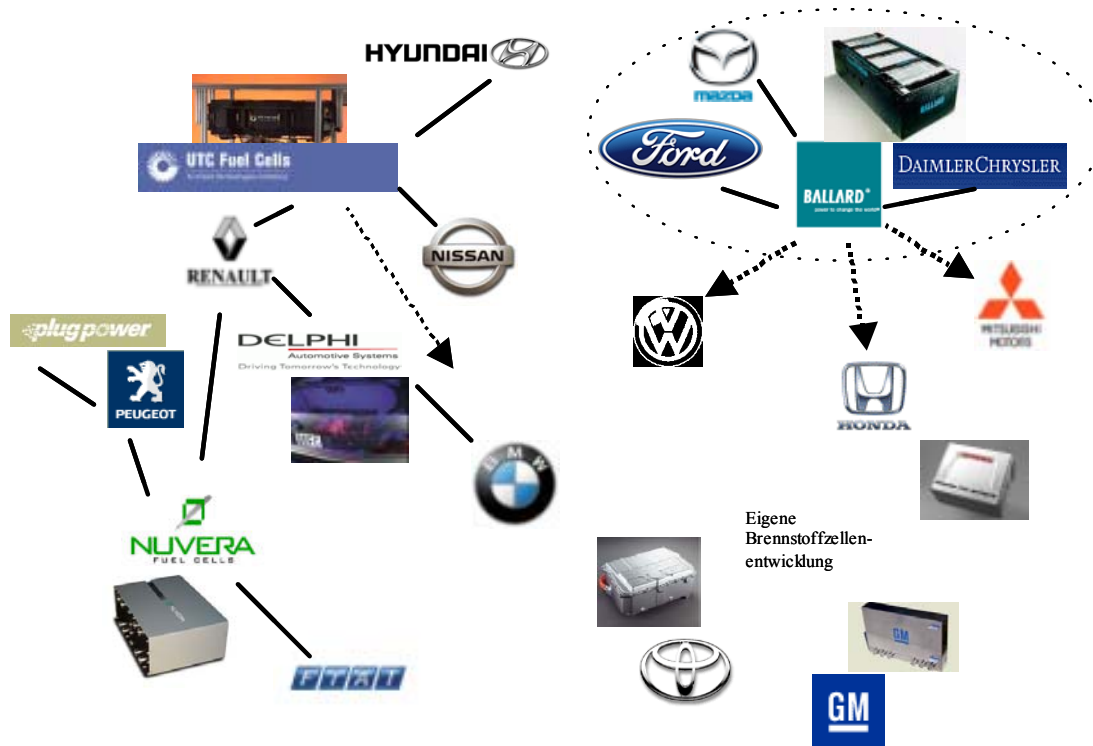


Bild 93: Kooperationen zwischen Automobil- und Brennstoffzellenherstellern (eigene Darstellung)

Eine weitere strategische Frage im Bezug auf Kooperationen ist die Entscheidung zwischen der Entwicklung einer eigenen Brennstoffzelle oder dem Kauf von Brennstoffzellen (Bild 93). Die meisten Automobilunternehmen kooperieren mit Brennstoffzellenherstellern (durchgängige Linie) bzw. kaufen Brennstoffzellen ein (gestrichelter Pfeil). DaimlerChrysler und Ford sind einen dritten Weg gegangen und haben sich beim Brennstoffzellenhersteller Ballard mit 24,2 bzw. 20 % eingekauft. Eine eigene konkurrenzfähige Brennstoffzelle haben bisher nur Toyota und General Motors entwickelt. Auch Honda hat im Oktober 2003 eine eigene konkurrenzfähige Brennstoffzelle vorgestellt und plant mittelfristig seine Fahrzeuge damit auszurüsten. Für die aktuelle Kleinserie an Brennstoffzellenfahrzeugen hat Honda jedoch die technisch ausgereifteren Ballard-Brennstoffzellen erworben.

Kooperationen in Bezug auf Brennstoffzellentechnologie und Wasserstoff-Infrastruktur bzw. Übergangskraftstoff oder -technologie gibt es auch zwischen Automobilunternehmen und Mineralölkonzernen. Diese bilden aber bis heute, mit Ausnahme der Kooperation von GM, Toyota und ExxonMobil, keine größeren und längerfristigen strategischen Partnerschaften. Eindeutige Zuordnungen zwischen einzelnen Automobilunternehmen und Mineralölkonzernen sind bis jetzt nicht möglich. Die vorhandene Zusammenarbeit ist zumeist projektbezogen.

Ein weiteres Feld für Kooperationen sind Demonstrationsprojekte (Bild 94). Drei große internationale Demonstrationsprojekte gibt es bis heute. Das ist zum einen die seit 1999 bestehende California Fuel Cell Partnership (CaFCP), zum anderen das seit März 2003 begonnene Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project (JHFC) und als drittes, dass Ende 2003

begonnende deutsche Demonstrationsprojekt, die Clean Energy Partnership Berlin (CEP). An allen drei Projekten nehmen auch Energieunternehmen teil. So sind dies bei der CaFCP BP, ChevronTexaco, ExxonMobil und Shell Hydrogen, bei der CEP Aral/BP und Vattenfall und in Japan verschiedene japanische Mineralölkonzerne²⁹².



Bild 94: Teilnehmende Automobilunternehmen bei den großen Demonstrationsprojekten (eigene Darstellung)

Neben dem Eingehen von unterschiedlichen strategischen Allianzen und Kooperationen unterscheiden sich die Strategien der Automobilhersteller aber auch in Bezug auf das strategische Vorgehen bei unterschiedlichen Fragen der Markteinführung der Brennstoffzellentechnologie. Im Bild 95 werden für die Automobilhersteller, die hierzu Stellung bezogen haben, vier relevante Aspekte der Markteinführung dargestellt.

²⁹² Vgl. www.jhfc.jp/whatisjhfc/partners.en.html.

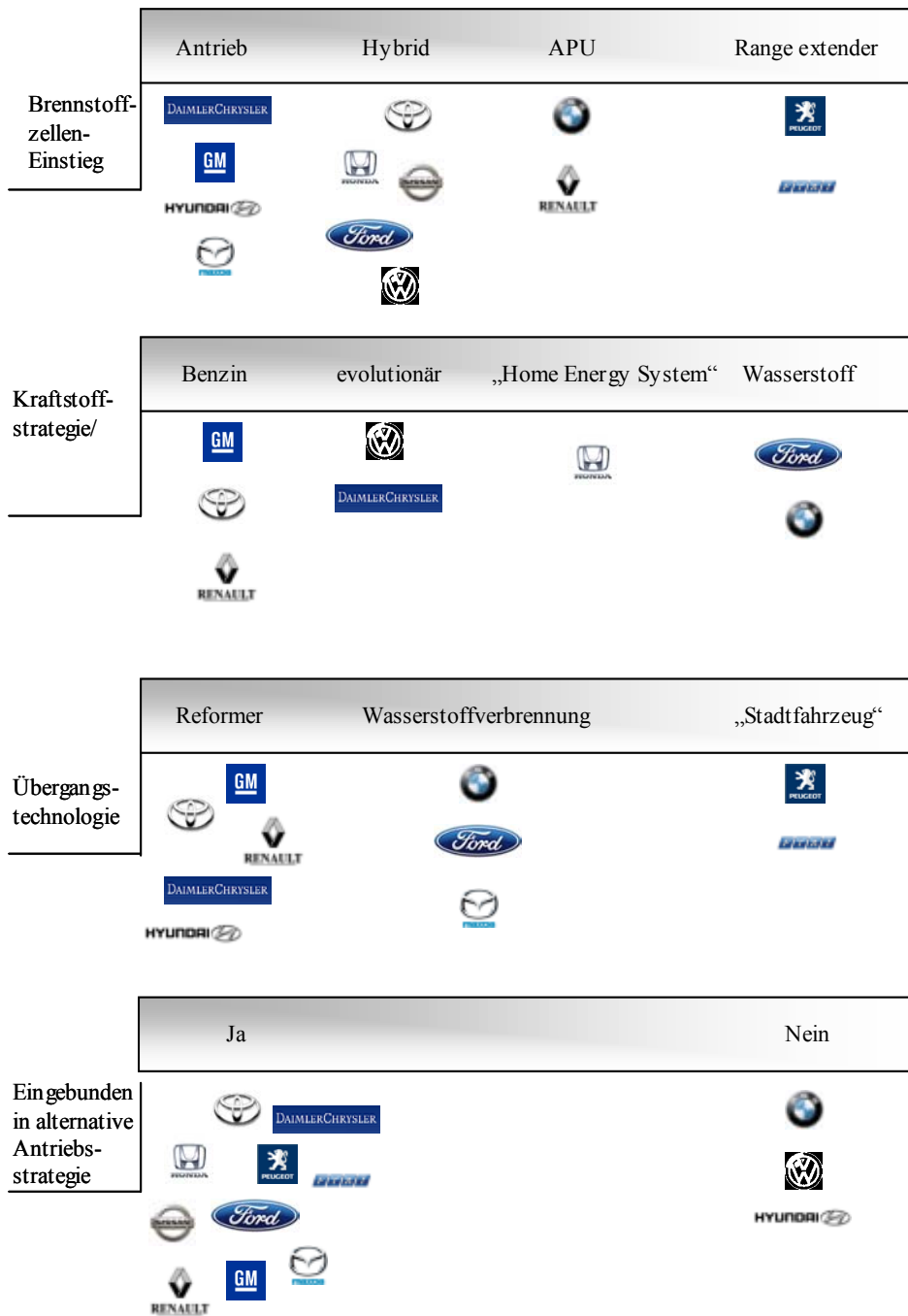


Bild 95: Strategiebausteine der Automobilunternehmen für Markteinführung der Brennstoffzelle (eigene Darstellung)

So ist ein relevanter Aspekt der Markteinführung, die Frage nach dem anfänglichen Einsatzbereich der Brennstoffzelle im Automobil bzw. wie die Brennstoffzelle ins Fahrzeug integriert werden soll. Während einzelne Hersteller die Brennstoffzelle sofort als Antrieb einsetzen wollen, vertrauen andere auf Hybridtechnologien, also die Ergänzung der Brennstoffzelle durch Batterien oder Hochleistungskondensatoren. Andere Automobilhersteller setzen die Brennstoffzelle zunächst als Auxiliary Power Unit (APU) ein oder als Range Extender von Batterie-Elektrofahrzeugen (vgl. Bild 95 oben). Neben dem Einsatzbereich der

Brennstoffzelle ist besonders die Frage nach der Wasserstoffspeicherung und -infrastruktur strategisch relevant. Die Wasserstoffspeicherung ist, wie in Kapitel 2 beschrieben, problematisch. Alternativen für den Übergang sind flüssige Kraftstoffe und noch zu verbessernde Reformertechnologien, die im Fahrzeug ‚An-Bord‘ Wasserstoff gewinnen. Beim Aufbau der Wasserstoff-Infrastruktur muss das ‚Henne-Ei-Problem‘ gelöst werden. Als Antwort auf diese offenen Fragen und Schwierigkeiten haben die Automobilunternehmen unterschiedliche Kraftstoffstrategien und für sie notwendige Übergangstechnologien identifiziert (vgl. Bild 95 Mitte). Dabei setzen einzelne Hersteller zunächst auf die etablierte Benzin-Infrastruktur und sehen den ersten Schritt bei der Etablierung der neuen Antriebstechnologie. Andere Hersteller haben eine evolutionäre Kraftstoffstrategie formuliert, bei der biogene Kraftstoffe den Übergang zu regenerativ hergestelltem Wasserstoff darstellen. Eine dritte Gruppe von Automobilherstellern will zunächst die Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur etablieren und Wasserstoff im etablierten Verbrennungsmotor einsetzen. Honda dagegen setzt auf individuelle Wasserstoffversorgungssysteme, d.h. Haus-Energiezentralen, die aus Erdgas Wasserstoff herstellen, der auch für die Fahrzeugbetankung genutzt werden kann.

Bis zur breiteren Markteinführung von wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenfahrzeugen werden nach heutiger Kenntnis vielleicht noch 10 bis 20 Jahre vergehen. In der Zwischenzeit können sich auch andere alternative Antriebstechnologien, wie ICE-Hybrid- oder Erdgasfahrzeuge am Markt etablieren. Strategisch relevant könnte demnach auch sein, dass einzelne Automobilhersteller über ein Portfolio von alternativen Antriebstechnologien verfügen. Bild 95 unten zeigt die Positionierung der Hersteller bei dieser Frage.

5 H2-/ BZ-Aktivitäten und Strategien der Automobilhersteller – Ausblick

Im abschließenden Kapitel dieser Studie soll noch ein kurzer Ausblick auf die zukünftige Entwicklung des Themas Brennstoffzelle in der Automobilindustrie gegeben werden. Dies soll aus einer innovationstheoretischen Perspektive geschehen. Konkret soll zum einen die einzige in einem wissenschaftlichen Kontext veröffentlichte Prognose bzw. Markteinschätzung über Brennstoffzellen-Autos vorgestellt werden. Zum anderen, da das Automobil nur ein Anwendungsfeld der Brennstoffzelle ist, soll ein möglicher Diffusionspfad der Brennstoffzellentechnologie aufgezeigt werden.

Die Problematik radikaler oder disruptiver Innovation ist ein häufig beschriebenes Thema der Innovationsforschung. Gerade die Automobilindustrie ist aus unterschiedlichen Gründen eine Paradebeispiel für die Schwierigkeit, eine einmal eingeschlagene technologische Trajektorie zu verlassen. Insbesondere sind hier das ‚Productivity Dilemma‘²⁹³, die Komplexität des

²⁹³ Vgl. Abernathy, William J. (1978): *The Productivity Dilemma: Roadblock to Innovation in the Automobile Industry*. Baltimore/London: John Hopkin University Press.

technischen Artefaktes ‚Automobil‘²⁹⁴, die kognitive Fixierung auf die etablierte Fahrzeugtechnologie und die Inertia des großtechnischen Systems Automobil²⁹⁵ zu nennen. Wenn man die von Schumpeter gemachte Dreiteilung des Innovationsprozesses in Invention, Innovation und Distribution als analytisches Werkzeug zu Rate zieht, dann sind radikale Produktinnovationen in der Automobilindustrie in fast allen Fällen am Übergang von Invention zur Innovation, also die Durchsetzung einer Erfindung innerhalb der Organisation, gescheitert. Die Innovationsgeschichte des ‚smart‘ ist ein beredtes Beispiel für die Widerstände und Komplikationen eines zumindest ursprünglich sehr radikalen Automobilkonzeptes²⁹⁶. Vor diesem Hintergrund scheint zur Zeit das ‚window-of-opportunity‘ in der Automobilindustrie für radikale Produktinnovation günstig wie nie zuvor. Dazu tragen neben den Rahmenbedingungen, wie Umweltgesetzgebung und der bestehenden Wettbewerbsdynamik, insbesondere die Bereitschaft von Teilen der Automobilindustrie bei, neue radikalere Ansätze im Bereich Antriebstechnologien wirklich auf den Markt bringen zu wollen.

Wie schon beschrieben, haben in den letzten Jahren frühzeitige Ankündigungen zur Markteinführung und der Innovationswettbewerb zu einer Brennstoffzellen-Euphorie in der Automobilindustrie geführt. Diese erste Euphorie ist vorbei und der zeitliche Horizont hat sich nach hinten verschoben. Während der Mythos um Wasserstoff und Brennstoffzelle auch dazu beigetragen hat, die Entwicklung voranzutreiben, hat er andererseits auch große Hoffnungen geweckt, die u.U. im Sinne eines vernünftigen Erwartungsmanagements hinderlich für die weitere Entwicklung sein könnten²⁹⁷. Innovationen, besonders so grundlegende wie die Brennstoffzelle, machen oft, wie Rosenberg es sagt „a long period of gestation“²⁹⁸ durch. Dies gilt besonders für große technische Systeme, weil Veränderungen auf vielen Ebenen notwendig sind und komplementäre Entwicklungen benötigt werden. Im Folgenden soll ein ‚realistischeres‘ Szenario für die Markteinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen vorgestellt werden, das von Ferdinand Dudenhöffer, Professor für Automobilwirtschaft an der Fachhoch-

²⁹⁴ Vgl. Clark, Kim B./Fujimoto, Takahiro (1992): *Automobilentwicklung mit System: Strategie, Organisation und Management in Europa, Japan und USA*. Frankfurt/New York: Campus.

²⁹⁵ Vgl. Weber, Matthias/Hoogma, Remco/Lane, Ben/Schot, Johan (1999): *Experimenting with Sustainable Transport Innovations: A workbook for Strategic Niche Management*. Seville/Enschede: Institute for Prospective Technological Studies.

²⁹⁶ Vgl. Weider, Marc (2002): *Organisation und technische Innovation am Beispiel der Automobilindustrie: Ein neoinstitutionalistischer Blick auf die Innovationsgeschichte des ‚smart‘*. Berlin. Unveröffentlichte Diplomarbeit.

²⁹⁷ „Fuel cells, and the hydrogen economy, clearly run the risk of excessive hype and this could yet be the biggest barrier remaining“ (Jollie, David (2002): *Market Challenges of Fuel Cell Commercialisation*. Online-Dokument: www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/IndustryInformation/IndustryInformationExternal/Reports/DisplayReport/0,1620,519,00.html). Vgl. auch Robert Steinberger-Wilckens, der die hohen Erwartungen als Hindernis sieht für eine organische und tragfähige Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie. „Dieses Vorgehen wird der Brennstoffzelle kaum noch zugestanden.“ Zudem werden durch den frühzeitig vorhandenen hohen Wettbewerb notwendige Kooperationen bei der Grundlagenentwicklung verhindert ((2002): *Brennstoffzellen-Nachrichten vom Marktdurchbruch: Ein Schritt zurück ist notwendig, um zwei Schritte voran zu kommen*. In: *H2Tec* September/2002, S. 9-11).

²⁹⁸ Vgl. Rosenberg, Nathan (1995): *Innovation’s uncertain terrain*. In: *McKinsey Quarterly* No. 3 1995, S. 170-185.

schule Gelsenkirchen, erarbeitet wurde²⁹⁹. Diese Marktabschätzung für die Verbreitung von Brennstoffzellen-Kraftfahrzeugen beruht auf einigen grundlegenden Prämissen und Annahmen (vgl. Bild 96).

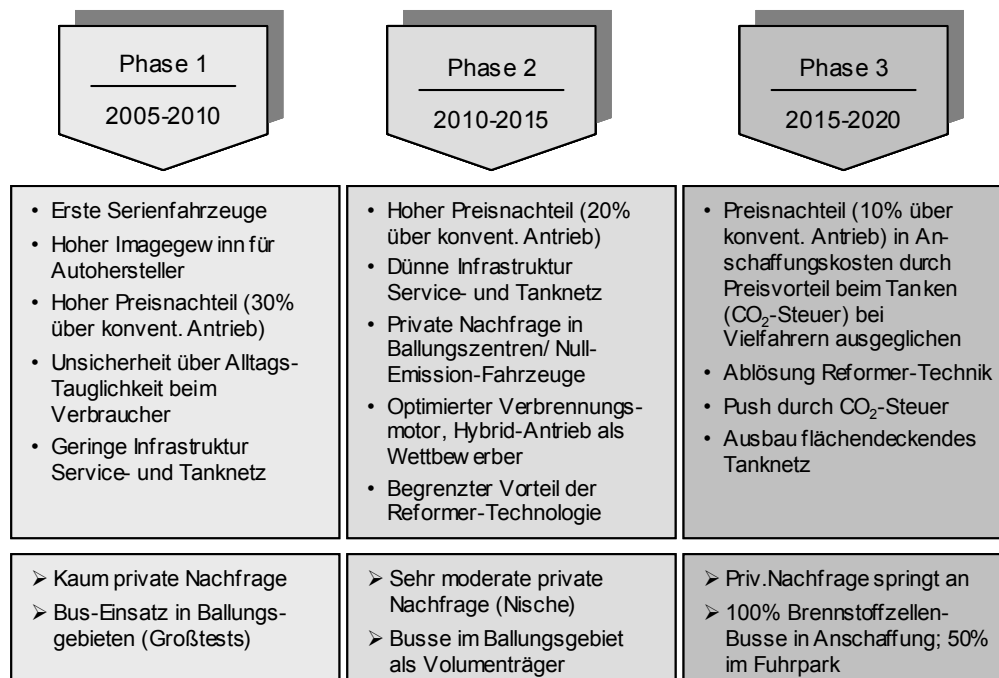


Bild 96: Überblick über zugrundeliegende Prämissen des Szenario zu Brennstoffzellenantrieben von F. Dudenhöffer (Quelle: Internationales Verkehrswesen)

Dabei geht Dudenhöffer davon aus, dass das Argument „begrenzte Erdölvorräte“ in den nächsten 25 Jahren kein wesentlicher Treiber für die Entwicklung im Bereich alternativer Antriebe sein wird. Es würde aber ab 2010 zu stärkeren Preissprüngen beim Erdöl kommen. Als entscheidenden Treiber sieht Dudenhöffer die den CO₂-Emissionen zugeschriebene Klimaerwärmung und die daraus resultierenden möglichen gesetzlichen Vorgaben, wie eine denkbare CO₂-Steuer. Dabei erwartet er eine Dynamisierung einer CO₂-Steuer ebenfalls ab 2010. Als besonderer Schrittmacher für diese Entwicklung wird die kalifornische Nullemissions-Fahrzeug-Gesetzgebung genannt. In Bezug auf die technische Entwicklung geht Dudenhöffer, besonders vor dem Hintergrund des starken Entwicklungsengagements der Automobilindustrie davon aus, dass im Zeitraum um das Jahr 2015 für die heute noch bestehenden technischen Probleme, u.a. die Wasserstoffspeicherung, marktfähige Lösungen gefunden werden. Dudenhöffer rechnet aufgrund dieser Prämissen und zusätzlicher Annahmen, wie den anfänglich hohen Anschaffungskosten von Brennstoffzellenfahrzeugen, den hohen Unsicherheiten für den Kunden – ist die neue Technologie im Alltag dauerhaft zuverlässig, wie schnell etabliert sich die notwendige Infrastruktur und welcher alternative Antrieb wird sich schlussendlich durchsetzen – mit einer zeitintensiven Markteinführung. In dem Marktszenario wird

²⁹⁹ Vgl. Dudenhöffer, Ferdinand (2001): Markteinschätzung von Brennstoffzellen-Kraftfahrzeugen. In: Internationales Verkehrswesen (53) 7+8/2001, S. 337-341.

weiter davon ausgegangen, dass aufgrund der hohen Preise der neuen Technologie bis 2020 nur in umweltsensiblen Regionen und Ballungszentren moderner Volkswirtschaften (USA, Japan, Europa) ein „theoretisches Marktpotenzial“ für Brennstoffzellenfahrzeuge vorliegt. Wie im Bild 97 zu sehen, entwickelt sich der Markt bis 2015 sehr langsam. Erst wenn die Frage der Wasserstoffspeicherung um 2015 gelöst ist und keine Reformier-Zwischenlösung mehr benötigt wird, stellt sich der eigentliche Vorteil der Brennstoffzellenfahrzeuge ein – Null Emission.

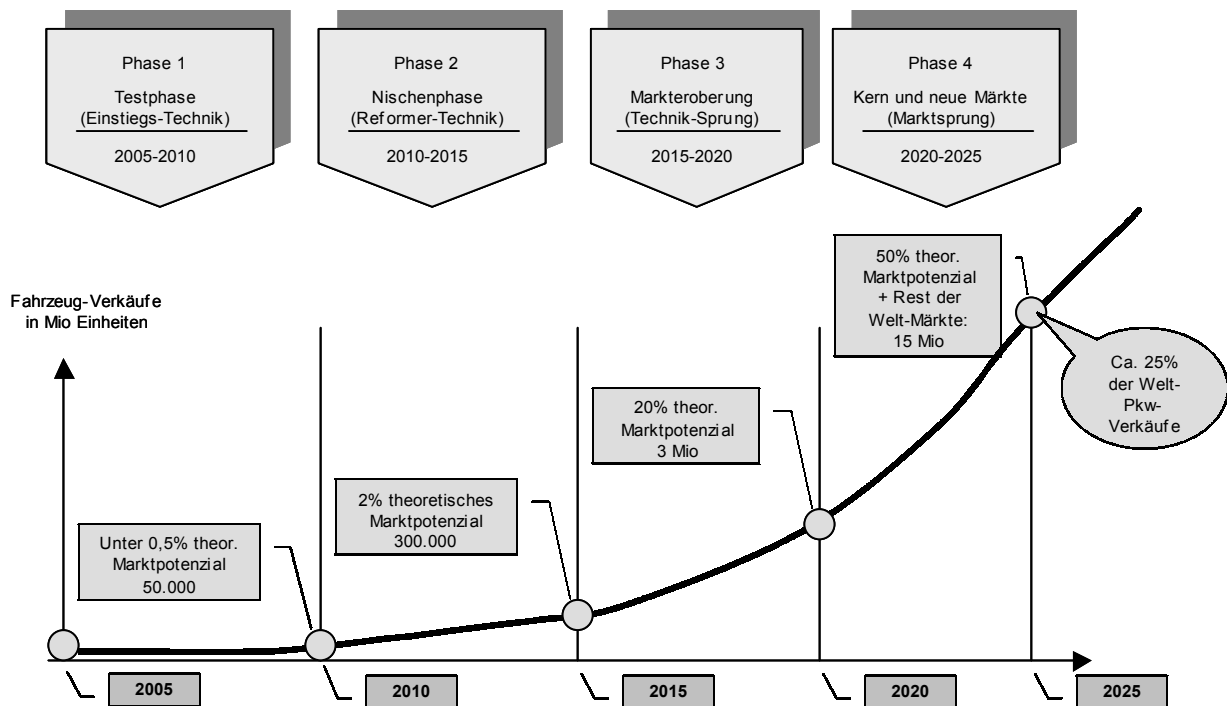


Bild 97: Szenario zu Brennstoffzellenantrieben von F. Dudenhöffer (Quelle: Internationales Verkehrswesen)

Ab diesem Zeitpunkt wird das Brennstoffzellenauto bei höherer jährlicher Fahrleistung wettbewerbsfähig. Denn der höhere Anschaffungspreis wird durch Einsparungen beim Treibstoff, der im Gegensatz zu Benzin und Diesel keiner CO₂-Steuer unterliegt, ausgeglichen. Damit kann, laut Dudenhöffer, eine Analogie zur Verbreitungsgeschwindigkeit des Dieselmotors hergestellt werden. Das Dieselmotor-Verbreitungsmuster wird deswegen ab 2015 dem weiteren Marktwachstum des Brennstoffzellenantriebs im Szenario zu Grunde gelegt. Die eigentliche Marktsprungphase sieht Dudenhöffer für Brennstoffzellenfahrzeuge aber erst zwischen 2020 und 2025.

Neben der langen Reifezeit nennt Nathan Rosenberg als Kennzeichen radikaler Innovationen zwei weitere Aspekte: „hidden usefulness“ und „unexpected applications“. Die ‚Innovation‘ und ‚Distribution‘ radikaler neuer Technologien läuft sehr oft nicht nach dem ursprünglich erwarteten Muster ab. Häufig hat dies mit fehlender Vorstellungskraft in Bezug auf zukünftige Entwicklungen zu tun. Gesellschaftliche oder komplementäre technische Entwicklungen können, da sie außerhalb der bekannten Vorstellungswelt liegen, nicht vorhergesehen werden. Auch die Nützlichkeit der Brennstoffzelle war über 100 Jahre ‚versteckt‘, bis es zur ersten

Anwendung in der Raumfahrt kam (vgl. Kapitel 2). Die wirkliche ‚Innovation‘ im Schumpeterischen Sinne geschah aber erst durch das Interesse der Automobilindustrie, die maßgeblich die Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie in den letzten Jahren vorange-trieben hat. Inzwischen zeigt sich, dass die Brennstoffzelle auch für andere Anwendungsfel-der, wie stationäre und portable Anwendungen, in Betracht kommt und diese wahrscheinlich viel früher auf den Markt kommen werden.

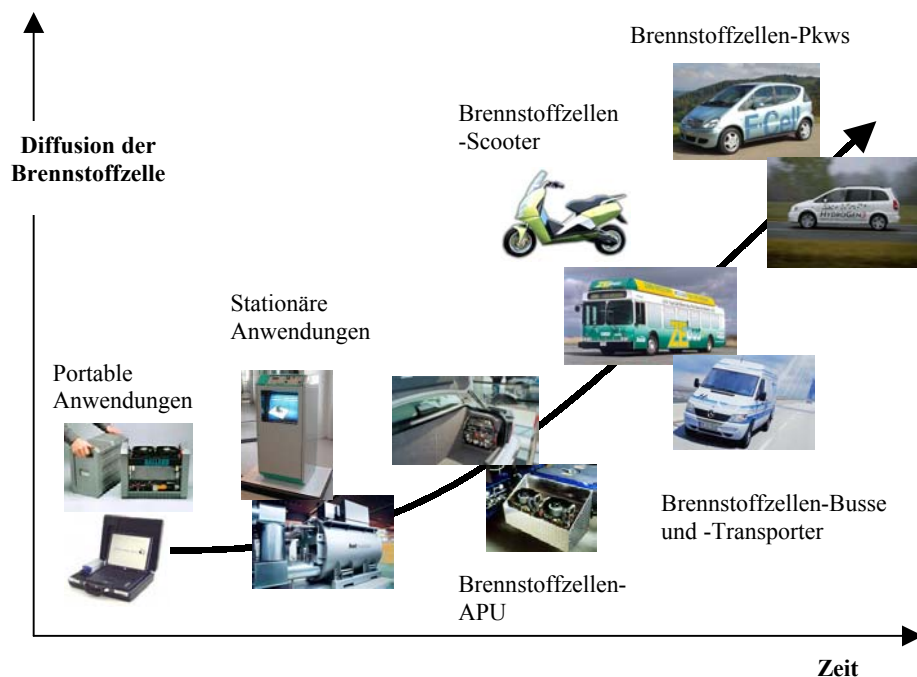


Bild 98: Möglicher Diffusionspfad der Brennstoffzellentechnologie (eigene Darstellung)

Ein erster Markt für Brennstoffzellen könnten portable Informations- und Kommunikationstechnologien sein, die in einer mobilen Gesellschaft zunehmend relevanter werden. So haben u.a. die japanischen Computerhersteller Toshiba und Casio für 2004 angekündigt, Laptops mit Brennstoffzellen-Akku auf den Markt zu bringen. Brennstoffzellen ermöglichen im Vergleich zu konventionellen Batterieakkus eine längere netzunabhängige Nutzungsdauer. Zudem kann die Methanol/Wasser-Kartusche, mit der die Brennstoffzelle betrieben wird, unterwegs unproblematisch gegen eine Neue ausgetauscht werden. Auch beim Einsatz in Handys, PDAs oder Videokameras würde dieser Mehrwert bestehen. Für die Markteinführung von neuen Technologien ist es wichtig, und darauf weist Steinberger-Wilkens hin, hochpreisige Nischenmärkte zu finden, auf denen die Mehrkosten einer neuen Technologie über den (Nutz-)Mehrwert gerechtfertigt werden können³⁰⁰. Dieser Mehrwert der Brennstoffzellentechnologie besteht auch bei stationärer Versorgung von netzfernen Geräten wie Telekommunikations-Relaisstationen oder im Bereich von Notstromaggregaten, ein Markt auf den u.a. die Markteinführungsstrategie von GM zielt (vgl. Kapitel 3.5.4). Ein zweites frühes Einsatzfeld für die

³⁰⁰ Vgl. Steinberger-Wilckens, Robert (2002): Brennstoffzellen-Nachrichten vom Marktdurchbruch: Ein Schritt zurück ist notwendig, um zwei Schritte voran zu kommen. In: H2Tec September/2002, S. 9-11.

Brennstoffzelle könnten stationäre Anwendungen sein. Zum einen ist die Brennstoffzelle für die stationäre Anwendung eher geeignet, da sie konstant im optimalen Lastbereich, dem so genannten Sweet Spot, laufen kann. Zum anderen gibt es komplementäre Trends im Energiesektor, wie Dezentralisierung und Kraft-Wärme-Kopplung, die die Markteinführung der Brennstoffzelle unterstützen.

Ein Pfad der Markteinführung bei der mobilen Anwendung der Brennstoffzelle, die höchstwahrscheinlich zeitlich am weitesten entfernt liegt, könnte wie in Bild 98 dargestellt erfolgen:

- Zunächst hält die Brennstoffzelle als APU Einzug im Auto, da die Brennstoffzelle deutliche Vorteile gegenüber der konventionellen Batterie hat, und in Zukunft der Strombedarf im Auto noch wachsen wird. Zudem würde die Entkopplung von Antrieb und Stromversorgung ein erhebliches Potenzial an Verbrauchsminderung und Schadstoffreduzierung haben.
- Als zweites setzt sich die Brennstoffzelle in städtischen Flottenfahrzeugen durch, da zum einen die Infrastrukturfrage einfacher gelöst werden kann (zentrale Tankstelle), und zum anderen in Ballungsgebieten die Emissionsbelastung ausschlaggebend ist. In Asien könnte ein Bedarf für Brennstoffzellen-Scooter entstehen, denn benzinbetriebene Mopeds und Motorroller tragen, auch aufgrund ihrer hohen Anzahl, besonders stark zum Smog in asiatischen Städten bei.
- Als Antrieb wird sich die Brennstoffzelle im Pkw, besonders wegen der Infrastrukturfrage, aber auch wegen der härteren Anforderungen an die Brennstoffzelle im automobilen Einsatz, am spätesten durchsetzen.

Dieses Trendbild stellt eine denkbare Entwicklung der Brennstoffzellen-Technologie in der Zukunft dar. Grundsätzlich gilt, dass die Zukunft der Thematik alternative Antriebe ein Feld großer Offenheit darstellt. Die Fragen, welche Strategie und welcher Ansatz sich durchsetzen werden, welche Anforderungen seitens des Marktes und der Gesellschaft zukünftig Märkte strukturieren werden und welche Technologien und Produkte chancenreich sind, eröffnen ein weites Optionsfeld für das Zustandekommen ganz unterschiedliche Konfigurationen. Sicher ist, dass sich mittelfristig die Dynamik im Themenfeld fortsetzen wird. Sich darauf strategisch einzustellen oder diesen Prozess proaktiv zu gestalten, wird einer der Erfolgsp Parameter für den Automobilhersteller in der Zukunft. Neben der Technikentwicklung spielen für die Durchsetzung radikalerer Innovationen beim Automobil aber insbesondere auch sozioökonomische und soziokulturelle Fragen eine entscheidende Rolle³⁰¹. Hier könnte die sozialwissenschaftliche Mobilitäts- und Innovationsforschung einen originären Beitrag leisten.

³⁰¹ Vgl. Hard, Mikael/Knie, Andreas (2000): Getting Out of the Vicious Traffic Circle: Attempts at Restructuring the Cultural Ambience of the Automobile Throughout the 20th Century. WZB Discussion paper FS II 00-103. Berlin: WZB; vgl. auch Steinberger-Wilckens, Robert (2002).

**Veröffentlichungsreihe der Abteilung Innovation und Organisation
des Forschungsschwerpunktes Organisationen und Wissen
Wissenschaftszentrum Berlin**

elektronisch verfügbar unter

http://www.wz-berlin.de/publikation/discussion_papers/liste_discussion_papers.de

1999

- FS II 99-101 EMILY UDLER. Israeli Business in Transition, 45 S.
- FS II 99-102 MARK B. BROWN. Policy, design, expertise, and citizenship: Revising the California electric vehicle program, 49 S.
- FS II 99-103 STEFAN BRATZEL. Umweltorientierter Verkehrspolitikwandel in Städten. Eine vergleichende Analyse der Innovationsbedingungen von „relativen Erfolgsfällen“, 74 S.

2000

- FS II 00-101 SABINE HELMERS, UTE HOFFMANN UND JEANETTE HOFMANN. Internet... The Final Frontier: An Ethnographic Account. Exploring the cultural space of the Net from the inside, 124 S.
- FS II 00-102 WEERT CANZLER UND SASSA FRANKE. Autofahren zwischen Alltagsnutzung und Routinebruch. Bericht 1 der choice-Forschung, 26 S.
- FS II 00-103 MIKAEL HÄRD UND ANDREAS KNIE. Getting Out of the Vicious Traffic Circle: Attempts at Restructuring the Cultural Ambience of the Automobile Throughout the 20th Century, 20 S.
- FS II 00-104 ARIANE BERTHOIN ANTAL, ILSE STROO AND MIEKE WILLEMS. Drawing on the Knowledge of Returned Expatriates for Organizational Learning. Case Studies in German Multi-national Companies. 47 S.

FS II 00-105 ARIANE BERTHOIN ANTAL UND MEINOLF DIERKES. Organizational Learning: Where Do We Stand? Where Do We Want to Go?, 33 S.

2001

FS II 01-101 KATRIN BÖHLING. Zur Bedeutung von „boundary spanning units“ für Organisationslernen in internationalen Organisationen, 34 S.

2002

FS II 02-101 UTE HOFFMANN UND JEANETTE HOFMANN. Monkeys, Typewriters and Networks. The Internet in the Light of the Theory of Accidental Excellence, 24 S.

FS II 02-102 UTE HOFFMANN. Themenparks re-made in Japan. Ein Reisebericht, 26 S.

FS II 02-103 WEERT CANZLER UND SASSA FRANKE. Changing Course in Public Transport: The Car as a Component of Competitive Services. Choice-Research, Report No. 2, 58 S.

FS II 02-104 WEERT CANZLER UND SASSA FRANKE. Mit cash car zum intermodalen Verkehrsangebot. Bericht 3 der choice-Forschung, 67 S.

FS II 02-105 ARIANE BERTHOIN ANTAL, MEINOLF DIERKES, KEITH MACMILLAN & LUTZ MARZ. Corporate Social Reporting Revisited, 32 S.

FS II 02-106 MARTIN GEGNER. Die Wege des urbanen Verkehrs zur Daseinsvorsorge, 63 S.

FS II 02-107 MEINOLF DIERKES, LUTZ MARZ & ARIANE BERTHOIN ANTAL. Sozialbilanzen. Konzeptioneller Kern und diskursive Karriere einer zivilgesellschaftlichen Innovation, 18 S.

FS II 02-108 CHRISTIANA WEBER UND BARBARA WEBER. Learning in and of Corporate Venture Capital Organizations in Germany. Industry structure, companies' strategies, organizational learning capabilities, 19 S.

- FS II 02-109 JEANETTE HOFMANN UNTER MITARBEIT VON JESSICA SCHATT-SCHNEIDER. Verfahren der Willensbildung und Selbstverwaltung im Internet – Das Beispiel ICANN und die At-Large-Membership, 155 S.
- FS II 02-110 KATHRIN BÖHLING. Learning from Environmental Actors about Environmental Developments. The Case of International Organizations, 40 S.
- FS II 02-111 ASTRID KARL. Öffentlicher Verkehr im künftigen Wettbewerb. Wie ein inkonsequenter Ordnungsrahmen und überholte Finanzierungsstrukturen attraktive öffentliche Angebote verhindern, 60 S.
- FS II 02-112 THOMAS SAUTER-SERVAES UND STEPHAN RAMMLER. *Delaytainment* an Flughäfen. Die Notwendigkeit eines Verspätungsservices und erste Gestaltungsideen, 83 S.
- FS II 02-113 ARIANE BERTHOIN ANTAL UND MEINOLF DIERKES. Organisationslernen und Wissensmanagement: Überlegungen zur Entwicklung und zum Stand des Forschungsfeldes, 39 S.
- FS II 02-114 ARIANE BERTHOIN ANTAL UND MEINOLF DIERKES. On the Importance of Being Earnest about Business: Overcoming liberal arts students' misconceptions about leadership in corporate change processes, 31 S.
- FS II 02-115 DANIELA ZENONE. Das Automobil im italienischen Futurismus und Faschismus. Seine ästhetische und politische Bedeutung, 72 S.

2003

- SP III 03-101 ARIANE BERTHOIN ANTAL UND VICTOR FRIEDMAN. Negotiating Reality as an Approach to Intercultural Competence, 35 S.
- SP III 03-102 ARIANE BERTHOIN ANTAL, CAMILLA KREBSBACH-GNATH UND MEINOLF DIERKES. Highest Challenges Received Wisdom on Organizational Learning, 36 S.
- SP III 03-103 ARIANE BERTHOIN ANTAL UND JING WANG. Organizational Learning in China: The Role of Returners, 29 S.

- SP III 03-104 JEANETTE HOFMANN. Die Regulierung des Domainnamensystems – Entscheidungsprozess und gesellschaftliche Auswirkungen der Einrichtung neuer Top Level Domains im Internet, 122 S.
- SP III 03-105 OLIVER SCHÖLLER UND STEPHAN RAMMLER. „Mobilität im Wettbewerb“ Möglichkeiten und Grenzen integrierter Verkehrssysteme im Kontext einer wettbewerblichen Entwicklung des deutschen und europäischen Verkehrsmarktes – Begründung eines Forschungsvorhabens, 35 S.
- SP III 03-106 FALK BERNDT UND HERMANN BLÜMEL. ÖPNV quo vadis? Aufforderung zu verkehrspolitischen Weichenstellungen im ÖPNV, 73 S.
- SP III 03-107 Tobias Wölfe und Oliver Schöller. Die kommunale „Hilfe zur Arbeit“ im Kontext kapitalistischer Arbeitsdisziplinierung, 26 S.
- SP III 03-108 MARKUS PETERSEN. Multimodale Mobilisations und Privat-Pkw. Ein Vergleich auf Basis von Transaktions- und monetären Kosten. Bericht 4 der choice-Forschung, 41 S.
- SP III 03-109 ARIANE BERTHOIN ANTAL AND VICTOR J. FRIEDMAN. Learning to Negotiate Reality: A Strategy for Teaching Intercultural Competencies, 33 S.
- SP III 03-110 UTE HOFFMANN (HG.). Reflexionen der kulturellen Globalisierung. Interkulturelle Begegnungen und ihre Folgen. Dokumentation des Kolloquiums „Identität-Alterität-Interkulturalität. Kultur und Globalisierung“ am 26./27. Mai 2003 in Darmstadt, 183 S.
- SP III 03-111 CHRISTIANA WEBER. Zeit und Zeitkompensation in der Entstehung und Entwicklung von Organisationskultur, 41 S.
- SP III 03-112 GERHARD PRÄTORIUS UND CHRISTIAN WICHERT. Integrierte Verkehrspolitik als Realtypus – mehr als die Summe von Teillösungen?, 60 S.
- SP III 03-113 CHRISTIANA WEBER UND BARBARA WEBER. Corporate Venture Capital Organizations in Germany. A Comparison, 46 S.

- SP III 03-114 MARC WEIDER, ANDRÉ METZNER, STEPHAN RAMMLER. Die Brennstoffzelle zwischen Umwelt-, Energie- und Wirtschaftspolitik. Darstellung der öffentlichen Förderprogramme für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in Deutschland, der Europäischen Union, den USA und Japan, 77 S.
- SP III 03-115 MARTIN GEGNER. Crash, Boom, Bang – Reload, Metamorphosen eines Softwareprojekts in Zeiten des New Economy-Hypes, 32 S.

Bei Ihren Bestellungen von WZB-Papers schicken Sie, bitte, unbedingt einen an Sie adressierten Aufkleber mit, sowie je Paper eine Briefmarke im Wert von Euro 0,51 oder einen "Coupon Réponse International" (für Besteller aus dem Ausland).

Please send a self-addressed label and postage stamps in the amount of 0,51 Euro or a "Coupon-Réponse International" (if you are ordering from outside Germany) for each WZB-Paper requested.

Bestellschein

Order Form

Wissenschaftszentrum Berlin
für Sozialforschung gGmbH
PRESSE- UND INFORMATIONSREFERAT
Reichpietschufer 50
D-10785 Berlin

Absender • Return Address:

<i>Hiermit bestelle ich folgende(s) Discussion Paper(s) • Please send me the following Discussion Paper(s) Autor(en) / Kurztitel • Author(s) / Title(s) in brief</i>	Bestellnummer • Order no.