

Brennstoffzellen für den Automobilbau im Wettbewerb

Gian Carle

Januar 2003

Brennstoffzellen für den Automobilbau im Wettbewerb

Gian Carle
IVT
ETH Hönggerberg (HIL)
CH-8093 Zürich

Telefon: +41-1-633 37 93
Telefax: +41-1-633 10 57
carle@ivt.baug.ethz.ch

January 2003

Kurzfassung

In dieser Arbeit wurde mit Hilfe der Wettbewerbsanalyse von Porter die Markteinführung der Brennstoffzelle als Substitutionsprodukt im Bereich der Fahrzeugs-Antriebssysteme analysiert.

Ein Resultat ist, dass die Brennstoffzellenhersteller einen hart umkämpften Markt vorfinden werden, wobei am Anfang Ballard, Nuvera und United Technologies Fuel Cells den Markt für mobile Brennstoffzellen dominieren werden. Die Verhandlungsstärke der Abnehmer ist gross, denn sie werden sich durch Fusionen weiter auf ein paar wenige grosse Konzerne konzentrieren und können mit einer Rückwärtsintegration drohen. Da hohe Summen in Forschung, Entwicklung und Produktionsmethoden investiert werden müssen, werden die Eintrittsbarrieren für den Markteintritt weiterer Hersteller sehr hoch sein. Eine starke Konkurrenz kommt von den möglichen Substitutionsprodukten. Obwohl die Brennstoffzelle im Prinzip eine ideale Energiequelle ohne lokale Kohlendioxidemissionen ist, werden optimierte Benzin- und Dieselmotoren, Hybrid- und Erdgasfahrzeuge mittelfristig bessere Wettbewerbschancen haben. Eine wichtige Rolle werden gesetzliche Rahmenbedingungen und staatliche Fördermassnahmen spielen.

Schlagworte

Automobilfirmen, Brennstoffzelle, Brennstoffzellenfahrzeuge, Erdgasfahrzeuge, Hybridfahrzeuge, Konkurrenzanalyse, Michael E. Porter, Wettbewerbsanalyse, Wettbewerbsstruktur, PEM-Brennstoffzelle

Bild auf der Titelseite: Modell eines Brennstoffzellenautos, (Heliocentris (2002))

Competition in the fuel cell industry for the automotive sector

Gian Carle
IVT
ETH Hoenggerberg (HIL)
CH-8093 Zurich

Telephone: +41-1-633 37 93
Telefax: +41-1-633 10 57
carle@ivt.baug.ethz.ch

January 2003

Abstract

In this work the specific competitive conditions, based on actual available data, were analyzed for the introduction of fuel cells as an automotive traction substitute. Porter's competitive strategy served as a technique for analyzing the fuel cell industry and the potential competitors. Several fuel cell manufacturers like Ballard, Nuvera und United Technologies Fuel Cells will enter the competitive fuel cell market. Customers will have a high degree of bargaining power, as they will merge to a few big companies and will threaten the fuel cell companies with a possible backward integration. The high sum to be invested into research, into development and production methods will lead to high market entrance barriers. A strong competition comes from the possible substitution goods. Although the fuel cell is in principle an ideal energy source without local carbon dioxide emission, substitution goods like further developed gasoline and diesel engines, hybrid and gas vehicles will have medium-term competitive advantages.

Keywords

automotive industry, car industry, competitive advantage, competitive analysis, competitive strategy, five forces model, Fuel cell, fuel cell car, gas car, hybrid car, Michael E. Porter, PEM fuel cell

1 Inhaltsverzeichnis

1	INHALTSVERZEICHNIS	4
2	EINLEITUNG	6
2.1	Nachhaltige Mobilität	6
2.2	Auswirkungen der Mobilität	7
2.3	Gesetzliche Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Mobilität	9
2.3.1	Zero Emission Vehicle Programm in Kalifornien	9
2.3.2	Kyoto-Protokoll	10
2.3.3	Entwicklungen in Europa	10
2.4	Die Brennstoffzelle	11
2.4.1	Brennstoffzellentypen	11
2.5	Neue Antriebstechnologie für den Automobilbau	13
2.5.1	Treibstoffe für den Individualverkehr	14
2.6	Aufbau der Arbeit	15
3	METHODIK	18
3.1	Wettbewerbsmodell von Porter	18
3.1.1	Bedrohung durch potentielle neue Konkurrenten	18
3.1.2	Bedrohung durch substituierende Produkte	21
3.1.3	Verhandlungsstärke der Abnehmer	22
3.1.4	Wettbewerb in der Branche	22
3.1.5	Verhandlungsstärke der Lieferanten	22
3.2	Unternehmensanalyse	23
3.3	Wettbewerbsstrategie nach Porter	23
4	RESULTATE UND DISKUSSION DER WETTBEWERBSKRÄFTE	26
4.1	Wettbewerb der Brennstoffzellenhersteller	26
4.1.1	Systemgrenzen der Firmenanalyse	27
4.1.2	A. Brennstoffzellen-Hersteller mit Prototypen	29
4.1.3	B. Brennstoffzellen-Firmen mit ersten PEM-Entwicklungs-Erfahrungen	33
4.1.4	C. Brennstoffzellen-Hersteller die einem Autokonzern gehören	35
4.1.5	Diskussion der Wettbewerbschancen der Brennstoffzellen-Firmen	36
4.1.6	Marktanteil der Brennstoffzellenfahrzeuge	37
4.1.7	Mögliche Szenarien für die Marktpenetration	38
4.1.8	Substitutionsökonomie	40
4.1.9	Diskussion der Substitutionsbedingungen	44
4.2	Verhandlungsstärke der Lieferanten	52
4.2.1	Johnson Matthey	52
4.2.2	DuPont	54
4.2.3	Diskussion der Verhandlungsstärke der Lieferanten	55

4.3	Resultate und Diskussion der Verhandlungsstärke der Abnehmer	56
4.3.1	Einleitung	56
4.3.2	DaimlerChrysler	58
4.3.3	Mazda	61
4.3.4	Nissan	62
4.3.5	Toyota	64
4.3.6	Honda	65
4.3.7	Hyundai	66
4.3.8	Mitsubishi Motors	66
4.3.9	Volkswagen	67
4.3.10	Renault	68
4.3.11	Peugeot/Citroën	68
4.3.12	Ford	70
4.3.13	General Motors/ Opel	71
4.3.14	Diskussion der Verhandlungsstärke der Abnehmer	74
4.4	Resultate und Diskussion der Wettbewerbskraft der substituierenden Produkte	78
4.4.1	Elektromobile	78
4.4.2	Hybridfahrzeuge	79
4.4.3	Erdgasfahrzeuge	80
4.4.4	Wasserstofffahrzeuge	82
4.4.5	Optimierte Benzin- und Dieselfahrzeuge	83
4.4.6	Diskussion der Bedrohung durch substituierende Produkte	85
4.5	Schlussfolgerungen	88
4.5.1	Schlüssel zum Erfolg	88
4.6	Fazit der zu erwartenden Wettbewerbskräfte	90
5	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	92
6	TABELLENVERZEICHNIS	94
7	LITERATUR	96
8	ANHANG	104
8.1	Abkürzungsverzeichnis	104
8.2	Interview mit Herrn Professor Jürgen Garcke vom 23.9.2002	106
8.3	Interview mit Herrn Philipp Dietrich vom PSI am 16.9.2002	110
8.4	Wichtige Kennzahlen der Brennstoffzellenfirmen	116
8.5	Wichtige Kennzahlen der Automobilfirmen	118

2 Einleitung

Nach dem Abschluss der Prüfungen des 3. Semesters des Nachdiplomstudiums „Betriebswirtschaft und Management für Ingenieure“ an der Zürcher Hochschule in Winterthur wird eine Diplomarbeit geschrieben. In diesem Rahmen entstand die vorliegende Arbeit. Der Wunsch des Autors war es, zwei Themen, nämlich die Wettbewerbsstrategie von Porter und den aktuellen Stand der Brennstoffzellenentwicklung im Fahrzeugbau zu kombinieren. Mittels dem Modell von Porter (1999, 2000) werden die Akteure und deren wirtschaftliche Interaktionen untersucht.

In dieser Arbeit werden die Wettbewerbsbedingungen bei der Einführung der Brennstoffzelle als Substitutionsprodukt im Bereich der Antriebssysteme analysiert werden. Als Analyseinstrument dient die Wettbewerbsanalyse von Porter, um einen Überblick über die möglichen Wettbewerbskräfte zu erhalten. Diese Analyse stützt sich auf derzeit verfügbare Daten, da die zukünftige Branchenstruktur und deren Kräfte noch relativ unbekannt sind. Auch deshalb ist nur ein Überblick möglich, da viele Faktoren in den nächsten Jahren den Markt verändern werden, die heute noch nicht klar sind. Zweites Ziel der Arbeit ist eine Analyse von Erfolgsfaktoren, die zu einem Durchbruch vom Nischen- zum Massenmarkt beitragen. Die Analyse soll auch die kritischen Faktoren aufzeigen, die den Marktpenetrationszeitpunkt und die Diffusionsgeschwindigkeit beeinflussen.

2.1 Nachhaltige Mobilität

Diverse Prognosen zeigen, dass sich die Zahl der Automobile in den nächsten 50 Jahren weltweit verdreifachen wird (Pehnt (2001)). Durch die fortschreitende Entwicklung der Schwellen- und Drittweltländer wird die Anzahl der Autos in diesen Ländern schnell zunehmen (Abbildung 1). Umso wichtiger ist die nachhaltige Gestaltung dieser Mobilität.

Das World Business Council for Sustainable Development (Koss (2001)) definiert „Sustainable mobility“ folgendermassen:

“ The ability to meet the needs of society to move freely, gain access, communicate, trade and establish relationships without sacrificing other essential human or ecological values today or in the future.“

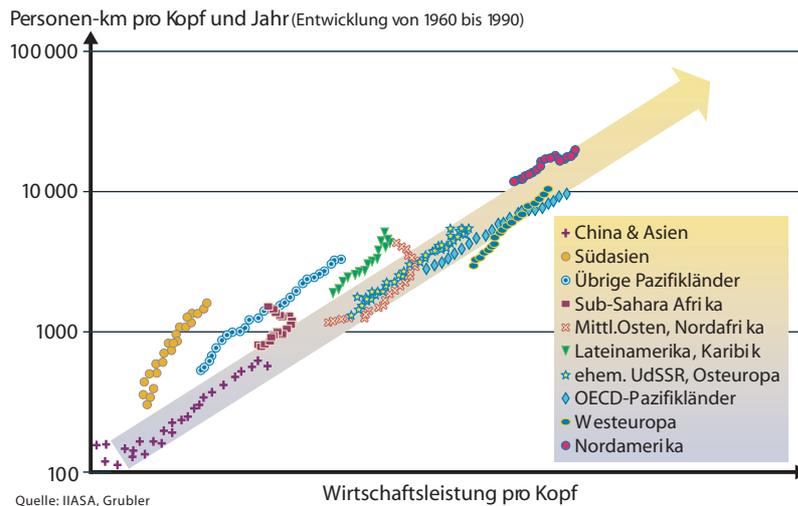


Abbildung 1: Gefahrene Pkw-Kilometer in Abhängigkeit zur Wirtschaftsleistung (Shell Deutschland (2001))

2.2 Auswirkungen der Mobilität

Die gesamte Mobilität ist für zirka 30% der weltweit konsumierten Energie verantwortlich (Oak Ridge National Laboratory, et al. (2001)). Davon gehen 80% auf das Konto der Strassenfahrzeuge. 96% der für den Verkehr konsumierten Energie basieren auf Erdöl. Die restlichen drei Prozent werden durch Gas und eine verschwindend kleine Menge durch Elektrizität bereitgestellt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Verteilung des Energiekonsums der USA nach Energiequelle (in Prozent), aus dem Jahre 1999 (Oak Ridge National Laboratory, et al. (2001))

Energiequellen	Verkehr		Haushalte		Dienstleistungssektor		Industrie	
	1973	2000	1973	2000	1973	2000	1973	2000
Öl	95.8	96.4	18.9	7.4	16.4	4.1	27.9	25.4
Erdgas	4.0	2.9	33.2	25.2	27.8	20.4	31.8	30.3
Kohle	0.0	0.0	0.7	2.2	1.6	3.9	12.4	6.4
Erneuerbare En.	0.0	0.5	2.4	2.4	0.1	0.4	3.6	6.3
Kernkraft	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Elektrizität	0.2	0.2	44.9	62.9	54.1	71.2	24.2	31.6
Total	100	100	100	100	100	100	100	100

Auch die durch den motorisierten Individualverkehr verursachten Emissionen sind beträchtlich. Dabei ist festzustellen, dass insbesondere die Emissionen an Stickoxyden (NOx), aber auch an Kohlenmonoxyden (CO) und Kohlendioxyden (CO2) ganz wesentlich durch die Mobilität mitverursacht werden (Tabelle 2).

Tabelle 2: Anteile an CO und NO_x im Jahr 1999 in den USA (Oak Ridge National Laboratory, et al. (2001))

Sektor	CO	NO _x
Strassenfahrzeuge	55.9%	35.1%
Flugzeuge	1.1%	0.7%
Eisenbahn	0.1%	3.9%
Schiff	0.2%	4.1%
Andere	20.9%	13.0%
Transport Total	78.6%	53.4%
Stationäre Quellen: Ölverbrennung	6.0%	41.7%
Industrielle Prozesse	4.1%	3.3%
Abfallentsorgung und Recycling Total	1.3%	0.4%
Verschiedene	10.0%	1.3%
Total aller Quellen	100.0%	100.0%

Der motorisierte Individualverkehr ist somit wesentlich mitverantwortlich für den Treibhauseffekt, den Smog und Ozon in den Städten. Die Automobilindustrie wird insbesondere im Zusammenhang mit der sich verschärfenden internationalen Klimapolitik zunehmend als Schlüsselindustrie bei der Erreichung einer globalen Nachhaltigkeitsstrategie identifiziert. Szenarien zeigen, dass sich das Autodesign in den nächsten 20 Jahren dramatisch verändern muss, um den gesellschaftlichen Anforderungen gerecht zu werden.

Laut Loske, et al. (1996) stehen heute drei Handlungsmöglichkeiten zur nachhaltigen Gestaltung der Mobilität zur Diskussion:

- Verkehrsvermeidung
- Verkehrsverlagerung
- Technische Verbesserungen der einzelnen Verkehrsträger

Verkehrsvermeidungsstrategien wollen die gefahrenen Kilometer senken. Dies kann durch einen gesellschaftlichen Wertewandel geschehen, aber andererseits auch durch eine Erhöhung der Auslastung der Fahrzeuge selber, wie auch durch Videokonferenzen statt Geschäftsreisen.

Verkehrsverlagerungsstrategien haben hingegen das Ziel, einen Teil des motorisierten Individualverkehrs und des motorisierten Güterverkehrs auf andere umweltfreundlichere Verkehrsträger umzulagern, zum Beispiel auf die Bahn.

Die technische Verbesserung bezweckt, die Umweltbelastung der einzelnen Verkehrsmittel zu senken.

Die Ökobilanz eines Automobils macht deutlich, wo die Umweltbelastung gesenkt werden sollte. Dies kann anhand der Primärenergieanalyse des VW Golf gezeigt werden (Abbildung 2). Die Primärenergieanalyse zeigt, dass der Beitrag der Gebrauchsphase des Autos zu den zentralen Umweltbelastungen um eine Größenordnung relevanter ist als die Primärenergie, die bei der Herstellung, der Entsorgung sowie der Treibstoffherstellung anfallen. In der Gebrauchsphase fällt sehr viel CO₂ an, welches der wichtigste Verursacher für

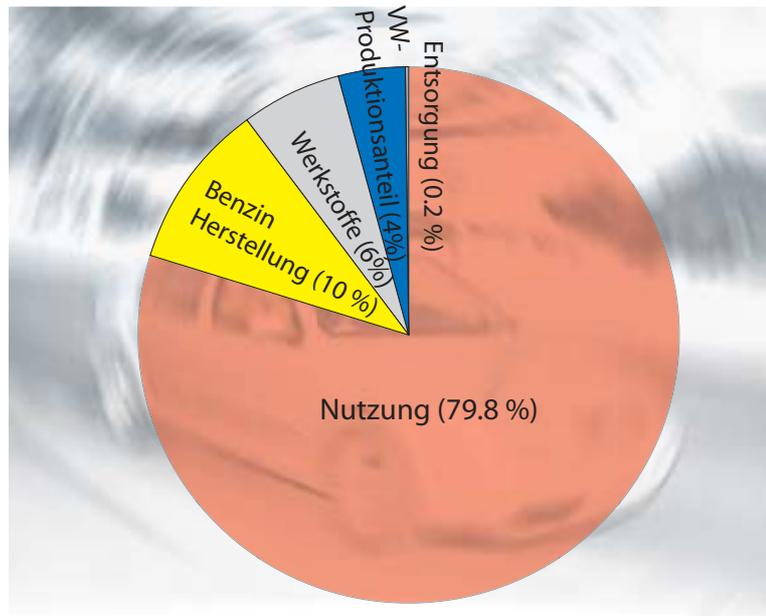


Abbildung 2: Gesamter Primärenergiebedarf eines VW-Golf (Schweimer GW, et al. (1996))

den Treibhauseffekt ist. Die Bemühungen der Automobilhersteller müssen somit vorerst auf die energetische Optimierung des Autos zielen. Massnahmen müssen bei der Treibstoffwahl (alternative Treibstoffe, wie zum Beispiel Erdgas, Methanol, Biogas und Wasserstoff), Treibstoffeffizienz (Verbesserungen der Verbrennung von Benzin und Diesel), der Gewichtsreduktion der Fahrzeuge, der Abgasreinigung und vor allem beim Antriebssystem (Brennstoffzelle, Elektromotor oder Hybridkonzepte) ansetzen.

2.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Mobilität

Die Immissionsbelastungen in verschiedenen Metropolen führte zu gesetzgeberischen Änderungen in verschiedenen Ländern, welche die Höhe des Emissionsausstosses regeln.

2.3.1 Zero Emission Vehicle Programm in Kalifornien

Bezüglich den gesetzlichen Regulierungen ist der US-amerikanische Bundesstaat Kalifornien bis jetzt am weitesten gegangen und hat für die Automobile sehr strenge Richtlinien eingeführt. Ein 1996 in Kraft getretenes Gesetz schreibt ab dem Jahr 2003 sehr niedrige Schadstoffemissionen vor. Diesem gesetzlichen Vorstoss folgten die amerikanischen Bundesstaaten New York, Vermont und Massachusetts (EVAA (2002)).

2.3.2 Kyoto-Protokoll

Laut Kyoto-Protokoll ist das Ziel, eine geringere Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre zu erreichen. Damit soll eine weitere Erwärmung des Weltklimas verhindert werden. Die europäischen Länder haben sich zudem im Rahmen des Kyoto-Protokolls CO₂-Reduktionsziele gesteckt, die unter anderem mit Treibstoffverbrauchsreduktion zu erreichen sind. Eine Reduktion von acht Prozent soll zwischen 2008 bis 2012 in Bezug auf das Jahr 1990 erreicht werden. Deutschland hat beispielsweise 21 Prozent Reduktion von CO₂ zugesagt. Bis zum Jahr 2012, so wurde vereinbart, muss der Ausstoss folgender Treibhausgase auf einen Wert reduziert werden, der mindestens fünf Prozent unterhalb des Wertes von 1990 liegt:

- Kohlendioxid
- Methan
- Lachgas
- Fluorchlorkohlenwasserstoffe
- Schwefelhexafluorid

2.3.3 Entwicklungen in Europa

Auch in Europa wurden Grenzwertverschärfungen bezüglich der Schadstoffemissionen von Pkws (EURO 4 ab 2005) beschlossen (Tabelle 3). Die Massnahmen reichen von einer CO₂-Steuer auf Treibstoffe (skandinavische Länder) bis hin zur freiwilligen Vereinbarungen mit der Automobilindustrie. Aktuelle politische Absichtserklärungen aus Europa fordern eine verstärkte Nutzung regenerativer Ressourcen im Verkehrsbereich:

- Das EU-Greenpaper (European Commission (2000b)) 'Required Commitment' fordert eine Verpflichtung auf 7 % Biotreibstoffe bis ins Jahre 2010.
- Ein Beschluss des EU-Rates (European Commission (2000a)) zur Verkehrspolitik fordert eine beschleunigte Einführung von alternativen Kraftstoffen aus erneuerbaren Energieträgern.
- Das Nationales Klimaschutzprogramm der Deutschen Bundesregierung 2000 fordert die Nutzung alternativer Treibstoffe wie Erdgas, Wasserstoff und Methanol (EU Rat für Verkehrspolitik (1998)).
- Eine freiwillige Absichtserklärung der schweizerischen Automobilimporteure, wie auch des Europäischen Verbandes der Automobilindustrie (ACEA) verpflichtet die Autoimporteure zur Reduktion des durchschnittlichen Treibstoffverbrauches.

Tabelle 3: Aktuelle und zukünftige EU Emissionsgrenzwerte für Fahrzeuge (in g/km), nach (Walsh (1999) und ADAC (2001))

	CO	HC	NOx	HC + NOx	PM
Euro 3 von 2000					
Benzinfahrzeuge	2.3	0.2	0.15	-	-
Dieselfahrzeuge	0.64	-	0.5	0.56	0.05
Euro 4 von 2005					
Benzinfahrzeuge	1.0	0.1	0.08	-	-
Dieselfahrzeuge	0.5	-	0.25	0.30	0.025

2.4 Die Brennstoffzelle

Brennstoffzellen sind galvanische Elemente, die als Energiewandler dienen. Sie wandeln chemische in elektrische Energie um. Ein Teil der Energie wird in Form von Wärme frei. Die Formel der Reaktion in einer Brennstoffzelle lautet folgendermassen:



Brennstoffzellen führen den umgekehrten chemischen Prozess einer Wasserelektrolyse durch.

2.4.1 Brennstoffzellentypen

Inzwischen existieren verschiedene Typen von Brennstoffzellen. Für den Fahrzeugbau kommt zurzeit nur die Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEM-Brennstoffzelle) oder auch Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) in Frage. Die PEM Brennstoffzelle eignet sich am ehesten für den Einsatz als Energiequelle für die Automobile, da ihre Leistung sehr schnell verfügbar ist.

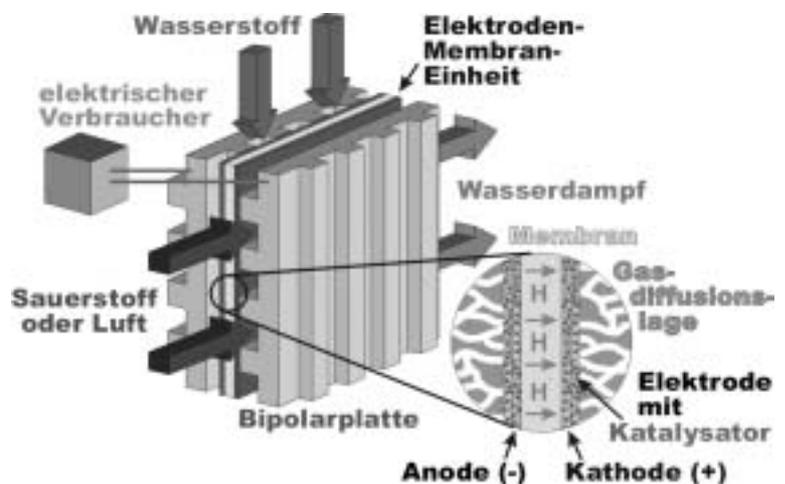
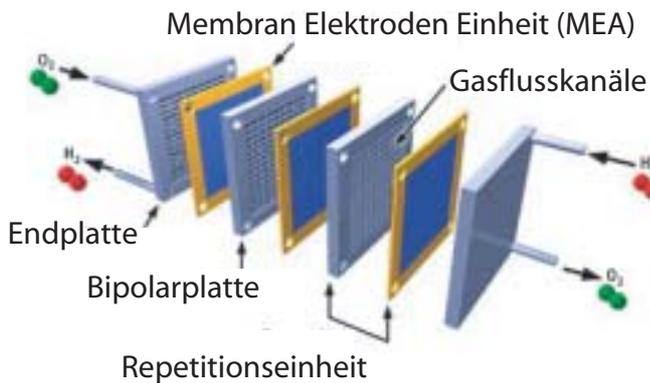


Abbildung 3: schematischer Aufbau einer PEM Brennstoffzelle, (Kabza (2002))

Eine PEM-Brennstoffzelle besteht aus zwei Elektroden (einer Anode und einer Kathode), die durch einen protonenleitenden Elektrolyten voneinander getrennt sind. Die Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau einer einzelnen PEM-Brennstoffzelle. Der Elektrolyt der PEM-Brennstoffzelle besteht aus einer dünnen gasdichten, jedoch für Protonen bzw. Wasserstoffatome leitenden polymeren Membran. Die Membran trennt die vorbeiströmenden, gasförmigen Reaktionspartner. Die

Membran ist eine dünne Folie (30 bis 170 µm), auf der auf beiden Seiten Elektroden mit einem Katalysator aufgebracht sind. Als Katalysator dienen fein verteilte Edelmetalle auf Kohle, meist Platin auf der Kathodenseite und Platin/Ruthenium auf der Anodenseite. Die Katalysatorbelegung ist kleiner als 0,5 mg/cm². Die Membran mit den Elektroden wird als Membran-Elektroden-Einheit (MEE) oder MEA (membrane electrode assembly) bezeichnet. Da die Spannung einer Einzelzelle gering ist, werden viele Einzelzellen zu einem Brennstoffzellen-Stapel oder Brennstoffzellen-Stack (Abbildung 4) zusammgebaut. Durch die elektrische Serienschaltung vervielfacht sich die Stackspannung entsprechend der Anzahl der Einzelzellen. Die Einzelzellen stehen jeweils durch eine gemeinsame Bipolarplatte



miteinander in elektrischem Kontakt. Die Bipolarplatte führt auf der einen Seite das Brenngas und auf der anderen Seite Luft oder Sauerstoff zu den jeweiligen Elektroden. Der Name Bipolarplatte kommt durch die an beiden Seiten anliegende Spannung mit unterschiedlichem Vorzeichen: Minuspol an der Anodenseite und Pluspol an der Kathodenseite (Sauerstoff). Die Summe der einzelnen Zellspannungen nennt man Stackspannung. Diese wird durch Stromabnehmer von den beiden Endplatten abgeführt (Kabza (2002)). Um einen hohe

Abbildung 4: Brennstoffzellenstack mit Membranaufbau

Effizienz zu erreichen, müssen die Elektroden porös sein, da dadurch die Oberfläche für die chemische Reaktion vergrößert wird. Der Anode wird Wasserstoff (H₂), der Kathode Sauerstoff (O₂) zugeführt. An der katalytisch aktivierten Anodenoberfläche werden den Wasserstoffatomen Elektronen (e⁻) entzogen, wodurch Protonen zurückbleiben.

Die chemische Reaktion sieht folgendermassen aus: $H_2 = 2H^+ + 2 e^-$

Weil die Membran für die Protonen durchlässig ist, diffundieren sie ungehindert zur Kathode, wo sie mit dem Sauerstoff chemisch reagieren und als Resultat der Reaktion Wasser entsteht:



Der Elektronenüberschuss auf der Wasserstoffseite der Membran und der Elektronenmangel auf der Sauerstoffseite erzeugen ein Potentialgefälle. Die Elektronen fließen von der

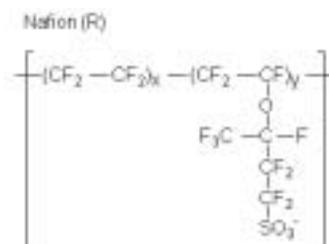


Abbildung 5: Nafion Membran Aufbau

Anode zur Kathode, womit elektrischer Strom fließt (Karamanolis (2001)).

Für die Brennstoffzellen benötigt man Nafion-Membranen (Abbildung 5), ein DuPont Produkt oder die Dow-Membranen von der Dow Chemical Corp (Kalhammer, et al. (1999a), III-1). Diese perfluorierten Membranen weisen eine ausserordentlich hohe chemische Stabilität auf. Sie zeigten in H₂-Brennstoffzellen eine Lebensdauer von bis zu 60.000 Stunden bei einer Betriebstemperatur von 80°C. Die hauptsächlichsten Nachteile dieser Membranen sind der komplizierte Produktionsprozess, welcher äusserst toxische Zwischenstufen beinhaltet (Roduner, et al. (2001)).

Neben Wasserstoff kann auch Methan als Treibstoff für eine PEM-Brennstoffzelle verwendet werden, wenn Methan im Fahrzeug in einem Reformer in Wasserstoff umgewandelt wird.

2.5 Neue Antriebstechnologie für den Automobilbau

Die Brennstoffzelle stellt für den Automobilbau eine neue Antriebstechnologie dar. Ein Durchbruch für die Verwendung der PEM Brennstoffzelle im Automobilbau wurde 1987 erzielt. Es gelang Ballard, Los Alamos National Laboratory (LNL), und der Texas A&M Universität, die Platin-Menge für den Edelmetallkatalysator zu reduzieren. Somit senkten sich die Platin-Kosten von rund \$50'000 pro Brennstoffzellenstapel auf einige hundert Dollar. Ebenfalls konnten diese beiden Forschungseinrichtungen das Leistungsgewicht der Polymermembranen erhöhen. Ein hohes Leistungsgewicht ist für die Beschleunigung und den Erhalt einer hohen Fahrgeschwindigkeit für das Automobil sehr wichtig. Damit zeigte Ballard zusammen mit den anderen Forschungseinrichtungen, dass es möglich sein wird, Fahrzeuge mit einer Brennstoffzelle zu betreiben. Aber erst als Ballard zusammen mit Daimler das erste Konzeptfahrzeug präsentierten, begannen andere Hersteller ebenfalls mit der Entwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen.

Zurzeit entwickeln unter anderem DaimlerChrysler, Honda, Mitsubishi, Nissan und Toyota Brennstoffzellenfahrzeuge, die durch einen Methanol-Bordreformer das Methanol im Fahrzeug selber in Wasserstoff umwandeln. Die gleichen Firmen versuchen auch eine Brennstoffzelle zu entwickeln, die ohne Bordreformer auskommen wird und Methanol direkt in Energie umwandelt, wobei diese Entwicklung noch in den Kinderschuhen steckt.

Tabelle 4: Eigenschaften der PEM-Brennstoffzelle, aus (Norbert Berg, et al. (1999))

BZ-Typ	Proton Exchange Membrane (PEMFC)
Elektrolyt	protonenleitende Polypersulfonsäure-Membran
Temperatur	50-80°C
Brennstoff	H ₂ , CH ₄ , CH ₃ OH
Reaktion Anode	H ₂ ->2H ⁺ +2e ⁻
Reaktion Kathode	1/2O ₂ +2H ⁺ +2e ⁻ ->2H ₂ O
Zellwirkungsgrad	50-60%
Betriebsbereitschaft	sofort
Anwendung	Raumfahrt, Fahrzeuge, KWK, U-Boote, mobile Stromerzeugung
Vorteile	einfacher Aufbau, niedrige Temperatur, kurze Anlaufzeit
Nachteile	teure Katalysatoren, empfindlich gegenüber Brennstoff-Verunreinigungen (CO)
Weltweit führende Hersteller	Ballard (Kanada), Mitsubishi (Japan), Matsushita (Japan), Sanyo (Japan), Toshiba (Japan), Plug Power (USA), Analytic Power (USA),...

Die Tabelle 4 zeigt summarisch die Charakteristiken der PEM-Brennstoffzelle auf.

2.5.1 Treibstoffe für den Individualverkehr

Bis heute werden im Individualverkehr fast nur Benzin und Diesel als Treibstoff eingesetzt. Biodiesel und andere Treibstoffe sind vernachlässigbar. Brennstoffzellen benötigen für ihre Funktion chemische Energie. Als Energiequelle können Wasserstoff oder ein wasserstoffreiches Gas eingesetzt werden. Je nach Typ der Brennstoffzelle können verschiedene Treibstoffe verwendet werden. Diese Treibstoffe müssen zum Teil Umwandlungsschritte (Reforming) an Bord des Fahrzeuges durchlaufen. Diese Umwandlungsschritte führen aber zu energetischen Verlusten. Wichtig ist, dass der Treibstoff ausreichend und kostengünstig verfügbar ist, der Betankungsvorgang einfach ist sowie die zusätzlichen Infrastrukturaufwendungen sich in Grenzen halten Oertel, et al. (2001). Brennstoffzellenautos werden jedoch nur wirkliche „Nullemissionsautos“ sein, wenn diese Treibstoffe auch wirklich aus regenerativen Quellen hergestellt werden. Zurzeit werden Wasserstoff und Methanol favorisiert, die aber heute noch kaum aus regenerativen Quellen erzeugt werden. Der Aufbau eines Wasserstoffnetzes und die ausreichend grosse Anzahl an Wasserstofftankstellen kann mittelfristig nicht erwartet werden. Folglich konzentrieren sich einige Automobilhersteller – neben den Prototypen, die mit Wasserstoff funktionieren – auf Fahrzeuge, wo im Auto selber die Umwandlung von Erdgas, Methanol oder Benzin in Wasserstoff durchgeführt wird. Methanol ist wasserstoffreich, lässt sich im Reformier vergleichsweise einfach in Wasserstoff überführen beziehungsweise in speziellen Brennstoffzellen (DMFC) auch direkt nutzen. Langfristig die beste Lösung ist Wasserstoff, da bei der Umwandlung von Erdgas und Methanol in Wasserstoff viel Energie verloren geht (Tabelle 5). Zudem wäre die Betankung mit Wasserstoff auch die kostengünstigste Lösung,

da Fahrzeuge ohne Onboard-Wasserstoff-Reformierung preiswerter sind. Doch solange keine oder nur eine schlechte Wasserstoffinfrastruktur zur Verfügung steht, schränkt dies die Einführung von Brennstoffzellenfahrzeugen dieses Typs ein. Erste Einsatzgebiete von Brennstoffzellenfahrzeugen mit H_2 als Treibstoff sind demnach Flotten, wo die Fahrzeuge täglich in ihr Depot zurückkommen und dort betankt werden können.

Tabelle 5: Wirkungsgrade und Kraftstoffverbrauch im Neuen Europäischen Fahrzyklus plus Autobahnfahrt (Pehnt, et al. (2002))

Antrieb	Wirkungsgrad (in %)	Kraftstoffverbrauch (l Benzinäquivalente/100 km)
Ottomotor heute	21	6
Ottomotor zukünftig (Direkteinspritzer)	23	5
Dieselmotor heute	26	4.5
Dieselmotor (Hybrid)	33	3.5
Brennstoffzellenfahrzeug (Wasserstoff)	40	3.1
Brennstoffzellenfahrzeug (Methanol)	33	3.9
Ottomotor (Wasserstoff)	25	k.A.

Die Tabelle 5 zeigt, dass ein Brennstoffzellenauto mit H_2 als Treibstoff einen Wirkungsgrad haben wird, der doppelt so hoch ist wie der von einem heutigen Auto mit Ottomotor. Bezieht man aber noch die Kraftstoffherstellung ein, so sinkt dieses Verhältnis leicht nach unten. Die Herstellung von Wasserstoff über eine Elektrolyse benötigt viel Energie.

2.6 Aufbau der Arbeit

Nach dieser Einführung in die Problematik der nachhaltigen Mobilität, in die existierenden Gesetze zur Emissionsreduzierung und in die Technik der Brennstoffzellen werden in den nächsten Kapiteln die Methodik von Porter erläutert und die einzelnen Wettbewerbskräfte analysiert. Angefangen wird im Folgenden mit der Beschreibung der Wettbewerbstheorie von Porter. Die Wettbewerbskräfte der Hersteller von Brennstoffzellen und der potentiellen neuen Konkurrenten wird man im Kapitel 4.1 finden. In diesen Kapiteln werden die einzelnen Akteure beschrieben und sogleich diskutiert, da sonst der Überblick verloren gehen würde. Im Kapitel 4.2 wird knapp auf die Zulieferer der Brennstoffzellenhersteller eingegangen. Da noch zu viele Unsicherheiten existieren, konnten die Brennstoffzellen-Lieferanten nicht vertieft analysiert werden. Die Brennstoffzelle und dessen Markt wird sich in Zukunft wandeln, dass noch nicht klar ist, welche Komponenten überhaupt in der Brennstoffzelle zu finden sein werden, welche von diesen Komponenten von den Herstellern selber hergestellt

werden und welche Bestandteile von spezialisierten Zulieferern bezogen werden. Im Kapitel 4.3 werden die einzelnen Automobilhersteller analysiert. Der Fokus wird dort auf die bisher entwickelten Prototypen gelegt, da diese ein gutes Indiz für das vorhandene technische Know-how sind. Kapitel 4.4 zeigt die Substitutionsprodukte auf, die als Konkurrenz zu Brennstoffzellenautos die Marktdiffusion verlangsamen könnten.

Im Rahmen dieser Arbeit konnten nicht alle Wettbewerbskräfte des Modells von Porter gleich ausführlich behandelt werden. Der Autor musste sich daher auf die wesentlichsten beschränken.

3 Methodik

3.1 Wettbewerbsmodell von Porter

Michael Porter hat sich mit einer klar aufgebauten Vorgehensweise zur Strukturanalyse von Branchen einen Namen gemacht. Die Grundlage dieser Vorgehensweise ist das „Five-Forces-Modell“. Dieses Modell setzt ein Unternehmen in Beziehung zu seinem Umfeld, wie dies die Abbildung 6 zeigt.

Mit Hilfe dieses Modells kann die Position der Brennstoffzellen-Technologie in einer frühen Phase der strategischen Planung ausgelotet werden. Wie attraktiv ist die Branche für die Einführung der Brennstoffzellen? Wie können die Wettbewerbsvorteile am besten ausgenutzt werden? Der Stand des Wettbewerbs in einer Branche hängt

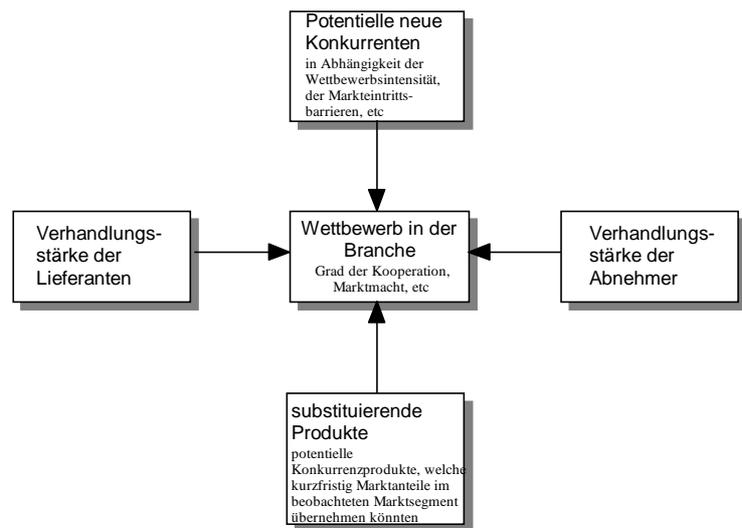


Abbildung 6: Das Five-Forces-Modell von Porter

nach Porter von fünf Wettbewerbskräften ab, die in Abbildung 6 dargestellt sind. Die Kräfte „Verhandlungsstärke der Brennstoffzellen-Lieferanten“, „Bedrohung durch neue Konkurrenten“, „Verhandlungsstärke der Abnehmer (Automobilkonzerne)“, „Bedrohung durch substituierende Produkte“ und „Wettbewerb in der Branche“ sollen hier betrachtet werden. Das Gesamtbild, welches durch die Analyse dieser fünf Kräfte entsteht, zeigt die Attraktivität der Branche und die Höhe des Gewinnpotentials.

3.1.1 Bedrohung durch potentielle neue Konkurrenten

Wenn neue Konkurrenten auf den Markt kommen, werden die Produktions-Kapazitäten eines Produktes erhöht, was einen Einfluss auf den Gewinn und den Absatz der ganzen Branche haben kann. Durch die Marktpräsenz von neuen Konkurrenten und dem allenfalls verschärften Wettbewerb innerhalb der Branche können die Produktpreise sinken und letztendlich die Rentabilität der einzelnen Unternehmungen beeinflussen.

Die Gefahr des Markteintritts von neuen Anbietern hängt vor allem von den vorhandenen Eintrittsbarrieren ab, die einen Markt schützen. Sieben verschiedene Eintrittsbarrieren werden von Porter (1999) genannt, die neue Firmen bei einem Markteintritt vorfinden werden:

- Betriebsgrössenersparnisse
- Produktdifferenzierung
- Kapitalbedarf
- Umstellungskosten
- Zugang zu Vertriebskanälen
- Grössenunabhängige Kostennachteile
- Staatliche Politik, institutionelle Eintrittsbarrieren

Tabelle 6: Markteintrittsbarrieren nach Hay/Morris 1991 aus Pfaff, et al. (2000)

Fall	Kategorie	Beschreibung
1	Leichter Eintritt	Kein aktueller oder potentieller Wettbewerber hat signifikante Kostenvorteile
2	Ineffektiv behinderter Eintritt	Kostenvorteile reichen nur mittelfristig, um überdurchschnittliche Gewinne zu Preisen, die vor Marktneueintritten schützen, zu realisieren
3	Effektiv behinderter Eintritt	Es lohnt sich für das Unternehmen, kurzfristige Gewinne zu opfern, um langfristig Marktneueintritte zu verhindern und zukünftige Gewinne zu sichern
4	Blockierter Eintritt	Der kurzfristig erzielbare, gewinnmaximierende Preis ist nicht hoch genug, um einen Markteintritt zu bewirken.

Die Höhe der Markteintrittsbarrieren bestimmt die Marktattraktivität (siehe Tabelle 6). Die Eintrittsbarrieren vermindern den Wettbewerb in einer Branche. Das Gewinnpotential der vorhandenen Anbieter in diesem Markt steigt durch die Eintrittsbarrieren, da die Macht der einzelnen Anbieter den Lieferanten und Abnehmern gegenüber zunimmt. In ganz extremen Situationen besitzt eine einzelne Firma ein Monopol.

Betriebsgrössenersparnisse

Betriebsgrössenersparnisse (Economies of Scale) liegen vor, wenn die Stückkosten eines Produktes (oder einer Operation oder Funktion, die in die Herstellung des Produkts eingeht) bei steigender absoluter Produktionsmenge pro Zeiteinheit sinken (Porter (1999)). Die

Kostenvorteile mit steigender Produktionsmenge sind besonders hoch, wenn die Gemeinkosten einen hohen Anteil der Gesamtkosten ausmachen. Diese Eintrittsbarriere schreckt Neuanbieter ab, da diese entweder schon von Anfang an sehr hohe Stückzahlen produzieren müssen oder weniger produzieren und somit Kostennachteile auf sich zu nehmen haben. Die Kostenvorteile der schon auf dem Markt befindlichen Firmen können mehrere Ursprünge haben:

- Die Firma, die bereits auf dem Markt ist, hat ein hohes Produktvolumen
- Die auf dem Markt präsente Firma, welche ihre Geschäftsaktivitäten diversifiziert hat, kann ihre Kosten mit denen von anderen Geschäftseinheiten teilen.

Produktdifferenzierung

Bei Firmen, die bekannte und beliebte Marken im Sortiment führen, ist die Käuferloyalität sehr hoch. Die Produktdifferenzierung gewährt einen gewissen Schutz vor neuen Marktanbietern. Eine neue Konkurrenz muss erhebliche Mittel aufwenden, um diese bestehenden Präferenzen zu überwinden. Laut Porter (1999) sind Investitionen in einen neuen Markennamen besonders riskant, weil er, falls der Eintrittsversuch misslingt, keinen Restwert mehr abwirft.

Kapitalbedarf

Unter dem Begriff des Kapitalbedarfs versteht man nicht nur das erforderliche Kapital für Produktionsanlagen, sondern auch für Lieferanten- und Kundenkredite, Personalkosten, Forschungs- und Entwicklungskosten. Eintrittsbarrieren werden geschaffen, wenn enorm hohe Summen investiert werden müssen, um wettbewerbsfähig zu sein. Je grösser die Summe ist, desto höher ist die Eintrittsbarriere.

Umstellungskosten

Umstellungskosten sind nach Porter (1999) einmalige Kosten für einen Abnehmer, der vom Produkt eines Lieferanten zu dem eines anderen wechselt. Solche Kosten sind beispielsweise Umschulungskosten für Mitarbeiter oder Kosten für neue Zusatzgeräte. Hohe Umstellungskosten beim Abnehmer zwingen den neuen Anbieter in der Anfangsphase zu erheblichen Preisnachlässen oder er liefert qualitativ bessere Produkte.

Zugang zu Vertriebskanälen

Werden die Vertriebskanäle von den vorhandenen Anbietern schon besetzt, so muss der neue Konkurrent neue Vertriebskanäle erschliessen, was eine hohe Eintrittsbarriere darstellt, denn die Neuerschliessung wirkt sich negativ auf die Profitabilität des Produktes aus.

Grössenunabhängige Kostennachteile

Etablierte Unternehmen können über Kostenvorteile verfügen, die für neue Konkurrenten unerreichbar sind, ganz gleich wie gross sie sind oder welche Betriebsgrössenersparnisse sie erzielen (Porter (1999)). Diese sind beispielsweise:

- Besitz von Produkttechnologien: Diese können zum Beispiel durch Patente geschützt sein
- Günstigerer Zugang zu Rohstoffen
- Günstige Standorte
- Staatliche Subventionen: Die Vergabe staatlicher Subventionen kann Firmen enorme Vorteile verschaffen
- Lern- oder Erfahrungskurve: Diese Kurve zeigt, dass die Stückkosten eines Produktes mit zunehmender Erfahrung, welche eine Unternehmung im Laufe der Produktionszeit sammelt, sinken.

Staatliche Politik, institutionelle Eintrittsbarrieren

Diese Barrieren basieren auf legislativen oder administrativen Massnahmen in Form von staatlichen Regulierungen. Patente sind beispielsweise solche Barrieren, da sie über wenigstens 20 Jahre verhindern, dass ein Konkurrent die Erfindung des Patentinhabers wirtschaftlich verwertet. Ein weiterer möglicher staatlicher Eingriff ist die Festlegung von Mindest- oder Maximalpreisen.

3.1.2 Bedrohung durch substituierende Produkte

Für Unternehmen ist es wichtig in Forschung und Entwicklung zu investieren, um neue Technologie möglichst als erste auf den Markt bringen zu können. Um Ersatzprodukte ausfindig zu machen, muss man nach Produkten suchen, die die gleiche Funktion erfüllen wie das bestehende Produkt. Diese Suche ist manchmal recht schwierig und führt den Analytiker

unter Umständen in Geschäftszweige, die scheinbar wenig mit der Branche zu tun haben (Porter (1999)).

Die bestehenden Produkte werden konkurrenziert, wenn ebenbürdige oder sogar bessere Substitutionsgüter auf dem Markt angeboten werden. Diese Güter müssen im Preis attraktiver sein, um erfolgreicher zu sein. Für ein Unternehmen ist es wichtig Substitute frühzeitig zu erkennen, um die Unternehmensstrategie danach auszurichten.

3.1.3 Verhandlungsstärke der Abnehmer

Abnehmer können die Preise drücken, wenn sie sich in einer Machtposition befinden. Ist ein Unternehmen einer solchen Abnehmermacht ausgesetzt, so sinkt die Rentabilität entsprechend. Gründe für eine Machtposition der Abnehmer gibt es einige:

- Hoher Konzentrationsgrad bei den Abnehmern
- Hoher Anteil des bestehenden Produkts des Lieferanten
- Drohung und Machtdemonstration der Abnehmer
- Standardisierung der Produkte
- Niedrige Umstellungskosten
- Drohung der Abnehmer mit einer Rückwärtsintegration

3.1.4 Wettbewerb in der Branche

Unternehmen einer Branche bewegen sich in einer wechselseitigen Abhängigkeit. Rivalitäten können durch Marktpositionskämpfe ausgelöst werden. Preiswettbewerb, Produktwerbung, Produktinnovationen und Serviceangebote können zu solchen Positionskämpfen führen. Herrscht in einer Branche Stagnation, können Unternehmen, die expandieren wollen nur mit Werbung, Innovationen und Preiswettbewerb Marktanteile dazu gewinnen.

Der Druck von hohen Fix- oder Lagerkosten führt zu Preiskämpfen, da die Unternehmen ihre Kapazitäten auslasten müssen.

3.1.5 Verhandlungsstärke der Lieferanten

Lieferanten können ihre Stärke ausspielen, falls sie diese haben, indem sie den Abnehmern drohen, ihre Preise zu erhöhen oder mindere Qualität anzubieten. Starke Lieferanten können im Abnehmermarkt die Rentabilität senken, wenn die Abnehmer die Preiserhöhungen nicht

an ihre Kunden weitergeben können. Lieferanten sind stark, wenn eines oder mehrere der folgenden Punkte erfüllt ist:

- In der Lieferanten-Branche existieren wenig Konkurrenten.
- Die Lieferanten werden nicht durch Ersatzprodukte konkurrenziert.
- Die gelieferten Produkte bilden einen wichtigen Bestandteil im Produkt des Abnehmers.
- Die Lieferanten konnten ihr Produkt differenzieren oder haben Umstellungskosten durchsetzen können.
- Die Lieferanten können beweisen, dass eine Vorwärtsintegration für sie denkbar wäre.

3.2 Unternehmensanalyse

Neben der Analyse der Branche und des Wettbewerbsumfeldes, ist auch eine interne Analyse eines Unternehmens sehr wichtig, um seine Stärken und Schwächen kennen zu lernen. Dabei soll erörtert werden, wie das Unternehmen zum Untersuchungszeitpunkt für den Wettbewerb gerüstet ist. In dieser Arbeit wird der Schwerpunkt auf die Wettbewerbsvor- und nachteile gelegt, die ein Brennstoffzellen- oder Automobilunternehmen aufweist.

3.3 Wettbewerbsstrategie nach Porter

Porter (1999) gibt zwei Grundtypen von Wettbewerbsvorteilen an: die niedrigen Kosten oder die Differenzierung von Produkten. Er erklärt die Stärken und Schwächen von Unternehmungen als eine Funktion von diesen beiden Variablen und leitet daraus drei Strategietypen ab:

Ziel der Kostenführerschaft ist die Kostenoptimierung der Stückkosten bei akzeptabler Qualität des Produktes. Bei dieser Strategie wird die Geschäftstätigkeit auf viele Branchensegmente ausgelegt, da ein breit gefächertes Geschäftsfeld wichtig ist, um Skaleneffekte (Economy of scale) erzielen zu können. Die Kostenführerschaft basiert auf der Ausnützung von Kostenvorteilen in allen Bereichen einer Unternehmung wie Beschaffung, Produktion, Finanzbereich, Absatz.

Die Differenzierungsstrategie versucht Wettbewerbsvorteile zu erarbeiten, indem durch strategische Differenzierung des Angebotes eine Kundenbindung erlangt wird. Der Nachfrager soll das Produkt als einzigartig wahrnehmen. Überlegene Produktqualität,

überdurchschnittlicher Kundenservice, Standortvorteile, überdurchschnittliche Innovationsfähigkeit gehören zu dieser Strategie, um sich von den Mitwettbewerbern zu differenzieren.

Bei der Konzentrationsstrategie bzw. Nischenstrategie sucht das Unternehmen spezifische Zielgruppen oder eine Marktnische, die es speziell und intensiv bearbeitet und versucht, dort ein gutes Preis-/Leistungsverhältnis anzubieten, indem entweder die Kostenführerschaft oder Differenzierungsstrategie für diese Nische angewendet wird.

4 Resultate und Diskussion der Wettbewerbskräfte

Die Abbildung 7 zeigt als Übersicht die wichtigsten Wettbewerbskräfte, die im Brennstoffzellensektor aktiv sind. Die einzelnen hier abgebildeten Kräfte und deren Auswirkungen werden im Folgenden Schritt für Schritt analysiert.

Da die Brennstoffzelle noch nicht als Serienprodukt für den Automobilmarkt erhältlich ist, ist es schwierig eine Wettbewerbsanalyse durchzuführen. Die Arbeit kann daher nur Hinweise geben, in welche Richtung sich der Markt beziehungsweise der Wettbewerb bewegen könnte. Da Anfang 2003 viele Autofirmen mit einem Produkt auf den „Prototypen-Testmarkt“ kommen werden, wird hinter verschlossenen Türen eifrig an den letzten Details geforscht. Dies machte die Recherche schwierig, da viele Firmen zurzeit extrem zurückhaltend bei der Herausgabe von Informationen sind. DaimlerChrysler, Toyota und Honda möchten unbedingt die ersten sein, die für einen Prototypen-Testmarkt in Kalifornien ein Auto anbieten können. Im Vorfeld wollen sie aber nicht zu viel über ihr Produkt preisgeben.

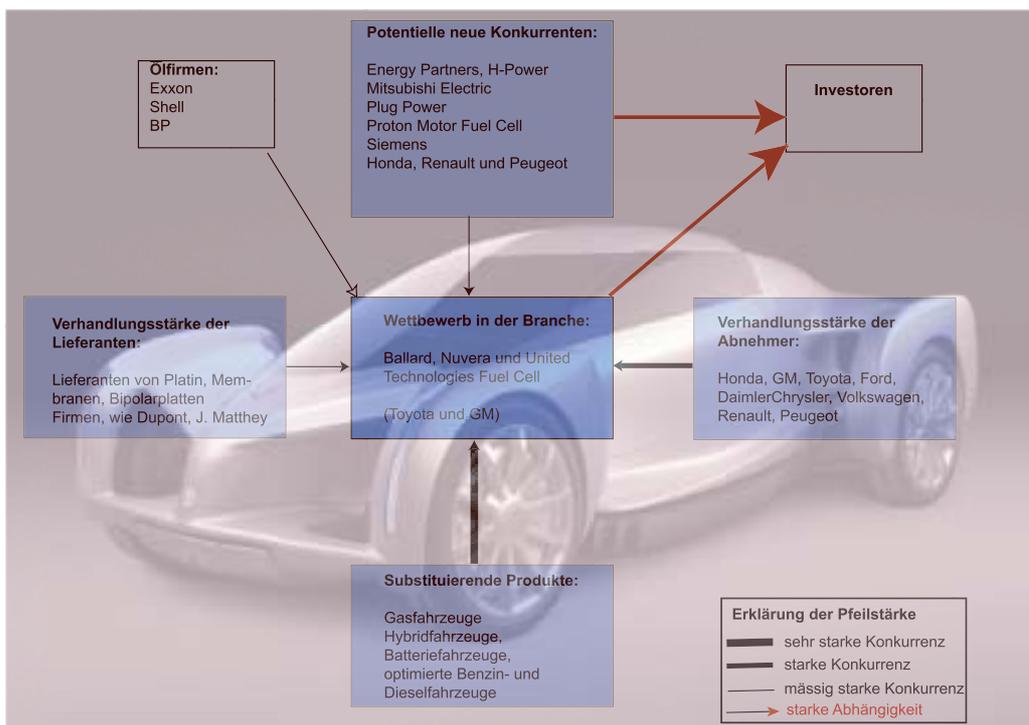


Abbildung 7: Die fünf Wettbewerbskräfte, eigene Darstellung in Anlehnung an Porter (1999)

4.1 Wettbewerb der Brennstoffzellenhersteller

Dieses Kapitel beschreibt die Brennstoffzellenhersteller, die in Zukunft ein Potential zur Entwicklung und Vermarktung von PEM-Brennstoffzellen für die Automobilindustrie haben.

Diese potentiellen Wettbewerber haben in den letzten Jahren in die Forschung und Entwicklung viel investiert. Die beiden Wettbewerbskräfte „Potentielle neuen Konkurrenten“ und „Wettbewerb in der Branche“ werden hier zusammen betrachtet. In einer so frühen Phase, wo im Prinzip die Branche der Brennstoffzellenhersteller noch gar nicht existiert, kann diese klassische Aufteilung nach Porter nicht seriös durchgeführt werden. Da diese Brennstoffzellen-Branche erst langsam am entstehen ist, kann noch nicht genau gesagt werden, welche der hier diskutierten Firmen in Zukunft überhaupt noch existieren werden, welche Firmen PEM-Brennstoffzellen für den Automobilbau serienmässig produzieren und welche Firmen schlussendlich potentielle neue Konkurrenten sein werden. Aus diesen Gründen werden die beiden Kräfte „Potentielle neue Konkurrenten“ und „Wettbewerb in der Branche“ in einem Kapitel betrachtet.

4.1.1 Systemgrenzen der Firmenanalyse

Das komplette Antriebssystem eines Brennstoffzellenfahrzeugs ist aus folgenden Modulen aufgebaut:

- Treibstoffmodul
- Brennstoffzellenmodul
- Elektrisches Modul
- Antriebsmodul

Im folgenden Kapitel wird nur die Systemkomponente Brennstoffzellenmodul (Abbildung 8) berücksichtigt. Auf die anderen Komponenten des Antriebssystems wird nur kurz eingegangen, da dies sonst den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

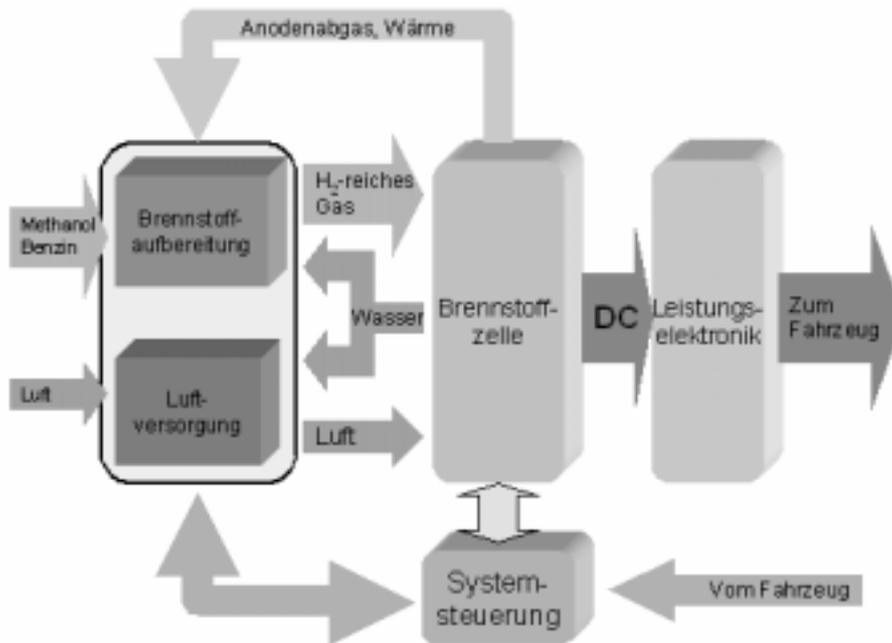


Abbildung 8: Komponenten eines Brennstoffzellenmoduls für den Fahrzeugantrieb (Jörissen (2001)), das zusätzlich über einem Reformer verfügt

Wie die Abbildung 9 zeigt, existieren viele Firmen, die in die Brennstoffzellenforschung und -entwicklung involviert sind und mit den Automobilfirmen Kooperationen eingingen. Die Verhältnisse zueinander werden aus der Abbildung ersichtlich. Zahlreiche Autofirmen verfügen auch über eine eigene Forschungsabteilung, wie zum Beispiel Toyota, GM und Honda. Diese Automobil-Firmen werden nicht in diesem Kapitel behandelt, sondern im Kapitel Verhandlungsstärke der Abnehmer, da diese zum Teil auch von Brennstoffzellenfirmen wie Ballard, Brennstoffzellen-Module oder andere Module beziehen.

Es ist schwierig, Prognosen zu einer Technologie zu machen, die noch nicht im Massenmarkt etabliert ist. Es gibt zwar bereits Fahrzeuge, wie den Necar, der schon grössere Distanzen zurückgelegt hat, aber das ist nicht zu vergleichen mit den Anforderungen an ein normales Auto im täglichen Gebrauch. Folgendes Beispiel kann dies illustrieren: Als Vertreter des Paul Scherrer Institut (PSI) mit ihrem Volkswagen Bora Hy.Power über den Simplon-Pass fahren wollten, mussten sie unterwegs auf den Vorstand von Volkswagen warten. Das Brennstoffzellen-Fahrzeug stand draussen bei Minustemperaturen still. Dabei gefror das Wasser in der Brennstoffzelle und diese funktionierte nicht mehr. Erst nachdem das Wasser im System aufgetaut worden war, konnte das PSI das Fahrzeug dem VW-Vorstand präsentieren bzw. mit dem Brennstoffzellenauto weiterfahren.

Erst, wenn eine Brennstoffzelle so zuverlässig wie ein Otto- oder Dieselmotor funktioniert und preislich ähnlich teuer ist, werden sich die Konsumenten für dieses alternative Antriebssystem entscheiden. Erst im fortgeschrittenen Stadium, das heisst in der

Wachstumsphase der Produktlebenszykluskurve könnte eine wirkliche Wettbewerbsanalyse durchgeführt werden. Die in dieser Arbeit durchgeführte Analyse basiert dagegen auf den begrenzten Informationen, die derzeit, also im Herbst 2002 erhältlich sind. Bei Firmeninformationen muss zudem damit gerechnet werden, dass die Brennstoffzellen- oder Automobilfirmen aufgrund von Marketingüberlegungen die Prototyp-Angaben beschönigen.

Die PEM-Brennstoffzellenfirmen können heute in drei Gruppen eingeteilt werden, wobei in der folgenden Diskussion nicht auf alle Firmen dieser Gruppen eingegangen werden kann. Nur die wichtigsten Exponenten werden analysiert:

- Firmen, die bereits über eine nennenswerte Anzahl an Brennstoffzellen-Prototypen für die Automobilindustrie verfügen und die in der Praxis getestet wurden (A. Brennstoffzellen-Hersteller mit Prototypen),
- Firmen, die erste Erfahrungen mit anderen Brennstoffzellentypen gesammelt haben (B. Brennstoffzellen-Hersteller mit ersten Erfahrungen),
- Firmen, die selber einem Automobilkonzern angehören (C. Brennstoffzellen-Hersteller die einem Autokonzern gehören)

4.1.2 A. Brennstoffzellen-Hersteller mit Prototypen

Ballard

Ballard Power Systems ([http:// www.ballard.com/](http://www.ballard.com/)) wurde 1979 in Vancouver, Kanada, durch Geoffrey Ballard gegründet. Sie entwickelt PEM-Brennstoffzellen. Vermarktet wird bislang nur die 1.5 kW starke PEM-Brennstoffzelle, zu rund 5'000 \$¹, die aber von Ballard bestimmt noch subventioniert wird. Ballard besitzt Werke an den Standorten Nabern (Deutschland), Dearborn (USA), Lowell (USA) und in Vancouver (Kanada). DaimlerChrysler und Ford sind Teilhaber und haben Ende 2001 ihren Aktienanteil substantiell aufgestockt (auf 24.2 % beziehungsweise 20 % Aktienanteil).

¹ laut Gespräch vom 15.10.2002 mit Herrn Gülzow vom DLR in Stuttgart

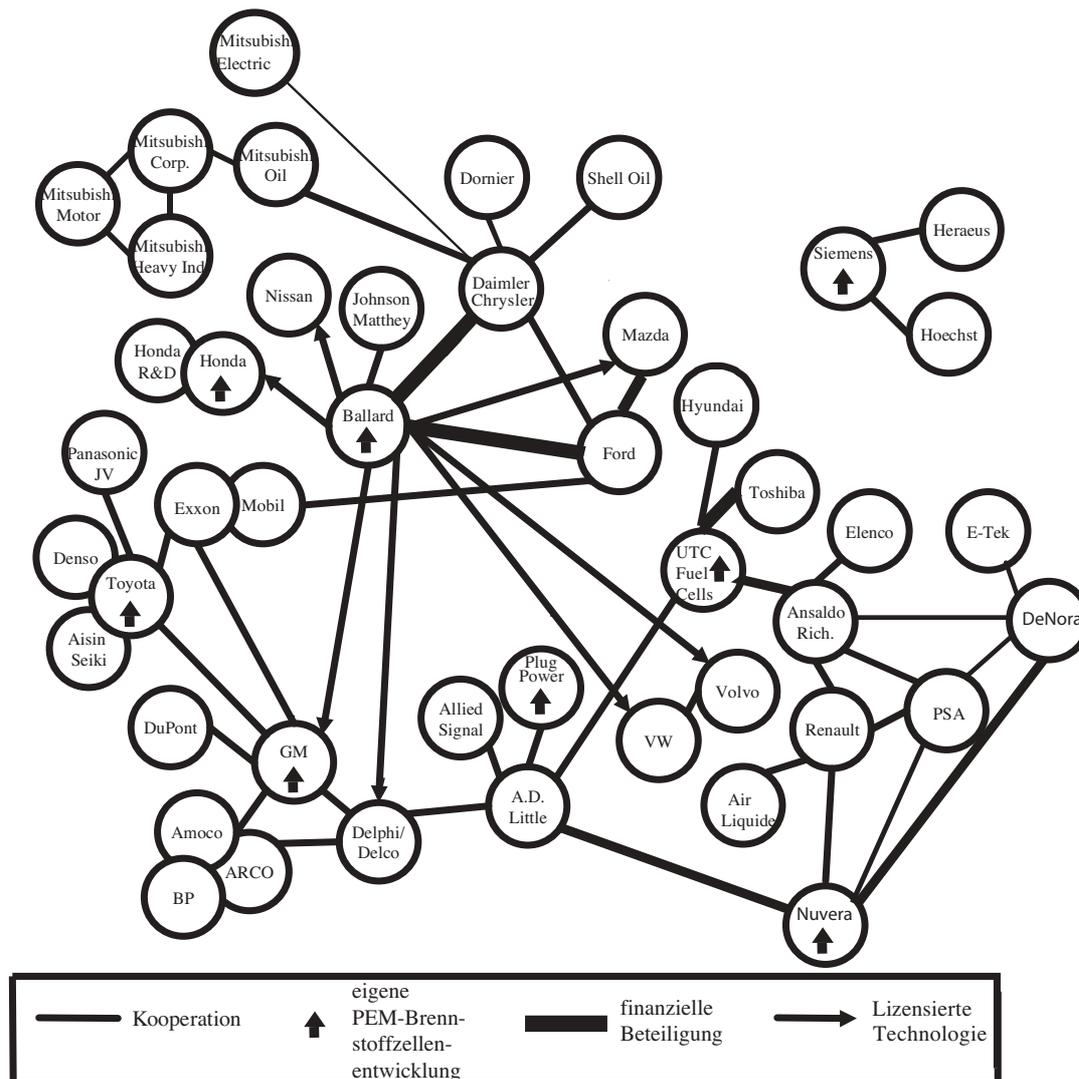


Abbildung 9: Kooperationen und Beteiligungen der Brennstoffzellenfirmen, verändert nach (Steinemann (1999))

Ballard entwickelt PEM-Brennstoffzellensysteme die entweder mit Methanol oder reinem Wasserstoff funktionieren. Diese Brennstoffzellensysteme wurden bereits in mehreren Fahrzeugen im Dauerbetrieb getestet. Beachtenswert ist das weltweite Netzwerk von Kooperationspartnern und Investoren. Ihre aktuellsten Brennstoffzellenmodule sind „Xcellsis HY-75“, welches mit Wasserstoff als Treibstoffquelle läuft, und „Xcellsis ME-75“, welches mit Methanol als Treibstoff funktioniert. In diesen Modulen findet man die Brennstoffzelle „Mark 902“, eine PEM-Brennstoffzelle mit einer Leistung von 85 kW. Alle Brennstoffzellen, wie zum Beispiel die erwähnte Mark 902, werden von Ballard bereits in der Entwicklung für die Massenproduktion und die kostengünstigere Herstellung konzipiert.

Inzwischen hat Ballard weit über 200 Brennstoffzellen an Kunden ausgeliefert. Beim California-Fuel-Cell-Partnership-Programm, welches im November 2000 gestartet wurde, um die Alltagstauglichkeit von Brennstoffzellen-Fahrzeugen zu überprüfen, fahren 11 der 14 teilnehmenden Fahrzeuge mit Brennstoffzellen der Firma Ballard. Dies sind

DaimlerChryslers Nekar 4, Nekar 4a, Nekar 5, der Natrium Brennstoffzellenhybridfuel MiniVan, Hondas FCX-V3 (2 Fahrzeuge) und FCX-V4, Fords P2000 und Focus FCV, und Nissans Xterra FCV (2 Fahrzeuge) (Ballard (2000)).

In Zusammenarbeit mit der Firma Johnson Matthey entwickelt Ballard neue Katalysatoren für Brennstoffzellen, die Kohlenmonoxid bis maximal 40 ppm tolerieren. Diese Katalysatoren sind nötig, da die Membranen in der PEM-Brennstoffzelle extrem sensitiv auf Kohlenmonoxid reagieren. Zudem überlegt sich Ballard eigene Membranen herzustellen, da die bisher verwendeten von DuPont sehr teuer sind: Der Quadratmeter kostet rund 900 \$ und pro Kilowatt Brennstoffzellenleistung sind 0.3 Quadratmeter nötig.



Abbildung 10: Aktienkurs der Firma Ballard während der letzten 5 Jahre, Hoovers (2002)

Während des Brennstoffzellenhypes in den Jahren 1998- 2000 lag der Aktienkurs von Ballard bei einem Höchststand von 144.9 \$, inzwischen bei 9.7 \$ (siehe Abbildung 10). In der Hoch-Phase sprach man von einer Serienfertigung im Jahre 2003/2004, was heute gar nicht mehr in Aussicht gestellt wird. Ballard hat bereits über eine Milliarde Dollar in die Entwicklung von Brennstoffzellen investiert und wird nochmals mindestens die doppelte Summe investieren müssen, um ein serienreifes Brennstoffzellenauto anbieten zu können. Phil Doran², wie auch andere Spezialisten im Bereich Brennstoffzellen sind der Meinung, dass Ballard, wie die anderen grossen Entwickler von Brennstoffzellen (GM, Toyota, Honda,...) jährlich zwischen 400 – 500 Mio. \$ für die Forschung und Entwicklung der Brennstoffzellen investieren. Wie lange Ballard die Aktionäre bis zum Erreichen der Gewinnschwelle hinhalten kann ist ungewiss. Es scheint aber, dass Ballard von den unabhängigen Firmen die grösste Chance zu einer Kommerzialisierung ihrer Produkte hat. Die starke Partnerschaft mit DaimlerChrysler und Ford unterstreicht das Potential der Firma.

Nuvera

Nuvera (www.nuvera.com) mit Sitz in Cambridge (USA) ist ein Joint Venture der Brennstoffzellenabteilung von Arthur D. Little (USA) und von DeNora (Italien). Nuvera

² Gründer der Venture Capital Firma Core Technologie Ventures Limited, Frankfurt: Gespräch vom 15.10.2002 in Stuttgart

lieferte bereits Brennstoffzellen an zahlreiche Kunden, wie Esoro (Schweiz), Fiat (Italien), sowie an die Bushersteller MAN (Deutschland), NeoPlan (Deutschland) und Scania (Schweden). Im Rahmen des HYDRO-GEN-Brennstoffzellen Entwicklungsprojekts liefert Nuvera Brennstoffzellen an Peugeot und Renault. Am „HYDRO-GEN“ Projekt nehmen die Firmen Air Liquide, CEA, Nuvera, PSA Peugeot Citroen, Renault and Solvay teil. Das Projekt wird vom “Non-Nuclear Energy Joule III” Programm der Europäischen Kommission, wie auch vom französischen Staat mitfinanziert. Die Firma hat Vertriebs- und Entwicklungskooperationen mit Air Liquide und Mitsui in Japan. Nuvera bietet komplette Brennstoffzellen-Stromversorgungen an, die mit Erdgas, Propan und Benzin betrieben werden können (Geschka (2002)). Anfang Oktober 2002 hat Nuvera 9 PEM-Brennstoffzellenstacks dem Centro Ricerche Fiat (CRF) verkauft. Fiat wird diese in ihrem Demonstrationsfahrzeug Fiat 600 Elettra Fuel Cell Vehicle mit dem Namen “Seicento Elettra H2” einbauen. Nuvera Stacks bis 5 kW Leistung sind bereits erhältlich. Der HyCar der Fällander Firma Esoro war beispielsweise ein kleines Fahrzeug das mit einem solchen 5 kW Aggregat von Nuvera fährt. Nuvera besitzt nicht sehr viele Patente, wie dies unter Kapitel „Grössenunabhängige Kostennachteile,, gezeigt wird. Hingegen werden laut Erich Gülzow³, vom DLR, viele Patente von Ballard in den nächsten 5 bis 10 Jahren auslaufen, dessen Inhalt von den Mitbewerbern anschliessend frei benutzt werden kann. Nuveras Erfahrungen mit den Fahrzeugen von MAN, NeoPlan und Scania können für den Automobilbau sehr wertvoll sein. Nuvera scheint vor allem im Bereich der Brennstoffzellen-Kraftstoffprozessoren und Reformer gut positioniert zu sein. Auch andere Experten, wie zum Beispiel P. Dietrich (siehe Interview im Anhang) vom PSI und Erich Gülzow vom DLR sehen ein grosses Potential in der Firma Nuvera. Laut Massimo Venturi⁴, Mitarbeiter bei Ballard, ist Nuvera einer der wichtigsten Mitkonkurrenten der Firma Ballard.

UTC Fuel Cells

UTC Fuel Cells, früher International Fuel Cells mit Sitz in South Windsor (USA), (<http://www.utcfuelcells.com/>) begann 1985 mit der Entwicklung von Brennstoffzellen. UTC Fuel Cells hat langjährige Erfahrung in der Brennstoffzellentwicklung. Über 100 Weltallflüge waren mit UTC Fuel Cells Brennstoffzellen ausgerüstet. Bislang lieferten die UTC Fuel Cells Brennstoffzellen im Orbit rund 90.000 Stunden Strom. Zudem versorgten sie die Astronauten mit lebenswichtigem Trinkwasser. UTC Fuel Cells produziert ausserdem für den stationären Markt die PC25 Brennstoffzelle, die eine Leistung von 200 kW hat und die schon über 250 Mal verkauft wurde (United Technologies Company (2002)).

³ laut Gespräch vom 15.10.2002 in Stuttgart

⁴ Gespräch vom 15.10.2002 in Stuttgart

Zusammen mit Toshiba entwickelt die Firma eine Brennstoffzelle, die mit Benzin funktioniert (Global Press Nachrichtenagentur (2001)). Zusätzlich entwickelte UTC Fuel Cells mit den beiden Automobilhersteller Hyundai und Kia Motors Corp. den Geländewagen Santa Fe SUV (Geitmann (2001)).

Die beiden Unternehmen Shell Hydrogen U.S. (USA) und UTC Fuel Cells haben ein Joint Venture namens HydrogenSource LLC gegründet. HydrogenSource soll Spaltaggregate (Reformer) entwickeln und vermarkten, die aus Kohlenwasserstoffen wie Benzin oder Erdgas Wasserstoff erzeugen können. Solche Reformer werden für PEM-Brennstoffzellen benötigt, die Benzin und Erdgas nicht selbsttätig in ein wasserstoffreiches Gas aufspalten können.

Die Firma kann bereits erste Erfahrungen im Automobilbau vorweisen. Die wertvolle Mitarbeit bei der Entwicklung der Brennstoffzelle für das Apollo Raumfahrtprogramm lässt ein zukünftiges Potential erahnen. Ballard sieht auch in UTC Fuel Cells einen zukünftigen Mitkonkurrenten.

4.1.3 B. Brennstoffzellen-Firmen mit ersten PEM-Entwicklungs-Erfahrungen

Zu den Brennstoffzellenhersteller, die keine Brennstoffzellen-Fahrzeuge (mit-)entwickeln gehören H-Power, Plug Power, Proton Motor Fuel Cell und Siemens, die im folgenden präsentiert werden.

H-Power

H-Power (www.hpower.com) aus Belleville (USA) entwickelt vor allem PEM Brennstoffzellen und verkauft diese bereits für den stationären Bereich mit einer Leistung von 30 kW bis 1'000 kW. Das Unternehmen besitzt eine Vertriebsvereinbarung mit der Firma ECO, in der rund 250 regionale Elektrizitätsversorger in den USA zusammengeschlossen sind, um stationäre Anlagen zu liefern. H-Power bekam nach Geschka (2002) einen der ersten „grossen“ Serien-Aufträge in den USA und lieferte Heim-Brennstoffzellen-Anlagen an Gaz de France. Zudem ging H-Power eine Entwicklungskooperation mit PSA für 7 kW FC Range Extender (zur Fahrdistanzverlängerung) für PSA Elektrofahrzeuge ein.

Ausser dem Range-Extender für Peugeot haben sie noch kaum Erfahrung im Automobilbereich. Aufgrund den spärlich vorhanden Informationen kann nur gesagt werden, dass H-Power Erfahrung mit der Proton-Exchange-Brennstoffzelle hat, die aber für einen Antrieb in einem Fahrzeug noch nicht verwendet werden konnten.

Plug Power

Plug Power (www.plugpower.com) mit Sitz in Latham (USA) ist ein gemeinsames Unternehmen von Mechanical Technology und DTE Energy und hat 300 Mitarbeiter. Es ist hauptsächlich auf dem stationären Markt aktiv. Bis Ende 2001 hat Plug Power laut Geschka (2002) 200 Brennstoffzellen-Systeme ausgeliefert und über 300'000 Betriebsstunden Erfahrung sammeln können. Das Unternehmen liefert Brennstoffzellen für den stationären Bereich unter anderem an Honda und Vaillant und hat für Ford eine 10 kW Brennstoffzelle entwickelt. Auf die Anfrage des Autors an Plug Power bezüglich ihrer Aktivitäten im Brennstoffzellenbereich für den Automobilbau teilte Steven Zenker von Plug Power dem Autor mit, dass sie zurzeit keine Brennstoffzellen für den Automobilbereich herstellen. Plug Power verfügt aber über Erfahrungen mit der PEM-Brennstoffzelle im stationären Bereich und kann diese Erfahrungen in Zukunft für den Automobilbau nutzen. Der Autor denkt, dass der Einstieg über den stationären oder portablen Bereich eine gute Alternative ist. Für den stationären oder portablen Bereich werden voraussichtlich lange vor dem Einsatz der Brennstoffzelle für den Automobilbau serienreife Produkte auf dem Markt verfügbar sein. Mit dem dadurch generierten Ertrag und den erworbenen Erfahrungen kann Plug Power später in den PEM-Brennstoffzellenmarkt für Automobile einsteigen.

Proton Motor Fuel Cell

Proton Motor Fuel Cell (www.proton-motor.de) entwickelt und produziert Brennstoffzellen des Typs PEM wie auch deren Komponenten. Zusammen mit der Tochter Magnet Motor liefert Proton Motor Fuel Cell ganze Antriebssysteme. Im Bereich Verkehrsfahrzeuge liegt der Entwicklungsfokus auf Brennstoffzellen für Busse. Die Firma ist auf Brennstoffzellen mit einer Leistung von 140 kW spezialisiert, die für den Nahverkehrsbusbetrieb eingesetzt werden. Proton Motor Fuel Cell war an der Entwicklung des Reisebusses Neoplan MIC 8021 mitbeteiligt. Neben der 140 kW Brennstoffzelle entwickelte und fertigte Proton Motor Fuel Cell im Jahr 2002 unter anderem ein 30 kW Brennstoffzellen-Aggregat für den PKW-Einsatz. Folglich wurden in der Firma erste Erfahrungen gesammelt. Mit Volvo als grösserer Aktionär kann dieser KMU-Betrieb auf einen kapitalstarken Partner zählen. Ein Repräsentant der Firma Proton Motor Fuel Cell sagte dem Autor, dass sie den Fokus der Entwicklung auf die Busse legen. Dies begründete er erstens damit, dass Busse Flottenfahrzeuge sind und regelmässig zurück an einen Standort kommen, wo sie betankt und gewartet werden. Zweitens könnte der Markteinstieg für Brennstoffzellensysteme für Busse schon in den nächsten Jahren lukrativ sein. Bei einem Preis von über 400'000 \$ pro Reisebus würde sich der Mehrpreis von Brennstoffzellen nicht all zu stark bemerkbar machen. Über das zukünftige Potential für den mobilen Pkw-Bereich kann zurzeit nicht viel gesagt werden, da zu wenig Informationen zur Verfügung stehen.

Siemens

Mit der Siemens Tochter Siemens Westinghouse Power Corporation (www.siemenswestinghouse.com/en/fuelcells/) besitzt der weltweit tätige Konzern eine Abteilung, die PEM- und SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)-Brennstoffzellen entwickeln und die SOFC-Brennstoffzellen bereits für Unterseeboote verkauft hat.

Der Siemens-Bereich Power Generation (PG) errichtet zurzeit auf Basis der Brennstoffzellen von Siemens Westinghouse Power Corporation erstmals ein seriennahes Brennstoffzellenkraftwerk in Europa. Im Auftrag der Stadtwerke Hannover AG und der E.ON Energie AG soll bis 2003 eine standardisierte SOFC-Brennstoffzellenanlage mit einer maximalen Leistung von 250 Kilowatt auf dem Gelände des Kraftwerks Herrenhausen in Hannover entstehen. Das von Siemens Westinghouse Power Corporation schlüsselfertig gelieferte SOFC-Hochtemperatur-Brennstoffzellenkraftwerk im Wert von rund fünf Millionen \$ wird im Normalbetrieb 225 Kilowatt elektrische Leistung ins Netz der Stadtwerke Hannover einspeisen. Gleichzeitig werden etwa 160 Kilowatt Wärme für das Fernwärmenetz von Hannover erzeugt. Der Gesamtwirkungsgrad liegt bei mehr als 80 Prozent (SiemensWestinghouse (2002)).

Siemens Brennstoffzellenaktivitäten, wie auch die Kooperation mit dem DLR und dem Fraunhofer Institut, bilden einen Einstieg in die Technologie. Zudem ist seit 1997 im bayerischen Neunburg vorm Wald ein Gabelstapler mit PEM-Brennstoffzellen von Siemens in Betrieb sein. Das Know-how für SOFC-Brennstoffzellen in der Firma ist sicherlich vorhanden, das für die PEM-Brennstoffzellen muss noch weiter aufgebaut werden. Siemens, wie auch alle anderen Firmen, hat aber nur eine Chance, sich auf dem Automobilmarkt zu etablieren, wenn es „gleichzeitig alle Komponenten, von den Werkstoffen über den Verdichter bis zum Elektroantrieb, drastisch verbilligen“ kann, sagt Joachim Grosse, der in der Siemens-Zentralabteilung Technik das Projekt PEM-Brennstoffzelle leitet (Eberl (1998)).

4.1.4 C. Brennstoffzellen-Hersteller die einem Autokonzern gehören

Der zweiten Gruppe gehören Toyota, Honda und GM an. Diese testen bereits PEM-Brennstoffzellen in ihren Fahrzeugen. Ausführlicher werden diese Firmen im Kapitel „Verhandlungsstärke der Automobilhersteller“ behandelt.

Eine tabellarische Übersicht aller Brennstoffzellenfirmen findet man im Anhang 8.4.

4.1.5 Diskussion der Wettbewerbschancen der Brennstoffzellen-Firmen

Neben Ballard, der Firma mit den meisten Erfahrungen bei PEM-Brennstoffzellen und mit kapitalstarken Aktionären werden diejenigen Firmen zu Konkurrenten werden, die bereits jetzt erste Erfahrungen mit PEM-Brennstoffzellen im Automobilmarkt gesammelt haben. Dies sind Nuvera und UTC Fuel Cells. Ob diese Firmen den Schritt bis zur Serienreife der Brennstoffzelle schaffen, ist offen, weil dafür noch enorme finanzielle Mittel aufgewendet werden müssen. Bei den grossen Entwicklern belaufen sich diese auf rund 400 bis 500 Millionen Dollar pro Jahr. Ze Tek Power, ein ehemaliger Mitentwickler, ist bereits vom Markt verschwunden, da sie letztes Jahr Konkurs anmelden mussten. Siemens hat zwar noch keine Erfahrungen im Automobilbereich, dafür aber im Bereich SOFC-Brennstoffzellen und in einem gewissen Rahmen im PEM-Bereich. Zudem verfügt Siemens über das nötige finanzielle Rückgrat, um eventuell später in den mobilen Markt einzusteigen.

Augrund der noch zahlreichen technischen Problemen mit Brennstoffzellen, wie zum Beispiel bezüglich der Funktionalität bei Temperaturen unter Null Grad, der Aufrechterhaltung eines kontinuierlichen Gasflusses in der Membran, der Abstimmung der Komponenten einer Zelle und der Peripherie aufeinander und vielem mehr, ist es schwierig, das Potential der Firmen in der Branche abzuschätzen. Zudem befindet sich die Technologie in den nächsten fünf bis sieben Jahren noch nicht im Stadium der Serienreife. Eine Serienreife wird erst in 10 - 15 Jahren möglich sein, es sei denn, es werden in nächster Zeit sensationelle Entwicklungsfortschritte gemacht. Herr Prof. Panik von DaimlerChrysler sieht die Serienreife der Daimler-Fahrzeuge im Jahre 2010, sein Kollege Herr Erdle eher noch ein paar Jahre später⁵.

Bedrohung durch potentielle neue Konkurrenten

Die Eintrittsbarrieren sind im Brennstoffzellensektor sehr hoch, da hohe Summen in Forschung und Entwicklung der Brennstoffzelle wie auch in die Produktionsprozesse für die Massenproduktion investiert werden müssen. Die Allianz von Ballard, Ford und DaimlerChrysler hat schon über eine Milliarde \$ in den Brennstoffzellen-Bereich investiert.

Weitere Eintrittsbarrieren entstanden durch die Allianz von Brennstoffzellenherstellern mit Automobilfirmen, um Zugriff auf Vertriebskanäle zu haben. Nochmals erschwerend sind die nötigen Verkaufsmengen (Economy of scale), um die angepeilten Kosten von 50\$ bis 70\$ pro kW Leistung der Brennstoffzelle zu erreichen. Mit einem geringeren Verkaufsvolumen können Brennstoffzellenhersteller nicht konkurrenzfähig sein, da sonst die herkömmlichen Otto- und Dieselmotoren oder die anderen Substitutionsprodukte weiter preiswerter sind und somit eine dominante Stellung innehaben werden.

⁵ mündliche Aussage vom 15.10.2002 in Stuttgart

Nichtsdestotrotz werden kapitalstarke Unternehmen aus dem Automobil- oder Treibstoffsektor in den Brennstoffzellenmarkt einsteigen, wie dies schon durch die obigen Ausführungen gezeigt wurde. Der Einstieg dieser Firmen wird erfolgen, da sie erwarten, dass der Brennstoffzellenmarkt langfristig einen interessanten Markt darstellen könnte.

4.1.6 Marktanteil der Brennstoffzellenfahrzeuge

Ausser Ballard, Nuvera und UTC Fuel Cells haben noch keine Firmen in grössere Produktionsanlagen zur Herstellung der PEM-Brennstoffzellen für den Automobilmarkt investiert. Ballard wird aufgrund dieser Tatsache und der technologischen Führungsrolle in den nächsten 2 bis 3 Jahren einen Marktanteil von mehr als 50 % im Brennstoffzellen-Markt haben, wobei dieser Markt extrem limitiert ist. Nuvera und UTC Fuel Cells werden die restlichen 30 bis 50% unter sich aufteilen. Die Kosten der Herstellung einer Brennstoffzelle werden momentan bei diesen sehr kleinen Stückzahlen mit dem Verkaufspreis nicht gedeckt werden können.

Firmen, wie Siemens, H-Power, und Plug Power werden zuerst ihre portablen Applikationen und stationären Anlagen vermarkten. Aufgrund der Erfahrungen, die sie in diesen Sektoren gesammelt haben, werden sie mit der Zeit in den Brennstoffzellen-Markt für den Automobilbau einsteigen. Mit den Erfolgen in den beiden anderen Märkten werden sie über das nötige Kapital, wie auch über die nötigen Fachleute verfügen, um mit Firmen wie Ballard, Nuvera und United Technologies Fuel Cells in den Wettbewerb zu treten.

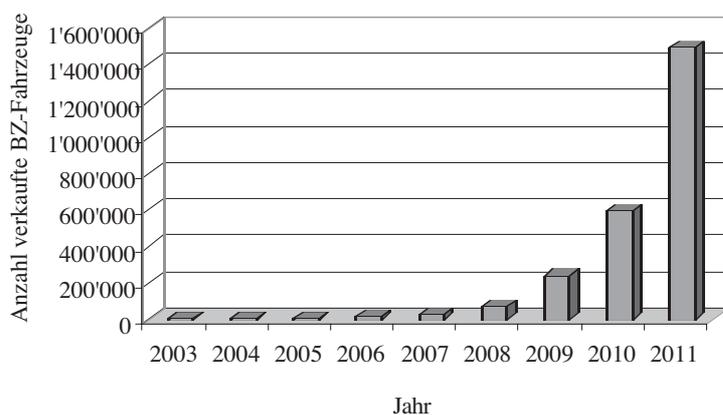


Abbildung 11: US-amerikanische Verkaufszahlen von Brennstoffzellenfahrzeugen nach Allied Business Intelligence, (Ozbek (2001))

Die Beratungsfirma Allied Business Intelligence (Ozbek (2001)) glaubt an einen Marktanteil von Brennstoffzellen-Fahrzeugen in den USA von 4 % am gesamten US-Automobilmarkt im Jahre 2010, was ungefähr 600'000 Fahrzeugen entspricht (Abbildung 11). Diese Prognose kann aufgrund anderer Angaben in der Literatur und Interviews mit Fachleuten als sehr optimistisch eingestuft werden. Die Übersicht von Frermont, et al. (2000) (Tabelle 7) rechnet

mit verschiedenen Szenarien. Auch das pessimistische Szenario halte ich noch für relativ unrealistisch. Professor Jürgen Garche vom Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW), wie auch Philipp Dietrich vom Paul Scherrer Institut denken, dass bis ins Jahr 2010 höchstens Stückzahlen von je rund 100 Fahrzeugen pro Prototyp der einzelnen Automobilhersteller produziert werden (siehe Interviews im Anhang). Ab dem Jahre 2020 könnten Brennstoffzellenfahrzeuge zusammen mit Hybrid- und Erdgasfahrzeugen, nach Meinung der beiden Experten, rund 3 % der Fahrzeuge ausmachen. In Nordamerika und der EU wären dies je rund 500'000 Fahrzeuge mit alternativen Antriebssystemen.

Tabelle 7: Absatz von Brennstoffzellen-Fahrzeuge nach Frermont, et al. (2000)

Verkaufte Fahrzeuge pro Jahr	2003	2005	2010
Pessimistischer Fall	0	5'000	20'000
Mittlerer Fall	2'000	20'000	700'000
Optimistischer Fall	5'000	40'000	1'000'000

4.1.7 Mögliche Szenarien für die Marktpenetration

Da die Zukunft noch ungewiss ist, gibt es nicht nur 1 mögliches Zukunftsszenario, sondern mehrere denkbare. Diese Szenarien sollen kurz und bündig darstellen, welche Möglichkeiten bezüglich der Marktdurchdringung von Brennstoffzellenfahrzeugen möglich sind.

Optimistisches Szenario

Die Allianz Daimler/Ford/Ballard, wie auch Toyota, GM und Honda werden keine Kosten und Mühen scheuen, die Brennstoffzelle für den täglichen Einsatz weiterzuentwickeln und die Produktionskosten zu senken. In den nächsten zwei bis drei Jahren werden weitere Prototypen in Japan, in Europa und in Kalifornien getestet. Zudem wird man sich auf eine Treibstoffform einigen und zusammen mit den Staaten und anderen Interessensgruppen die nötige Infrastruktur aufbauen.

Die Motivation von GM, Toyota und Honda an diesem Wettbewerb teilzunehmen, basiert auf der Angst, dass DaimlerChrysler zuerst mit einem Brennstoffzellen-Fahrzeug auf den Markt kommt. Aufgrund dieses verschärften Konkurrenzkampfes werden enorme finanzielle Investitionen getätigt und die dafür nötigen Kapitalgeber gefunden. Die ersten Serienmodelle werden 2010 auf den Markt kommen. Die Kosten pro kW werden dann bei rund 100 \$ liegen. Der Anteil von Brennstoffzellenfahrzeugen an der weltweiten Autoflotte wird im Jahre 2020 bei ungefähr 5 bis 7 Prozent liegen.

Realistisches Szenario

Auch hier werden die Allianz Daimler/Ford/Ballard wie auch Toyota, GM und Honda keine Kosten und Mühen scheuen, die Brennstoffzelle für den täglichen Einsatz weiterzuentwickeln und die Produktionskosten zu senken. In den nächsten zwei bis sieben Jahren werden weitere Prototypen in Japan, in Europa und in Kalifornien getestet. Man kann sich nicht auf eine Treibstoffform einigen, daher werden die Unternehmen mit dem Staat und anderen Interessensgruppen parallel eine Wasserstoff-(flüssig und gasförmig), Erdgas- und Methanolinfrastruktur aufbauen. Die Motivation von GM, Toyota und Honda, an diesem Wettbewerb teilzunehmen, basiert auch hier auf der Angst, dass DaimlerChrysler zuerst mit einem Fahrzeug auf den Markt kommt. Aufgrund dieses Konkurrenzkampfes werden enorme finanzielle Investitionen getätigt und die dafür nötigen Kapitalgeber gefunden, wobei dafür viel Überzeugungskraft notwendig sein wird. Die ersten Serienmodelle werden 2012 bis 2015 auf den Markt kommen. Bis 2015 werden nur Brennstoffzellenbusse in Ballungszentren eingesetzt und in Flotten werden Brennstoffzellenfahrzeuge als Versuchsfahrzeuge getestet. Die Kosten pro kW werden im Jahre 2015 bei zirka 100 \$ pro kW liegen. Ab dem Jahre 2020-2025 wird das Brennstoffzellenfahrzeug zu einem Massenprodukt. Um das Brennstoffzellenfahrzeug zu fördern, müssen finanzstarke staatliche Förderprogramme einerseits die Treibstoff-Infrastruktur, wie auch das Fahrzeug selbst subventionieren. Nach einer Übergangsphase, bei der verschiedene Treibstoffe verwendet werden, wird nach 2025 bis 2030 nur noch reines Wasserstoff als Treibstoff verwendet. Nochmals zahlreiche Jahre später wird dieser Treibstoff aus regenerativen Energiequellen stammen.

Substituierende Produkte wie Hybrid-Fahrzeuge und Gasfahrzeuge werden so optimiert, dass sie als extrem emissionsarme Fahrzeuge auf dem Automobilmarkt zu einem konkurrenzfähigen Preis angeboten werden. Auch Otto- und Dieselmotor werden weiter optimiert.

Pessimistisches Szenario

Im Laufe der nächsten Jahre wird man erkennen, dass noch zu viele technische Hürden zu überwinden sind, bevor man Brennstoffzellenfahrzeuge auf den Markt bringen kann. Die Test-Programme in Japan, Europa und Kalifornien zeigen, dass das Brennstoffzellenauto für den täglichen Einsatz nicht geeignet ist und die Effizienz des Brennstoffzellen-Motors nicht optimal ist. Es wird immer schwieriger, Kapitalgeber zu finden, die die weitere Forschung finanzieren und sich auf eine Massenproduktion ab dem Jahre 2020 verträsten lassen. Firmen wie Honda, Toyota, Peugeot, Renault und GM steigen aus der Brennstoffzellenforschung mehrheitlich aus, da schon zu hohe Summen an Forschungsgeldern in diesen Bereich geflossen sind. Es findet sich kaum niemand, der Investitionen in die Treibstoff-Infrastruktur tätigt. Anstelle der Brennstoffzellen wird das Forschungsschwergewicht auf die Optimierung

der konventionellen Motoren, wie auch auf die Weiterentwicklung von Hybrid-Fahrzeugen und Erdgasfahrzeugen verlegt. Durch die Finanzierungsprobleme müssen viele kleine Venture Capital Firmen im Bereich der Brennstoffzellenkomponenten- und Brennstoffzellenentwicklung aufgeben.

Diese drei Szenarien bilden drei extreme Standpunkte. Heute findet man zu all diesen drei Szenarien Personen, die an die eine oder andere Variante glauben. Der Brennstoffzellen „Hype“ ist sicherlich nicht mehr vorhanden, aber es gibt immer noch zahlreiche Leute, die an das optimistische Szenario glauben. Beispielsweise verbreiten die Entwicklungsabteilungen von Automobil- und Brennstoffzellenfirmen das optimistische Szenario, um Geldgeber zu finden. Diese Tendenz spiegelt sich auch in den Analysen der Broker Reports von Banken wider.

Das realistische Szenario wird je länger je mehr von Fachleuten aus den Forschungslabors vertreten. Vor allem unabhängige Institute von Universitäten und staatlichen Forschungseinrichtungen glauben an diese Variante.

Das pessimistische Szenario wird ebenfalls von Experten aus der Forschung vertreten, die noch die zahlreichen Hürden bis zur Massenproduktion sehen, sowie nicht an eine flächendeckende Infrastruktur glauben.

Vorhersagen über die nächsten 1 bis 3 Jahre sind einigermaßen möglich. Unmöglich ist es dagegen, genaue Vorhersagen über die Zeit in 15 bis 20 Jahre zu machen. In 15 bis 20 Jahren kann vieles passieren, was heute noch für unmöglich gehalten wird. Kriege in Nahost könnten die Treibstoffpreise in die Höhe schnellen lassen, neue Ölvorkommen könnten dagegen die Forschungsanstrengungen bezüglich alternativen Antriebssystemen in Frage stellen aber auch neue Erfindungen im Gebiet der alternativen Antriebssysteme können plötzlich die Marktpenetration beschleunigen. Diese Arbeit kann daher nur ein Versuch sein, auf der Basis der heute bekannten Informationen, die zukünftigen Entwicklungen im Brennstoffzellen-Markt möglichst realistisch abzuschätzen.

4.1.8 Substitutionsökonomie

Substitution ist nach Porter (2000) der Vorgang, bei dem ein Produkt oder eine Dienstleistung durch andere ersetzt wird. Substitution gehört zu den fünf die Rentabilität einer Branche bestimmenden Wettbewerbskräften, da die Gefahr der Substitution den Branchenkräften Grenzen setzt. Produktsubstitution tritt ein, wenn ein Umstellungsreiz vorhanden ist und dieser stärker ist als die Umstellungskosten. Umstellungsreiz und Umstellungskosten sind nach Porter eine Funktion von drei Faktoren, die wie folgt aussehen:

- Relativer Wert / Preis des Brennstoffzellenantriebes gegenüber dem Verbrennungsmotor (via Total Cost of Ownership auszudrücken)
- Umstellungskosten, welche beim Wechsel auf ein neues Produkt anfallen
- Umstellungsneigung der Abnehmer

Relativer Wert/Preis

Der Wert beziehungsweise Preis eines Substitutionsprodukt ist nach Porter (2000) der Wert, den es dem Abnehmer im Vergleich zu dem von ihm gezahlten Preis bietet. Ein Ersatzprodukt ist wertvoll, wenn es, auf das Produkt bezogen, für den Abnehmer kostensenkend oder leistungssteigernd ist. Diesen Wert muss der Abnehmer jedoch wahrnehmen. Vergleicht man einen heutigen Ottomotor oder Dieselmotor mit einer Brennstoffzelle, so nimmt man Dollar pro Kilowatt (\$/kW) als Vergleichswert. Pro Kilowatt Leistung zahlt man bei einem Ottomotor heute 30 \$, bei einem Dieselmotor 40\$ bis 50\$. Der Verbrennungsmotor ist ein ziemlich ausgeklügeltes System, das sich auf der Lernkurve in einer fortgeschrittenen Position befindet. Da Motorenserien im Durchschnitt länger auf dem Markt verkauft werden als die Auto-Modelle, können grössere Serien hergestellt werden, was den Preis senkt. Die hohen Investitionskosten für die Entwicklung können somit über mehr als 10 Jahre abgeschrieben werden. Laut Wengel, et al. (2001) liegen die Preise für PEM-Brennstoffzellen-Stacks derzeit bei ca. 5'300 – 10'600 \$/kW⁽⁶⁾, was auch untenstehende Tabelle 8 zeigt.

Tabelle 8: Material- Herstellungskosten für PEM-Brennstoffzellen Stacks, (Wengel, et al. (2001))

BZ-Komponenten	Heute	Ziel (Kalhammer, et al. (1999b))
Leistungsdichte	0.3 W/ cm ²	1 W/cm ²
MEA	2'756 \$/kW	< 14 \$/kW
Bipolarplatten (Material)	1'325 \$/kW	< 5 \$/kW
Bipolarplatten (Bearbeitung)	530 \$/kW	Enthalten in BPP ⁽⁷⁾ -Kosten
Gasdiffusion	530 \$/kW	Enthalten in MEA-Kosten
Endlatten, Kleinteile	424 \$/kW	Nicht definiert
Dichtungen	530 \$/kW	Integriert in BPP-Kosten
Montage/Test	1'272 \$/kW	< 5 \$/kW
Gesamt	7'367 \$/kW	< 24 \$/kW

Autokonzerne gehen davon aus, dass bei Stückzahlen von 100'000 Einheiten pro Jahr die Kosten eines Brennstoffzellenantriebes pro kW in Zukunft bei 100 bis 200 Euro⁽⁸⁾ liegen

⁶ Jürgen Wengel, et al. (2001) geben 10'000 – 20'000 DM/kW an, was mit einem Umrechnungsfaktor von 1 \$ = 0.53 DM umgerechnet wurde.

⁷ Bipolarplatten

werden (Pehnt, et al. (2002) & P. Dietrich (siehe Interview)). Durch Rationalisierungsmassnahmen, den Effekten aus der Lernkurve und Erfahrung bei der Produktion können Einsparungen erzielt werden. Wenn die Kosten bei Verdoppelung der gesamten Produktion um 20 Prozent gesenkt werden können, so spricht man von einem Lernfaktor von 80 Prozent. Unter der Annahme, dass bei der ersten Serienfertigung einer Brennstoffzelle 1'000 \$ pro kW bezahlt werden müsste und ein Lernfaktor von 80 Prozent angenommen wird, so resultiert daraus, dass bei einem Anfangsbestand von 2'000 Fahrzeugen eine Steigerung der Produktion auf 4'000'000 notwendig ist, um den angestrebten Preis von 100 \$ pro kW zu erreichen.

⁸ Pehnt et al geben 100 bis 200 Euro an . Zur Umrechnung wurde der Umrechnungskurs vom 11.9.2002 verwendet, der bei 0.97 Euro pro Dollar liegt.

Tabelle 9: Total Cost of Ownership (TCO) für Fahrzeuge mit Verbrennungs- und Brennstoffzellenmotor

Kosten-Parameter versus Fahrzeugkosten:	Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (75 kW Leistung)	Quelle	Fahrzeug mit H2-Brennstoffzellenantrieb (75 kW Leistung)	Quelle	Fahrzeug mit H2-Brennstoffzellenantrieb (75 kW Leistung) mit Methanol-reformer	Quelle
Fahrzeug ohne Antrieb	18'000 \$	Thomas, et al. (2000) und Erdmann, et al. (1999)	18'000 \$	Thomas, et al. (2000) und Erdmann, et al. (1999)	18'000 \$	Thomas, et al. (2000) und Erdmann, et al. (1999)
Antrieb	2000 \$	Erdmann, et al. (1999)	7500 \$	Yuji Morita, et al. (2000)	5'500 \$	Erdmann, et al. (1999)
\$/ kW	26		100 \$		75	
Eigenkapital	50 %		50 %		50%	
Kreditanteil	10'000 \$		12'750 \$		11'750 \$	
Lebensdauer	14	Contadini (2000)	14	Contadini (2000)	14	Contadini (2000)
Zinssatz	9 %	Migros Bank Privatkredit per 11.9.2002	9 %	Migros Bank Privatkredit per 11.9.2002	9 %	Migros Bank Privatkredit per 11.9.2002
Abschreibungen pro Jahr	1'429 \$		1'821 \$		1'679 \$	
Zins pro Jahr	900 \$		1'148 \$		1'058 \$	
Summe der direkten Produktkosten	2'329 \$		2'969 \$		2'737 \$	
Treibstoffeffizienz in Liter	7.00	Contadini (2000) und Thomas, et al. (2000)	3.5	Contadini (2000) und Thomas, et al. (2000)	4.7	Contadini (2000)
Gefahrene Kilometer pro Jahr in Kilometer	15'000		15'000		15'000	
Treibstoffpreis in \$ pro l	⁹ 0.95 \$ / l (Bezin)	Contadini (2000)	0.7 \$ / l (Wasserstoff)	Bevilacqua Knight (2001)	¹⁰ 1.8 \$ / l (Methanol)	Arthur D. Little (2002) ¹¹
Treibstoffkonsum (Liter pro Jahr)	1050 l		525 l		705 l	
Wartungskosten pro Jahr	516 \$	Contadini (2000)	434 \$	Contadini (2000)	450 \$	Contadini (2000)
Summe der jährlichen Treibstoffkosten	998 \$		368 \$		1'269 \$	
Summe der direkten Betriebskosten	1'514 \$		802 \$		1'719 \$	
Summe der Kosten	3'843 \$		3'771 \$		4'456 \$	

⁹ Der Autor rechnet mit 3.6 \$ per Gallone, was mit dem Faktor 3.78541 in Liter umgerechnet wurde.

¹⁰ Der Autor rechnet mit 1.5 \$ per Gallone, was mit dem Faktor 3.78541 in Liter umgerechnet wurde.

¹¹ berechneten 1.1 \$ - 2.5 \$

In Tabelle 9 wurde für 3 verschiedene Antriebssysteme ein Kostenvergleich durchgeführt. Diese wurden auf Basis von Schätzung für das Jahr 2010 vorgenommen, die verschiedenen Literaturquellen entnommen wurden. Unter diesen berechneten Bedingungen, wäre ein mit Wasserstoff betriebenes Brennstoffzellenauto 2 % günstiger als ein konventionelles Fahrzeug. Kalkuliert man aber mit einem Preis von 75 \$ pro kW für den Brennstoffzellenantrieb, so ist das Brennstoffzellenfahrzeug noch 7 % günstiger. Bedeutend sind die Steuern, die der Staat auf den Treibstoff erhebt, wie auch die Preisentwicklung von Rohöl in den nächsten Jahren, da diese Entwicklungen starken Einfluss auf die Treibstoffkosten haben. Ein Brennstoffzellen-Fahrzeug mit Reformer wäre nach den Berechnungen in Tabelle 9 rund 15 % teurer als ein konventionelles Benzinfahrzeug. Der Staat oder die Hersteller müssten somit dafür sorgen, dass Brennstoffzellen-Fahrzeuge für den Konsumenten gleich teuer sind wie ein herkömmliches Auto, da sonst kaum jemand ein Brennstoffzellenfahrzeug kaufen würde. Laut J. Garche (siehe Interview im Anhang) zahlt der umweltfreundliche Konsument maximal 5-6 % mehr für ein umweltfreundlicheres Produkt.

Zu den in Tabelle 9 angegebenen Kosten kommen für Brennstoffzellenfahrzeuge ausserdem noch indirekte Betriebskosten, die die Kosten für ein Brennstoffzellenfahrzeug erhöhen. Zum einen fällt der Weg bis zur nächsten Tankstelle ins Gewicht. Zum anderen ist die Abschreibung höher, da bei einem Verkauf für ein gebrauchtes Brennstoffzellenfahrzeug weniger eingelöst werden kann als für ein konventionelles Fahrzeug.

4.1.9 Diskussion der Substitutionsbedingungen

Die Kosten der Brennstoffzellen sind ein Spiegelbild der technischen Schwierigkeiten bei der Herstellung des Produktes. Die vom Markt akzeptierten Kosten richten sich in der Regel nach den Kosten der Wettbewerbstechnologie (Wengel, et al. (2001)). Solange der Preis pro Kilowattstunde nicht gleich hoch ist, wie beim Otto- oder Dieselmotor, werden keine Massen von Fahrzeugen abgesetzt. Langfristig muss eine PEM-Brennstoffzelle rund 50\$/kW kosten, um kompetitiv zu sein. Abbildung 12 zeigt die Kostenstruktur der Brennstoffzelle. Die Kosten eines Stacks bestehen aus den Kosten der Brennstoffzellen, dem Treibstoffprozessor, der Feinjustierung der Brennstoffzelle und dem Zusammenfügen der Komponenten. Die Abbildung zeigt schön, dass zwei Drittel der Kosten auf das Konto der Brennstoffzelle gehen. Die grössten Kostenreduktionspotentiale bei den Brennstoffzellen liegen im Bereich der Materialentwicklung. Konkret heisst das für die PEM-Brennstoffzelle:

- weitere Senkung des Platingehalts
- weitere Senkung der PEM-Membrankosten
- weitere Senkung der Kosten der Bipolarplatten

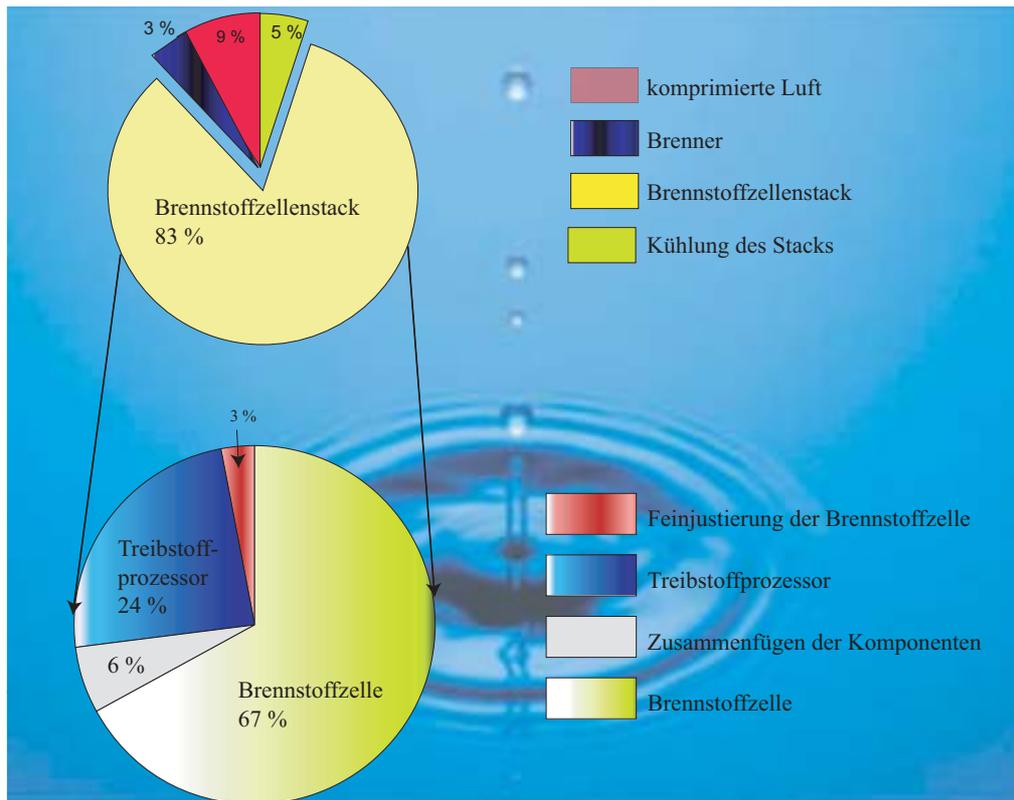


Abbildung 12: Kostenstruktur des Brennstoffzellenmoduls, aufgrund von Zahlen aus Geschka (2002) & Kalhammer, et al. (1999b)

Kosten der Neugestaltung oder Neuformulierung von Produktionsprozessen

Produkte oder Produktionsprozesse eines Abnehmers (hier Automobilhersteller) müssen oft neu gestaltet werden, um ein Ersatzprodukt aufnehmen zu können. Die Kosten für die Neugestaltung sind niedriger, wenn der Abnehmer Produktgenerationen ändert oder eine neue Anlage baut.

Da die Brennstoffzellen nicht immer in der Automobilfirma selber hergestellt werden, steigt der Anteil der Zulieferer, was zu Einsparungen bei den Fixkosten führt. Dies sind beispielsweise Lohn- und Gebäudekosten.

Relativ hohe Kosten fallen bei der Bereitstellung der Infrastruktur an. Bevilacqua Knight (2001) rechnet in der Anfangsphase (Nischenmarktphase) mit Kosten von 450'000 \$ für eine Wasserstofftankstelle, die 50 Fahrzeuge pro Tag betanken kann. Die American Methanol Foundation (1999) rechnet dagegen mit Kosten von rund 50'000 \$ pro Methan-Tankstelle, was aber Herr Dietrich (siehe Interview im Anhang) als zu tief betrachtet. Werden beispielsweise in der Schweiz rund 10 % der bestehenden Tankstellen, das heisst 356 Tankstellen (Erdöl-Vereinigung (2001)) für den Wasserstoffeinsatz umgerüstet, so fallen

Kosten von 160'200'000 \$ an. Für eine Methanoltankstelle müsste mit Kosten von mindestens 17'800'000 \$ kalkuliert werden. Laut Erich Gülzow und Jürgen Garcke müssen aber nach 15 Jahren alle Tankstellen total erneuert werden. Bei dieser Erneuerungsphase könnte man die Infrastruktur für die neuen Treibstoffe integrieren, womit die Kosten geringer ausfallen würden.

Umlernkosten

Mitarbeiter der Automobilhersteller müssen auf neue Prozessschritte umgeschult werden, da sie neues Know-how benötigen. Know-how bezüglich Elektromotoren, Brennstoffzellen und deren Steuerung muss in den Automobilfirmen neu aufgebaut werden. Zusätzlich müssen Investitionen in Patente als auch in Mitarbeiter-Know-how erfolgen.

Betriebsgrössenersparnisse und Produktdifferenzierung

Unter den aktuellen Bedingungen macht eine Produktdifferenzierung nur unter dem Gesichtspunkt Sinn, Kunden zu binden. Es darf dabei aber nicht darauf herauslaufen, dass mehrere Treibstoffkonzepte für den Antrieb der Brennstoffzelle verfolgt werden. Das Problem des Aufbaus einer Treibstoffinfrastruktur kann nur gelöst werden, wenn man sich langfristig auf einen Treibstoff einigen kann. Kurzfristig werden einige Firmen eine eigene Treibstoffpolitik verfolgen, was die Kosten zusätzlich in die Höhe treiben wird. Auch die Brennstoffzellenfirmen sind an einem Massenmarkt interessiert, beziehungsweise können nur durch die Economy of Scale überleben.

Kapitalbedarf

Da jede grosse Brennstoffzellen-Entwicklungsfirma pro Jahr zirka 400 bis 500 Millionen \$ Entwicklungsausgaben hat, sind die Eintrittsbarrieren für neue Firmen sehr hoch. Kleinere KMUs werden kaum die Möglichkeiten haben diese hohen Summen in den nächsten 10 Jahren aufbringen zu können.

Umstellungskosten

Am Anfang wird noch keine Standardisierung der Brennstoffzellen-Produkte existieren. Hat sich eine Automobilfirma daher für einen Brennstoffzellentyp entscheiden, so wird für längere Zeit eine enge Kundenbindung bestehen. Erst im Laufe der Zeit sich werden sich die Brennstoffzellen-Firmen auf eine Standardisierung einigen, was die Umstellungskosten senken würde.

Zugang zu Vertriebskanälen

Eintrittsbarrieren entstanden durch die Allianz von Brennstoffzellenherstellern mit Automobilfirmen, um Zugriff auf Vertriebskanäle zu haben. Ballard hat sich die Verkaufskanäle durch die Partnerschaft mit DaimlerChrysler und Ford gesichert. GM und Toyota entwickeln eigene Brennstoffzellen, was bedeutet dass die Vertriebskanäle der weltweit grössten 4 Automobilproduzenten nicht mehr zur Verfügung stehen. Die anderen Brennstoffzellenhersteller wie Nuvera und United Technology Fuel Cells müssen mit den übrig bleibenden Automobilherstellern Kooperationen eingehen, um Zugang zu Vertriebskanälen zu erlangen.

Grössenunabhängige Kostennachteile

Wichtig für Firmen ist es, über Kostenvorteile zu verfügen, die für neue Konkurrenten unerreichbar sind. Ein wichtiger Faktor bei einer neuen Technologie sind Patente. Zur Untersuchung der vorhandenen Patente im Bereich Brennstoffzellen wurde eine Recherche am europäischen Patentamt durchgeführt. Am 2.10.2002 wurde nach dem Begriff „fuel cell“ in den registrierten Patentschriften gesucht. Nur wenn der Begriff im Titel vorkam, wurde er hier in die Tabelle 10 aufgenommen. Die Suche wurde nicht weiter detailliert, da man sonst pro Brennstoffmodul nach Dutzenden von Patentkategorien hätte suchen müssen. Für die Polymere Membran gelten beispielsweise die amerikanischen Patentkategorien 521-025 bis 521-39, die einzeln abgefragt werden müssten.

Die Suche ergab, dass die Firma Siemens am meisten Patente mit dem Schlagwort „fuel cell“ angemeldet hat (Tabelle 10). Die Firmen Toyota, Honda, Ballard Power, United Technologies Fuel Cell und Nissan folgen mit je über 200 Patenten. Auch hier zeigt sich das Potential von Ballard, wie auch von Siemens und United Technologies Fuel Cell. Auf der Automobilstufe führen somit DaimlerChrysler und Ford (via Ballard), sowie Toyota, Honda und Nissan. Das Resultat von Nissan erstaunt, da erst der Xterra FCV (Fuel Cell Vehicle) als erstes ernstzunehmendes Fahrzeug präsentiert wurde. Weiter erstaunt das Resultat von Nuvera mit nur 11 Patenten, da einige Experten dieser Firma ein hohes Entwicklungspotential zuschreiben und glauben, dass das Unternehmen zu einem ernsthaften Konkurrenten von Ballard und anderen Brennstoffzellen-Herstellern werden könnte. Ausser diesen zwei Ausnahmen stützen die vorliegenden Resultate die Ergebnisse aus den vorhergehenden Kapiteln.

Tabelle 10: angemeldete Patente am europäischen Patentamt, eigene Recherche European Patent Office (2002)

Firma	Angemeldete Patente zu „fuel cell“
Volkswagen	0
Hyundai	1
BP	1
BMW	7
Proton Motor	8
GM	8
Mobil Oil	9
NUVERA	11
Peugeot	11
Renault	21
Energy Partners	25
Mazda	29
H-POWER	35
Ford	37
Johnson Matthey	39
Exxon	69
DaimlerChrysler	87
Plug Power	88
Nissan	210
United Technologies	288
Ballard Power	312
Honda	425
Toyota	430
Siemens	634
Fuel Cell-Patente insgesamt	20'691

Weitere grössenunabhängige Kostenvorteile sind günstige Standorte und staatliche Subventionen. Ballard wird in Zukunft vom Standort seiner Werke profitieren, da diese in unmittelbarer Nähe von Produktions- und Forschungsanlagen der Firmen DaimlerChrysler und Ford liegen. Dies ermöglicht einen intensiven Austausch von Know-how ohne grosse Zeitverzögerung und Anreiseweg, wie auch die kostengünstige Belieferung der beiden Firmen. Staatliche Subventionen erhielten die Firmen Peugeot, Renault, GM, DaimlerChrysler, Ford und Nissan in Form von Entwicklungsgeldern. Ballards Einstieg in die Brennstoffzellentechnologie erfolgte ebenfalls durch Forschungsaufträge, die das Unternehmen durch die Länder Kanada und USA in den 80er Jahren erhielt. United Technologies Fuel Cell profitierte durch die Aufträge der Raumfahrtindustrie der letzten 40 Jahre, die schlussendlich auch vom Staat bezahlt wurden. Zahlreiche weitere Firmen profitieren direkt durch Aufträge des Militärs oder indirekt durch dessen Forschung.

Staatliche Politik, institutionelle Eintrittsbarrieren

Auch die Regierung spielt bei der Förderung der Brennstoffzellentechnologie eine wichtige Rolle, wie dies schon in Kapitel 0.0 erläutert wurde. Steueranreize für Konsumenten würden zum Beispiel helfen, die höheren Anschaffungskosten für fortschrittliche Technologien zu kompensieren und dabei einen höheren Bedarf für Fahrzeuge zu schaffen, die mit einer solchen Technologie ausgestattet sind. Das Projekt VEL2¹² (BaslerZeitung (2002)) zeigte, dass nur via steuerliche Anreize und durch Subventionierung der Autos – im VEL2 sind es Elektro- und Hybridfahrzeuge - neue Antriebssysteme, die in der Anschaffung teurer sind, gekauft werden. Anreizsysteme für Fahrzeuge müssen ganz genau untersucht und vorsichtig gewählt werden, da eventuell sie sich eventuell negativ auf den öffentlichen Verkehr auswirken. Anstelle der Benutzung von öffentlichen Verkehrsmitteln wird ein steuerlich begünstigtes Zweitauto gekauft.

GM, DaimlerChrysler und Ford nahmen zum Beispiel von der unter Clinton ins Leben gerufenen Technologie-Initiative „Partnership for a New Generation of Vehicles“ teil, welches vom amerikanischen Department of Energy und anderen staatlichen Behörden der USA unterstützt wird. Durch das Programm wurden Forschungsprojekte im Bereich PEM-Brennstoffzellen als Fahrzeugantrieb und Biomassevergasung zur Wasserstoff-Bereitstellung als Fahrzeugkraftstoff finanziell unterstützt. An der Detroit Autoshow 2002 hat sich die US-Bundesregierung von dieser Initiative verabschiedet und startete eine neue, dafür aber noch längerfristige Initiative "Freedom CAR". CAR steht für Cooperative Automotive Research. Dies soll ein grossangelegtes, gemeinsames Forschungsvorhaben zwischen dem Department of Energy und dem Council for Automotive Research (USCAR) werden, das den Masseneinsatz von Brennstoffzellen zum Betreiben von Fahrzeugen vorbereiten soll.

Im US-Bundesstaat Kalifornien existiert die „California Fuel Cell Demonstration Initiative“, welche Automobilfirmen, Brennstoffzellen-Hersteller und Ölfirmen als Mitglieder hat. Die Initiative unterstützt die Markteinführung der Brennstofftechnologie. Um das Projekt zu fördern, wird Kalifornien „Ultra Low und Zero Emission“-Fahrzeuge, ob Batterien-, Hybrid- oder Brennstoffzellenfahrzeuge steuerlich begünstigen.

Auch das Kyoto-Protokoll, welches eine geringere Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre erreichen möchte, wie auch die europäischen Grenzwertverschärfungen bezüglich der Schadstoffemissionen von Pkws sind klare Mechanismen, die Forschung und Entwicklung im Bereich der alternativen Antriebssysteme fördern.

¹² Grossversuch im Mendrisiotto (Südtessin) zur Förderung von Elektromobilen und schadstoffarmen Fahrzeugen und Hybridfahrzeuge

Wettbewerbsvorteil durch politische Rahmenbedingungen einzelner Staaten

Nach Porter, et al. (1995) herrscht die Illusion, dass Umweltgesetzgebungen nur die Kosten erhöhen und dazu führen, dass die lokalen Firmen, die den Gesetzgebungen ausgesetzt sind, auf dem Weltmarkt Nachteile hinnehmen müssen. Porter schildert im Buch „competitive advantage of countries“, dass es zum Teil sogar von Vorteil ist, wenn Staaten im Alleingang strenge Umweltschutzvorschriften erlassen, da dies die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmer dieser Länder steigern kann. Porter, et al. (1995) haben über Hundert Firmen in einem Duzend Ländern untersucht und kommen zum Schluss, dass Firmen, die strenge Umweltgesetzgebungen ausgesetzt sind, am ehesten diejenigen sind, die die Kapazität zur kontinuierlichen Innovation haben. In Porter, et al. (1995) heisst es:

„Such “innovation offsets,” as we call them, can not only lower the net cost of meeting environmental regulations, but can even lead to absolute advantages over firms in foreign countries not subject to similar regulation. Innovation offsets will be common because reducing pollution is often coincident with improving the productivity with which resources are used. In short, firms can actually benefit from properly crafted environmental regulations that are more stringent than those faced by their competitors in other countries“. Porter, et al. (1995) unterstreichen diese These mit Beispielen dafür, dass Firmen, die sofort auf Umweltgesetzgebungen in ihrem Land reagieren und folglich ein innovatives Produkt auf den Markt bringen über einen sogenannten “Early-Mover-Advantage“ verfügen. Durch die „innovation offsets“ werden die kurzfristig entstanden Kosten langfristig mindestens kompensiert. Viele Firmen schliessen sich dieser These nicht an. Beispielsweise warnte Lee Iacocca, Präsident der Ford Motor Company 1970, dass durch die neue Umweltgesetzgebung “Clean Air Act” in den USA die Automobilproduktion zusammenbrechen werde und dies der amerikanischen Wirtschaft schaden würde. Diese Prognose stellte sich als falsch heraus. Nach Porter, et al. (1995) ist dieser positive Zusammenhang zwischen Wettbewerbsfähigkeit und strengen Umweltschutzvorschriften immer dann eher die Regel als die Ausnahme, wenn die Regulierung richtig implementiert wird.

4.2 Verhandlungsstärke der Lieferanten

Viele Firmen, die Brennstoffzellen herstellen (im weiteren „Hersteller“ genannt) beziehen die Bestandteile für die Brennstoffzellen von anderen Firmen (im weiteren „Zulieferer“ genannt). Zahlreiche Zulieferer (Abbildung 13) sind an der Entwicklung und Weiterentwicklung von Bestandteilen für die Brennstoffzellen. Vor allem Prototypen von Membranen, Reformer und Membran Elektroden Einheiten (MEA) werden von den Herstellern bezogen. Im Rahmen dieser Arbeit werden hier nur 2 Zulieferer aus der Vielzahl der Firmen herausgegriffen und diese 2 wichtigen Zulieferer werden ganz knapp und kurz porträtiert. Die Firma DuPont und Johnson Matthey wurde gewählt, da diese zu den führenden Zulieferern von wichtigen Brennstoffzellenkomponenten gehören.

Wertschöpfungskette der Brennstoffzelle

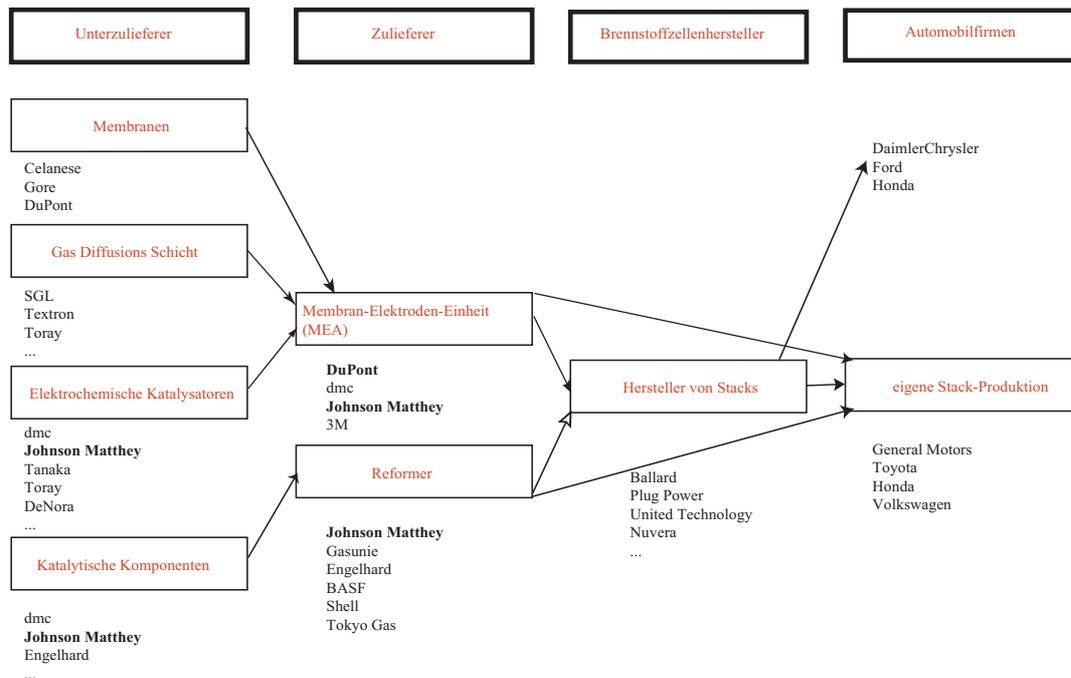


Abbildung 13: Wertschöpfungskette der Brennstoffzelle mit den im jeweiligen Bereich tätigen Unternehmen, eigene Darstellung

4.2.1 Johnson Matthey

Johnson Matthey (<http://www.matthey.com>) ist eine Chemiefirma mit Sitz in London (Grossbritannien), die weltweit in 34 Ländern operiert und rund 6'500 Angestellte hat. Im April 2000 hat Johnson Matthey eine eigene Business Einheit gegründet, die sich auf Bestandteile von Brennstoffzellen spezialisiert hat. In dieser Abteilung arbeiten rund 150 Personen in Europa, den USA und Japan.

In folgenden 5 Teilbereichen ist die Business Unit Brennstoffzelle von Johnson Matthey vor allem tätig (Fuel Cell Today (2001)):

1. Entwicklung von MEAs (bestehend aus einem Elektrolyt, Katalysatorschicht und einer Membran)
2. Entwicklung von Katalysatoren für Reformer, die beispielsweise Methan in Wasserstoff umwandeln
3. Entwicklung von Katalysatoren, um Kohlenmonoxyd aus dem Gas im Reformer zu eliminieren
4. Entwicklung eines Systems, um den in den Brennstoffzellenabgasen noch vorhandenen Wasserstoff wieder dem Energieumwandlungsprozess zuzuführen
5. Entwicklung von Katalysatoren, um die Abgase des Reformers zu reinigen.

Johnson Matthey hat einen "Dual Fuel"-Prozessor entwickelt, der angeblich sowohl aus Erdgas als auch aus Flüssiggas (Propan, Butan) gleich gut Wasserstoff erzeugen kann. Er kann jederzeit umgeschaltet werden.

Mitsubishi, Shell Hydrogen und der Chemie-Konzern Johnson Matthey haben ein Venture Capital Unternehmen mit dem Namen Conduit gegründet, welches sich auf Brennstoffzellen und Wasserstoff konzentrieren wird. Mit Unterstützung weiterer Investoren sollen 100 Millionen Dollar in einen Fonds fließen. Ziel von Conduit ist, weltweit Marktführer im Venture-Capital-Sektor für Brennstoffzellen-Unternehmen zu werden (BörseGo (2001)).

Johnson Matthey ist zudem einer der weltweit führenden Hersteller und Raffineure von Edelmetallen, wie zum Beispiel Platin. Platin wird als Material in der Brennstoffzelle eingesetzt. Bei einem zukünftigen Produktionsvolumen von 500'000 Fahrzeugen pro Jahr werden laut Rade (2001) rund 19 Gramm Platin für eine Brennstoffzellenleistung von 50 kW benötigt, wobei diese Menge durch Forschung und Entwicklung in den nächsten 10 Jahren sinken wird. Bei einem Preis von 590 \$ pro Troy Unze Platin¹³, dem Handelspreis an den Börsen vom 21.10.2002 (Kitco (2002)), müssen 540 \$ pro 75 kW Brennstoffzelle bezahlt werden, beziehungsweise pro Kilowatt 7.2 \$. Bei einem angestrebten kW Preis von 50 – 75 \$ muss daher der Platinanteil noch massiv gesenkt werden. Wie Abbildung 14 zeigt, wird die pro Jahr weltweit geförderte Platinmenge auf Grund der Annahmen der Arbeit von Rade (2001) ab dem Jahre 2030 zu mehr als 50 % für die Brennstoffzellen eingesetzt. 1999 wurden 169.7 Tonnen gefördert, was bei Verwendung von 28.5 Gramm pro Brennstoffzellenstack (75

¹³ 1 Troy Unze entsprechen 31.10348 Gramm

kW) im Jahr 2000 für 5'954'386 Brennstoffzellenautos (=11 % aller produzierten Fahrzeuge¹⁴) pro Jahr reichen würde. Dies zeigt, dass der Einsatz an Platin gesenkt werden muss. Aber selbst, wenn die pro Brennstoffzelle benötigte Platinmenge auf einen Drittel gesenkt wird, würde der Platinpreis wegen der zusätzlichen hohen Nachfrage vermutlich ansteigen. Das Ziel pro Brennstoffzelle müssten Null Gramm Platin sein, da andernfalls eine Abhängigkeit vom Edelmetallpreis bestehen wird (Abbildung 14).

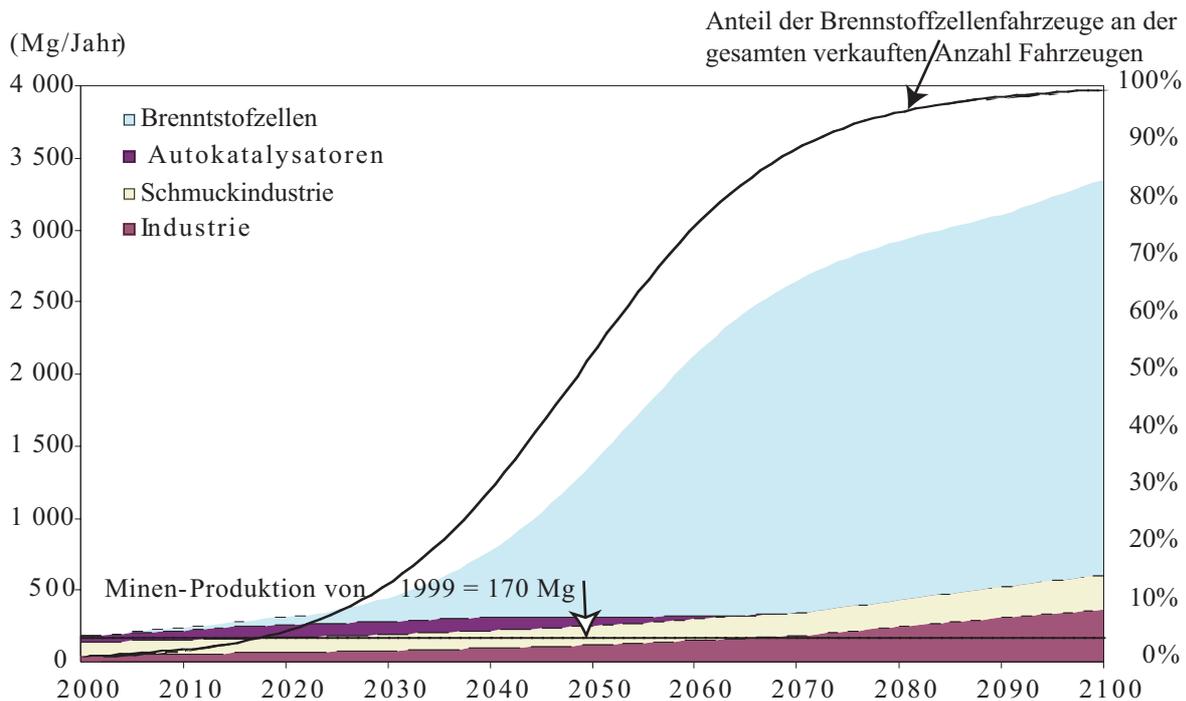


Abbildung 14: Jährlicher Bedarf an primärem Platin nach dem Szenario von Rade (2001)

4.2.2 DuPont

DuPont (www.dupont.com) ist eine weltweit operierende Chemiefirma. Sie hat ihren Hauptsitz in Fayetteville (USA) und besitzt in zahlreichen Ländern auf der ganzen Welt Niederlassungen, Produktionswerke und Forschungsstätten. DuPont bietet Nafion-Membranen, Bipolarplatten und komplette MEAs an. Nafion ist bis heute das verbreitetste Membranprodukt auf dem Markt. Es ist aber noch sehr teuer. Während die bereits seit über 35 Jahren für Brennstoffzellen eingesetzten Nafion Membranen auch weiterhin weltweit kommerziell für Entwicklungen verfügbar bleiben, sind MEAs derzeit ausschliesslich im Rahmen vertraulicher Entwicklungsverträge mit DuPont zugänglich. Nafion-Membranen und MEAs kommen für die Herstellung der PEM-Brennstoffzellenstacks zum Einsatz (Kundegraber (2002)).

¹⁴ Die Auto-Welt-Jahresproduktion betrug im Jahr 2000 55'100'582 (Concept-Automobile (2002))

Nafion wird auch neben PEM-Stacks bei den meisten Direkt-Methanol-Brennstoffzellen (DMFC) eingesetzt. Nachteilig ist ausser dem hohen Preis vor allem die Durchlässigkeit von Nafion gegenüber Methanol. Wenn der Brennstoff durch die Membran entweicht, erhöht sich der Verbrauch, gleichzeitig sinkt die Leistungsfähigkeit. Beide Effekte verringern den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle. Aber genau der deutlich höhere Wirkungsgrad, als ihn Verbrennungsmotoren besitzen, macht die Brennstoffzelle so attraktiv (Janositz Paul (2002)). DuPont ist derzeit daran günstigere und effizientere Membranen zu entwickeln.

4.2.3 Diskussion der Verhandlungsstärke der Lieferanten

Brennstoffzellenhersteller benötigen Kapital, Material und Produktionsanlagen, welche von verschiedenen Lieferanten bezogen werden können. In diesem Kapitel wurden nur zwei Firmen porträtiert. Aufgrund dieser zwei Zulieferfirmen kann die Verhandlungsstärke nicht vollständig diskutiert werden.

Die Membran wird ein Schlüsselprodukt in der Brennstoffzelle sein. Die Firma DuPont besitzt als Membranlieferant eine Verhandlungsstärke gegenüber den Brennstoffzellenherstellern, die aber nicht all zu stark ausgenutzt werden kann, da sonst die Brennstoffzellenlieferanten mit der Rückwärtsintegration drohen und selber die Membranen herstellen werden. Ballard hat laut Massimo Venturi¹⁵, Mitarbeiter bei Ballard, bereits eine eigene Entwicklungsabteilung zur Entwicklung einer kostengünstigeren Membran. Um eine Rückwärtsintegration abwenden zu können hat DuPont angekündigt, dass sie eine Membran entwickeln, die zehnmal günstiger sein wird, als die aktuell lieferbare. Um dem Ziel der 50\$ bis 75\$ pro kW Brennstoffzelle näher zu kommen, muss der Preis der Membran von den aktuellen 300 \$ auf einen Bruchteil gesenkt werden können.

Johnson Matthey als Anbieter von Platin und Katalysatoren wird auch bestrebt sein, die Platinmenge zu senken, so dass 50\$ bis 75\$ pro kW langfristig realistisch werden.

¹⁵ Gespräch vom 15.10.2002 in Stuttgart

4.3 Resultate und Diskussion der Verhandlungsstärke der Abnehmer

4.3.1 Einleitung

Heute teilen die zehn grössten Automobilkonzerne 95 % der weltweiten Produktion von Automobilen unter sich auf. Insgesamt wurden im Jahr 2000 etwa 55 Millionen Pkw und Leichtfahrzeuge (Light Vehicle) produziert (Obertreis (2001)).

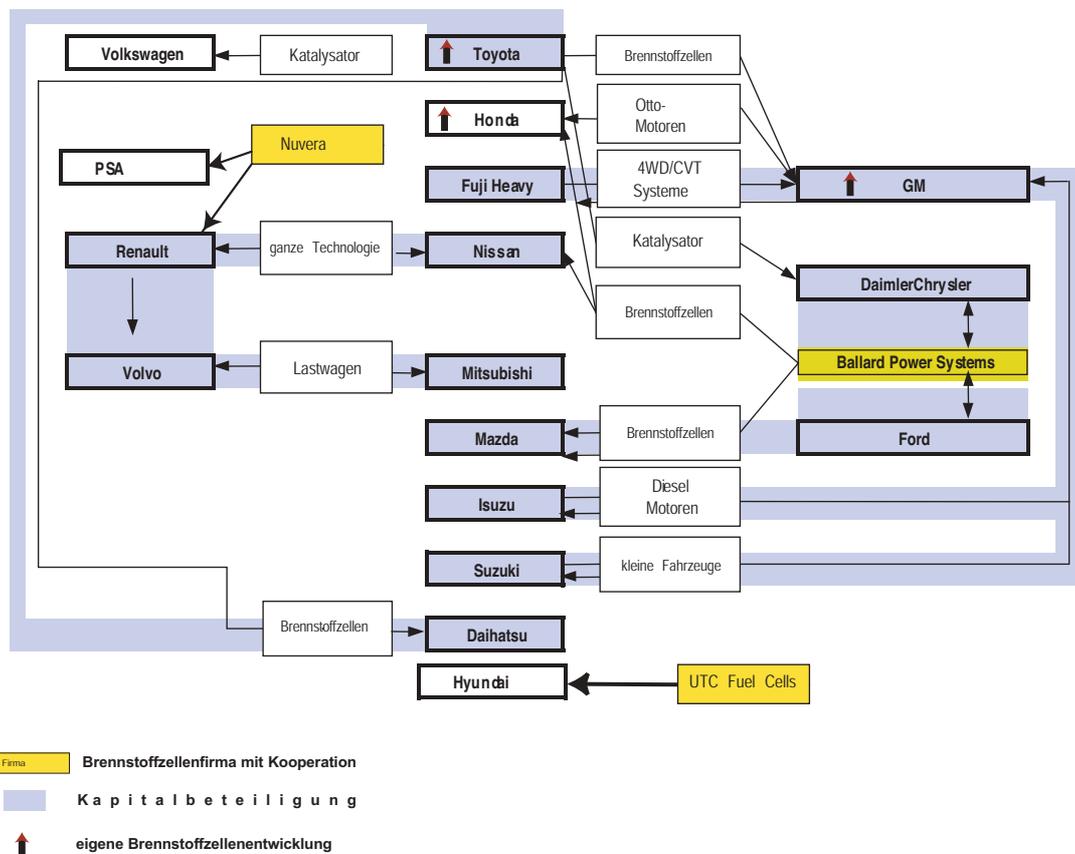


Abbildung 15: Automobilfirmen und deren Kooperation im Bereich der Antriebsysteme, abgeändert nach Matsushima, et al. (2000)

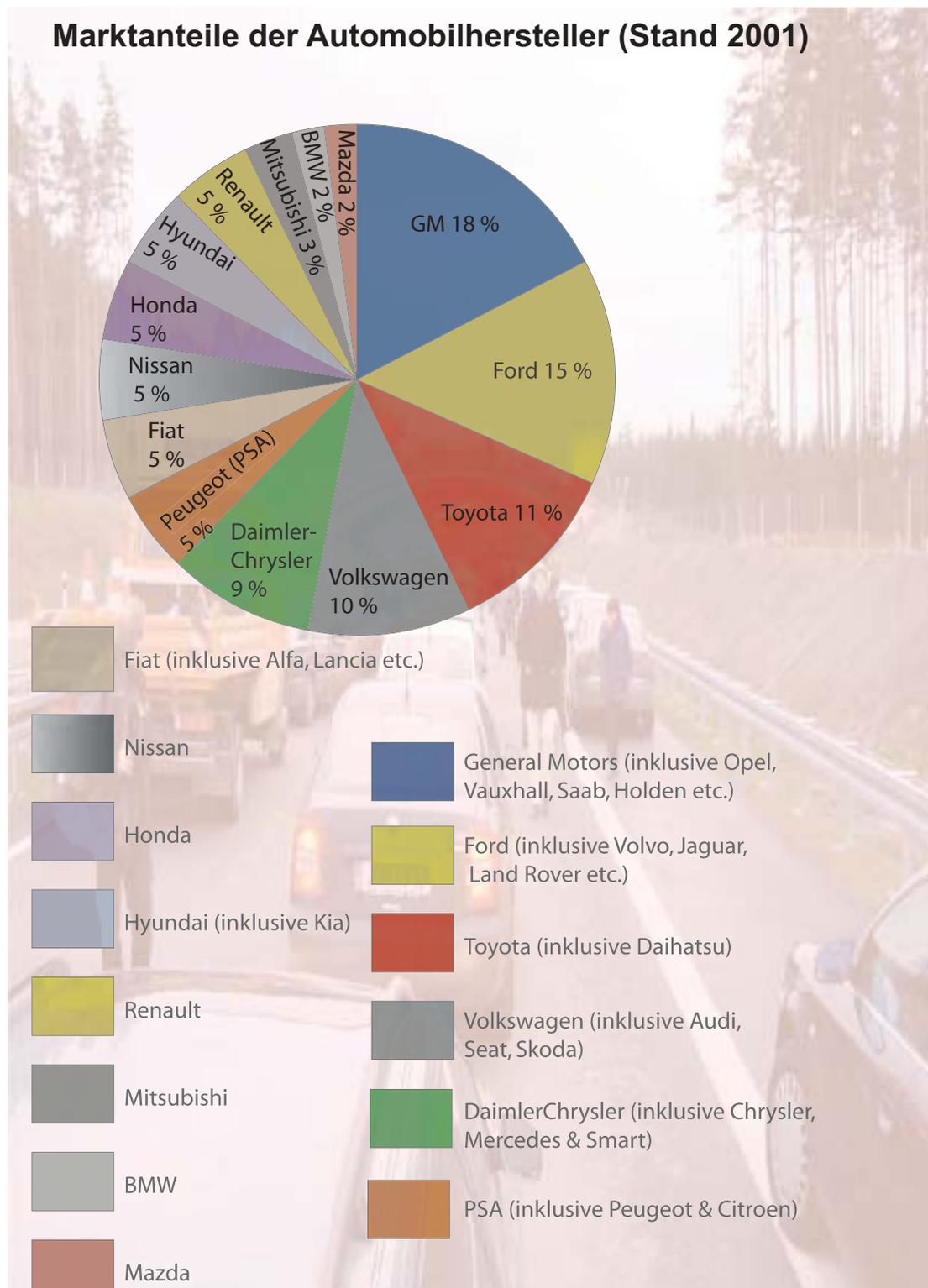


Abbildung 16: Marktanteile der verschiedenen Automobilhersteller, eigene Grafik, Daten von Concept-Automobile (2002)

Von den 14 grössten Automobilherstellern (Abbildung 16) sind alle bis auf drei (Peugeot, Honda und BMW) in irgendeiner Form mit einem anderen Automobilhersteller via Joint Venture, Kapitalbeteiligung, gemeinsame Entwicklung von Bestandteilen oder Lieferungen von Bestandteilen eine Kooperation eingegangen (Abbildung 15).

In den letzten zehn Jahren hat der durchschnittliche Treibstoffverbrauch der Neuwagen abgenommen. Das im Rahmen einer Selbstverpflichtung des Verbandes der europäischen Automobilhersteller (ACEA) angestrebte Ziel eines CO₂-Ausstosses von 140 Gramm je Kilometer bis zum Jahre 2008 (entspricht einer Verringerung von 25% gegenüber 1995) dürfte noch zum grössten Teil allein durch Treibstoff-Sparmassnahmen beim bisherigen Otto- und Dieselmotor erreichbar sein. Wäre die ACEA keine Selbstverpflichtung eingegangen, hätte die EU vermutlich tiefere CO₂ Grenzwerte festgesetzt. Der Bestand der 2008/2009 neu auf den Markt gebrachten Personenkraftwagen wird im Schnitt etwa 5,8 l Benzin¹⁶/100 km oder 5,25 l Diesel¹⁷/100 km verbrauchen (Europäische Kommission (2000)). Das vom Rat der Europäischen Kommission angegebene Ziel von 120 Gramm CO₂ je Kilometer bis zum Jahr 2010 wird dagegen nur durch einen höheren Anteil von Fahrzeugen mit alternativen Antriebsarten erlangt werden können (Bredehöft, et al. (2002) & COWI A/S (2002)). Vorreiter bei der Festlegung des Null-Emissions Grenzwertes (0 Gramm CO₂) war Kalifornien. Auch wenn Anfang 2001 das dortige „zero-emission-vehicle-mandate“ deutlich abgeschwächt wurde, handelt es sich immer noch um die weltweit strengste Regelung. Danach müssen die Automobilhersteller ab dem Jahr 2003 in Kalifornien jährlich insgesamt 8'137 Null-Emissions-Fahrzeuge verkaufen, von denen die Hälfte autobahntauglich sein muss.

Im Folgenden werden die Automobilfirmen porträtiert und die neusten Brennstoffzellenfahrzeuge der Firmen werden vorgestellt. Diese Brennstoffzellenfahrzeug-Prototypen der einzelnen Automobilfirmen geben einen Hinweis, wie weit die Technologie der Brennstoffzellen und dessen Integration in ein Fahrzeug fortgeschritten ist. Der Stand des Brennstoffzellen-Know-hows der Autofirmen ist ein Indiz ob und wann eine Firma Brennstoffzellenfahrzeuge verkaufen wird und dazu entweder eigene Brennstoffzellen herstellen werden oder potentielle Kunden von Brennstoffzellenherstellern werden könnten.

4.3.2 DaimlerChrysler

DaimlerChrysler (www.daimlerchrysler.de), aus Stuttgart (Deutschland), entwickelt und produziert Automobile und Nutzfahrzeuge. Zusätzlich ist das Unternehmen in den Bereichen Rüstung, Luft- und Raumfahrt, Leasing und Finanzdienstleistungen tätig. Durch ein Netzwerk von Allianzen und Beteiligungen ist DaimlerChrysler zu einem globalen Anbieter von Fahrzeugen geworden. DaimlerChryslers Markenimperium umfasst: Mercedes Benz, Smart, Chrysler, Dodge, Jeep, Plymouth, Freightliner, Sterling, Western Star, Mitsubishi (Beteiligung) und Hyundai (Beteiligung). DaimlerChrysler beschäftigt weltweit mehr als 370'000 Mitarbeiter.

¹⁶ Die Gramm CO₂ pro km wurden in Benzinäquivalente umgerechnet

¹⁷ Die Gramm CO₂ pro km wurden in Dieseläquivalente umgerechnet

DaimlerChrysler war die erste Automobilfirma, die die Brennstoffzelle von Ballard 1990 testete und daraufhin 1993 mit Ballard eine Kooperation einging. Die Unternehmen entwickeln zusammen Brennstoffzellen wie auch deren Bestandteile. DaimlerChrysler ist inzwischen mit 24.2% an der Firma beteiligt. In Nabern bei Ulm (Deutschland) betreiben die beiden Firmen ein gemeinsames Brennstoffzellenforschungshaus. Seit 1994 hat DaimlerChrysler bereits mehr als 16 Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb (siehe Tabelle 11) präsentiert.

Im Folgenden werden die wichtigsten Prototypen der letzten Jahre vorgestellt.

NECAR 4

Der im März 1999 präsentierte NECAR 4 –auf Basis der A-Klasse gefertigt – nutzt verflüssigten Wasserstoff als Treibstoff. Das Fahrzeug ist bis zu 145 km/h schnell, hat eine Reichweite von bis zu 450 km und bietet für fünf Personen mit Gepäck ausreichend Platz. Es erfüllt die zukünftigen Vorschriften für Null-Emissions-Fahrzeuge im US-Bundesstaat Kalifornien (Oertel Dagmar, et al. (2001)). Beim NECAR 4 (Tabelle 11) besteht die Brennstoffzelle aus zwei Stacks mit je 35 kW Leistung, wobei jedes Stack aus je 160 aneinandergepackten Brennstoffzellen besteht. Die Brennstoffzellen stammen von Ballard und sind vom Typ "Ballard Mark 900".

Jeep Commander 2



Abbildung 17: Jeep Commander 2 (hinten) und NECAR 5 (vorn) (DaimlerChrysler (2002)).

Im Oktober 2000 präsentierte DaimlerChrysler den Jeep Commander 2 (Abbildung 17), einen Geländewagen mit Brennstoffzelle. Dieses Fahrzeug demonstriert, dass der Brennstoffzellenantrieb keineswegs nur für kleine Fahrzeuge infrage kommt. Im

Tank des Jeep Commander wird flüssiges Methanol gespeichert. Leistungsspitzen können zusätzlich über eine Batterie

abgedeckt werden (DaimlerChrysler (2002)). Ein Methanolreformer unter der Kühlerhaube erzeugt Wasserstoff für zwei Stacks, die im Heck unter dem Kofferraum liegen und Strom für den Antrieb liefern. Im Gegensatz zu den NECAR Fahrzeugen besitzt der Jeep Commander zwei elektrische Antriebsaggregate, die jeweils eine Spitzenleistung von 82 kW erreichen. Die beiden Wechselstrom- Induktionsmotoren, einer für jede Achse, sorgen für permanenten Allradantrieb. Der wesentliche Unterschied zum NECAR 5 besteht darin, dass der Commander 2 ein Brennstoffzellenfahrzeug mit Hybridantrieb ist. Beim Beschleunigen – vor

allem bei hoher Zuladung – und nach Kaltstarts liefert eine 230 Kg schwere Nickel-Metallhydrid-Batterie zusätzliche Energie (DaimlerChrysler (2001a)). Der Einbau einer Batterie ermöglicht den Einsatz einer kleineren Brennstoffzelle, die ursprünglich zum Antrieb der wesentlich kleineren und leichteren NECAR-Fahrzeuge entwickelt wurde und spart somit Kosten.

NECAR 5

Der NECAR 5 stellt eine Leistung von 75 Kilowatt bereit. Damit erreicht der Fünfsitzer eine Spitzengeschwindigkeit von gut 150 Stundenkilometern (DaimlerChrysler (2001a)). Das voluminöse Brennstoffzellen-Gesamtsystem wurde in drei Jahren um die Hälfte verkleinert, wodurch man eine Gewichtsreduzierung um 300 kg erreichte. Die Brennstoffzellen wogen beim NECAR1 800 kg.

Tabelle 11: Brennstoffzellenfahrzeuge von DaimlerChrysler

Model	Fahrzeug-typ	Passa-giere	Brenn-stoff-zellen Typ	Treibstoff	Brennstoff-zellen Typ	Anzahl Brennstoff-zellen	kW	Reich-weite	Präsen-tations-Jahr
NECAR 1	Transporter MB100	2	PEM	Wasser-stoff	k.A.	k.A.	50	130 km	1994
NECAR 2	V-Klasse	6	PEM	Wasser-stoff	k.A.	k.A.	50	250 km	1996
NECAR 3	A-Klasse	2	PEM mit Reformer	Methanol	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	1997
NECAR 4	Limousine	4	PEM	Wasser-stoff	Ballard Mark 700	k.A.	70	450	1999
NECAR 4A	Limousine	5	PEM	Wasser-stoff	Ballard Mark 900	640	75	250 km	2000
Natrium	Minivan	k.A.	k.A.	Schwefel Boro-hydride	Ballard	k.A.	k.A.	500	2001
NECAR 5	Limousine	5	PEM	Methanol Bord	Ballard Mark 900	440 Zellen	75	k.A.	2000
Go-Kart	Go-Kart	1	DMFC	Methanol	Ballard	k.A.	3	k.A.	2000
Comman-der	Gelände-wagen	5	PEM	Benzin	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	1999
Comman-der 2	Gelände-wagen	5	PEM	Methanol	Ballard Mark 700,	2	k.A.	190	2000
Sprinter	Van	k.A.	PEM	Wasser-stoff	k.A.	k.A.	k.A.	+150	2001

In den letzten sechs Jahren hat DaimlerChrysler 16 Pkws, Transporter und Busse mit Brennstoffzellen-Antrieben ausgerüstet und präsentiert, mehr als alle Wettbewerber weltweit zusammen (DaimlerChrysler (2002)).

Prof. Klaus-Dieter Vöhringer, im DaimlerChrysler-Vorstand verantwortlich für Forschung und Technologie, erwartet die Einführung der Brennstoffzelle in Fahrzeugen in mehreren Stufen: "Im Jahr 2002 wird DaimlerChrysler die ersten Stadtbusse mit Brennstoffzelle ausliefern. 2004 folgen erste Pkws. Die Fahrzeuge der ersten Produktionsstufen werden bis dahin flüssigen oder gasförmigen Wasserstoff als Kraftstoff verwenden, der aber angesichts der hohen Kosten für die notwendige Infrastruktur kaum flächendeckend zum Einsatz kommen kann. Wir werden aber in mehreren Regionen der Welt Testflotten betreiben, um Erfahrungen im Alltagseinsatz der Brennstoffzelle zu gewinnen. Eine solche Testflotte könnte auch in Berlin starten" (DaimlerChrysler (2001a)).



Abbildung 18: Innenleben des NECAR 4, DaimlerChrysler (2001a)

Das erste Brennstoffzellenfahrzeug wurde bereits an den Hamburger Versand-Service Hermes ausgeliefert. Es handelt sich um einen Lieferwagen des Typs "Sprinter". Das Fahrzeug soll während eines zweijährigen Einsatzes die Alltagstauglichkeit der neuen Antriebstechnik beweisen. Das von Hermes bei DaimlerChrysler geordnete Fahrzeug weist eine Leistung von 55 Kilowatt auf. Als Höchstgeschwindigkeit erreicht der Sprinter 120 Kilometer pro Stunde, die Reichweite beträgt 150 Kilometer.

4.3.3 Mazda

Mazda Corporation (www.mazda.co.jp) aus Tokio (Japan) entwickelte 1997 das erste Brennstoffzellenfahrzeug, den Mazda Demio FCEV und kooperiert nun mit DaimlerChrysler, Ballard und Ford zur Entwicklung von brennstoffzellenbetriebenen Autos und Komponenten (Forum Brennstoffzelle (2002a)). Ford hält einen Aktienanteil von über 33% am japanischen Hersteller. Das neueste Fahrzeug, der fünfsitzige Premacy FC-EV (Fuel Cell Electric Vehicle) wird von einer Brennstoffzelle mit Methanol-Reformer und einem Elektromotor angetrieben. Alle Komponenten, also insbesondere die Brennstoffzellen-Stacks sowie der Reformer, wurden so kompakt wie möglich konstruiert, damit sie unter dem Fahrzeugboden angebracht werden können. Auf diese Weise ist es Mazda gelungen, ohne grössere Veränderungen an der Karosseriestruktur des Basismodells ausreichend Platz für den Transport von fünf Erwachsenen zu schaffen (Kern (2002)).

Mit diesem Prototyp will Mazda das Potenzial des Brennstoffzellensystems mit Methanol-Reformer ausloten. Dank einer vom japanischen Transportministerium ausgestellten Zulassung kann der Premacy FC-EV als erstes Brennstoffzellen-Fahrzeug in Japan auf öffentlichen Strassen zirkulieren. Mit diesem Versuchsträger nimmt Mazda an einem Gemeinschaftsprojekt zur Erprobung von Brennstoffzellen-Autos teil, dem auch DaimlerChrysler Japan und Nippon Mitsubishi Oil angehören und das von japanischen Interessenverbänden (Petroleum Energy Center, Agency of Natural Resources and Energie) sowie vom Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie unterstützt wird (Kern (2002)).

Tabelle 12: Mazdas Brennstoffzellenfahrzeuge

Model	Fahrzeug-typ	Passa-giere	Typ	Treibstoff	Brennstoffzellen Typ	Anzahl Brennstoff-zellen	kW	Reich-weite	Präsentations-Jahr
Demio FCEV	Limousine/ Kombi	4	k.A.	Wasserstoff	PEM (Mazda)	4	20	270	1997
Premacy FC-EV	Limousine	5	PEM	Methanol	Ballard Mark 901	k.A.	65	k.A.	2001

4.3.4 Nissan

Nissan Corp (www.nissan.co.jp) ist der zweitgrösste Automobilproduzent in Japan. Seit 1999 hält Renault einen Anteil von 44 %. Im Gegenzug besitzt Nissan 15 % der Aktien von Renault.

Nissan hat einen Vertrag mit Ballard abgeschlossen, um von ihnen Brennstoffzellen beziehen zu können. Nissan entwickelt auch selbst, zusammen mit Suzuki, Brennstoffzellen, aber nur in bescheidenem Rahmen. Das selbst entwickelte Fahrzeug soll im Jahre 2003 vorgestellt werden. Das Projekt wird grösstenteils von NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organisation) finanziert. Nissan begann mit der Entwicklung von Brennstoffzellen 1996 mit dem Fokus auf Direkt-Methanol –Brennstoffzellen (DMFC). Das Unternehmen plant den Einsatz von Brennstoffzellen in Serienfahrzeugen für das Jahr 2005 und wird in den kommenden 5 Jahren rund 0.75 Milliarden \$ in die Entwicklung der neuen Technologie investieren (Brennstoffzelle (2001)). Etwa 300 Ingenieure und Techniker werden sich im Rahmen des NEDO-Programms mit der neuen Antriebstechnologie beschäftigen (Geschka (2002)).

Nissan hat im kalifornischen Sacramento einen Xterra (siehe Table 4) mit Brennstoffzellen-Antrieb in den Praxistest geschickt. Der Xterra FCV (Fuel Cell Vehicle) ist das erste Fahrzeug von Nissan, das direkt mit Wasserstoff betankt wird. Der Xterra FCV verfügt im Gegensatz zu den Brennstoffzellen-Fahrzeugen der meisten Hersteller über eine an Bord installierte Lithium-Ionen-Batterie, die eine Speicherung der beim Verzögern entstehenden

Energie ermöglicht. Beim Beschleunigen wird dann neben der elektrischen Energie aus der Brennstoffzelle auch Strom aus der Batterie zum Antriebsmotor geleitet. Dieser sogenannte Hybrid-Brennstoffzellen-Antrieb soll insbesondere im Stadtverkehr eine effiziente Energieausnutzung ermöglichen. An einen Serieneinsatz von brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen denkt man bei Nissan ab dem Jahr 2005 (Nissan Deutschland (2001))

Tabelle 13: Brennstoffzellenfahrzeuge von Nissan

Model	Fahrzeugtyp	Passagiere	Typ	Treibstoff	Typ	Anzahl Brennstoffzellen	kW	Reichweite	Präsentations-Jahr
FCV (Altra basierend) Xterra	Kastenwagen	5	PEM	Methanol	Ballard	k.A.	10	k.A.	k.A.
Xterra	Geländewagen	5	PEM	Wasserstoff	Ballard	k.A.	65	k.A.	k.A.

4.3.5 Toyota

Toyota aus Tokio (Japan) ist der grösste japanische Automobilhersteller und der viertgrösste auf der Welt. Toyota begann 1990 mit der Entwicklung von Brennstoffzellen und Wasserstofftanks. Das Unternehmen hat seine Brennstoffzellenaktivitäten in einem neuen Entwicklungszentrum in Nagoya (Japan) zusammengefasst. Die bisher über den Konzern verteilten Aktivitäten sollen dadurch strategisch besser zusammenarbeiten. Im Zentrum arbeiten rund 450 Mitarbeiter (Geschka (2002)). Derzeit arbeitet Toyota verstärkt an der Benzinreformierung im Fahrzeug. Aus normalem Benzin soll direkt im Reformer des Fahrzeugs Wasserstoff produziert werden. Sollte diese Strategie Erfolg haben, stellt sich für Toyota zunächst nicht die Frage nach einer neuen Infrastruktur. Toyota und General Motors (GM) entwickeln im Rahmen einer fünfjährigen Kooperation gemeinsam an der Brennstoffzelle sowie am Kraftstoffsystem (Forum Brennstoffzelle (2001b)). Wasserstoff ist laut Toyota und GM der einzige Kraftstoff, der das Potential besitzt, den Fahrzeug-Wirkungsgrad deutlich zu steigern und die CO₂-Emissionen zu vermindern (Geschka (2002)).

Mit einem neuen Verfahren will Toyota ausserdem die Kosten für den Katalysator in der Brennstoffzelle um den Faktor 50 senken, das heisst man will den Einsatz von Platin minimieren oder das Platin sogar ersetzen. Immerhin machen die Fortschritte Toyota so optimistisch, für 2005 bereits 300'000 verkaufte Fahrzeuge einzuplanen. Einsatzorte der Fahrzeuge werden vermutlich die Grossräume Tokio, Kalifornien und Europa werden, wo der Bau von Tankstellen bereits beschlossen ist (Forum Brennstoffzelle (2002b)).

Toyota plant aber, schon ab 2003 mit dem Brennstoffzellenfahrzeug Kluver V FCHV-4 (Tabelle 14) auf dem Markt zu sein. Europa, die USA und Japan werden die bevorzugten Absatzgebiete sein. Das Fahrzeug FCHV-4 soll für 90'000 \$ zu kaufen sein (Pehnt, et al. (2002)). Laut Toyota soll auch eine limitierte Anzahl von rund 30 FCHV-4 Fahrzeugen für ein Leasing in Kalifornien und Japan zur Verfügung stehen. Der FCHV-4 wird von einer Wasserstoff-Brennstoffzelle mit einer Leistung von 90 Kilowatt angetrieben und soll eine Reichweite von 250 Kilometern haben. Dabei bietet das Fahrzeug für fünf Personen Platz und erreicht eine Höchstgeschwindigkeit von 150 km/h. Das Fahrzeug besitzt zudem noch eine

Nickel-Metall-Hydride-Batterie. Es fährt mit einem Reformer für Kohlenwasserstoffe (veredelte und gesäuberte Benzinvarianten oder synthetisch aus Kohle oder Erdgas hergestellte Kraftstoffe) (Pehnt, et al. (2002)). Der FCHV-4, der im Jahre 2001 vorgestellt wurde, besitzt vier Wasserstofftanks. Der FCHV-4 hat bereits eine Genehmigung zur Erprobung auf japanischen Strassen. Bisher wurden fünf Fahrzeuge dieser Art gebaut. Zwei weitere gingen im Juli 2001 für Strassentests in die USA (AUTO-NEWS (2002a) & Toyota Motor Corporation (2002)).

Tabelle 14: Brennstoffzellenfahrzeuge von Toyota

Model	Fahrzeug-typ	Passa-giere	Typ	Treibstoff	Brennstoffzellen Typ	kW	Reich-weite	Präsentations-Jahr
FCHV-3	Gelände-wagen	5	PEM	Wasserstoff	Toyota PEM	90	300 km	2001
FCHV-4	Gelände-wagen	5	PEM	Wasserstoff	TMC PEM Stack	90	250 km	2001
Kluger V FCHV-5	Gelände-wagen	5	PEM	Benzin	Toyota PEM mit Reformer	90	k.A.	2001

4.3.6 Honda

Honda (www.honda.co.jp) ist in Japan der drittgrösste Automobilproduzent und weltweit der grösste Hersteller von Motorrädern. Das Unternehmen ist noch eines der wenigen, die keine Kooperation mit einem anderen Automobilhersteller eingegangen ist. Lange war Honda im Bereich Brennstoffzellenentwicklung nicht sehr aktiv. Seit 1996 werden deutlich mehr Forschungsgelder in diese neuen Antriebssysteme investiert, und die Firma fing mit einer eigenen Brennstoffzellenentwicklung an. Das Fahrzeug FCX-V4 wird zurzeit im Californian Fuel Cell Programm getestet (Tabelle 15). Honda verwendet dafür einen Ballard-Brennstoffzellenstack, parallel arbeitet man allerdings an der Entwicklung eines eigenen Brennstoffzellen-Systems. Der FCX-V4 mit einer Brennstoffzelle, die 90 kW leistet, hat das Fahrzeug eine Höchstgeschwindigkeit von 140 km/h und eine Reichweite von 300 km. Genau wie Toyota möchte Honda 2003 ein serienreifes Brennstoffzellenfahrzeug auf dem Markt anbieten (Forum Brennstoffzelle (2001c)). Hondas Brennstoffzellen-Prototyp ist von Japans Umwelt- und Verkehrsministerium Anfang März 2002 für den Strassenverkehr zugelassen worden und wird jetzt unter realen Bedingungen getestet (Entreß (2002)). Honda wird Ende Jahr eine limitierte Anzahl von FCX-V4 Fahrzeugen in den USA und in Japan verleasen und bis in 3 Jahren plant Honda, rund 30 weitere Fahrzeuge als Prototyp auf den Strassen testen zu lassen (Honda USA (2002)).

Tabelle 15: Brennstoffzellenfahrzeuge von Honda

Model	Fahrzeugtyp	Anzahl Passagiere	Brennstoffzellen Typ	Treibstoff	Typ	kW	Reichweite	Präsentationsjahr
FCX-V1	Limousine	4	PEM	Wasserstoff	Ballard	60	180 km	1999
FCX-V2	Limousine	4	PEM	Methanol	Ballard PEM	60	k.A.	1999
FCX-V3	Limousine	4	PEM	Wasserstoff	Honda Polymer Elektrolyte FC Stack	62	180 km	2000
FCX-V4	Limousine	4	PEM	Wasserstoff	Ballard	78	300 km	2001

4.3.7 Hyundai

Die beiden Automobilhersteller Hyundai (www.hyundai.com) und Kia Motors Corp. beide aus Südkorea, entwickelten das Brennstoffzellenfahrzeug Santa Fe SUV (Sport Utility Vehicle) gemeinsam mit der United Technology Corporation (USA). Der Santa Fe besitzt einen Druckbehälter für gasförmigen Wasserstoff (72 l), der eine Reichweite von über 160 Kilometern ermöglicht. Die Brennstoffzelle hat eine Leistung von 75 kW, was für eine Maximalgeschwindigkeit von 124 km/h ausreicht. Darüber hinaus verfügt das Fahrzeug über ein Leichtbau-Fahrgestell. Hyundai und Kia arbeiten ausserdem an einem Modell mit benzinbetriebener Brennstoffzelle, das 2003 präsentiert werden soll.

Tabelle 16: Brennstoffzellenfahrzeuge von Hyundai

Model	Fahrzeugtyp	Anzahl Passagiere	Brennstoffzellen Typ	Treibstoff	Typ	kW	Reichweite	Präsentationsjahr
Santa Fe	Geländewagen	k.A.	PEM	Wasserstoff	United Technologies Fuel Cell	75	160 km	2000

4.3.8 Mitsubishi Motors

Mitsubishi Motors (www.mitsubishi-motors.co.jp) ist ein japanischer Automobilhersteller, an dem DaimlerChrysler zu 34% und die Mitsubishi Group zu 15% beteiligt sind. Mitsubishi Motors entwickelt gemeinsam mit Mitsubishi Heavy Industry Brennstoffzellenfahrzeuge (siehe Tabelle 17) und plant, bis 2005 ein Serienfahrzeug auf dem Markt zu haben. Nippon Mitsubishi Oil entwickelt dafür einen neuartigen Brennstoff der anstelle von Benzin benutzt werden kann.

Tabelle 17: Mitsubishiis Brennstoffzellenfahrzeuge

Model	Fahrzeugtyp	No. Passagiere	Brennstoffzellen Typ	Treibstoff	Typ	kW	Reichweite	Jahr
Space Liner	Limousine	4	PEM	Methanol	Mitsubishi Group	k.A.	k.A.	2001
FCV	Limousine	k.A.	PEM	Methanol	Mitsubishi Group	40	k.A.	k.A.

4.3.9 Volkswagen

Volkswagen (Deutschland) ist mit den Marken VW, Audi, Skoda, Seat, Bugatti, Bentley und Lamborghini auf dem Automobilmarkt präsent und gehört zu einer der führenden Automobilproduzenten weltweit. Das Unternehmen beschäftigt weltweit mehr als 320'000 Mitarbeiter.

Die Volkswagen AG sieht in Wasserstoff den Energieträger der Zukunft für Pkws, wenn er regenerativ erzeugt wird und die Infrastruktur dafür geschaffen worden ist, da nur dann eine CO₂-Entlastung eintritt (Geschka (2002)). Allerdings existieren noch Sicherheitsbedenken was den Einsatz von reinem Wasserstoff betrifft. Das Unternehmen setzt als Zwischenlösung bis zur reinen „Wasserstoffwirtschaft“ auf synthetische Treibstoffe mit einem hohen Anteil an Wasserstoff. Diese synthetischen Treibstoffe sollen mittels Reformier in Wasserstoff umgewandelt werden. VW sieht die Zukunft der Brennstoffzelle wesentlich pessimistischer als die anderen grossen Automobilhersteller. Dies zeigt sich auch in den relativ geringen Forschungsgeldern (2001 etwa 60 Mio. \$), die für den Bereich Brennstoffzellen zur Verfügung stehen. Das Unternehmen legt zurzeit eher den Schwerpunkt auf die Optimierung der konventionellen Motoren und auf einen geringen Kraftstoffverbrauch.

VW hat mit der Brennstofftechnologie des Paul Scherrer Institut (PSI) und der ETH Zürich ein neues Brennstoffzellenfahrzeug entwickelt, den VW Bora Hy.Power (Tabelle 18). Im eingebauten Stack sind eine neue Membran und als Energiespeicher Supercaps eingebaut (Geschka (2002)). Die neuen Membrane sind einiges billiger als die herkömmlichen von den Firmen DuPont und Gore. Mit Hilfe der Supercaps kann die Bremsenergie zurückgewonnen und genutzt werden. Dieses Fahrzeug wird am California Fuel Cell Partnership¹⁸ getestet. Es läuft mit Wasserstoff, hat eine Leistung von 75 kW und eine Reichweite von 150 km.

¹⁸ Verbund von Unternehmen aus der Automobil- und Energiebranchen, die in Kalifornien verschiedene Brennstoffzellenfahrzeuge testen.

Tabelle 18: Brennstoffzellenfahrzeug von Volkswagen

Modell	Fahrzeugtyp	No. Passagiere	Brennstoffzellen Typ	Treibstoff	Typ	Brennstoffzelle Anzahl	kW	Reichweite	Jahr
Bora HY.POWER	Limousine	5	PEM	Kryotank für 50 l flüssigen Wasserstoff	Paul Scherrer Institut (PSI) PEM Zelle	6 Stacks (125 Zellen)	40	300-350 km	Nov 2000

4.3.10 Renault

Renault (Frankreich) hat sich in den letzten Jahren von einem auf Europa konzentrierten Anbieter von Fahrzeugen zu einem globalen Unternehmen gewandelt. Der Hauptantrieb dafür war die 1999 eingegangene Allianz mit Nissan, welche Renault den Zugang zu neuen Technologien, Produktkategorien und Märkten verschaffte. Der Kauf einer 70%-Beteiligung an der koreanischen Samsung Motors sowie eine Mehrheitsbeteiligung an der rumänischen Dacia sichern weitere Standbeine in den neuen Märkten Asien und Osteuropa.

Renault hat in Kooperation mit Ansaldo Ricerche (Italien), Nuvera (USA) und Air Liquide (Frankreich) ein Brennstoffzellenauto entwickelt das auf der Basis des Laguna Estate entstanden ist und teilweise von der europäischen Union finanziell unterstützt wurde. Der „The FEVER“ (Fuel cell Electric Vehicle for Efficiency and Range) wird mit einer Brennstoffzelle angetrieben und hat ein Tank mit flüssigem Wasserstoff. 1999 starteten Renault und Peugeot ein neues Wasserstoff-Brennstoffzellen Projekt, das von Frankreich finanziell unterstützt wird. Laut einer dpa-Meldung vom Oktober 2000 hat Renault mitgeteilt, dass der Autohersteller und sein Tochterunternehmen Nissan Motors über 5 Jahre 85 Mrd. Yen (rund 0.9 Mrd. \$) in die Entwicklung einer neuen Brennstoffzelle investieren wollen (Forum Brennstoffzelle (2001d)).

Tabelle 19: Brennstoffzellenfahrzeug von Renault

Modell	Fahrzeugtyp	No. Passagiere	Brennstoffzellen Typ	Treibstoff	Typ	Brennstoffzelle Anzahl	kW	Reichweite	Präsentations Jahr
Laguna „The Fever“	Limousine	5	PEM	Wasserstoff	Nuvera	k.A.	30	500 km	1999

4.3.11 Peugeot/Citroën

PSA Peugeot Citroën (www.psa.fr), einem französisches Unternehmen, gelang es seit 1998 mittels innovativen Fahrzeugen die Ertragslage kontinuierlich zu verbessern. PSA führt die

beiden eingeführten Marken Peugeot und Citroën und produzierte 2001 rund 3,132 Mio. Fahrzeuge. 1999 starteten Renault und Peugeot ein Wasserstoff- Brennstoffzellen Forschungs- und Entwicklungsprojekt "HYDRO-GEN", das von Frankreich finanziell unterstützt wird (Tabelle 20).

Konzeptfahrzeug H₂O

Peugeot hat auf dem Pariser Autosalon 2002 das Konzeptfahrzeug „H₂O“ vorgestellt (Abbildung 19). Es handelt sich dabei um ein kompaktes Feuerwehrauto für den Einsatz in Städten, das von Brennstoffzellen angetrieben wird. Der für die Brennstoffzellen benötigte Wasserstoff wird an Bord des Fahrzeugs aus Natriumbohrhydrid hergestellt, so dass sich immer nur höchstens zweieinhalb Gramm Wasserstoff im Fahrzeug befinden. Damit entfällt die aufwendige Speicherung von grösseren Wasserstoffmengen. Der Elektromotor, die Brennstoffzellen und die Wasserstoffproduktion befinden sich vorne im Fahrzeug, der Natriumbohrhydrid-Tank hinten (Anonymous (2002)). Man gewinnt Natriumbohrhydrid aus Borax (Na₂B₄O₇), einer preisgünstigen Chemikalie. In einem relativ einfachen Verfahren reagiert Natriumbohrhydrid mit Wasser und setzt reinen Wasserstoff frei, den die PEM-Brennstoffzelle braucht. Übrig bleiben Wasser und Borax.



Abbildung 19: H₂O Konzept Fahrzeug, (Peugeot France (2002))

Tabelle 20: Brennstoffzellenfahrzeuge von PSA

Model	Fahrzeugtyp	No. Passagiere	Brennstoffzellen-Typ	Treibstoff	Typ	kW	Reichweite	Jahr der Präsentation
Hydro-Gen	Kombi	k.A.	PEM	Wasserstoff	Nuvera	30	k.A.	k.A.
Taxi PAC	Taxi	k.A.	PEM	Wasserstoff	H Power	5.5	200-300 km	k.A.
H ₂ O Feuerwehrauto	kompaktes Feuerwehrauto	k.A.	k.A.	Natrium-Bohrhydrid	k.A.	k.A.	k.A.	2002

4.3.12 Ford

Ford (www.ford.com), aus Dearborn (USA), ist der zweitgrösste Automobilkonzern weltweit. Er operiert mit den Marken Ford, Jaguar und Landrover. Seit 1998 ist Ford mit einem Aktienpaket von 20 % an Ballard beteiligt. Wayne Booker, Vice-Chairman der Ford Motor Company, erklärte, dass diese Transaktion das Commitment von Ford zu Ballard und zum kommerziellen Potential der Brennstoffzellentechnologie widerspiegelt. "Wir legen unseren zukünftigen Antriebsstrang für Brennstoffzellenfahrzeuge in die Hand von Ballard. Wir vertrauen darauf, dass Ballard der leistungsfähigste Zulieferer von Brennstoffzellensystemen und Antriebssträngen für die Brennstoffzellen-Fahrzeuge wird" (DaimlerChrysler (2001b)). Ford fasste Ende 1999 alle Elektrofahrzeug- und Brennstoffzellenaktivitäten unter dem Schirm der Marke "TH!NK-Group" zusammen.

Tabelle 21: Brennstoffzellenfahrzeuge von Ford

Model	Fahrzeugtyp	Passagiere	Brennstoffzellen Typ	Treibstoff	Brennstoffzellen Typ	kW	Reichweite	Jahr der Präsentation
FC5	Limousine	5	PEM	Methanol	Ballard	k.A.	k.A.	1999
Focus FCV	Limousine	5	PEM	H2	Ballard Mark 900	80	160 km	k.A.
Focus	Limousine	5	PEM	Methanol	Ballard Mark 901	80	620 km	k.A.
Focus FCV	Limousine	5	PEM	Kompriertes Wasserstoffgas (250 bar)	Ballard Mark 902	75	300 km	2002
P2000	Limousine	5	PEM	H2/LH2	Ballard Mark 700 PEM	75	160 km	k.A.

Da die Infrastruktur für Wasserstoff in absehbarer Zeit noch nicht kostengünstig verfügbar sein wird, arbeitet man bei Ford auch an einer Alternative, die mit Methanol-reformiertem Wasserstoff betrieben werden soll.

Ford Focus FCEV Hybrid

Der Ford Focus FCEV Hybrid kombiniert eine Brennstoffzelle mit einem zusätzlichen Energiespeicher, nämlich einer 216-Volt-Batterie - daher auch die Bezeichnungen E für "Electric" und "Hybrid". Es entstand ein emissionsfreies Fahrzeug mit einer Reichweite von über 300 Kilometern. Die Höchstgeschwindigkeit ist auf 128 km/h begrenzt. Die Batterie des japanischen Herstellers Sanyo ist nicht nur Starterbatterie für das gesamte System, sondern

bietet beim Beschleunigen zusätzlichen Schub: Die Leistung der Batterie kann immer dann abgerufen werden, wenn kurzfristig zusätzliche Energiereserven benötigt werden - beispielsweise zum Überholen. Die neue PEM-Brennstoffzelle Mark 902 von Ballard liefert eine Leistung von 68 kW / 92 PS und wiegt aber nur 96 Kilogramm (Automotive Intelligence (2002)).

Bereits 2004 will Ford eine limitierte Anzahl von serienreifen Brennstoffzellen-Fahrzeugen auf der Basis des FCEV-Hybrid produzieren. Sie sollen weltweit erprobt werden und in den USA zu Testzwecken auch in Kundenhand gegeben werden. Eine zweite Generation soll um 2007 auch in Europa und Japan erprobt werden. So wird der Ford Focus FCEV Hybrid im Rahmen der Clean Energy Partnership Berlin (CEP) auch ausgewählten deutschen Flottenkunden für Praxistests auf Leasingbasis zur Verfügung stehen, wobei die dabei gesammelten Erfahrungen in die weitere Entwicklung einfließen sollen (Automotive Intelligence (2002)). Die Vermarktung von serienreifen Brennstoffzellen-Fahrzeugen soll jedoch nicht vor 2010 beginnen.

4.3.13 General Motors/ Opel

General Motors (GM) (www.gm.com) ist der grösste Autobauer der Welt und hat den Hauptsitz in Detroit (USA). Hauptmarken sind Chevrolet und GMAC Trucks, GM-Diesel Lokomotiven und -motoren. In Europa sind es Opel, Saab, Vauxhall und Holden die produziert werden, in Japan Isuzu, Suzuki und Subaru. Zugleich ist GM Mitglied des amerikanischen Verbundes FreedomCar. Mit Toyota und Fiat ist General Motors eine Kooperation zur Entwicklung von innovativen Antriebssystemen eingegangen (Abbildung 20). Für die Entwicklung von alternativen Antriebssystemen gründete GM ausserdem zusammen mit seiner Tochter Opel 1998 das Global Alternative Propulsion Center. Dieses Forschungszentrum mit Standorten in Mainz, Roches (New York) und Warren (Michigan) hat rund 300 Mitarbeiter, davon 150 in Deutschland.

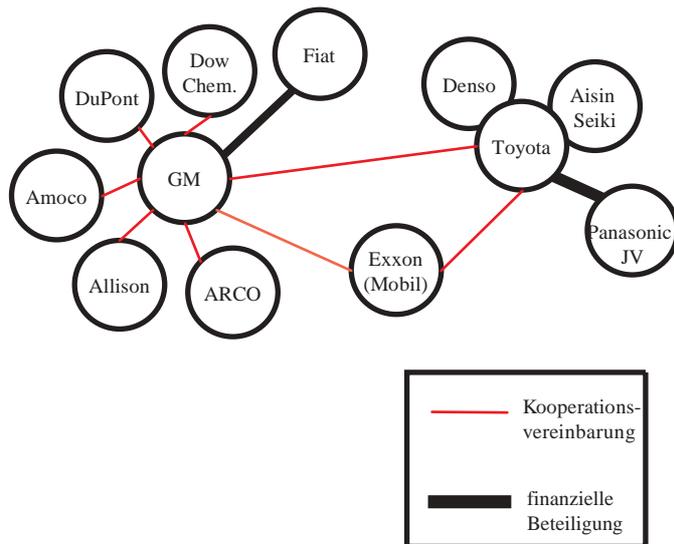


Abbildung 20: Kooperationspartner von GM, nach Steinemann (1999), verändert

Der Stack des Opel Zafira Brennstoffzellenfahrzeug HydroGen3 (Tabelle 22) liefert eine Leistung von 94 kW (Opel (2001)). Den 700-bar-Wasserstofftank im "HydroGen3", hat der Technische Überwachungs-Verein TÜV zertifiziert. Bisher konnten nur Wasserstofftanks mit maximal 350 bar Druck die Bedingungen für eine TÜV-Zertifizierung erfüllen. Der Druck von 700 bar ermöglicht nun die Speicherung von mehr Wasserstoff bei gleichem Platzbedarf - das bedeutet weniger Stopps zum Nachtanken (RichardLamers (2002)).

Tabelle 22: Brennstoffzellenfahrzeuge von GM

Model	Fahr-zeugtyp	Passa-giere	Treibstoff	Brennstoffzellen Typ	kW	Reich-weite	Präsentations-Jahr
EV1	Coupe	4	Methanol	k.A.	k.A.	>480 km	k.A.
Precept	Limousine	5	Wasserstoff	PEM	75	800 km	2000
AUTONomy	Zweisitzer	2	Wasserstoff	GM	k.A.	k.A.	2002
S-10	Truck	2	Benzin	GM Stack 2000	25	k.A.	2002
HydroGen1 (Zafira 2nd gen)	Minivan	5	LH2	GM	60	400 km	1998
Zafira HydroGen3	Minivan	5	Kryotank für Flüssig-wasserstoff	GM	94	410 km	2001
Zafiras	Minivan	k.A.	Methanol	k.A.	k.A.	k.A.	1997
Phoenix (Buick GL8)	Kombi	8	Wasserstoff	k.A.	k.A.	k.A.	2001

AUTOmomy

Mit dem Konzeptfahrzeug "AUTOmomy" (Abbildung 21) präsentierte das Global Alternative Propulsion Center (GAPC) von General Motors und Opel auf dem Genfer Automobilsalon 2001 ein Brennstoffzellen-Auto. Anders als bisherige Studien entstand das Konzeptfahrzeug nicht auf Basis eines Serienmodells, sondern wurde von Grund auf neu für den Wasserstoff-Antrieb ausgelegt. Wesentliches Element dieser neuen Konstruktions-Philosophie ist die

konsequente Umsetzung der "Drive-by-Wire"-Technik, die statt einer mechanischen eine elektronische Steuerung von Lenkung,

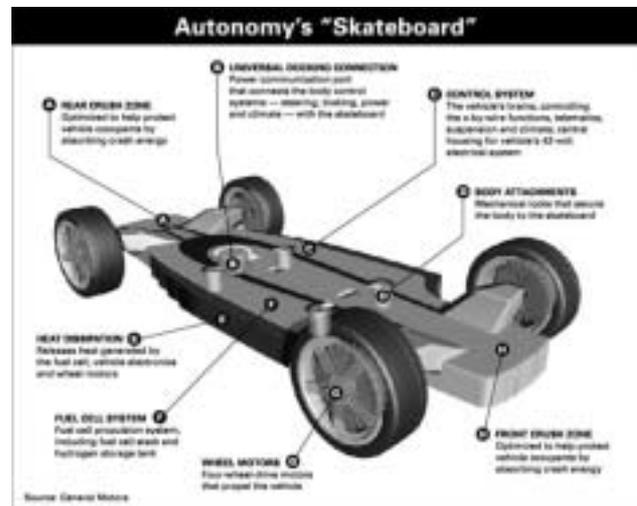


Abbildung 21: Das Skateboard des AUTOmomy, GM (2002)

Bremsen und anderen Fahrzeugfunktionen ermöglicht. Konstruktives Herzstück des AUTOmomy, ist ein völlig neuartiges Fahrgestell, auf dem alle wesentlichen Elemente, einschliesslich der Brennstoffzelleneinheit und des Wasserstofftanks, übersichtlich angeordnet sind. Dieses Skateboard-Chassis ermöglicht es, durch verschiedene Karosserieaufbauten eine breit gefächerte Modellpalette zu realisieren. Die Schlüsselfunktion im Elektriksystem übernimmt eine Art Andock-Station ("Docking port") in der Mitte des Skateboard-Chassis. Sie stellt eine schnelle und sichere Verbindung aller Fahrzeugsysteme für Steuerung, Antrieb und Klimaanlage mit dem Fahrgestell her und ermöglicht so einen wesentlich leichteren und unkomplizierteren Karosserieaufbau. Da zudem auch das komplette Brennstoffzellen-Antriebssystem in das nur rund 15 Zentimeter dicke Chassis integriert ist, eröffnen sich neue Freiräume in der Karosserie-Gestaltung, weil die Notwendigkeit, um einen Motorraum herum zu planen, nicht mehr besteht (Autointell (2002a)).

Opel und General Motors nehmen zurzeit an einem Projekt zur Demonstration von Brennstoffzellen-Fahrzeugen in Japan teil. Das Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project (JHFC) wird vom japanischen Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie (METI) geleitet. Neben GM und Opel beteiligen sich weitere Automobilhersteller sowie Energieunternehmen an dem Projekt, das sich zum Ziel gesetzt hat, ein besseres Verständnis für die Brennstoffzellen zu erhalten. GM/Opel sind mit dem Opel Zafira Hydrogen3 beteiligt (Autointell (2002b)).

Bis jetzt sind die Prototypen von GM/Opel Einzelstücke, die je ungefähr eine Million \$ kosten. Aber parallel entwickelt GM/Opel auch Benzin-Reformer. Im September 2001 wurde der erste Transporter von GM vorgestellt, der mit Benzin fährt, welches in einem Reformer im Fahrzeug (on Board) zu Wasserstoff umgewandelt wird. Laut Pehnt, et al. (2002) ist die Benzinreformierung sehr anspruchsvoll, da sich die Verbindung zwischen Kohlenstoffatomen schwerer aufbrechen lässt, als Verbindung zwischen Kohlenstoffatome und OH-Gruppen im Methanol (CH₃-OH). Zudem müssen die Temperaturen des Reformers höher sein (über 800 Grad Celsius im Vergleich zu 300 Grad Celsius bei Methanol). Generell sinkt durch den Einsatz eines Reformers der Wirkungsgrad und das ganze Auto wird teurer.

Kraftstoffentwicklung

Die bisher getrennt von den Firmen Toyota und GM mit ExxonMobil Corporation durchgeführte Zusammenarbeit im Bereich Kraftstoffe für Brennstoffzellen-Fahrzeuge wurde im Januar 2001 zusammengeführt. Die drei Firmen sehen Wasserstoff in der langfristigen Sicht als Kraftstoff der Wahl für Brennstoffzellen-Fahrzeuge. Kurz- und mittelfristig wird ein sauberer Kohlenwasserstoff als Überbrückung gewählt. Für Japan wird zusätzlich Erdgas in Verbindung mit einem sauberem Kohlenwasserstoff bei der gemeinsamen Entwicklung berücksichtigt. GM und Toyota sind sich einig, dass nur Wasserstoff das Potenzial hat, die Effizienz des Fahrzeugs wesentlich zu steigern und die Emissionen wesentlich zu senken. Ein sauberer Kohlenwasserstoff kann aber in einer Übergangsphase die existierende Infrastruktur nutzen. Es ist das Ziel der beiden Firmen, einen Kraftstoff zu finden, der sowohl in Verbrennungsmotoren als auch in Brennstoffzellen-Fahrzeugen eingesetzt werden kann (Forum Brennstoffzelle (2001a)).

Eine tabellarische Übersicht aller Automobilfirmen findet man im Anhang 8.5.

4.3.14 Diskussion der Verhandlungsstärke der Abnehmer

Die Automobilhersteller können bezüglich der Brennstoffzellenentwicklung in fünf Gruppen unterteilt werden:

A. Kooperation mit Ballard in der „Allianz“

Firmen, die nicht zur Allianz von Ballard, DaimlerChrysler, und Ford gehören, haben folgende andere Möglichkeiten, um an Brennstoffzellen Know-how zu kommen:

- B. Entwicklung eigener Brennstoffzellen oder Entwicklung von Brennstoffzellen in Kooperation mit anderen Automobil-Herstellern
- C. Entwicklung eigener Brennstoffzellen-Fahrzeuge mit Einkauf fremder Brennstoffzellen
- D. Entwicklung von Brennstoffzellen mit einem anderen Brennstoffzellenhersteller als Ballard
- E. Des weiteren gibt es Firmen, die momentan kein Interesse an der Brennstoffzellenforschung zeigen.

Die Variante B ist die teuerste und risikoreichste, da das finanzielle Risiko nicht mit einer Brennstoffzellenfirma geteilt werden kann, aber eventuell mit anderen Automobilfirmen. Verfolgt eine Firma das Ziel mit DaimlerChrysler zu den ersten Firmen zu gehören, die ein Brennstoffzellen-Auto auf dem Markt präsentieren und somit einen Standard setzen können, so muss diese Variante B gewählt werden.

Die Variante D führt zu mehr „added value“ als Variante C, da in D wesentlich mehr Firmen-Know-how steckt. Die Variante E ist im Moment die billigste. Verfolgt eine Firma diese Variante, so könnte dies dazu führen, dass sie bezüglich der Brennstoffzellentechnologie mittelfristig zu den Verlierern gehört. BMW und Porsche sind zwei deutsche Firmen, die Variante E verfolgen.

Toyota wählte Option B, könnte sich aber auch vorstellen in Zukunft, die Variante C zu verfolgen. Honda, Nissan, GM kombinieren zurzeit die Varianten B und C.

Aus heutiger Sicht haben GM, Toyota, Honda, Ford und DaimlerChrysler die besten Chancen als erste Autofirmen Brennstoffzellen-Fahrzeuge auf den Markt zu bringen. Diese „early mover“, wie dies Porter nennt, haben aber das Problem, dass sie in den ersten 10 Jahren mit ihrem neuen Produkt keine Gewinne schreiben werden, da die Fahrzeuge nicht kostendeckend verkauft werden können. Nissan, Peugeot, Renault, Hyundai und Volkswagen werden später mit ähnlichen Produkten auf dem Markt präsent sein, wobei Volkswagen zurzeit den Fokus auf alternative Antriebssysteme legt und zugleich mit dem Know-how vom PSI trotz allem auf dem Stand der Technik sein wird.

Kosten

Da sich die Abnehmer von Brennstoffzellen, die Automobilkonzerne, in den nächsten Jahren vermutlich noch stärker konzentrieren werden, werden sich die Margen für die Hersteller der Brennstoffzellen verringern. Die heutigen Verflechtungen von Automobilhersteller wurden in der Abbildung 15 gezeigt. Zudem werden immer mehr Produkte über Internet-B2B-

Plattformen abgewickelt, die von mehreren rivalisierenden Firmen betrieben werden. Beispielsweise wurde von Ford, GM und DaimlerChrysler im Februar 2000 die Internet-B2B-Plattform Covisin gegründet, um Kosten zu sparen (European Commission (2000c)). Solche B2B-Plattformen führen zu zusätzlichen Preissenkungen der Bestandteile die von Zuliefern stammen.

Aufgrund der Globalisierung müssen die Kosten von Brennstoffzellen noch weiter gesenkt werden, was nur mit einer höheren Stückzahl, zum Beispiel via Plattformstrategie (Tabelle 23) möglich ist. Die potentiellen Käufer von Brennstoffzellen werden sehr limitiert sein.

Tabelle 23: Beispiele von Plattformstrategien von konventionellen Fahrzeugen, Veloso (2000)

Autohersteller	Modelle mit derselben Plattform	Jährliches gesamtes Produktionsvolumen der Plattform
Volkswagen	Audi A3, Audi TT, Skoda Octavia, Seat Toledo, VW Golf	1.4 Millionen
General Motors	Buick Century, Buick Regal, Chevrolet Lumina, Chevrolet Monte Carlo, Oldsmobile Cutclass, Oldsmobile Intrigue, Pontiac Grand Prix	0.9 Millionen
Fiat	Palio, Palio Weekend, Siena, Strada, Minivan	1 Million
Ford	F Series, Super Duty, Expedition, Lincoln Navigator	1.2 Millionen

Diese wenigen Automobilfirmen können somit ihre Marktposition ausnützen. Eine Rückwärtsintegration bezüglich der Herstellung von Brennstoffzellen, die schon von einigen Automobilfirmen verfolgt wird, wird bei den anderen Automobilfirmen ebenfalls erwogen. GM, Honda und Toyota entwickeln eigene Brennstoffzellen, um nicht von einem Lieferanten abhängig zu sein. DaimlerChrysler und Ford entwickeln zusammen mit Ballard Brennstoffzellen. GM, Ford, Toyota und DaimlerChrysler gehören aber genau zu den 4 grössten Automobilfirmen weltweit, die bereits eigene Brennstoffzellen oder diese in Kooperation mit Brennstoffzellenherstellern entwickeln. Können die weiteren Brennstoffzellenhersteller, die noch keine Kooperation mit den 4 grössten Automobilfirmen eingegangen sind, nicht wichtige Kunden unter den 5 bis 7 grössten Hersteller gewinnen, so werden die Hersteller von Brennstoffzellen Mühe haben, die Kosten unter die benötigten 50 bis 70\$/kW zu drücken, da sie auf ihren Produktionsanlagen keine grossen Stückzahlen herstellen und verkaufen können.

Andererseits sind die Brennstoffzellen in einem Brennstoffzellenfahrzeug die wichtigste Komponente, was dazu führen wird, dass die Hersteller eine Marktmacht ausspielen können. Die Umstellungskosten werden am Anfang sehr hoch sein, da die Produkte noch nicht Standardisiert sein werden. Die Grösse der Zellen, das Gewicht und zum Teil der zu verwendete Treibstoff werden herstellerepezifisch sein.

Infrastruktur

Solange noch keine genügend dichte Infrastruktur für Wasserstoff oder Methanol für die Brennstoffzellenfahrzeuge vorhanden sein wird, werden die Automobilhersteller ihre Brennstoffzellen-Autos nur an Flottenbetreiber verkaufen können, wie dies die Post, lokale Zustellfirmen, Taxibetriebe und Behörden oder Firmen sind. Aber auch das ist schon ein beachtlicher Markt. Solche Flotten wären geeignet für Brennstoffzellenfahrzeuge, da eine zentrale Infrastruktur mit Tanksäule eingerichtet werden könnte. Nur schon die Landwirtschaftsfahrzeuge und Flughafenfahrzeuge in den USA belaufen sich schon auf rund 1000'000. Die Schweizer Post verfügt über 19'000 Fahrzeuge (Die Schweizerische Post (2001)), der United States Postal Service (2001), über 200'000 Fahrzeuge.

4.4 Resultate und Diskussion der Wettbewerbskraft der substituierenden Produkte

Im technologischen Umfeld der Brennstoffzelle existieren zahlreiche andere Antriebssysteme, die die Brennstoffzelle konkurrenzieren können. Abbildung 22 zeigt die verschiedenen Möglichkeiten und deren CO₂-Produktion. Je weniger CO₂ ein Antriebssystem emittiert, desto konkurrenzfähiger ist dieses zu einem Brennstoffzellenfahrzeug und trägt umso mehr zu einer nachhaltigen Mobilität bei.

Substitution ist nach Porter (2000) der Vorgang, bei dem ein Produkt oder eine Dienstleistung durch andere ersetzt wird.

Kohlendioxidemissionen von potentiellen Antriebssystemen

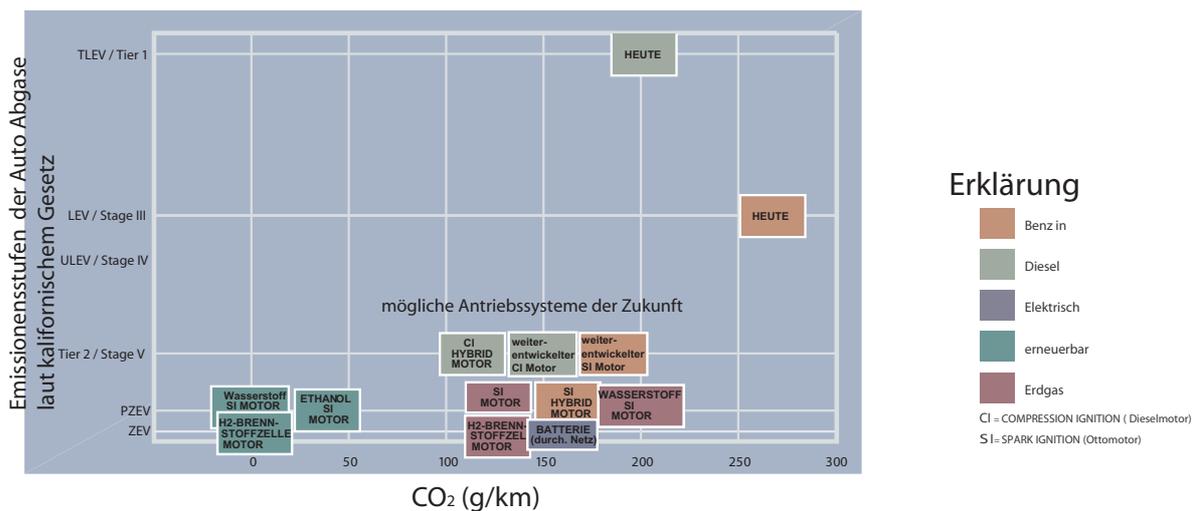


Abbildung 22: Umweltattribute von potentiellen Antriebssystemen und Konkurrenzprodukten der Brennstoffzelle, nach Ford Motor Company (2002) verändert

4.4.1 Elektromobile

Mit den bis jetzt verfügbaren Batterien die sehr schwer sind, haben Elektrofahrzeuge nur eine geringe Reichweite. Sie werden zum Beispiel für Transporte in autofreien Orten, wie Zermatt oder Braunwald, eingesetzt, also auf einem relativ kleinen Gelände. Sie können Brennstoffzellen nur ernsthaft konkurrenzieren, wenn die Leistungsdichte der Batterie zunimmt, das heißt wenn pro Kilogramm Batterie wesentlich mehr Energie gespeichert werden kann (siehe Interview mit Herrn Dietrich im Anhang). Nachteile sind die lange Batterieaufladezeit und die noch sehr hohen Kosten der Batterien. Einen Auftrieb könnten die Elektro-Fahrzeuge laut P. Dietrich (siehe Interview) und Geschka (2002) durch die Super-

Caps (Hochleistungs-Kondensatoren) erhalten. Diese ermöglichen eine höhere Leistungsdichte und können die Bremsenergie sehr effizient speichern. Einen Vorteil von Elektromobilen ist, dass beim Betrieb keine Emissionen anfallen. Zudem sind die Fahrzeuge relativ klein und nehmen auf der Strasse, wie auch auf Parkflächen wenig Raum in Anspruch.

Einige Fachleute sind jedoch der Meinung, dass das Elektroauto keine Chance auf einen Marktdurchbruch hat, weil es die Emissionsprobleme lediglich zu den Kraftwerken verlagert und – so Daimler-Forscher Karl Noreikat – „kein Kunde die geringe Reichweite und die hohen Kosten akzeptieren wird“ (Diebäcker (2000)).

4.4.2 Hybridfahrzeuge

Bei Fahrzeugen mit Hybridtechnik werden zwei Motoren eingesetzt. Ein Elektromotor wird hauptsächlich im innerstädtischen Verkehr benutzt, bei häufigem Stopp und Go. Ein konventioneller Antrieb (Otto- oder Dieselmotor) wird für ausserstädtischen Betrieb, wie zum Beispiel für Fahrten auf einer Überlandstrasse oder Autobahn, sowie für das Aufladen der Batterie eingesetzt. Moderne Elektromotoren und Generatoren sowie nahezu verlustfrei arbeitende elektronische Steuerungselemente und hoch belastbare Batterien gestatten den Einsatz der Elektroantrieb mit guten Wirkungsgraden. Trotz des damit verbundenen relativ hohen technischen Bauaufwands – es befinden sich zwei Antriebssysteme in einem Fahrzeug – können mit solchen Hybridfahrzeugen besonders niedrige Energieverbräuche und auch niedrige Abgasemissionen verwirklicht werden (Verband der Automobilindustrie e. V. (2002)). Die Emissionen werden aber zum Kraftwerk verlagert, welches die Energie produziert.

Hybridfahrzeuge werden inzwischen von verschiedenen Automobilherstellern als Versuchsfahrzeuge betrieben. In Japan werden laut Geschka (2002) Hybridfahrzeuge von Honda, Nissan, Mitsubishi und Toyota in Fahrzeugflotten eingesetzt. Der Toyota Prius ist das einzige seriengefertigte Fahrzeug mit Hybridantrieb (mit Benzin- und Elektromotor), das seit Anfang 2001 in Europa auf dem Markt ist. In Japan und in den USA ist zudem der Honda Insight erhältlich. Zum Fahren benutzt das Hybrid-Fahrzeug Toyota Prius einen 1,5-Liter-Benzinmotor, einen Elektromotor oder beide zugleich. Beim Bremsen kann der Prius einen Teil der Bremsenergie wieder rückgewinnen. Das fünfsitzige Fahrzeug ist etwa so lang wie ein Ford Focus mit Stufenheck. Es verbraucht aber im Vergleich zu einem Focus 1.4 mit 75 PS 30 Prozent weniger Benzin, nämlich nur 5,1 statt 6,7 Liter pro 100 Kilometer (AUTO-NEWS (2002b)). Der Prius kostet zurzeit 25'864 \$, der Ford Focus 15'000 \$. Die Differenz des Preises widerspiegelt noch die technologischen Unterschiede in der Entwicklung, wie auch die zwei Motoren die sich unter der Motorhaube befinden und noch ein enormer Kostenfaktor sind.

Das Hybrid-System "Mild" ist in Japan seit einem Jahr in der Limousine Crown auf dem Markt. Das System besteht aus vier Hauptbestandteilen: einem Elektromotor, einem Verbrennungsmotor, einer 36-Volt-Batterie zur Versorgung des 42-Volt-Bordnetzes und einem Steuergerät. Sobald das Fahrzeug zum Stehen kommt, schaltet das System den Motor ab. Radio und Klimaanlage werden nun vom Elektromotor gespeist. Zum erneuten Anfahren stellt der Elektromotor Antriebskraft bereit und startet den Verbrennungsmotor. Der Elektromotor leistet nur rund 5 bis 15 kW. Diese Leistung wird beim Beschleunigen eingesetzt. Zudem wird Bremsenergie zurückgewonnen. Das System bewirkt laut AUTO-NEWS (2002b) bis zu 15 Prozent Benzin-Ersparnis. Bei einem solchen Fahrzeug kann der konventionelle Verbrennungsmotor deutlich kleiner und leichter dimensioniert werden.

Die US-Regierung subventioniert jeden Kauf eines Hybridfahrzeuges mit 3000 Dollar. Der Besitzer kann ausserdem 55 Prozent der Zusatzkosten steuerlich abziehen (Diebäcker (2000)).

4.4.3 Erdgasfahrzeuge

Erdgasfahrzeuge werden seit Jahrzehnten in zahlreichen Ländern der Erde erfolgreich eingesetzt. Konzerne wie zum Beispiel VW, BMW, Opel und Fiat bieten bereits Erdgasfahrzeuge an. Meistens fahren diese als Bifuel-Fahrzeuge, weisen somit einen normalen Benzintank und einen Erdgastank auf. Das Erdgas-Tankstellennetz entwickelt sich allerdings in Europa eher langsam, mit Ausnahme in Italien, wo ein recht dichtes Netz aufgebaut wurde. Erdgas als Treibstoff emittiert, je nach emittierter Substanz, zwischen 60 bis 90% weniger Schadstoffe als Benzin oder Diesel (VSG (2002) und siehe auch Abbildung 23). Der Verband der Schweizerischen Gasindustrie hat kürzlich das langfristige Ziel von 50'000 Erdgasfahrzeugen für die Schweiz bekannt gegeben (Leuenberger (2002)). So wie Deutschland mit gezielten fiskalischen Massnahmen Erdgasfahrzeuge fördert, so verlangte die Schweizer Gaswirtschaft vom Bund eine international kompatible Steuerreduktion für Erdgas als Treibstoff. Die Schweizer Gaswirtschaft hat versprochen, bei einer Steuersenkung, die weitere Verbreitung von Erd- und Biogas-Fahrzeugen durch die Verdichtung des Tankstellen-Netzes zu unterstützen. Allein schon mit 50'000 Erdgas-Fahrzeugen könnte die Schweiz ihre CO₂-Emissionen jährlich um rund 30'000 Tonnen reduzieren. Der erdgasbetriebene Verbrennungsmotor ist laut Hirschberg (2002) eine attraktive Alternative zum Verbrennungsmotor für die CO₂-Reduktion. Sein Vorteil: sehr guter Wirkungsgrad bei gleichzeitig extrem niedrigen Stickoxidemissionen und keine Produktion von Partikeln, wie im Jahre 2002 an der ETH Zürich gezeigt werden konnte (Hirschberg (2002)).

Tabelle 24: TCO für Erdgasfahrzeuge (Stand Sept. 2002)

Kosten-Parameter versus Fahrzeugkosten:	Erdgasfahrzeug (Opel Zafira 1.6 CNG)	Quelle	Erdgasfahrzeug Opel Zafira (Opel Zafira 1.6 CNG) mit Subventionen von 3'000 Franken	Quelle	Konventioneller Opel Zafira mit Benzinmotor 74 kW / 100 Ps	Quelle
Fahrzeug mit Antrieb	21'067 \$	Opel (2002)	19'067 \$	Opel (2002)	18'398 \$	Opel (2002)
Eigenkapital	50%		50%		50%	
Kreditanteil	10'534\$		9'534 \$		9'199 \$	
Lebensdauer	14	Contadini (2000)	14	Contadini (2000)	14	Contadini (2000)
Zinssatz	9%	Migros Bank Privatkredit per 11.9.2002	9%		9%	
Abschreibungen pro Jahr	1'505 \$		1'362 \$		1'314 \$	
Zins pro Jahr	1'170 \$		1'059 \$		1'022 \$	
Summe der direkten Produktkosten	2'675 \$		2'421 \$		2'336 \$	
Treibstoffeffizient	5.5 kg/100 km	Opel (2002)	5.5 kg/100 km	Opel (2002)	7.9 L/100 km	Opel (2002)
Gefahrene Kilometer pro Jahr	15'000		15'000		15'000	
Treibstoffpreis	1 \$/kg	Telefonische Auskunft der IWB ¹⁹	1 \$/kg	Telefonische Auskunft der IWB ²⁰	0.877 \$/l	Shell Schweiz (2002)
Treibstoffkonsum (pro Jahr)	825 kg		825 kg		1'185 l	
Summe der jährlichen Treibstoffkosten	825 \$		825 \$		1'039 \$	
Wartungskosten pro Jahr	516 \$	Thüringen Gas (2002)	516 \$	Thüringen Gas (2002)	516 \$	
Summe der direkten Betriebskosten	1'341 \$		1'341 \$		1'555 \$	
Summe der Kosten	4'016 \$		3'762 \$		3'891 \$	

Diese TCO zeigt (Tabelle 24), dass nach diesen Berechnungen das Erdgasfahrzeug Opel Zafira 1.6 CNG nur günstiger ist als der herkömmliche Opel Zafira 1.6, wenn er von den 3'000 Franken Subventionen profitieren kann, die zum Beispiel im Kanton Basel Stadt (Schweiz) den Besitzern von Erdgasfahrzeugen gewährt werden.

¹⁹ Industrielle Werke Basel (Herr Schlitter)

²⁰ Industrielle Werke Basel (Herr Schlitter)

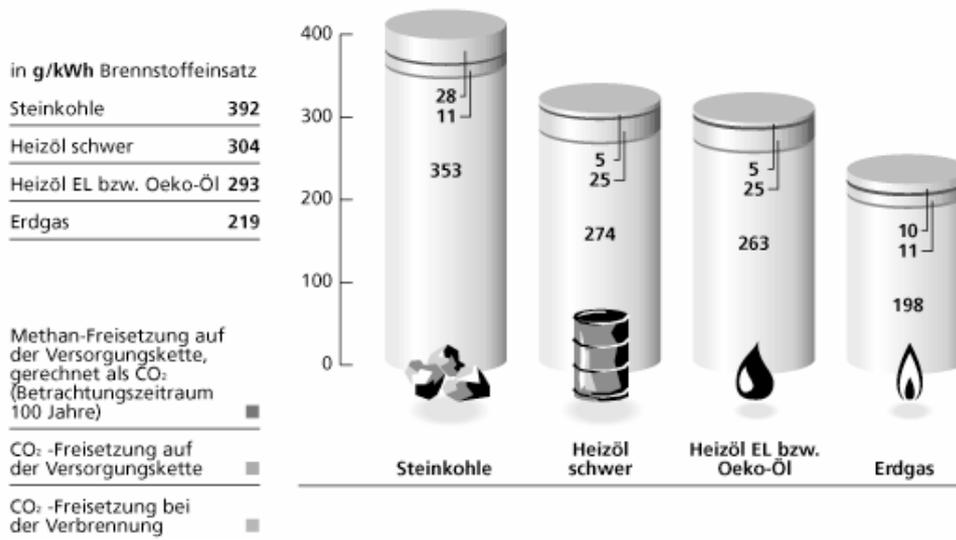


Abbildung 23: Freisetzung von Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄) bei der Nutzung fossiler Energieträger, VSG (2002)

4.4.4 Wasserstofffahrzeuge

BMW ist einer der ganz wenigen Automobilhersteller, die nicht auf die Brennstoffzelle als Energieversorger für den Antrieb setzen. Als Alternative zur kalten Verbrennung verfolgt BMW das Konzept der warmen Verbrennung von Wasserstoff. Dabei wird Wasserstoff direkt als Treibstoff für einen konventionellen Motor eingesetzt. Die beiden Modelle Mini Cooper und BMW 745 h sind inzwischen serienreif, aber noch nicht erhältlich. Der Vorteil dieser Technik ist, dass dieser Motor ungefähr so viel kostet wie ein Dieselmotor. Der Absatz dieser Fahrzeuge ist aber bedingt durch die kaum vorhandenen Wasserstofftankstellen stark limitiert. Um dieses Problem zu lösen, plant BMW, in unmittelbarer Nähe der BMW eigenen Verkaufsstellen Wasserstofftankstellen (persönliche Information von Herrn Medrisch, BMW). Zudem arbeitet BMW zusammen mit der deutschen Firma Linde und der EU an einem Projekt, um auf der Strecke Mailand-Brüssel ebenfalls eine genügend grosse Anzahl von Wasserstofftankstellen zu bereitzustellen. Laut Merten (2001) sind 15 Fahrzeuge des BMW 750 hl, dem Vorgänger des BMW 745 h, bis heute als Demonstrationsfahrzeuge produziert worden. Um den Absatz in Zukunft zu fördern, hat sich die bayerische Automobilfirma einen Zeitplan vorgegeben: 2005 soll in der nahen Umgebung jeder BMW-Niederlassung eine Wasserstofftankstelle stehen, 2010 soll das Netz europaweit ausgebaut sein und 2020 will BMW den Grossteil der ganzen BMW-Fahrzeugflotte auf den umweltschonenden Wasserstoffantrieb umgerüstet haben. Innerhalb der nächsten Jahre soll der BMW 745 h für einen Preis von 75.000 bis 100.000 \$ zu kaufen sein. Einen grossen Unterschied zum "normalen" 7er soll es dabei nicht geben. Er ist mit einem

Zwölfzylindermotor ausgerüstet, der 204 PS (104 kW) leistet. Auf der Internationalen Automobil-Ausstellung (IAA) 2001 präsentierte BMW eine Wasserstoff-Studie des MINI Cooper. Die Studie des MINI Cooper Hydrogen soll zeigen, dass BMW nicht nur den Wasserstoff-Motor als Antriebskonzept für Grossraumlimousinen betrachtet, sondern auch für Kleinwagen. BMW sieht in regenerativ erzeugtem Wasserstoff eine Alternative zu fossilen Kraftstoffen und möchte bereits 2010 mehrere Tausend Wasserstoff-Autos verkaufen (Geschka (2002)). Die Abbildung 24 zeigt aber, dass der Energieverbrauch zum Antrieb eines Verbrennungsmotors mit Wasserstoff ähnlich hoch wie bei einem Dieselmotor ist und somit keine CO₂-Verringerung erzielt werden kann.

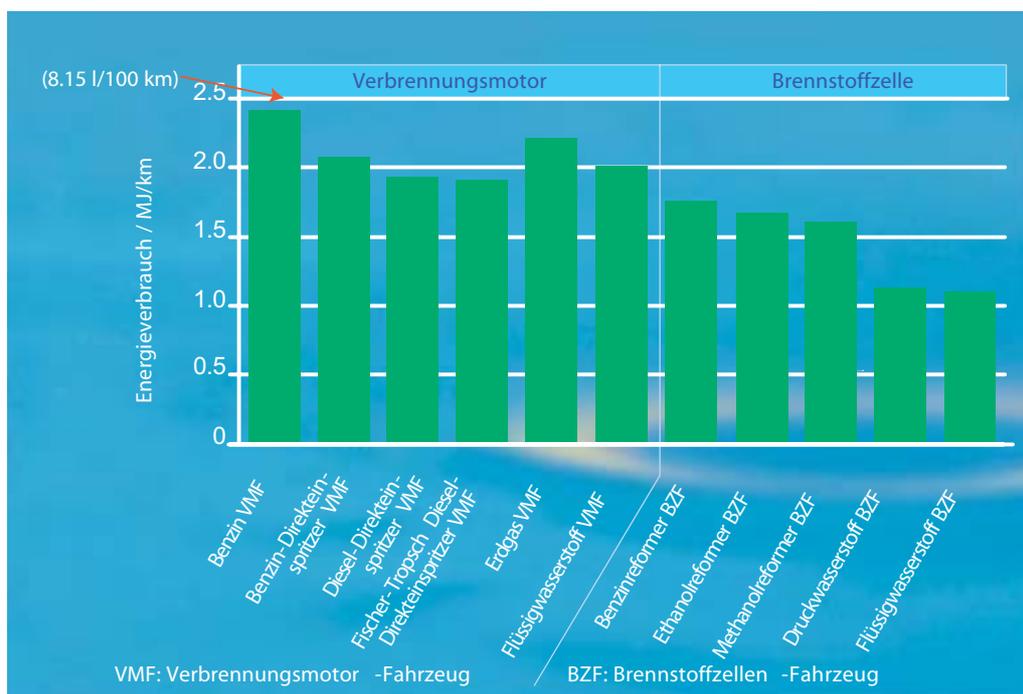


Abbildung 24: Tank to wheel Energieverbrauch, nach Choudhury (2002) ²¹

4.4.5 Optimierte Benzin- und Dieselfahrzeuge

Die Verbrennungsmotoren haben noch Verbesserungspotentiale bezüglich ihrer Energieeffizienz und der Menge an Emissionen. Laut Geschka (2002) besteht dieses Potential in neuer Motorentechnologie, wie variabler Ventilsteuerung, Zylinderabschaltung oder Kraftstoff-Direkteinspritzung. Beim Pkw mit Verbrennungsmotor kann langfristig mit einer Halbierung des Treibstoffverbrauchs gegenüber heute gerechnet werden. Man rechnet bis

²¹ Well to wheel = Die Summe der Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen über den gesamten Kraftstoffpfad, vom Ausgangsbrennstoff bis zur Zapfsäule plus die Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen bei der Nutzung des Fahrzeugs im Fahrzyklus

2005 mit einer Verbesserung der Effizienz von 17 auf 23 % (Geschka (2002)). Die Tabelle 25 zeigt weitere Möglichkeiten zur Optimierung der bestehenden Technologie auf.

Fahrzeuge wie der Volkswagen Lupo und der Audi A2, die im Durchschnitt 3 Liter verbrauchen, werden Nischenprodukte bleiben, da sie auf den ersten Blick relativ teuer sind. Der normale Lupo kostet 10'800 \$ in der Basisausstattung und der Lupo 3L TDI 14'575 \$, was eine Differenz von immerhin 3'775 \$ ist. Nimmt man an, dass ein Lupo in seinem Auto-Leben 150'000 Kilometer fährt und im Durchschnitt 3 Liter verbraucht und vergleicht man diesen Konsum mit dem des normalen Lupos, der 5.8 Liter konsumiert, so kommen beide im Endeffekt gleich teuer. In den Ländern mit steuerlich begünstigtem Diesel ist der Lupo 3L sogar günstiger, wenn man den Dieselskonsum über das ganze Leben eines Lupos einbezieht. Dr. Friedrich Wilhelm²², von der Audi AG, sagte dem Autor, dass der Audi A2 und der Lupo 3L keine Modell-Nachfolger finden werden, da die Fahrzeuge zu wenig nachgefragt werden. Dies wird durch eine Pressemeldung von BBC News bestätigt (Madslie (2002)).

Doch die Förderung von Fahrzeugen mit energieeffizienterem Diesel- oder Ottoantrieb, verbunden mit strengen Grenzwerten für die Partikelemissionen, schafft laut Hirschberg (2002) nur einen Teil der vom Gesetz verlangten CO₂- Reduktion im Strassenverkehr. Das heisst, es reicht als alleinige Massnahme nicht aus.

Tabelle 25: Hypothesen zu Technologien konventioneller Fahrzeuge 2005 bis 2010, (Gossen, et al. (1999))

Technologie	Massnahme/ Wirkung	Trend 2005	Trend 2010
Direkteinspritzende Ottomotoren	Wirkungsgradverbesserung im Teillastbereich um ca. 20 %, bei Vollast um ca. 3-5 %	breiter Einsatz ist denkbar und wahrscheinlich	Fortführung des Trends
Direkteinspritzende Dieselmotoren	Verbesserung des Wirkungsgrades um ca. 1-3%. Motoren mit weniger kW mit Aufladung zur Verbesserung des Teillastwirkungsgrades	Wirkungsgrad im Bestpunkt ca. 43 % Motoren mit weniger kW und Aufladung	Wirkungsgrad ca. 44 %
Starter-/ Generator-Einheit (SGE)	Verbrauchsminderung durch höheren Wirkungsgrad der Stromerzeugung, Start- Stopp-Automatik, 42 V Bordnetz	SGE als Serienausrüstung, (Start- Stopp-Automatik als Option)	zwei Bordnetze (12/14 Volt bzw. 36/42 Volt), um die elektrischen Geräte, wie Radio, Navigationssystem zu betreiben
Automatisierte Schaltgetriebe	Erhöhung der Gangstufenzahl, Vorgabe einer sparsamen Schaltstrategie,	Serie	Serie
Stufenlose Getriebe	Optimale Wahl der Betriebspunkte	k.A.	k.A.
Klimaanlage	Weiterentwicklung der externen Regelung, Einsatz kleinerer Kompressorvolumina, elektrisch bedarfsgerecht angetrieben	verbessertes Wirkungsgrad des mechanisch angetriebenen Kompressors, Klimaanlage gehört zur Serienausstattung	elektrisch angetriebener Kompressor, Klimaanlage gehört zur Serienausstattung

²² Gespräch in Stuttgart vom 14.10.2002

4.4.6 Diskussion der Bedrohung durch substituierende Produkte

Obwohl Brennstoffzellenfahrzeuge eine hohe Effizienz bezüglich der Treibstoffverwertung haben werden und zudem zumindest lokal emissionsfrei sind und keinen Motorenlärm mehr verursachen, müssen sich diese Fahrzeuge gegenüber anderen Fahrzeugen durchsetzen (Abbildung 25). Dies sind Erdgasfahrzeuge, Elektromobile, Wasserstoff-Verbrennungsmotor, Hybridfahrzeuge und optimierte Otto- und Dieselfahrzeuge. Da einige dieser Technologien weiter entwickelt sind als die Brennstoffzellen-Fahrzeuge und weniger kosten, werden hier die Wettbewerbskräfte sehr stark sein. Diese Alternativen werden hingegen noch nicht lokal emissionsfrei sein, aber zu den Low Emission Fahrzeugen zählen.

Der Verbrennungsmotor ist eine etablierte Technik bei guter Leistung, schlechtem Wirkungsgrad und schlechten Emissionswerten (NO_x, CO). Niedrige Abgasemissionen können aber durch verbrauchsoptimierte Fahrzeuge mit Otto- und Dieselmotor kostengünstiger als Brennstoffzellenfahrzeuge realisiert werden. Quantensprünge beim Verbrennungsmotor sind aber schwer zu erreichen.

Solange der Brennstoffzellenmotor trotz Subventionen über 60 \$/ kW kostet und der Diesel- beziehungsweise Benzinpreis nicht ansteigt, werden der Otto- und Dieselmotor sich weiter auf dem Markt behaupten können.



Abbildung 25: Kosten-Entwicklung und Marktpenetration von Brennstoffzellenfahrzeugen und substituierenden Fahrzeugen, eigene Darstellung

Kosten-Nutzen-Berechnungen von Wengel, et al. (2001) ergaben, dass es volkswirtschaftlich gesehen wesentlich kostengünstiger ist, durch verbrauchsoptimierte Fahrzeuge mit Otto- oder Dieselmotor die niedrigsten Abgasemissionen (Ultra Low Emission Vehicle oder Euro 4-Standard) zu realisieren als durch Fahrzeuge mit Brennstoffzelle. Solche Tatsachen werden natürlich eine frühzeitige Marktdiffusion der Fahrzeuge stark bremsen. Brennstoffzellenfahrzeuge werden sich erst im Massenmarkt etablieren können, wenn die substituierenden Fahrzeuge, wie dies die Abbildung 25 zeigt, teurer sind als Brennstoffzellenfahrzeuge sind. Allerdings wird dies in den nächsten 10 bis 15 Jahren bestimmt nicht der Fall sein, ausser es findet eine drastische Verknappung von Erdöl und Erdgas statt. Aber auch dann müssten die Treibstoffe für die Brennstoffzelle günstig sein und ein ausreichend dichtes Infrastrukturnetz für Treibstoffe vorhanden sein.

Verbrennungsmotoren mit Wasserstoff oder Erdgas als Kraftstoff sind für einige Automobil-Hersteller die alternative Lösung zu Brennstoffzellenfahrzeugen. Die Effizienz von Verbrennungsmotoren mit Wasserstoff liegt allerdings weit unter der eines Brennstoffzellenfahrzeuges. Die BMW 745h Variante kann nicht als Alternative bezeichnet werden. Das Fahrzeug verfügt über eine zu geringe Effizienz, da er einerseits einen Hubraum von 3600 cm^3 besitzt und über zwei Tonnen wiegt und der Verbrennungsmotor Wasserstoff nicht effizient in Antriebsenergie umsetzen kann.

Hingegen könnten Erdgasfahrzeuge zumindest die nächsten 10-20 Jahre eine echte Alternative zum herkömmlichen Verbrennungsmotor und zum Brennstoffzellenfahrzeug sein, da sie relativ günstig in der Anschaffung sind. Von den Kantonen, wie auch von anderen Ländern werden Gasfahrzeuge subventioniert. Die Treibstoffkosten sind niedrig und die Gasindustrie ist gewillt, diese Fahrzeuge zu fördern, auch wenn sie am Anfang das Gas subventionieren oder sogar gratis anbieten muss. Auch die Total Cost of Ownership (TCO) Berechnung zeigte die Vorteile von Gasfahrzeugen.

Viele Automobilhersteller haben die Entwicklung von Elektromobilen zugunsten der Brennstoffzellentechnik zurückgestellt, da die Elektromobile noch eine zu geringe Reichweite, ein zu hohes Batteriegewicht und hohe Batteriekosten haben.

Hingegen sind Hybridfahrzeuge in den die nächsten 10-20 Jahre eine vernünftige Alternative zu den konventionellen Verbrennungsmotor- und Brennstoffzellenfahrzeugen. Hybridfahrzeuge, wie der Toyota Prius weisen zwar immer noch einen relativ hohen Treibstoffverbrauch von rund 5.5 Liter aus, der sich aber mit den neuen Generationen dieser Fahrzeuge verringern wird.

Ein weiterer Bonuspunkt all dieser Alternativen gegenüber Brennstoffzellenfahrzeugen ist, mit Ausnahme der Gasfahrzeuge, die schon vorhandene Treibstoff-Infrastruktur. Solange das Infrastrukturproblem bei den Brennstoffzellen-Fahrzeugen noch nicht gelöst ist und der Preis

pro Kilowattstunde mehr als 20 % über dem einer Alternative liegt, wird sich das Brennstoffzellenfahrzeug nicht durchsetzen können.

4.5 Schlussfolgerungen

4.5.1 Schlüssel zum Erfolg

Die zwei übergeordneten Schlüsselfaktoren zum Erfolg sind einerseits die Ansprüche des Konsumenten an ein Auto und andererseits der Markterfolg durch politische Rahmenbedingungen. Nur, wenn der Konsument willens ist Brennstoffzellenfahrzeuge zu akzeptieren und in einer Anfangsphase bereit ist, mehr zu zahlen, werden Brennstoffzellenfahrzeuge auf dem Automobilmarkt eine Chance haben. Beim Autokauf spielen zum einen technische Eigenschaften, zum anderen aber auch emotionale Aspekte eine wichtige Rolle. Eine grossangelegte Befragung bei über einer Million Autofahrern in den USA zeigt folgende Rangfolge der Ansprüche des Konsumenten beim Kauf eines konventionellen Autos:

- | | |
|---|-----------------------------------|
| 1. Verlässlichkeit/problemloser Betrieb | 6. Reputation des Herstellers |
| 2. Qualität der Verarbeitung | 7. Treibstoffeffizienz |
| 3. Unfallsicherheit | 8. Passagierkomfort |
| 4. Niedriger Verkaufspreis | 9. Aussehen und Styling |
| 5. Zugang zu Ersatzteilen und Service | 10. Fortschrittliches Engineering |

Wenn Brennstoffzellen-Fahrzeuge in diesen Punkten schlechter abschneiden als herkömmliche Fahrzeuge sowie zusätzlich ein schlechter ausgebautes Infrastrukturnetz zur Verfügung steht, werden nur wenige Konsumenten bereit sein, auf Brennstoffzellen-Fahrzeuge umzusteigen.

Handelt es um die Einführung von Brennstoffzellenfahrzeugen, sind von den erwähnten 10 Punkten die folgenden Punkte hervorzuheben:

- Verlässlichkeit/problemloser Betrieb
- Niedriger Verkaufspreis (Kosten)
- Zugang zu Ersatzteilen und Service
- Treibstoffeffizienz

Weitere Punkte, die in diesem Zusammenhang wichtig sind, aber die hier der Konsument nicht nannte, sind eine **verfügbare Treibstoffinfrastruktur**, **gesetzliche Rahmenbedingungen** und der **Zusatznutzen der Brennstoffzelle**. Im Folgenden wird auf fünf dieser Punkte näher eingegangen:

Niedriger Verkaufspreis (Kosten)

Eine Firma kann nur erfolgreich operieren, wenn sie die Kosten reduziert und somit die Produktpreise wettbewerbsfähig sind. Durch die Optimierung der gesamten Konzeption des Fahrzeuges auf den neuen Antrieb sollen vor allem die Anschaffungskosten deutlich gesenkt werden. Eine Kostenreduktion kann unter anderem durch eine Plattformstrategie erfolgen. Dieses Konzept wurde beispielsweise bei konventionellen Antrieben bei Volkswagen und Ford umgesetzt. Die Plattform des Audi A3, des VW Golf und des Seat Toledo sind beispielsweise identisch. Diese Plattformstrategie führt zu grösseren Stückzahlen, was die Produktionskosten senkt. GM ist mit dem Konzeptfahrzeug AUTONomy ebenfalls auf dem richtigen Weg. Dieses Fahrzeug ermöglicht mit dem Skateboardmodul (Unterboden, welcher Motor, Räder, Elektronik und Antriebsachsen beinhaltet) eine Vielzahl von Hüllen.

Treibstoffinfrastruktur

Eine der kritischen Determinanten bei der Markteinführung und -durchdringung der Brennstoffzellen-Technologie im Strassenverkehr ist das Vorhandensein einer Treibstoffinfrastruktur. Brennstoffzellen benötigen Wasserstoff als Treibstoff. Der Wasserstoff kann dabei entweder direkt zur Verfügung gestellt werden oder indirekt in Form von Kohlenwasserstoff-Verbindungen wie Methanol oder konventionellen Erdölprodukten (Erdgas, Benzin oder Diesel). Bei der indirekten Lösung muss ein Reformier den Treibstoff in Wasserstoff umwandeln, was aber zu einem Effizienzverlust führt. Welche Lösung sich durchsetzen wird, ist derzeit noch nicht absehbar. Die Schaffung einer entsprechenden Infrastruktur erfordert enorm hohe Investitionen und muss noch vor der Markteinführung teilweise abgeschlossen sein.

Treibstoffeffizienz

Zukünftige technische Weiterentwicklungen müssen die Effizienz der Brennstoffzelle weiter steigern. Derzeit geht rund 50 % der Input-Energie als Wärme durch den Prozess in der Brennstoffzelle verloren. Durch die Reformierung von Benzin, Erdgas und Methanol in Wasserstoff, wie auch durch die Elektrolyse von Energie in Wasserstoff gehen mindestens je 10 % an Energie verloren. Je effizienter eine Brennstoffzelle mit dem Treibstoff umgeht, desto erfolgreicher wird die Brennstoffzelle auf dem Markt für mobile Antriebssysteme sein.

gesetzliche Rahmenbedingungen

Brennstoffzellenfahrzeuge werden sich auf dem Markt etablieren, wenn klare und sehr strenge Emissionsgrenzwerte und Treibstoffverbrauchswerte in den wichtigsten OECD-Ländern festgelegt werden. Diese Richtlinien und Grenzwerte vereinfachen den Markteintritt. Porter, et al. (1995) zeigten einen positiven Zusammenhang zwischen strengen

Umweltschutzvorschriften und Wettbewerbsfähigkeit der davon betroffenen Firmen, wenn die staatlichen Regulierung richtig implementiert sind. Diese Firmen werden auf anderen Märkten durch ihren Know-how-Vorsprung profitieren.

Eine freiwillige Absichtserklärung der schweizerischen Automobilimporteure, wie auch des Europäischen Verbandes der Automobilindustrie (ACEA) zur Reduktion des durchschnittlichen Treibstoffverbrauches genügt dazu nicht. Stattdessen müssen klare gesetzliche Richtlinien implementiert werden. Die strengen Gesetzgebungen führen zu zusätzlichen technologischen Anstrengungen, um neue innovative Produkte auf den Markt zu bringen, wie dies anhand der kalifornischen Gesetze schon gezeigt werden kann.

Zusatznutzen der Brennstoffzelle

Das Brennstoffzellenfahrzeug wird zum Beispiel keine Vibrationen durch den Motor mehr erzeugen und das Fahrzeug kann ausserdem im Stand klimatisiert werden.

Während seiner Lebensdauer von durchschnittlich 15 Jahren fährt ein Fahrzeug durchschnittlich 5'000 Stunden und steht 125'000 Stunden in der Garage oder auf dem Parkplatz. Während diesen 125'000 Stunden, beziehungsweise diesen 96 % der Produktlebenszeit könnte das Fahrzeug für das lokale Energienetz oder für das eigene Haus die Energie und Wärme liefern. Das würde aber heissen, dass eine Brennstoffzelle nicht nur für 5'000 Stunden ausgelegt werden dürfte, wie dies geplant ist, sondern für rund das 10 bis 20-fache. Dies würde die Brennstoffzelle zusätzlich verteuern.

4.6 Fazit der zu erwartenden Wettbewerbskräfte

Die Entwicklung im Brennstoffzellensektor hat sich nach den euphorischen 90er Jahren ein bisschen verlangsamt. Niemand spricht mehr von einem serienreifen Fahrzeug, das noch vor dem Jahr 2005 auf den Markt kommt. Als Zusammenfassung kann gesagt werden, dass sich der Wettbewerbsdruck innerhalb der Hersteller verstärken wird. Mehrere Firmen werden Ballard folgen und einen hart umkämpften Markt vorfinden. Da sich die Brennstoffzellen-Hersteller noch nicht auf einen Standard einigen können, werden die **Umsteigekosten** von einer Brennstoffzelle auf eine andere für den Automobilhersteller zu Beginn sehr hoch sein. Dies ist ein Grund dafür, warum einige Auto-Firmen mit einer Rückwärtsintegration liebäugeln oder sie wie GM, Honda und Toyota sogar bereits vollziehen. Brennstoffzellenhersteller können nicht mit dem Preis den Wettbewerb für sich gewinnen, da die Materialkosten viel zu hoch bleiben werden. Das Produkt zu differenzieren, wird ebenfalls schwierig sein, da im Prinzip nur zwei mögliche chemische Prozesswege existieren (Direkt-Wasserstoff-, Indirekt-Wasserstoffbrennstoffzelle).

Die **Eintrittsbarrieren** im Brennstoffzellen-Markt werden sehr hoch sein, da hohe Summen in Forschung, Entwicklung und Produktionsmethoden investiert werden müssen. Zudem sind einige Hersteller von Brennstoffzellen Kooperationen mit Automobilherstellern eingegangen, um besser an Vertriebskanäle zu gelangen. Die Economy of Scale wird eine weitere hohe Eintrittshürde sein. Erst ab hohen Stückkosten wird es möglich sein, den konventionellen Otto- oder Dieselmotor als Substitutionsgut konkurrenzieren zu können. Trotzdem werden grosse Firmen enorme Summen investieren, um in Zukunft Brennstoffzellen auf dem Markt anbieten zu können. Dies werden Automobilhersteller, Treibstoffhersteller, High-Tech- und Energiefirmen sein.

Eine starke Konkurrenz kommt von den möglichen **Substitutionsgütern**. Obwohl Brennstoffzellen im Prinzip eine ideale Energiequelle ohne lokale Kohlendioxidproduktion sind, werden weiterentwickelte Benzin- und Dieselmotoren, Hybrid- und Erdgasfahrzeuge als Substitutionsgüter mittelfristig bessere Wettbewerbschancen haben. Zudem verfügen diese Substitutionsgüter über eine funktionierende und genug dichte Infrastruktur, was für Wasserstoff oder Methanol noch nicht und für Erdgas nur bedingt existiert.

Die **Verhandlungsstärke der Lieferanten** wird nicht sehr stark sein. Das für Brennstoffzellen benötigte Material, ausser Platin und Membranen, ist günstig auf dem Markt erhältlich. Auch die Maschinen zur Herstellung der Zellen werden leicht erhältlich sein. Eine Vorwärtsintegration bei den Zulieferern wird kaum stattfinden, da diese nicht über das nötige Mitarbeiter-Know-how verfügen.

Die Verhandlungsstärke der Abnehmer ist dagegen gross, denn sie werden sich durch Fusionen weiter auf ein paar wenige grosse Konzerne konzentrieren, die jeweils über 10 – 15 % der Fahrzeuge weltweit herstellen. Obwohl die Umsteigekosten für einen Automobilhersteller zu Beginn hoch sein werden, werden sie eine starke Marktmacht ausüben können, da sie mit einer Rückwärtsintegration drohen können.

«Un jour, l'hydrogène et l'oxygène seront les sources inépuisables qui fourniront chaleur et lumière.»

Jules Verne dans son livre «L'Île mystérieuse» en 1874.

5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gefahrene Pkw-Kilometer in Abhängigkeit zur Wirtschaftsleistung (Shell Deutschland (2001))	7
Abbildung 2: Gesamter Primärenergiebedarf eines VW-Golf (Schweimer GW, et al. (1996))..	9
Abbildung 3: schematischer Aufbau einer PEM Brennstoffzelle, (Kabza (2002))	11
Abbildung 4: Brennstoffzellenstack mit Membranaufbau	12
Abbildung 5: Nafion Membran Aufbau	12
Abbildung 6: Das Five-Forces-Modell von Porter	18
Abbildung 7: Die fünf Wettbewerbskräfte, eigene Darstellung in Anlehnung an Porter (1999)	26
Abbildung 8: Komponenten eines Brennstoffzellenmoduls für den Fahrzeugantrieb (Jörissen (2001)), das zusätzlich über einem Reformer verfügt	28
Abbildung 9: Kooperationen und Beteiligungen der Brennstoffzellenfirmen, verändert nach (Steinemann (1999))	30
Abbildung 10: Aktienkurs der Firma Ballard während der letzten 5 Jahre, Hoovers (2002)...	31
Abbildung 11: US-amerikanische Verkaufszahlen von Brennstoffzellenfahrzeugen nach Allied Business Intelligence, (Ozbek (2001))	37
Abbildung 12: Kostenstruktur des Brennstoffzellenmoduls, aufgrund von Zahlen aus Geschka (2002) & Kalhammer, et al. (1999b)	45
Abbildung 13: Wertschöpfungskette der Brennstoffzelle mit den im jeweiligen Bereich tätigen Unternehmen, eigene Darstellung	52
Abbildung 14: Jährlicher Bedarf an primärem Platin nach dem Szenario von Rade (2001) ...	54
Abbildung 15: Automobilfirmen und deren Kooperation im Bereich der Antriebssysteme, abgeändert nach Matsushima, et al. (2000)	56
Abbildung 16: Marktanteile der verschiedenen Automobilhersteller, eigene Grafik, Daten von Concept-Automobile (2002)	57
Abbildung 17: Jeep Commander 2 (hinten) und NECAR 5 (vorn) (DaimlerChrysler (2002)).	59
Abbildung 18: Innenleben des NECAR 4, DaimlerChrysler (2001a).....	61
Abbildung 19: H ₂ O Konzept Fahrzeug, (Peugeot France (2002)).....	69
Abbildung 20: Kooperationspartner von GM, nach Steinemann (1999), verändert.....	72
Abbildung 21: Das Skateboard des AUTOnomy, GM (2002)	73
Abbildung 22: Umweltattribute von potentiellen Antriebssystemen und Konkurrenzprodukten der Brennstoffzelle, nach Ford Motor Company (2002) verändert.....	78
Abbildung 23: Freisetzung von Kohlendioxid (CO ₂) und Methan (CH ₄) bei der Nutzung fossiler Energieträger, VSG (2002).....	82
Abbildung 24: Tank to wheel Energieverbrauch, nach Choudhury (2002)	83
Abbildung 25: Kosten-Entwicklung und Marktpenetration von Brennstoffzellenfahrzeugen und substituierenden Fahrzeugen, eigene Darstellung	85

6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verteilung des Energiekonsums der USA nach Energiequelle (in Prozent), aus dem Jahre 1999 (Oak Ridge National Laboratory, et al. (2001))	7
Tabelle 2: Anteile an CO und NO _x im Jahr 1999 in den USA (Oak Ridge National Laboratory, et al. (2001)).....	8
Tabelle 3: Aktuelle und zukünftige EU Emissionsgrenzwerte für Fahrzeuge (in g/km), nach (Walsh (1999) und ADAC (2001))	11
Tabelle 4: Eigenschaften der PEM-Brennstoffzelle, aus (Norbert Berg, et al. (1999))	14
Tabelle 5: Wirkungsgrade und Kraftstoffverbrauch im Neuen Europäischen Fahrzyklus plus Autobahnfahrt (Pehnt, et al. (2002)).....	15
Tabelle 6: Markteintrittsbarrieren nach Hay/Morris 1991 aus Pfaff, et al. (2000).....	19
Tabelle 7: Absatz von Brennstoffzellen-Fahrzeuge nach Frermont, et al. (2000).....	38
Tabelle 8: Material- Herstellungskosten für PEM-Brennstoffzellen Stacks, (Wengel, et al. (2001))	41
Tabelle 9: Total Cost of Ownership (TCO) für Fahrzeuge mit Verbrennungs- und Brennstoffzellenmotor	43
Tabelle 10: angemeldete Patente am europäischen Patentamt, eigene Recherche European Patent Office (2002)	48
Tabelle 11: Brennstoffzellenfahrzeuge von DaimlerChrysler	60
Tabelle 12: Mazdas Brennstoffzellenfahrzeuge.....	62
Tabelle 13: Brennstoffzellenfahrzeuge von Nissan	64
Tabelle 14: Brennstoffzellenfahrzeuge von Toyota.....	65
Tabelle 15: Brennstoffzellenfahrzeuge von Honda.....	66
Tabelle 16: Brennstoffzellenfahrzeuge von Hyundai.....	66
Tabelle 17: Mitsubishi's Brennstoffzellenfahrzeuge.....	67
Tabelle 18: Brennstoffzellenfahrzeug von Volkswagen	68
Tabelle 19: Brennstoffzellenfahrzeug von Renault.....	68
Tabelle 20: Brennstoffzellenfahrzeuge von PSA.....	69
Tabelle 21: Brennstoffzellenfahrzeuge von Ford.....	70
Tabelle 22: Brennstoffzellenfahrzeuge von GM.....	72
Tabelle 23: Beispiele von Plattformstrategien von konventionellen Fahrzeugen, Veloso (2000).....	76
Tabelle 24: TCO für Erdgasfahrzeuge (Stand Sept. 2002).....	81
Tabelle 25: Hypothesen zu Technologien konventioneller Fahrzeuge 2005 bis 2010, (Gossen, et al. (1999)).....	84

7 Literatur

ADAC (2001) Zahlen und Fakten zum Thema Umwelt, München.

American Methanol Foundation (1999) Methanol Refueling Station Cost, Washington DC.

Anonymous (2002) Peugeot stellt Brennstoffzellen-Feuerwehrauto vor, <http://www.brennstoffzellenautos.com/p.html>, Brennstoffzellenautos.com, 25.9.2002.

Arthur D. Little, I. (2002) Guidance for Transportation Technologies: Fuel Choice for Fuel Cell Vehicles, Arthur D. Little, Inc., Cambridge.

AUTO-NEWS (2002a) Toyota zeigt in Tokyo ein neues Hybridfahrzeug, http://www.auto-news.de/auto2/toyota_hybrid.htm, Auto News, 19.9.2002.

AUTO-NEWS (2002b) Serienautos und Studien, die die Umwelt schützen, http://www.auto-news.de/auto2/toy_est_02_estima_hybrid.htm, Toyota, 24.9.2002.

Autointell (2002a) Revolutionäres Fahrzeugkonzept für Brennstoffzelle, <http://www.autointell.de/News-deutsch-2002/Februar-2002/Februar-2002-4/Februar-27-02-p2.htm>, autointell, 4.9.2002.

Autointell (2002b) Opel / GM beteiligen sich an japanischem Brennstoffzellen-Programm, <http://www.autointell.de/News-deutsch-2002/Juli-2002/Juli-2002-4/Juli-25-02-p4.htm>, Autointell, 19.9.2002.

Automotive Intelligence (2002) Der neue Ford Focus Brennstoffzelle: Hybrid-Technologie für exzellente Fahrleistungen, <http://www.autointell.de/News-deutsch-2002/September-2002/September-2002-3/September-19-02-p7.htm>, Automotive Intelligence, 19.9.2002.

Ballard (2000) California Fuel Cell Partnership, <http://www.ballard.com/td.asp?pgid=58&dbid=0>, Ballard, 18.09.2002.

BaslerZeitung (2002) Der lange Weg zur sanften Mobilität, *Basler Zeitung*, **27. September 2002**, 27. September 2002.

Bevilacqua Knight (2001) Bringing Fuel Cell Vehicles to Market: Scenarios and Challenges with Fuel Alternatives, California Fuel Cell Partnership, West Sacramento.

BörseGo (2001) Konzerne gründen Brennstoffzellen-Fonds, <http://www.finanznachrichten.de/nachrichten/artikel-658244.asp>, FinanzNachrichten.de, 19.9.2002.

Bredenhöft, Christine, C. Niegsch and T. Schuldt (2002) Im Fokus - Deutsche Automobilhersteller, *DZ Bank Research*, DZ Bank AG, Frankfurt.

Brennstoffzelle, F. (2001) Renault und Nissan investieren in die Zukunft, <http://www.forum-brennstoffzelle.de/index.php?main=info&news=akt&akt=9>, Forum Brennstoffzelle, 19.9.2002.

Choudhury, R. (2002) Well-to-Wheel Analyse des Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen von Fortschrittlichen Kraftstoff/Fahrzeug-Systemen, GM/Opel, 17.10.2002.

Concept-Automobile (2002) A propos des marques, http://caroconcept.free.fr/a_propos_des_marques.htm, Concept-Automobile,, 19.9.2002.

Contadini, J. F. (2000) Social cost comparison among fuel cell vehicle alternatives, *SO - Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, 2000. (IECEC) 35th Intersociety.*, **2**, 1341 - 1351.

COWI A/S (2002) Fiscal Measures to Reduce CO₂ - Emissions from New Passenger Cars - Main Report - Final Report, European Union, Brussel.

DaimlerChrysler (2001a) DaimlerChrysler HighTech Report 2001 - Energie für die Zukunft, Stuttgart.

DaimlerChrysler (2001b) DaimlerChrysler erhöht Anteile an Ballard, http://www.daimlerchrysler.com/index_g.htm?news/top/2001/t11002_g.htm, DaimlerChrysler, 25.9.2002.

DaimlerChrysler (2002) NECAR, http://www.daimlerchrysler.com/index_g.htm?specials/necar/fahrzeuge/necar1_g.htm, DaimlerChrysler, 13.9.2002.

Die Schweizerische Post (2001) Geschäftsbericht 2001, Die Post, Bern.

Diebäcker, J. (2000) Die Zukunft hat noch nicht begonnen, http://www.neue-oz.de/information/noz_print/automobiles/zz_autotechnik/alternativen.html, Osnabrücker Zeitung, 1.10.2002.

Eberl, U. (1998) Brennstoffzellen für Jedermann, http://w4.siemens.de/FuI/de/archiv/zeitschrift/heft2_98/artikel05/, Siemens, 1.10.2002.

Entreß, A. (2002) Honda fährt nächstes Jahr mit Brennstoffzelle, <http://www.ftd.de/ub/in/1014398883101.html>, Financial Times Deutschland, 19.9.2002.

Erdmann, Georg and M. Grahl (1999) Economic Systems Analysis of Fuel Cell Electric Vehicles, Economists), IAEE (International Association of Energy, IAEE (International Association of Energy Economists), Paris, 1999.

Erdöl-Vereinigung (2001) Jahresbericht 2001, Erdöl-Vereinigung, Zürich.

EU Rat für Verkehrspolitik (1998) Strategie für die Einbeziehung der Belange der Umwelt und der nachhaltigen Entwicklung in die Verkehrspolitik, *Schlußfolgerungen des Europäischen Rates von Wien*, European Union, Wien.

Europäische Kommission (2000) EU-Strategie zu CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen, http://europa.eu.int/comm/environment/co2/co2_home_de.htm, Europäische Kommission, 1.10.2002.

European Commission (2000a) GREEN PAPER – TOWARDS A EUROPEAN STRATEGY FOR THE SECURITY OF ENERGY SUPPLY - Technical Documentation, *KOM(2002) 321*, Brüssel.

European Commission (2000b) Green paper: "Toward a European strategy for the security of energy supply, European Commission, Brüssel.

European Commission (2000c) Automotive Industry- Sectoral Analysis, <http://europa.eu.int/comm/enterprise/automotive/pagesbackground/sectoralanalysis/>, The European Commission, 1.10.2002.

European Patent Office (2002) esp@cenet - patent searching, <http://www.european-patent-office.org/>, European Patent Office, 2.10.2002.

EVAA (2002) Electric Vehicle Association of the Americas (EVAA) - Regulatory issues - Revisions to California's ZEV program, http://www.evaa.org/evaa/pages/state_reg_alert_03-02-02.html, EVA, 17.9.2002.

Ford Motor Company (2002) Connecting with society, Our Learning Journey, Ford Motor Company, Dearborn.

Forum Brennstoffzelle (2001a) General Motors und Toyota verständigen sich auf gemeinsame Kraftstoff-Strategie für Brennstoffzellen, <http://www.forum-brennstoffzelle.de/index.php?main=info&news=akt&akt=8>, Forum Brennstoffzelle, 19.9.2002.

Forum Brennstoffzelle (2001b) Toyota gründet neues Zentrum zur Brennstoffzellenentwicklung, <http://www.forum-brennstoffzelle.de/index.php?main=info&news=akt&akt=113>, Forum Brennstoffzelle, 4.9.2002.

Forum Brennstoffzelle (2001c) Honda stellt verbessertes Brennstoffzellenfahrzeug vor, <http://www.forum-brennstoffzelle.de/index.php?main=info&news=akt&akt=64>, Forum Brennstoffzelle, 19.9.2002.

Forum Brennstoffzelle (2001d) Nissan Corp, <http://www.forum-brennstoffzelle.de/index.php?main=info&bsID=18&thID=4&kapID=51>, Forum Brennstoffzelle, 19.9.2002.

Forum Brennstoffzelle (2002a) Mazda, <http://www.forum-brennstoffzelle.de/index.php?main=info&bsID=18&thID=4&kapID=49>, Forum Brennstoffzelle, 18.9.2002.

Forum Brennstoffzelle (2002b) 300.000 Brennstoffzellen Toyota für 2005, <http://www.forum-brennstoffzelle.de/index.php?main=info&news=akt&akt=150>, Forum Brennstoffzelle, 19.9.2002.

- Fremont, P. B. and B. Glenn (2000) Electric Utilities, *Equity Research*, Jefferies & Companies, Los Angeles.
- Fuel Cell Today (2001) Johnson Matthey, <http://www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/IndustryDirectory/IndustryDirectoryExternal/IndustryDirectoryDisplayCompany/0,1411,179,00.html>, Fuel Cell Today, 19.9.2002.
- Geitmann, S. (2001) H2 Report Ausgabe 0401, <http://www.freesen.de/H2expo/wenl0401.htm>, 18.9.02.
- Geschka (2002) Die Brennstoffzelle als Fahrzeugantrieb - Situation, Perspektiven bis 2010, Konsequenzen - Ein Szenario-Roadmap-Studie, Geschka, Darmstadt.
- Global Press Nachrichtenagentur (2001) Shell und Brennstoffzellen-Hersteller IFC gründen Joint Venture, http://www.avd.de/news/2001/juni/2001_n_kw25_03_08.htm, 18.9.2002.
- GM (2002) AUTOnomy., http://www.gm.com/company/gmability/environment/road_to_future/adv_tech_vehicles/future_fuel_cells/autonomy1_010702_de.html, GM, 7.10.2002.
- Gossen, F. and M. Grahl (1999) Vergleich von Brennstoffzellen- und weiteren zukünftigen Antrieben hinsichtlich Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit, RWTH Aachen, Institut für Kraftfahrwesen, 8. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 1999.
- Heliocentris (2002) Car, <http://www.heliocentris.com/produkte/start.html>, Heliocentris, 20.10.2002.
- Hirschberg, S. (2002) ENERGIE-SPIEGEL - Facts für die Energiepolitik von Morgen, Villigen PSI.
- Honda USA (2002) Honda Fuel Cell Vehicle First to Receive Certification - Honda FCX Slated for Commercial Use, <http://world.honda.com/news/2002/4020724.html>, Honda USA, 23.9.2002.
- Janositz Paul (2002) Auf die Membran kommt es an, <http://archiv.tagesspiegel.de/archiv/30.07.2002/148841.asp>, Tagesspiegel, 12.9.2002.
- Jörissen, L. (2001) Entwicklungsstand der mobilen Brennstoffzelle, <http://www.brennstoffzellensymposium.de/projektergebnisse/entwicklungsstand/entwicklungssstand.htm>, ZSW ULM, 16.9.2002.
- Jürgen Wengel and Elna Schirrmeister (2001) Innovationsprozess vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle, *Chancen und Risiken für die badenwürttembergische Industrie*, Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe.
- Kabza, A. (2002) Funktion und Aufbau einer PEMFC, <http://www.pemfc.de/pemfc.html>, 10.10.2002.

Kalhammer, F. R., P. R. Prokopius, V. P. Roan and G. E. Voecks (1999a) Fuel cells for future electric vehicles, *SO - Battery Conference on Applications and Advances, 1999. The Fourteenth Annual*, 5 - 10.

Kalhammer, F. R., P. R. Prokopius, V. P. Roan and G. E. Voecks (1999b) Status and prospects of fuel cells as automobile engines - A report of the fuel cell technical advisory panel, State of California Air Resources Board, Sacramento, California.

Karamanolis, S. (2001) Wasser - Energieträger der Zukunft, Elektra Verlags-GmbH, Neubiberg b. München.

Kern, J. (2002) Mazda Premacy FC-EV, <http://www.hycar.de/cars/mini.htm>, Hycar, 9.10.2002.

Kitco (2002) Platin Preis, <http://www.kitco.com/charts/liveplatinum.html>, KITCO, 7.10.2002.

Koss, M. (2001) Sustainable Mobility Project, *Dedicated to make a difference*, World Business Council for Sustainable Development, Manila.

Kundegraber, S. (2002) DuPont ergänzt Angebot bei Brennstoffzellen, <http://e2i.e2i.at/var1.php3?newsID=2252>, Online-Zeitung e2i-Energie-Innovation-Information, 19.9.2002.

Leuenberger, M. (2002) Gas geben – für das Gas, http://www.uvek.admin.ch/gs_uvek/de/dokumentation/reden/chef/20021004/01170/, UVEK, 17.10.2002.

Loske, R., Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland and Wuppertal-Institut für Klima Umwelt Energie (1996) Zukunftsfähiges Deutschland ein Beitrag zu einer global nachhaltigen Entwicklung Studie des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Birkhäuser, Basel etc.

Madslie, J. (2002) Audi takes on VW cousin, <http://news.bbc.co.uk/1/hi/business/2271507.stm>, BBC News, 17.10.2002.

Matsushima, N. and S. Noguchi (2000) Auto Manufacturers - Auto Industry 2000, *Global Equity Research*, NikkoSalomonSmithBarney, Tokyo.

Merten, C. (2001) BMW CleanEnergy World Tour 2001, <http://www.diebrennstoffzelle.de/h2projekte/fahrzeuge/cleanenergy.shtml>, dieBrennstoffzelle.de, 17.10.2002.

Nissan Deutschland (2001) Nissan testet Brennstoffzelle im Xterra FCV, http://www.nissan-berlin.de/info/concept_car_nissan.htm, Nissan Deutschland, 19.9.2002.

Norbert Berg and A. Wille (1999) Brennstoffzellen, *revue technique*, **3**, (1999), 105-109.

Oak Ridge National Laboratory, United States. Dept. of Energy and Office of Vehicle and Engine Research and Development (2001) Transportation energy data book : Edition 21,

Transportation Energy Conservation (TEC) Division of the Energy Research and Development Administration, Park Ridge, N.J.

Obertreis, R. (2001) Hersteller strotzen vor Zuversicht, <http://www2.tagesspiegel.de/archiv/2001/09/08/ak-wi-5511944.html>, Der Tagesspiegel, 19.9.2002.

Oertel, D. and T. Fleischer (2001) Brennstoffzellen-Technologie Hoffnungsträger für den Klimaschutz technische, ökonomische und ökologische Aspekte ihres Einsatzes in Verkehr und Energiewirtschaft, Erich Schmidt Verlag, Berlin.

Oertel Dagmar and Fleischer Torsten (2001) Brennstoffzellen-Technologie Hoffnungsträger für den Klimaschutz technische, ökonomische und ökologische Aspekte ihres Einsatzes in Verkehr und Energiewirtschaft, Erich Schmidt Verlag, Berlin.

Opel (2001) Brennstoffzellen-Studie „HydroGen3“ auf dem Weg zur Serienreife, <http://www.ruckstuhlgaragen.ch/opelmediainfo/20010816.htm>, Opel, 19.9.2002.

Opel (2002) Opel Zafira Preisliste, <http://www.opel.ch/modelspeciaux/index.cfm?mnu=00,01,01,10,08&lang=de>, Opel Schweiz, 25.9.2002.

Ozbek, A. (2001) US and Global Automotive Fuel Cell Markets: Markets, Technologies and Applications, www.alliedworld.com/energy/product/AFC01.html, Allied Business Intelligence Inc., 25.09.2002.

Pehnt, M. (2001) Ökologische Nachhaltigkeitspotenziale von Verkehrsmitteln und Kraftstoffen, Stuttgart.

Pehnt, M. and W. Schnurnberger (2002) Energierevolution Brennstoffzelle? Perspektiven, Fakten, Anwendungen, Wiley-VCH, Weinheim.

Peugeot France (2002) http://www.peugeot-avenue.com/concept_cars/en/cc_h2o_fiche.html, A new H2O concept, 26.09.2002.

Pfaff, K. and I. f. A. u. Marktforschung. (2000) Wettbewerbsanalyse im Rahmen der Industrieökonomik Theorie und empirische Anwendung auf den hessischen Fleischmarkt, AgriMedia, Bergen/Dumme.

Porter, M. E. (1999) Wettbewerbsstrategie Methoden zur Analyse von Branchen und Konkurrenten, Campus-Verlag, Frankfurt/Main etc.

Porter, M. E. (2000) Wettbewerbsvorteile Spitzenleistungen erreichen und behaupten, Campus Verlag, Frankfurt etc.

Porter, M. E. and C. von der Linde (1995) Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship, *Journal of Economic Perspectives*, **9**, (4), 97-118.

Rade, I. (2001) Requirement and availability of scarce Metals for Fuel-Cell and Battery Electric Vehicles, *Department of Physical Resource Theory*, School of Physics and

Engineering Physics, Department of Physical Resource Theory, Postgraduate Programme in Physical Resource Theory, Göteborg, Sweden.

Richard Lamers (2002) Zertifikat für Wasserstofftank, <http://www.qm-trends.de/news/02-09-12-02.htm>, 19.9.2002.

Roduner, E. and J. Kerres (2001) Die protonenleitende Membran, Schlüsselkomponente einer Brennstoffzelle, www.uni-stuttgart.de/wechselwirkungen/ww2001/roduner.pdf, Universität Stuttgart, 30.8.2002.

Schweimer GW and Schuckert M (1996) Sachbilanz eines VW-Golf, Universität Siegen, Siegen.

Shell Deutschland (2001) Mehr Autos - weniger Verkehr? - Szenarien des Pkw-Bestands und der Neuzulassungen in Deutschland bis zum Jahr 2020, Shell Deutschland, Hamburg.

Shell Schweiz (2002) Treibstoffpreise, http://www.shell.com/home/Framework?siteId=ch-de&FC1=&FC2=%2FLeftHandNav%3FLeftNavState%3D9&FC3=%2Fch-de%2Fhtml%2Fiwgen%2Fproductsservices%2Ftankstellen%2Ftreibstoffpreise%2Faktuellesjahr_09181550.html&FC4=%2Fch-de%2Fhtml%2Fiwgen%2Fimpulse.html&FC5=, Shell Schweiz., 25.9.2002.

Siemens Westinghouse (2002) Siemens baut erstes seriennahes Brennstoffzellenkraftwerk in Europa - Stadtwerke Hannover und E.ON bestellen SOFC-Anlage für rund fünf Mio., <http://www.siemenswestinghouse.com/de/news/index.cfm>, Siemens Westinghouse, 17.9.2002.

Steinemann, P. P. (1999) R&D Strategies for New Automotive Technologies: Insights from Fuel Cells, imvp.mit.edu/papers/99/fuelcell.pdf, International Motor Vehicle Program (IMVP), 15.9.2002.

Thomas, C. E., B. D. James, F. D. Lomax Jr. and I. F. Kuhn Jr. (2000) Fuel Options for the fuel cell vehicle: hydrogen, methanol or gasoline?, *International Journal of Hydrogen Energy*, **25**, (2000), 551-567.

Thüringen Gas (2002) Erdgasfahrzeuge: alles wie gewohnt, <http://www.thuringengas.de/387.htm>, Thüringen Gas, 25.09.2002.

Toyota Motor Corporation (2002) Environmental Report 2002, Tokyo, Japan.

United States Postal Service (2001) Annual Report 2001, United States Postal Service, Washington, DC.

United Technologies Company (2002) Who we are, <http://www.utcfuelcells.com/howeare/ourcompany.shtml>, 2002, 18.9.02.

Veloso, F. (2000) The automotive supply chain: Global Trends and Asian Perspectives - Background paper prepared for the project, *INTERNATIONAL COMPETITIVENESS OF ASIAN ECONOMIES: A CROSS-COUNTRY STUDY*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

Verband der Automobilindustrie e. V. (2002) Alternative Antriebssysteme, http://www.vda.de/de/service/jahresbericht/auto2002/auto+umwelt/u_27.html, Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA), 24.9.2002.

VSG (2002) Erdgas in der Schweiz- Gas in Zahlen, http://www.erdgas.ch/index.php3?off=&active_cat=erdgas_ch&subcat_id=24, Verband der Schweizerischen Gasindustrie (VSG), 25.9.2002.

Walsh, M. P. (1999) Motor Vehicle Standards And Regulations Around The World, Worldbank, Arlington, USA.

Wengel, Jürgen and Schirrmeister, Elna (2001) Innovationsprozess vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle, *Chancen und Risiken für die badenwürttembergische Industrie*, Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe.

Yuji Morita and Kiyoshi Sugiyama (2000) Development and Diffusion of Fuel Cell Powered Automotive Vehicles and its impact, The Institute of Energy Economics, Japan.

8 ANHANG

8.1 Abkürzungsverzeichnis

\$	US Dollar
\$ / kW	Kosten (US \$ pro Kilowatt Leistung)
(ACEA)	Verbandes der europäischen Automobilhersteller
AFC	Alkaline Fuel Cell
B2B	Business to Business
BMW	Bayerische Motoren Werke GmbH
BP	British Petroleum p.l.c
BPP	Bipolarplatten
BZ	Brennstoffzelle
CAR	Cooperative Automotive Research California Fuel Cell Partnership Programm
CARB	California Air Resources Board (www.arb.co.gov)
CFCP	California Fuel Cell Partnership (www.drivingthefuture.org)
CH ₄	Methan
CNG	Compressed Natural Gas
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
DLR	Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
DOE	U.S. Department of Energy
EU	Europäische Union
EURO 4	Emissionsgrenzwert-Gesetzgebungsstufe 4 von Personenkraftwagen in der Europäischen Union (EU)
F + E	Forschung und Entwicklung
F & E	Forschung und Entwicklung
GM	General Motors
H ₂	Wasserstoff
HC	Kohlenwasserstoff
Kfz	Kraftfahrzeug
kW	Kilowatt
LNG	Liquefied Natural Gas
MEA	Membran Electrolyt Assembly
MeoH	Methanol
Mobile BZ	Brennstoffzellen, die im Buss und Auto ihren Einsatz finden
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NO ₂	Stickoxid
NO _x	Stickoxide
o. D.	ohne Datum
PEFC	Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle
PEM	Polymer Electrolyte Membrane

PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
Pkws	Personenkraftwagen
PM	(Russ-) Partikel
PNGV	Partnership for the Next Generation of Vehicles“
portable BZ	Brennstoffzellen, die beispielsweise im Laptop oder Handy ihren Einsatz finden
ppm	parts per million
PSA	Peugeot Citroën
PSI	Paul Scherrer Institut in Villigen (Schweiz)
SOFC	Solide Oxid Fuel Cell
stationäre BZ	Brennstoffzellen, die beispielsweise im Haus als Ölbrennerersatz ihren Einsatz finden
SUV	Sport Utility Vehicles (Geländefahrzeug)
TCO	Total Cost of Ownership
ULEV	Ultra Low Emission Vehicle
USCAR	United States Council for Automotive Research
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung in Baden Württemberg

8.2 Interview mit Herrn Professor Jürgen Garche vom 23.9.2002

Herr Professor Garche ist im Vorstand des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) Baden-Württembergs und zugleich Leiter des Geschäftsbereiches Elektrochemische Energiewandlung und -Speicherung des ZSW.

GC: Sehen Sie Chancen, dass sich die Brennstoffzellentechnologie durchsetzen wird? Werden andere Varianten, wie optimierter Verbrennungsmotor sich durchsetzen und wird somit die Brennstoffzelle keine Chancen haben? Brauchen wir die Brennstoffzelle im Fahrzeug?

JG: Wir brauchen sicherlich die Brennstoffzelle im Fahrzeug, da wir generell zu einer Umweltentlastung und Ressourcenschonung kommen müssen. Das muss nicht unbedingt die Brennstoffzelle sein, da können eine ganze Reihe von Massnahmen dieses Ziel erreichen aber die BZ hat das Potential in der Effizienz. Vom Primärrohstoff bis zum Rad hat es in Prozent eine Effizienz von rund 30 %. Somit muss ich alles daran setzen um so ein Fahrzeug auf die Strasse zu stellen, so dass Sie und ich dieses Fahrzeug freiwillig kaufen. Kostenmässig muss es im Bereich des Verbrennungsmotors zu liegen kommen.

GC: Da sind aber noch ziemlich viele Hürden auf dem Weg zu diesem BZ Fahrzeug?

JG: Wenn es auf den Markt soll, so muss es bei 50 \$ pro kW liegen. Der Preis ist das entscheidende letztendlich. Die stationären Anlagen können 1500 \$ pro kW kosten. Zuerst werden wir also portable und stationäre Anlagen in Betrieb nehmen und erst viel, viel später die Brennstoffzelle für den Automobilbereich. Bei den Hausenergieanlagen sehe ich persönlich keinen echten Vorteil, da die Gesamtenergieeffizienz nicht ganz so gut ist.

GC: Wo sehen Sie das grösste Kostenpotential um diese 50 \$ pro kW zu erreichen?

JG: Das grösste Kostenreduktionspotential liegt im Material. Das Kostenreduktionspotential Nummer eins ist das Material (Membrane, Katalysator und die Bipolarplatten). Diese sind wahnsinnig teuer!

GC: Liegt das noch unter anderem an Platin?

JG: Bei Platin ist man schon einigermaßen runtergekommen. Da braucht man etwas weniger als ein Gramm pro kW, was bei preislich bei ungefähr 30 \$ liegt. Jedoch bei der Membran benötigt man ungefähr 0.3 Quadratmeter und der Quadratmeterpreis kostet 800 \$. Diese Membran ist ganz entscheidend.

Der zweite Punkt zur Kostenreduktion, nach dem Material ist das Design, wie baue ich die Brennstoffzelle zusammen, das heisst mit welchen Gasführungskanälen. Der dritte Punkt im Ranking ist die Massenproduktion. Die Kosten werden durch die Massenproduktion stark reduziert. Aber der Rohstoff für die Membran ist sehr teuer und wenn schon der Rohstoff für die Membran rund 300 \$ kostet, komme ich auch bei einer Massenproduktion nicht auf 50 \$.

Das sind die Probleme, an denen wir neu Ansetzen und viel forschen müssen. Viel Grundlagenforschung muss für die Materialentwicklung geleistet werden.

Vorher haben wir noch die Frage bezüglich der Standzeit.

GC: Was meinen sie unter Standzeit?

JG: Ich meine die Lebensdauer einer Brennstoffzelle. Bei einem Fahrzeug müssen dies 4'000 Stunden sein. Mit einem guten Gewissen kann ich sagen, dass heute eine Brennstoffzelle rund 1'000 bis 1'500 Stunden läuft.

GC: Wie steht es mit der Funktionsfähigkeit der Brennstoffzellen unter extremen Bedingungen?

JG: Im täglichen Betrieb muss die Brennstoffzelle bei - 10, -20 Grad starten. Ich kann die Zelle bei 90 Grad betreiben aber ich kann noch nicht bei - 30 Grad starten. Was passiert bei einer sehr hohen Luftfeuchtigkeit? Hier gibt es viele technische Details zu klären. Das Hauptproblem ist aber der Treibstoff? Da hat man mit Methanol operiert. Ich halte dies persönlich als der richtige Weg, aber aus irgendwelchen Gründen, konzernpolitischen Gründen die ich aber noch nicht nachvollziehen kann wird man von Methanol wegkommen, wie dies beispielsweise bei GM/Opel der Fall ist. Diese Infrastrukturfrage stellt eine Problematik dar, da enorm viel investiert werden muss und dies vor allem bei Wasserstoff. Eine Methanolinfrastruktur wäre viel billiger.

GC: Aber Methanol ist doch viel giftiger und die Tankstelle muss gegen das Grundwasser abgedichtet werden?

JG: Das ist richtig, Ich bin mit 100 ml Methanol, wie auch mit 100 ml Benzin tot. Man soll dies nicht verniedlichen. Aber was für Methanol spricht: Man kann ohne grössere Investitionen eine Infrastruktur aufbauen, was schon heute möglich ist. In Deutschland geht dies offensichtlich noch nicht. Aber in den USA gib es die Möglichkeit dem Benzin bis 10 % Methanol beizumischen, was bereits schon geschieht. Wenn wir das Modell auf Deutschland übertragen, so könnte jeder Tankwart jetzt schon ein Tank mit Methanol installiert haben und

das Methanol dem Benzin beimischen. Somit würde bereits jetzt schon eine Infrastruktur für Brennstoffzellenfahrzeuge existieren. Würden dann ein Brennstoffzellenfahrzeug zur Tankstelle fahren, so schalte der Tankwart ganz einfach auf 100 % Methanol um.

GC: Aber dies sind doch trotzdem noch enorme Kosten?

JG: Genau dies ist der Punkt. Wenn ich auf Wasserstoff an einer Tankstellen umrüsten, so müssten noch einige tausend, 100'000 Fahrzeug mit Wasserstoff betrieben werden, so dass es sich lohnt umzurüsten. Aber bei Methanol würde die Infrastruktur schon in meinem Szenario existieren und mit oder ohne Brennstoffzellenfahrzeuge benutzt werden. So wäre dies aus meiner Sicht ein möglicher Weg. Warum dies nicht vollzogen wird, kann ich nicht einsehen!

GC: Die wenigen die noch die Direkt-Methanol Strategie oder die Strategie mit einem Reformer fahren sind DaimlerChrysler mit Ford und Ballard. Warum soll ich aber nicht doch mit Wasserstoff direkt anfangen und somit auf diesem holprigen Weg bis zum Ziel noch viel lernen?

JG: Da muss man aber sehr viel Geld investieren. Wenn man ein Drittel der Tankstellen in Kalifornien, New York und Massachusetts auf Wasserstoff umrüsten würde zeigen Schätzungen, dass dies über 1.3 Milliarde \$ und für Methanol 300 Millionen \$ kosten würde.

Die Treibstofffrage wird politisch und nicht energetisch gelöst.

GC: Wie sehen sie die Marktdiffusion der Fahrzeuge?

JG: Die ersten Fahrzeuge werden sie demnächst haben, beziehungsweise im nächsten Jahr. Eine hunderter Serie werden ich in 4 bis 5 Jahre haben und richtig wird es nicht vor 2015 losgehen. Ab 2015 wäre der Zeitpunkt, wo die Leute sich freiwillig für ein Brennstoffzellenfahrzeug entscheiden und das Fahrzeug nicht noch gross subventioniert werden muss. beziehungsweise wird das Individuum rund 5 bis 6 % mehr zahlen, um für die Umwelt was Gutes zu tun, dies ist so ein Erfahrungswert.

GC: Sie sehen ab 2015 also den Zeitpunkt kommen, wo das Fahrzeug genau so verlässlich sein wird, wie ein Benziner?

JG: Ja, auf jeden Fall. Aber bis da ist noch sehr viel zu tun, da viele Probleme bis jetzt noch nicht gelöst sind. Im alten Benziner steckt 100 Jahre Erfahrung!

GC: Wo sehen die grössten Schlüsselprobleme abgesehen mal von den Kosten?

JG: Das sind die Startprobleme, das sind die Fragestellung wie schnell ich bei einem Reformer auf die volle Leistung komme, das ist die Frage der Reinigung der Gase bei einem

Reformer und dann ist es die Frage der Lebensdauer, da ich eine starke Degradation bei den Reformern habe. Zusätzliche Parameter muss ich berücksichtigen, wie zum Beispiel die Befeuchtung der Gase. Dies hat folgenden Hintergrund: Die Membran ist ein kleiner Schwamm. Wenn die Feuchtigkeit raus geht, dann schrumpft die Membran. Wenn die Feuchtigkeit raus geht, beziehungsweise durch die durchwandernden Protonen rausgeschleppt werden dann schrumpft sie und die Poren werden kleiner und somit nimmt die Leitfähigkeit ab. Deshalb muss diese Membran befeuchtet werden. Das ist eine ganz kritische Komponente.

Die Kosten widerspiegeln die technische Machbarkeit.

GC: Eine Brennstoffzelle macht nur Sinn, wenn wir den Treibstoff auf regenerativer Basis herstellen können. Wie sehen sie die Möglichkeiten? Schaut man sich beispielsweise die Produktion von Wasserstoff via Elektrolyse an, so ist dies teuer und benötigt sehr viel Energie, die heute noch nicht auf regenerativem Weg hergestellt werden kann.

JG: Genau dieser Weg ist eine Energievernichtungsmaschine. Schaut man sich den Wirkungsgrad an, so habe ich dort einen Wirkungsgrad von 70 % (bei der Elektrolyse) und bei der Brennstoffzelle hat man einen Wirkungsgrad von 40 %. Zudem kommen noch die Verluste bei der Speicherung dazu. So resultiert eine Effizienz von rund 35%. Sicherlich wird es dann interessant werden, wenn wir keine fossilen Rohstoffe mehr haben. Bis dahin sehe ich die Alternative von Verwendung der Biomasse in dieser Übergangszeit. Daher sehe ich mein Methanol und Ethanol als gangbaren Weg um diesen zeitlichen Gap zu überwinden.

GC: Ethanol kann man wahrscheinlich besser für die Speicherung im Fahrzeug binden und hat nicht so hohe Verlust wie beim Wasserstoff? Flüssig oder Druckspeicherung führt zu hohen energetischen Verlusten.

JG: Ja, Ethanol kann man relativ gut chemisch binden. Aber die Metallhydride sind extrem schwer. Die Speicherung ist noch ein grosses Problem. Da ist noch viel zu tun.

GC: Ich danke Ihnen für das Interview.

8.3 Interview mit Herrn Philipp Dietrich vom PSI am 16.9.2002

GC: Können Sie sich kurz vorstellen und sagen inwieweit Sie am PSI mit Brennstoffzellen arbeiten?

PD: Ich bin Leiter des Technologietransfers hier am PSI. Wie kann neue Technologie in die Wirtschaft integriert werden, das ist eine Frage die ich hier angehe.

Ich habe an der warmen Verbrennung von Wasserstoff mitgearbeitet, an der BMW Strategie, die in einem normalen Motor Wasserstoff verbrennen lässt und war bei der Entwicklung des VW Hy.Power involviert.

GC: Wie sehen Sie das Potential der Brennstoffzellenfahrzeuge in den nächsten Jahren?

PD: Der BMW 750hl, der Wasserstoff in einem mehr oder weniger normalen Motor verbrennt, wird in den nächsten 2 bis 3 Jahren auf den Markt kommen. Es ist eine bekannte Technologie, was als Vorteil bezeichnet werden kann. Der Nachteil ist die schlechte Effizienz, im Vergleich zu einer Brennstoffzelle.

Der Sinn Wasserstoff zu verwenden ist die Null-Emissionen und Richtung Nachhaltigkeit zu gehen beziehungsweise die Energieeffizienz. Der 750 hl mit 5 Liter Hubraum ist nicht sehr nachhaltig und setzt nicht das richtige Signal. Nach wie vor ist dieser Verbrennungsmotor mit Wasserstoff eine gute Übergangslösung. Die Energiebilanz von diesem Fahrzeug darf man aber nicht betrachten.

Für die Brennstoffzelle muss in den nächsten 4 Jahren die Technologie gefunden werden, um die anstehenden Probleme zu lösen. Erst danach kann das Produkt wettbewerbsfähig sein. Bis ins Jahr 2010 werden hunderter Serien gebaut, bis 2020 werden es 10'000'er Serien sein. In den nächsten 18 Jahren kann noch nicht von einer Massenproduktion gesprochen werden. Im Jahre 2020 wird die Brennstoffzelle zusammen mit den Hybridfahrzeugen einen Marktanteil von 3 % haben und die Gasfahrzeuge ebenfalls rund 3 %.

In Kalifornien werden die Autos in der Öffentlichkeit in Kundenhand und in Firmenhand unter realen Bedingungen getestet, um die Fahrzeuge zu verbessern. Wo kann man Kosten reduzieren, dies wird eine zu lösende Hauptfrage sein.

GC: Bei so kleinen Serien kann ja nie ein Gewinn erzielt werden. Diese Fahrzeuge müssten vom Staat oder von den Automobilfirmen subventioniert werden.

PD: Dem ist absolut so.

GC: Analysten von Banken sprechen von einer Marktpenetration von zirka 15- 20 % im Jahre 2020. Warum liegt diese Schätzung rund 10 Mal höher als die von Ihnen?

PD: Haben die Banken den Börsencrash des letzten Jahres vorausgesagt? Nein, aber die Analysten wollen Aktien empfehlen und sind verpflichtet Empfehlungen abzugeben. So werden diese sehr optimistischen Prognosen abgegeben. Das wirtschaftliche Umfeld spielt eine enorm grosse Rolle für die Marktdurchdringung. Dazu kommt die Problematik der Treibstoffinfrastruktur. In diesem Sinn kann keine Euphorie verbreitet werden. Ich korrigiere lieber meine pessimistischen Zahlen 10-mal nach oben. Weckt man zu hohe Erwartungen kann das sehr kontraproduktiv sein.

GC: Können Sie mir die zwei bis dreigrössten Probleme nennen, die noch zu lösen sind, so dass die Brennstoffzelle einwandfrei funktionieren wird.

PD: Dies ist sicher der Temperaturbereich in dem eine Brennstoffzelle funktioniert. Die Brennstoffzelle darf bei einer Umgebungstemperatur von Minusgraden nicht gefrieren und muss über 40 Grad gekühlt werden, was noch nicht gelöst ist.

GC: Wie steht es mit der Aufwärmzeit, bis eine Brennstoffzelle einsatzfähig ist? Liegt die unter einer Minute?

PD: Momentan liegt die Aufwärmzeit ungefähr bei 30 Sekunden und ist kein Problem mehr!

GC: Was gibt es für Konkurrenztechnologien, die eine hohe Marktpenetration der Brennstoffzellen gefährden könnte?

PD: Die Batteriefahrzeuge könnten eine Konkurrenz sein. Dies aber nur unter der Voraussetzung, dass die Leistungsdichten der Batterien noch stark zunehmen?

Zudem haben CNG-Fahrzeuge eine Chance. Hier darf man aber nicht vergessen, dass Erdgasfahrzeuge Methan ausstossen und dies allenfalls die CO₂ Bilanz negativ verändern könnte bzw. den Treibhauseffekt negativ begünstigen. Hybridfahrzeuge werden in den nächsten Jahren auch als Substitutionsgut einen gewissen Marktanteil haben und als Transitionstechnologie eine Rolle spielen.

Der Verbrennungsmotor wird noch lange eine Koexistenz mit alternativen Antriebssystemen führen. Weiter sehe ich eine Chance in den synthetischen Treibstoffen, wie dies VW propagiert wird.

GC: Die Batterien der Batteriefahrzeuge sind vermutlich auch noch viel zu teuer?

PD: Der Preis muss sich auch noch gegen unten bewegen.

GC: Wie wird ungefähr der Preis für 1 kW Brennstoffzelle in 10 Jahren aussehen? DaimlerChrysler gibt für Ihren Nocar IV einen Wert von rund 500 \$ kW an.

PD: Das amerikanische Department of Energie gibt einen Zielwert von 100 \$ kW an.

GC: Wann wird dieser Wert erreicht?

PD: Das kann ich Ihnen nicht sagen.

GC: DaimlerChrysler entwickelt sowohl Fahrzeuge mit On-board Reformern²³ und solche ohne? Was wird der Treibstoff der Zukunft sein?

PD: DaimlerChrysler ist der einzige Konzern, der Methanol in Erwägung zieht! Momentan wäre flüssiges Wasserstoff besser, hat aber eine 50 % schlechtere Energiebilanz. Zurzeit wird Wasserstoff bei 250 bar gespeichert. Ziel wäre 800 bar zu erreichen. Das Komprimieren kostet aber auch zusätzlich Energie und senkt die Effizienz. Ein Problem ist noch der Tank, der sehr voluminös sein muss, um bei einem Crash nicht zerstört zu werden. Beim VW Hy.Power ist dieser zwischen den Hinterrädern platziert, was sehr sicher ist.

Es ist vielleicht in einem Übergangsstadium besser mit synthetischen Kraftstoffen, synthetischem Benzin in einer sehr guten Qualität zu arbeiten als mit Methanol.

Diese synthetischen Kraftstoffe sind weniger aufwendig zu produzieren als Methanol.

GC: Wie sieht die Ökobilanz der synthetischen Treibstoffe aus?

PD: Diese synthetischen Kraftstoffe haben eine bessere Ökobilanz als Methanol.

GC: Umstellungskosten zeigen, dass eine Umstellung der Tankstellen auf Methanol um einen Faktor 6 bis 7 günstiger ist, als die für Wasserstoff!

PD: Man darf nicht vergessen, dass zusätzlich eine Sperrung Richtung Grundwasser nötig ist, da Methanol sehr löslich ist und sonst ins Grundwasser gelangen könnte. Dies ist in diesen Kalkulationen sicherlich nicht inbegriffen!

GC: Wer wird diese Infrastrukturkosten tragen?

PD: Kalifornien zeigt es, dass über public-private Partnership Infrastrukturkosten getragen werden können. Man muss eine Win-Win Situation erzeugen.

²³ Anmerkung: Der Reformer wandelt im Auto selber Methanol oder andere Treibstoffe in ein wasserstoffreiches Gas um.

GC: Das Brennstoffzellenfahrzeug ist zwar lokal CO₂ neutral, global aber nicht? Wie wird Wasserstoff in Zukunft regenerativ hergestellt.

PD: Auf der einen Seite haben wir Wasserkraft, Kernenergie, einen Teil über Biomasse und über solarthermische Produktion.

GC: Wo wird die solarthermische Produktion stattfinden? Wird dies hauptsächlich in der Sahelzone sein?

PD: Ja klar. Kernenergie wäre eine Option und ist aber sicherlich nicht die Energie die 100 % gepuscht werden sollte. Es gibt nicht die einzigen Substitutionsmassnahmen. Es gibt viele Massnahmen, die ihre Beiträge leisten könnten den Energiebedarf zu decken.

GC: Wie kann die Energie aus solarthermischer Energie produziert und transportiert werden?

PD: Man kann Zink herstellen und in einem zweiten Prozess mit Zinkoxid Wasserstoff erzeugen.

GC: Wird bis dann Supraleiter eine mögliche Technologie sein?

PD: Wenn man bis dann die Fusion in den Griff kriegt, so ist dies möglich.

GC: Was sind sonst noch technologische Neuerungen, die man im VW HY.Power finden kann, die am PSI entwickelt wurden.

PD: Wir haben eine neue bipolare Platte entwickelt, die in der Massenproduktion relativ günstig ist. Der Einsatz von speziellen und günstigen Supercaps ist sicherlich auch speziell.

GC: Werden diese Supercaps auch in Zukunft in anderen Fahrzeugen eingesetzt? Sind diese nicht teuer?

PD: Diese werden in allen zukünftigen Fahrzeugen eingesetzt, um Spitzenleistungen decken zu können.

GC: Halten diese Supercaps mindestens 4'000 – 5'000 Stunden?

PD: Diese Supercaps speichern physikalisch und nicht chemisch die Energie. Somit halten diese sehr lange.

GC: Konnten Sie die Platinmengen bei VW Hy.Power reduzieren?

PD: Wir haben bei diesem Demonstrationsfahrzeug nicht unbedingt auf die Kosten geschaut, sondern auf das technisch machbare. Aber wir haben gezeigt, dass bei Verwendung von anderen Katalysatormetallen der Platinanteil gesenkt werden kann.

PD: Dazu empfehle ich folgenden Tagungsband mit der ISBN Nummer 3-906483-03-7 von der IMRT Press (Institut für Vermessung und Regeltechnik). Am Institut soll Frau Rohrbach kontaktiert werden.

GC: Wie sehen sie die Chancen der BMW Strategie mit dem 750 hl, dem Auto welches Wasserstoff als Treibstoff benutzt, aber einen herkömmlichen Motor einsetzt?

PD: Ich sehe kurzfristig gewisse Chancen.

GC: Ist es nicht ein Witz, dass dieser BMW, der rund 2 Tonnen wiegt und normal über 15 Liter Benzin konsumiert, mit einem Wasserstoffverbrennungsmotor eingesetzt wird? Sind nicht die Chancen des Mini Cooper mit Wasserstoffmotor grösser?

PD: Ja das stimmt. Der 750 hl ist viel zu gross. Besser ist der Mini Cooper.

PD: Die Brennstoffzelle hat das Potential den Verbrennungsmotor herauszufordern. Der Verbrennungsmotor wird in einer Koexistenz leben. Der Lebenszyklus von einem Auto beträgt mindestens 10 Jahre. Somit dauert der Umstieg lange und es geht mindestens 10 Jahre zu einer stetigen Marktdurchdringung.

GC: Was gibt es ausser Ballard sonst noch für Firmen, die ein Konkurrenzprodukt auf den Markt bringen könnten?

PD: Ist sicher Nuvera, sicher Siemens, sicher Toyota und Honda.

GC: Man hört viel weniger von diesen Firmen als von Ballard?

PD: Man darf vor allen die Japaner nicht unterschätzen.

GC: Wie sieht es mit Nuvera und Siemens aus?

PD: Siemens verkauft bereits Brennstoffzellen für Unterseeboote und verkauft diese ganz gut. Das gibt sehr gute Prozess Erfahrung und diese Firmen haben dadurch ein wesentliches Know-how. Bei Nuvera werden Brennstoffzellen für den mobilen Bereich produziert. Jede Firma wird nicht nur für die Automobilbereich Brennstoffzellen entwickeln, sondern aber auch für den stationären Bereich, obwohl die Anforderungen ganz anders sind.

GC: Kann die Brennstoffzellentechnologie für den stationären Bereich die Brennstoffzellendiffusion für die Anwendung im Fahrzeug pushen?

PD: Diejenigen Firmen, die die PEM Brennstoffzelle im stationären Bereich erfolgreich verkaufen haben grössere Chance in den mobilen Bereich vorzustossen und können somit mehr Geld verdienen. Diejenigen, die nicht jetzt schon oder in der Zukunft für den stationären Bereich Brennstoffzellen entwickeln müssen schauen, wo sie die finanziellen Mitteln erhalten, um die Durststrecke bis zum Durchbruch für die Automobilbereich zu überstehen.

GC: Wo liegen die kritischen Faktoren bei der Zulieferindustrie? Von welchen Firmen werden Firmen wie Nuvera oder Ballard abhängig sein.

PD: Die Zusammenführung der Prozesse wird wichtig sein. Das ganze System muss optimal funktionieren. Man kann nicht sagen, wenn Firma x eine bessere Membran hat, so wird diese von den Brennstoffzellenherstellern verwendet. Diese Membran muss auch im Prozess, im System gut funktionieren. Dies ist das wichtigste. Das System muss schlussendlich billig hergestellt werden können.

GC: Sie sehen keine Schlüsselindustrie von denen die Brennstoffzellenfirmen abhängig sein werden.

PD: Schwierig zu sagen. Wird Ballard Membranen herstellen? Sehr wahrscheinlich nicht, aber die Firma muss das Know-How haben.

GC: Welche Autofirmen werden mit einem erfolgreichen Produkt auf den Markt kommen? Daimler, Ford, GM, Honda und Toyota

PD: Dies sind die wichtigsten Firmen.

GC: Wie ist dies für die restlichen Firmen, die keine Forschung betreiben.

PD: Diese sagen sich, dass man die Technologie in diesem Marktsegment nicht benötigt. Sie werden bei Erfolg später die Technologie zukaufen.

GC: Wird nicht Ballard verweigern, da Sie DaimlerChrysler und Ford gehört?

DC: Vielleicht wird ausgehandelt, dass die Brennstoffzellen während 2-3 Jahren exklusiv an ihre Kooperationspartner gehen. Die Hersteller haben aber das Interesse den Markt völlig auszunützen.

GC: Besten Dank für das Interview.

8.4 Wichtige Kennzahlen der Brennstoffzellenfirmen

Firma	Hauptsitz	Marktkapitalisierung ²⁴	Gegründet	Status
Ballard	Vancouver, Kanada	1'299 Millionen \$	1979	Börsenkotiert DaimlerChrysler Anteil: 24.2 % Ford-Anteil: 20 %
Nuvera	Cambridge, Massachusetts (USA)	Firma in privater Hand: Investoren sind momentan die Gruppo De Nora, Arthur D. Little, Inc. Und Amerada Hess	2000	Joint Venture von Arthur d. Little (USA) und DeNora (Italien)
H-Power	Belleville, New Jersey, USA	935 Millionen \$ Investoren: Sofnic, Singapore Technologies Automotive Ltd, DQE Inc.	1989	Börsenkotiert
United Technologies Fuel Cell	South Windsor, Connecticut, USA	Des ganzen Konzerns: 19'930 Millionen \$	1966	Tochter von United Technologies Corporation
Plug Power	Latham, New York, USA	919 Millionen \$ GE (12 % des Aktienkapitals, DTE Energy (31.5 %), Mechanical Technology (28 %)	1997	Börsenkotiert
Proton Motor	Starnberg (Deutschland)	Volvo ist Aktionär	k.A.	Privat
Siemens	München	48'072 Mio \$	Siemens: 1847 Westinghouse Fuel Cell: ~1960	Börsenkotiert

²⁴ Stand 22.10.2002

Firma	Zeit bis zur Serienreife	Patente	Allianzen	Kunden
Ballard	Mobile Brennstoffzellen mit 1.5 kW Leistung kamen Ende 2001 auf den Markt.	312 Patente, laut European Patent Office (2002) im Bereich Brennstoffzellen, die registriert sind.	DaimlerChrysler, Ford, GPUI, Ebara, Coleman Powermate, Alstom, Matsushita;	DaimlerChrysler, Ford, Ebara, Coleman Powermate, Alstom, Matsushita Electric Work, Honda, Nissan, VW
Nuvera		11 angemeldete Patente im Bereich Brennstoffzellen beim europäischen Patentbüro		Lieferte an diverse Konzerne Brennstoffzellen für dessen Demonstrationsfahrzeuge, wie zum Beispiel an Peugeot, Fiat und Renault
H-Power		35 angemeldete Patente im Bereich Brennstoffzellen beim European Patent Office (2002)	US Militär	Eco Fuel Cells, PSA
United Technologies Fuel Cell	UTCFC begann 1991 mit der Produktion der PC25 Brennstoffzelle.	288 angemeldete Patente im Bereich Brennstoffzellen am European Patent Office (2002)	UTC's Carrier Corp., Toshiba Corp. und Buderus Heiztechnik	Peugeot, Fiat und Renault
Plug Power	Hat bereits eine Fabrik zur vollständigen Produktion von Brennstoffzellen und bereits über 150 Module geliefert.	88 angemeldete Patente im Bereich Brennstoffzellen beim European Patent Office (2002)	Celanese (Entwicklungszusammenarbeit); gemeinsames Unternehmen mit GE Fuel Cell Systems; Entwicklungskooperation: Gastec, Vaillant und Celanese	
Proton Motor	Hat bis jetzt 5'000 einzelne Zellen produziert	8 angemeldete Patente im Bereich Brennstoffzellen beim European Patent Office (2002)		
Siemens	Schon kommerzielle Serie für Unterseeboote; Für den Automobilbereich noch keine kommerziellen Pläne	634 angemeldete Patente im Bereich Brennstoffzellen beim European Patent Office (2002)	MAN AG	

8.5 Wichtige Kennzahlen der Automobilfirmen

Firma	Hauptsitz	Marktkapitalisierung ²⁵	Gegründet	Status	Produzierte Fahrzeuge pro Jahr	Marken
Hyundai	Seoul, Südkorea	11'454 Mio. \$	1967	börsenkotiert	1.55 Mio.	Hyundai
Mitsubishi	Tokio, Japan	3'013 Mio. \$	1970	börsenkotiert	1.70 Mio.	Mitsubishi
Mazda	Tokio, Japan	28'812 Mio. \$	1914	börsenkotiert	2.60 Mio.	Nissan
Honda	Tokio, Japan	39'171 Mio. \$	1948	börsenkotiert	2.66 Mio.	Honda, Acura
PSA Peugeot Citroën	Paris, Frankreich	11'280 Mio. \$	1914	börsenkotiert	3.13 Mio.	Peugeot, Citroën
Renault	Paris, Frankreich	12'981 Mio. \$	1898	börsenkotiert	4.90 Mio.	Renault, Nissan, Infinity, Dacia, Samsung, AB Volvo Lastwagen
Volkswagen	Wolfsburg, Deutschland	12'970 Mio. \$	1937	börsenkotiert	5.25 Mio.	VW, Audi, Seat, Skoda, Bentley, Bugatti, Lamborghini, Scania
Daimler	Stuttgart, Deutschland	39'077 Mio. \$	1883	börsenkotiert	5.48 Mio.	Mercedes Benz, Smart, Chrysler, Dodge, Jeep, Plymouth, Freightliner, Sterling, Western Star, Mitsubishi, Hyundai, Kia
Toyota	Tokio, Japan	93'859 Mio. \$	1937	börsenkotiert	5.86 Mio.	Toyota, Lexus, Daihatsu, Hino
Ford	Dearborn, USA	26'887 Mio. \$	1903	börsenkotiert	7.57 Mio.	Ford, Mercury, Lincoln, Volvo, Land Rover, Jaguar, Aston Martin, Think, Mazda
GM	Detroit, USA	30'679 Mio. \$	1887	börsenkotiert	8.21 Mio.	GMC, Buick, Saturn, Chevrolet, Pontiac, Cadillac, Holden, Oldsmobile, Opel, Vauxhall, Saab, Fiat, Alfa-Romeo, Ferrari, Maserati, Lancia, Suzuki, Isuzu, Subaru, Daewoo

²⁵ Stand 23.10.2002

Firma	Brennstoff-zellentyp	Brennstoffzellen-hersteller	Marktsegmente	Leistungsstärke	Entwicklungsschritte und Erfolge
Hyundai	PEM	Ballard	Automobile	75 kW	Santa Fe
Mitsubishi	PEM	Mitsubishi Group	Automobile	40 kW	Space Liner und FCv
Mazda	PEM- und DMFC-Brennstoffzellen	Ballard	Automobile	65 kW	Xterra
Honda	PEM	Ballard und eigene Entwicklung	Automobile	78 kW	FCX V1 bis FCX V4
PSA Peugeot Citroën	PEM	Nuvera	Automobile	Hydrogen: 30kW	Hydro-gen, Taxi PAC und H20 Feuerwehrauto
Renault	PEM	Nuvera	Lastwagen und Automobile	30 kW	Renault Laguna Fever
Volkswagen	PEM	PSI	Lastwagen und Automobile	40 kW	VW Bora Hy.Power
Daimler	PEM- und DMFC-Brennstoffzellen	Ballard	Busse und Automobile	75 kW	Mehr als 16 Brennstoffzellenfahrzeuge präsentiert
Toyota	PEM- und DMFC-Brennstoffzellen	Toyota	Busse und Automobile	Brennstoffzelle des FCHV-4: 90 kW	Entwicklung einiger Fahrzeuge, wie FCHV3, FCHV4 (beide mit Wasserstoff) und FCHV5 mit Benzin
Ford	PEM	Ballard	Lastwagen und Automobile	Ford Focus: 80 kW	Entwicklung von Ford Focus und Ford Focus FCEV Hybrid
GM	PEM	GM	Lastwagen und Automobile		Entwicklung des Zafira HydroGen3, des Autonomy

Firma	Zeit bis zur Serienreife	Patente	Allianzen
Hyundai	k.A.	1	Allianz mit UTC Fuel Cells
Mitsubishi	plant ab 2005	5	Allianz mit Daimler
Mazda	ab 2005	210	mit Ballard und Daimler
Honda	plant ab 2003 serienreifes Fahrzeug zu haben	425	bezieht Brennstoffzelle vorläufig bei Ballard
PSA Peugeot Citroën		11	Nuvera
Renault	k.A.	21	Nuvera
Volkswagen	k.A.	0	PSI
Daimler	Serienproduktion 2010	87	mit Ballard und Ford
Toyota	wird ab 2003 die ersten Fahrzeuge verkaufen	430	Kooperation mit GM
Ford	2004	37	DaimlerChrysler und Ballard
GM	Zafira HydroGen3: 94 kW	8	mit Toyota