

## Innovationsprozess vom Verbrennungs- motor zur Brennstoffzelle

### Chancen und Risiken für die baden- württembergische Industrie

Verbundforschungsprojekt gefördert vom Ministerium für  
Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg  
im Rahmen der Zukunftsoffensive „Junge Generation“.

### Abschlussbericht

Jürgen Wengel  
Elna Schirrmeister  
(Hrsg.)



**Bearbeiter:**

- Lutz Demuß, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebs-  
technik (wbk), Universität Karlsruhe
- Prof. Dr. Jürgen Garcke, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasser-  
stoff-Forschung (ZSW)
- Gunter Hackenjos, Institut für Wirtschaftspolitik und Wirtschafts-  
forschung (IWW), Universität Karlsruhe
- Dr. Ludwig Jörissen, Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-  
Forschung (ZSW)
- Wilhelm Mannsbart, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und In-  
novationsforschung (ISI)
- Dr. Frank Marscheider-Weidemann, Fraunhofer-Institut für System-  
technik und Innovationsforschung (ISI)
- Elna Schirrmeister, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und In-  
novationsforschung (ISI)
- Stefan Vögele, Zentrum für Europäische Wirtschaftsfors-  
chung GmbH (ZEW)
- Jürgen Wengel, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und In-  
novationsforschung (ISI)

**Herausgeber:**

Fraunhofer-Institut für Systemtechnik  
und Innovationsforschung (ISI)  
Breslauer Straße 48  
76139 Karlsruhe

Jürgen Wengel  
Telefon +49(0)721/6809-307  
Telefax +49(0)721/6809-131  
eMail we@isi.fhg.de

Elna Schirrmeister  
Telefon +49(0)721/6809-319  
Telefax +49(0)721/6809-131  
eMail els@isi.fhg.de

Karlsruhe, Februar 2000



Inhalt  
Kapitel

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
	<i>Jürgen Wengel, Elna Schirrmeister, ISI</i>	
<b>2</b>	<b>Brennstoffzellen für den Fahrzeugantrieb</b>	<b>13</b>
	<i>Ludwig Jörissen, Jürgen Garche, ZSW</i>	
<b>3</b>	<b>Einflussfaktoren und Szenarien zur Diffusion</b>	<b>49</b>
	<i>Frank Marscheider-Weidemann, Wilhelm Mannsbart, Elna Schirrmeister, ISI</i>	
<b>4</b>	<b>Betankungsinfrastruktur, Stand und Perspektiven</b>	<b>73</b>
	<i>Gunter Hackenjös, IWW</i>	
<b>5</b>	<b>Technologische Veränderungen beim Übergang vom konventionellen Antriebsstrang zur Brennstoffzelle</b>	<b>111</b>
	<i>Lutz Demuß, wbk</i>	
<b>6</b>	<b>Auswirkungen des Innovationsprozesses auf die baden-württembergische Industrie</b>	<b>177</b>
	<i>Jürgen Wengel, Elna Schirrmeister, ISI</i>	
<b>7</b>	<b>Modellrechnungen zu Beschäftigungswirkungen mit Hilfe der Input-Output-Analyse</b>	<b>203</b>
	<i>Stefan Vögele, ZEW</i>	
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>227</b>
	<i>Jürgen Wengel, ISI</i>	





# Einleitung

## Kapitel 1

Bearbeiter: Jürgen Wengel, ISI  
Elna Schirrmeister, ISI

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	5
1.2	Ziel und Vorgehen der Studie	6
1.3	Struktur des Berichtes	10



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Brennstoffzelle hat sich in den letzten Jahren zu einer möglichen Alternative zumindest aber mittelfristigen Ergänzung des Verbrennungsmotors als Antrieb für Kraftfahrzeuge entwickelt. Viele Automobilhersteller haben ihre Forschungsaktivitäten im Bereich der Brennstoffzellentechnologie verstärkt und wollen in den nächsten Jahren serienreife Autos entwickeln. So plant z. B. DaimlerChrysler den Markteintritt für das Jahr 2004 und hat kürzlich die vierte Generation seines Konzeptfahrzeuges (Necar IV) vorgestellt. Die Forschungsaktivitäten konzentrieren sich jetzt auf die Weiterentwicklung von Systemkomponenten, wie z. B. Reformier zur Wasserstoffgewinnung aus flüssigem Methanol, Elektroantriebe und Leistungselektronik.

Markteintritt und Verbreitung der Brennstoffzellen-Antriebstechnologie hängen allerdings neben den technologischen Fortschritten vor allem von den strategischen Entscheidungen der Automobilindustrie sowie den gesellschaftlichen Rahmenbedingungen ab. Da sich die Einführung der Brennstoffzelle auf fast alle Komponenten der Antriebstechnik auswirkt und andere Technologien als bisher zum Zuge kommen, werden Fertigungsverfahren umgestellt und Zuliefererverflechtungen neu geordnet werden. Dies bedeutet Chancen aber auch Risiken für die Automobilindustrie.

Für Baden-Württemberg ist der Automobilbau mit seinen Ausrüstern und Zulieferern ein zentrales Standbein der Wirtschaft. So war 1994 jeder sechste Arbeitsplatz im Verarbeitenden Gewerbe des Landes direkt oder indirekt von der Automobilproduktion abhängig (Kaiser 1995). Einen wesentlichen Beitrag zu den indirekten Arbeitsplätzen des Automobilbaus in Baden-Württemberg leisten die Ausrüster der Automobilkonzerne und Zulieferer, insbesondere im Bereich des Werkzeugmaschinenbaus. Dabei ist die Automobilausrüstungs- und -zulieferindustrie in Baden-Württemberg zudem noch besonders auf die konventionelle Antriebstechnologie mit Otto- bzw. Dieselmotor ausgerichtet. Bei einer Umstellung auf die Brennstoffzellen-Antriebstechnologie könnten einige Fertigungstechnologien, insbesondere der mechanischen Bearbeitung wie Drehen, Fräsen, Honen oder Schleifen ihre heutige Bedeutung verlieren oder überhaupt nicht mehr eingesetzt werden. Zulieferbranchen für die Komponenten, die für ein Brennstoffzellen-Automobil zukünftig notwendig werden (z. B. Elektromotoren und Leistungselektronik), sind demgegenüber im Land nicht gleichermaßen konzentriert.

Aus der starken Abhängigkeit der baden-württembergischen Wirtschaft von der Automobilindustrie ergibt sich die Notwendigkeit, die Auswirkungen einer technologischen Umstellung im Antriebssystem der Automobile auf die Zuliefer- und Ausrüsterindustrie in Baden-Württemberg zu untersuchen. Dieser Innovationsprozess beinhaltet Risiken aufgrund der starken Ausrichtung auf die bisherige Antriebstechnologie, aber auch große Chancen aufgrund der Industriestruktur mit langjähriger Erfahrung in innovativer Automobilproduktion in Baden-Württemberg und der Nähe zu einem der Vorreiter des Innovationsprozesses. So können ein Wettbewerbsvorsprung der baden-württembergischen Ausrüstungs- und Zulieferindustrie bei rechtzeitiger Ausrichtung der Produktpalette auf die technologischen Neuerungen erreicht und neue, zukunftsfähige Arbeitsplätze geschaffen werden. Die bestehenden Chancen und Anpassungserfordernisse müssen den betroffenen Branchen zur Kenntnis gebracht werden, damit diese rechtzeitig genug Anpassungsmaßnahmen ergreifen können.

Vor diesem Hintergrund hat das baden-württembergische Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst im Rahmen des Programms „Zukunfts-offensive Junge Generation“ ein wissenschaftliches Verbundprojekt von fünf baden-württembergischen Forschungsinstituten unter der Leitung des Fraunhofer-Instituts für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe, gefördert. Das Projekt „Innovationsprozess vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle. Chancen und Risiken für die baden-württembergische Industrie“ startete am 1. August 1998 und endete am 31.12.1999. Hiermit wird der Abschlussbericht vorgelegt.

## 1.2 Ziel und Vorgehen der Studie

Ziel des Projektes war es, die Auswirkungen des Innovationsprozesses zum Brennstoffzellenantrieb für die betroffenen Branchen in Baden-Württemberg transparent zu machen und

- die technologischen Veränderungen aufzuzeigen,
- die wichtigsten Einflussfaktoren zu identifizieren und
- Einführungszeiträume abzuschätzen.

Die Arbeiten sollten vor allem am Bedarf der großteils klein- und mittelständisch strukturierten Zuliefer- und Ausrüsterindustrie orientiert sein, während davon auszugehen war, dass die Automobilhersteller über den Stand der Technik informiert sind und die notwendigen Analysen eigenständig durchführen können. Die Ausrichtung auf die Bedürfnisse der Industrie wurde durch die Beteiligung eines Industriebeirates sichergestellt. Die interessanten

Diskussionen mit dem Industriebeirat haben wesentlich zu den Ergebnissen des Projektes beigetragen.

#### Industriebeirat

- Dr. Hans Klingel  
TRUMPF GmbH & Co. Maschinenfabrik, Blechbearbeitung  
[www.trumpf.com](http://www.trumpf.com)
  
- Philipp Kühbauch  
KÜMA Werkzeugmaschinenfabrik GmbH & Co. KG, Mehrspindelköpfe  
[www.kuema.com](http://www.kuema.com)
  
- Dr. Manfred Kuczera  
MIRO Gesellschaft Oberrhein GmbH & Co. KG, Mineralö Raffinerie
  
- Werner Nendwich  
DaimlerChrysler AG Projekthaus Brennstoffzelle  
[www.daimlerchrysler.de](http://www.daimlerchrysler.de)
  
- Erich Willimsky  
Ernst Scherzinger GmbH & Co. KG, Pumpenfabrik  
[www.scherzinger.de](http://www.scherzinger.de)
  
- Dr. Lothar Ophey  
EX-CELL-O GmbH, Werkzeugmaschinen, Sondermaschinen  
[www.ex-cell-o.de](http://www.ex-cell-o.de)
  
- Jürgen Schaufler  
Schaufler GmbH & Co. Werkzeugbau, Formenbau  
[www.schaufler.de](http://www.schaufler.de)

Neben der Erarbeitung eines methodischen Instruments war es damit Ziel des Verbundprojektes, die Voraussetzungen für die Realisierung möglicher Wettbewerbsvorteile zu verbessern. Die betroffenen Betriebe sollten identifiziert und nicht nur mit einem Bericht, sondern auch in einem Symposium über Art und Ausmaß der Herausforderungen sowie den zeitlichen Handlungsdruck informiert werden. Auf dieser Basis können strategische Entscheidungen getroffen werden und Anpassungsmaßnahmen – etwa Forschungs- und Entwicklungsarbeiten – vorbereitet werden. Die detaillierte Darstellung der Determinanten für die Marktdurchdringung erlaubt es, Veränderungen in Entwicklungspfaden frühzeitig wahrzunehmen.

Um sowohl die technischen Fragestellungen als auch Untersuchungen zu Marktentwicklungen, Veränderungen der Produktionsstruktur und Arbeits-

platzeffekten abzudecken, arbeiteten fünf Forschungsinstitute zusammen (in Klammern die Arbeitsschwerpunkte):

- Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe (Projektkoordination, Analyse der Entwicklung der politischen Rahmenbedingungen, der Märkte und der Industriestruktur)
- Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik (wbk), Universität Karlsruhe (Technologievergleich, Fertigungstechnologie)
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) an der Technischen Universität Ulm (Brennstoffzellentechnologie)
- Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW), Mannheim (Modellrechnungen mit Hilfe der Input-Output-Analyse zu Beschäftigungswirkungen)
- Institut für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung (IWW), Universität Karlsruhe (Betankungsinfrastruktur).

Die Aufgaben waren in sechs Arbeitspakete strukturiert (siehe Abbildung 1-1) und wurden in der Regel gemeinsam von mehreren Partnern bearbeitet. Neben Auswertungen der Literatur und anderen Quellen stützten sich die Analysen auf Interviews mit Experten aus industriellen und wissenschaftlichen Forschungseinrichtungen, mit Automobil-Herstellern sowie der Ausrüstungs- und Zulieferindustrie, die bisher im Umfeld des konventionellen Antriebsstranges tätig waren und/oder zukünftig bei der Produktion von Fahrzeugen mit Brennstoffzellen eine Rolle spielen könnten. Zentral für das Projekt war die enge Zusammenarbeit mit der DaimlerChrysler AG und ihrem Projekt- haus Brennstoffzelle. Die von DaimlerChrysler zur Verfügung gestellten Daten zur A-Klasse, die als Referenz für die Analysen im Projekt diente, erlaubten zusammen mit weiteren Informationen aus Experteninterviews über einen Target-Costing-Ansatz die Kosten- und Komponentenstruktur eines zukünftigen Brennstoffzellenantriebes abzuschätzen.

Ohne die Offenheit und den Einsatz der Mitarbeiter aus dem Projekt- haus Brennstoffzelle – und hier sei besonders Herr Werner Nendwich genannt – wären die vorgelegten Ergebnisse nicht möglich gewesen. Ihnen allen sei an dieser Stelle ausdrücklich gedankt. Auch dem Beirat aus Ministeriums- und Industrievertretern, der das Projekt begleitet hat, gebührt unser Dank.

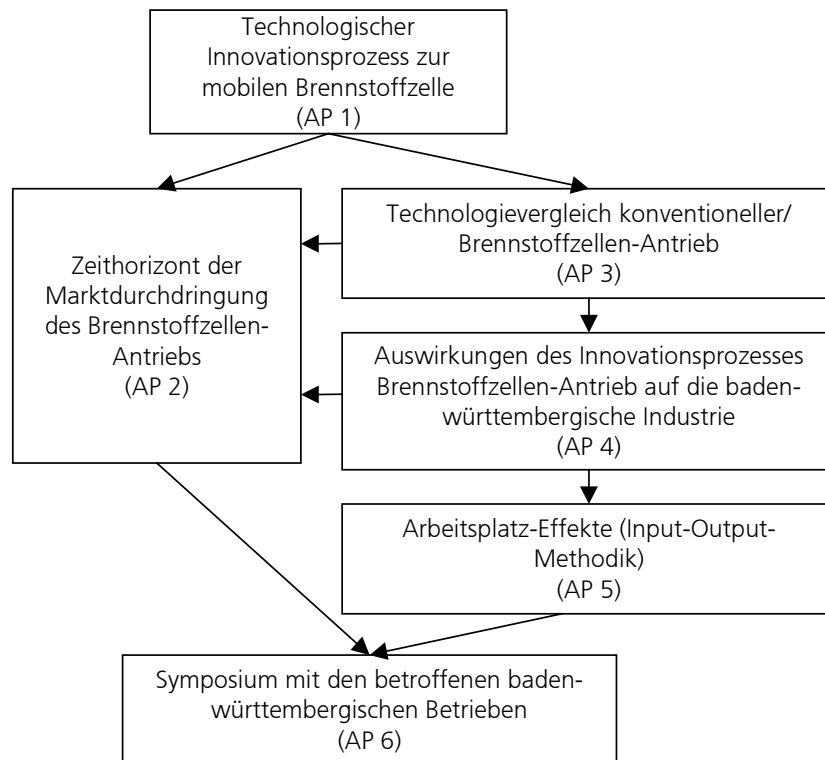


Abbildung 1-1: Projektablaufplan

Die Analyse des Entwicklungsstandes der Technologie des mobilen Einsatzes von Brennstoffzellen zielte darauf, kritische Punkte und mögliche Engpässe zu identifizieren (Materialeigenschaften, Speicher, Reformer, Leistungselektronik, Systemkosten im Fahrzeug, Lernkurven etc.). Der technologische Vergleich zwischen dem konventionellen Antriebsstrang (Otto- bzw. Dieselmotor) und einer alternativen Lösung auf der Basis der Brennstoffzelle bildete den Kern der Untersuchungen und wurde am Beispiel der A-Klasse durchgeführt. Dabei ging es insbesondere um die Veränderungen bei einzelnen Komponenten wie Antrieb, Lichtmaschine und Batterie, Getriebe, Bremssystem sowie Tank und Reformer für die Wasserstoffbereitstellung aus Methanol. Außerdem werden die sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Herstellungsverfahren untersucht.

Auf der Grundlage des Technologievergleichs sowie Interviews mit Herstellern, Zulieferern und Ausrüstern wurde abgeschätzt, wie und in welchem Umfang einzelne Teilbranchen bzw. Produktgruppen von diesem technologischen Wandel betroffen sein könnten. Diese Strukturdaten fließen schließlich zusammen mit den Kostenabschätzungen in Modellrechnungen zu den möglichen Beschäftigungswirkungen mit Hilfe der Input-Output-Analyse ein.

Neben den technischen Aspekten wurden parallel Determinanten der Marktdurchdringung identifiziert und bewertet. Dabei richtete sich das Augenmerk vor allem auf Entscheidungen globaler Wettbewerber zur Markteinführung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen, politische Entscheidungen über Rahmenbedingungen (z. B. Umweltauflagen in Ballungsgebieten und Klimapolitik), Anpassungsnotwendigkeiten und -möglichkeiten bei der Betankungsinfrastruktur sowie die Akzeptanz der Käufer.

### 1.3 Struktur des Berichtes

Der vorliegende Abschlussbericht stellt die Ergebnisse des Projektes in differenzierter Form dar. Um diese Ergebnisse nachvollziehbar zu machen, haben wir versucht, auch die angewandten Methoden und die den verschiedenen Berechnungen zugrunde liegenden Annahmen darzustellen. Der Bericht stellt damit auch eine wichtige Ergänzung zur Präsentation der Ergebnisse auf dem im Rahmen des Projektes organisierten Brennstoffzellensymposium am 27.9.1999 in Stuttgart dar.

Das folgende Kapitel 2 führt kurz in die Brennstoffzellentechnik ein und gibt einen Überblick über die technologischen Alternativen. Die verschiedenen Möglichkeiten und der aktuelle technologische Stand im Hinblick auf mobile Anwendungen werden diskutiert.

Kapitel 3 beschreibt die Strategien der großen Automobilhersteller sowie die Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren der Entwicklung und zukünftigen Verbreitung von Kraftfahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb. Für die wichtigsten Einflussfaktoren werden Annahmen über deren künftige Entwicklung getroffen und die konsistenten Bündel von Entwicklungspfaden in Form von drei Szenarien „Durchbruch Inland“, „Durchbruch Ausland“ und „Konkurrenz“ beschrieben.

Die Betankungsinfrastruktur ist eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Diffusion von mobilen Brennstoffzellen. Je nach technologischem Konzept des Brennstoffzellensystems werden unterschiedliche Anforderungen an die Infrastruktur der Treibstoffherstellung und -versorgung gestellt. In Kapitel 4 werden die Ausgangsbedingungen und die notwendigen Anpassungsmaßnahmen dargestellt sowie die damit verbundenen Probleme aufgelistet.

Wie sich der konventionelle Antriebsstrang mit Verbrennungsmotor von einem Brennstoffzellenantriebssystem technologisch unterscheidet, wird in Kapitel 5 anhand von Daten eines Fahrzeuges der A-Klasse von DaimlerChrysler detailliert. Dieses Kapitel zeigt auch, wie sich die Kostenstrukturen verschieben bzw. welche Kostenanteile auf die einzelnen Komponenten des Brennstoffzellensystems entfallen, wenn man einen Zielkostenansatz zugrun-

de legt, der sich an den heutigen Kosten eines Diesellaggregats orientiert. Außerdem werden die Konsequenzen, die sich aus den Veränderungen in den Komponenten des Antriebsstranges für die Fertigungstechnologien ergeben, diskutiert.

Die Abschätzungen zu den technologischen Veränderungen und den Kosten bilden die Grundlage für das Kapitel 6, in dem die Auswirkungen auf die Zulieferstrukturen unter sektoralen und regionalen Gesichtspunkten untersucht werden. Dabei werden die entsprechend den drei Szenarien auf Grund der angenommenen Diffusion veränderten Wertschöpfungsvolumina bei einzelnen Branchen und deren voraussichtliche regionale Zuordnung aufgezeigt.

Kapitel 7 übersetzt diese Zahlen mit Hilfe der Input-Output-Analyse in Beschäftigungseffekte. Diese Modellrechnungen berücksichtigen nicht nur die direkten Beschäftigungswirkungen sondern zeigen auch indirekte Wirkungen beispielsweise auf Grund von Einkommenseffekten.

Im abschließenden Kapitel 8 werden die Ergebnisse zusammengefasst und einige Überlegungen zu möglichen weiteren Aktivitäten für die verschiedenen Akteure in diesem Themenfeld angestellt.







# Brennstoffzellen für den Fahrzeugantrieb

## Kapitel 2

Bearbeiter: Ludwig Jörissen, ZSW  
Jürgen Garche, ZSW

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Brennstoffzellenantriebssystem</b>	<b>15</b>
1.1	Brennstoffzellen Grundlagen	15
1.2	Brennstoffzellentypen	17
1.3	Komponenten des Systems	20
1.3.1	Brennstoffzellenstack	21
1.3.2	Brennstoffaufbereitung	29
<b>2</b>	<b>Entwicklungsstand und Angebot von PEFC-Systemen</b>	<b>33</b>
2.1	Brennstoffzellen-Demonstrationsfahrzeuge	33
2.2	Brennstoffzellen-Hybridfahrzeuge	34
2.3	Hersteller von PEFC-Stacks	35
2.4	Entwickler von Gasprozessoren	36
2.5	Kostensituation	36
2.6	Betriebserfahrungen	38
<b>3</b>	<b>Einsatzmöglichkeiten von Brennstoffzellen im automobilen Umfeld</b>	<b>39</b>
3.1	Brennstoffzellen als Antrieb	40
3.2	Bordnetzversorgung	42
3.3	Konkurrierende Technologien	44
3.4	Technischer Stand, Kosten und Marktchancen	45
<b>4</b>	<b>Literatur</b>	<b>48</b>

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1-1:	Anwendungsfelder von Brennstoffzellentechnologien	17
Tabelle 1-2:	Charakteristische Eigenschaften verschiedener Brennstoffzellentechnologien	19
Tabelle 1-3:	Technische Entwicklung von Polymermembranmaterialien	24
Tabelle 1-4:	Bewertung von Bipolarplattenmaterialien	27
Tabelle 1-5:	Einfluss verschiedener Bipolarplattenmaterialien auf die erzielbare Leistungsdichte von PEFC-Stacks	28
Tabelle 1-6:	Bipolarplattentechnologien	28
Tabelle 1-7:	Maximal erzielbare Wasserstoffgehalte bei der Aufbereitung von Methan	32
Tabelle 2-1:	Entwickler von PEFC-Stacks (Auswahl)	35
Tabelle 2-2:	Entwickler von Gasprozessoren	36
Tabelle 2-3:	Material- und Herstellungskosten für PEFC-Stacks	37
Tabelle 3-1:	Leistung und Dynamik unterschiedlicher BZ-Anwendungen	40

## Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1-1:	Funktionsprinzipien von Brennstoffzellen	15
Abbildung 1-2:	Funktionsprinzip einer PEFC	16
Abbildung 1-3:	Komponenten eines Brennstoffzellensystems für den Fahrzeugantrieb.	20
Abbildung 1-4:	Stackaufbau: Darstellung als funktionelle Lagen	21
Abbildung 1-5:	Schemazeichnung eines Brennstoffzellenstacks	22
Abbildung 1-6:	Strukturmodell einer Nafion <sup>®</sup> -Membran	25
Abbildung 1-7:	Benötigte Tankvolumina und Speichermassen zur Unterbringung der Energie von 50 l Benzinäquivalent	29
Abbildung 3-1:	Wirkungsgradverlauf bei Antrieben mit Verbrennungsmotoren bzw. Brennstoffzellen (siehe Fußnote 3)	41
Abbildung 3-2:	Akzeptierte Kosten für verschiedene Brennstoffzellenanwendungen (Hockaday, R.; Navas, C.: Fuel Cells Bulletin No. 10, 1999)	46
Abbildung 3-3:	Schematische Darstellung der Kostenentwicklung im zeitlichen Ablauf	46

# 1 Brennstoffzellenantriebssystem

## 1.1 Brennstoffzellen Grundlagen

Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler. Durch sie ist es möglich, den Energieinhalt eines Brennstoffs ohne den Umweg über eine Wärme-Kraftmaschine direkt in elektrische Energie umzusetzen.

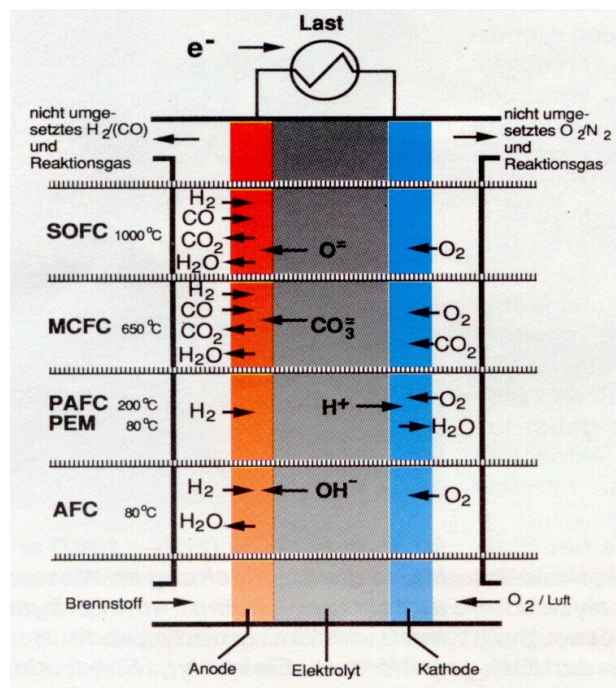


Abbildung 1-1: Funktionsprinzipien von Brennstoffzellen

Die Arbeitsweise einer Brennstoffzelle kann am einfachsten am Beispiel der elektrochemischen Umsetzung von Wasserstoff in einer Brennstoffzelle mit saurem Polymerelektrolyten erklärt werden (Abbildung 1-2). Wasserstoff ( $H_2$ ) wird einer Elektrode zugeführt, die mit einem Katalysator (z. B. feinverteiltes Platin) belegt ist. Am Katalysator wird das Wasserstoffmolekül in Atome dissoziiert und nach Abgabe je eines Elektrons ionisiert. Es entstehen Wasserstoff-Ionen ( $H^+$  bzw. Protonen). Die Elektrode ist ebenfalls im Kontakt mit einem Elektrolyten, in dem gelöste, elektrisch geladene Teilchen (Ionen) vorhanden sind, die den elektrischen Strom leiten können.

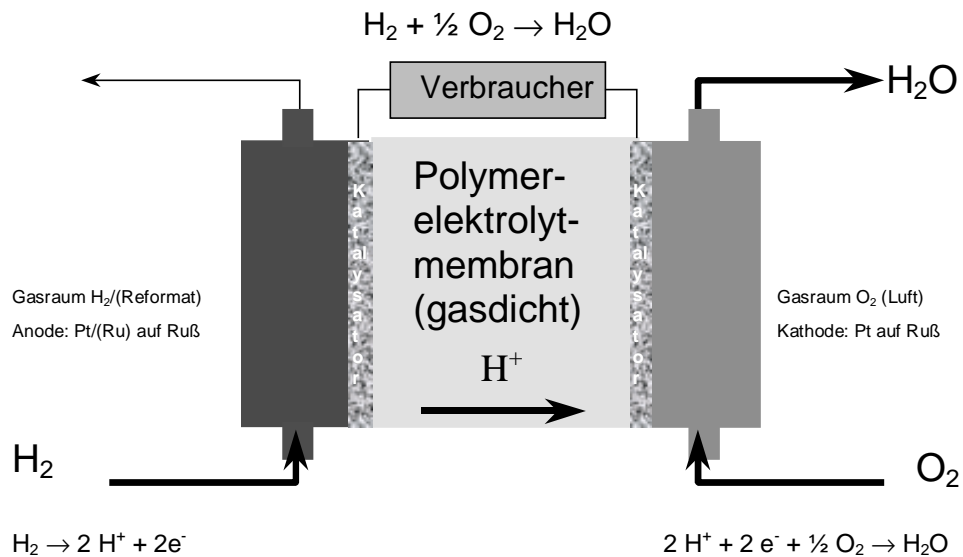


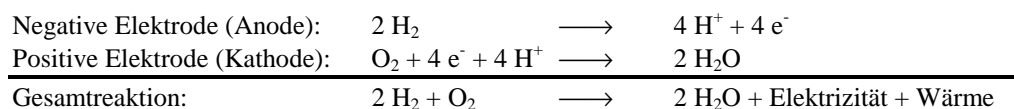
Abbildung 1-2: Funktionsprinzip einer PEFC

Die an der Wasserstoffelektrode erzeugten Protonen können in den Elektrolyten übertreten und hinterlassen Elektronen in der Elektrode, die dadurch ein negatives Potential annimmt.

An der Sauerstoffelektrode werden Sauerstoffmoleküle ( $O_2$ ) dissoziiert und können Elektronen aus der Elektrode aufnehmen. Die an der Sauerstoffelektrode gebildeten negativen Ionen können mit den Protonen des Elektrolyten zu Wasser ( $H_2O$ ) reagieren. Demzufolge bildet die Sauerstoffelektrode ein positives Potential aus.

Werden die beiden Elektroden über eine Last miteinander verbunden, so kann ein elektrischer Strom fließen, so lange die Versorgung der Elektroden mit Wasserstoff und Sauerstoff gewährleistet ist. Der Stromfluss wird direkt durch die Wandlung der chemischen Energie von Wasserstoff und Sauerstoff in elektrische Energie gespeist. Als Produkt entsteht reines Wasser. Die Entstehung weiterer Schadstoffe ist durch die Vermeidung von Flammverbrennungsvorgängen ausgeschlossen.

In der Brennstoffzelle finden also die folgenden Reaktionen statt:



## 1.2 Brennstoffzellentypen

Brennstoffzellen können nach dem verwendeten Elektrolyten sowie nach der Arbeitstemperatur klassifiziert werden. Im folgenden Kapitel wird kurz auf die verschiedenen Technologien eingegangen und deren Entwicklungsstand beschrieben. Tabelle 1-1 zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Brennstoffzellentechnologien und deren mögliche Anwendungsgebiete.

Tabelle 1-1: Anwendungsfelder von Brennstoffzellentechnologien

System	Temperatur-Bereich	Zellwirkungs-grad	Elektrolyt	Anwendungsbereich
AFC	60-90 °C	50-60%	30-50% KOH	Raumfahrt, Straßenfahrzeuge, U-Boote
PEFC	50-80 °C	50-60%	Protonenleitende Polymer-membran (Nafion®)	Raumfahrt, Straßenfahrzeuge, Kraft-Wärme-Kopplung, U-Boote
PAFC	160-220 °C	55%	Konzentrierte Phosphorsäure	Stromerzeugung, Kraft-Wärme-Kopplung, Straßenfahrzeuge
MCFC	620-660 °C	60-65%	Geschmolzene Karbonate (Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	Elektrizitätserzeugung
SOFC	800-1000 °C	55-65%	Ionenleitende Keramik (Yttrium stabilisiertes Zirkonoxid)	Elektrizitätserzeugung

### Alkalische Brennstoffzelle (AFC)

In der alkalischen Brennstoffzelle wird wässrige Kalilauge (30-50 Gew. %) als Elektrolyt verwendet. Die Betriebstemperatur beträgt 60 – 90 °C. Alkalische Brennstoffzellen für Raumfahrtanwendungen arbeiten zum Teil bei einer Temperatur von 250 °C mit einem Elektrolyten aus 85 Prozent KOH. Bei der AFC können preiswerte Nichtedelmetallkatalysatoren verwendet werden. Außerdem ist die Kinetik der Sauerstoffreduktion im alkalischen Medium schneller als im sauren. Allerdings ist die Zelle anfällig gegen CO<sub>2</sub>. Daher ist ihre Anwendung auf Fälle beschränkt, in denen reiner Wasserstoff und Sauerstoff bzw. CO<sub>2</sub>-freie Luft zur Verfügung stehen. Das Musterbeispiel der AFC-Anwendung ist die Raumfahrt.

### Phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC)

Dieser Brennstoffzellentyp verwendet konzentrierte Phosphorsäure als Elektrolyt. Die Betriebstemperatur beträgt 160 – 180 °C. In der PAFC werden kohlegeträgerte Platinkatalysatoren verwendet, als Brennstoff dient Wasserstoff, der üblicherweise aus Kohlenwasserstoffen durch Dampfreformierung vor Ort hergestellt wird. Die hohe Arbeitstemperatur erlaubt den Betrieb auch

mit moderaten CO-Gehalten. Die PAFC kann unter dynamischen Betriebsbedingungen betrieben werden, der Betrieb bei hohen Temperaturen und unter Teillast schädigt jedoch die Lufterlektrode und verringert somit die Lebensdauer. Phosphorsaure Brennstoffzellen sind als präkommerzielle Produkte mit einer Leistung von 250 kW verfügbar, sie werden üblicherweise zur kombinierten Wärme- und Stromerzeugung eingesetzt. Vereinzelt wurden sie auch zum Antrieb von Bussen erprobt.

### **Schmelzkarbonat Brennstoffzelle (MCFC)**

Der Elektrolyt ist üblicherweise eine Schmelze aus Alkalikarbonaten, die in einer keramischen Matrix aufgesogen sind. Die Betriebstemperatur beträgt ca. 650 °C. Die Elektroden bestehen üblicherweise aus Nickel bzw. Nickeloxid. Der Stand der MCFC-Entwicklung erlaubt einen graduellen Übergang von Laborexperimenten hin zu Demonstrationsvorhaben. Ein typisches Einsatzfeld ist die stationäre Kraft-Wärme-Kopplung. Hierzu wurden Demonstrationsprojekte in der 2 MW-Klasse und der 300 kW-Klasse durchgeführt. Die MCFC erlaubt infolge der hohen Arbeitstemperatur die zellinterne Aufbereitung von Kohlenwasserstoffen.

### **Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC)**

Der Elektrolyt dieses Brennstoffzellentyps besteht aus einer Sauerstoffionen leitenden Keramik (Yttrium stabilisiertes Zirkonoxid, YSZ). Die Zelle arbeitet üblicherweise bei 900 – 1000 °C. Die Elektroden bestehen üblicherweise aus Sr-dotiertem  $\text{LaMnO}_3$  auf der Luftseite und einem Nickel-YSZ-Cermet. Ein typisches Anwendungsfeld ist die stationäre Kraft-Wärme-Kopplung. Demonstrationsprojekte mit einer Leistung von 100 kW wurden verwirklicht. Infolge der hohen Arbeitstemperatur könnten Kohlenwasserstoffe direkt umgesetzt werden. Aus wärmetechnischen Gründen wird der Zelle jedoch eine Brennstoffaufbereitung vorgeschaltet.

### **Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEFC)**

Der Elektrolyt in dieser Brennstoffzelle besteht aus einer dünnen, sauren Ionenaustauschermembran, die als Protonenleiter wirkt. Üblicherweise werden fluorierte Basispolymere verwendet, die durch den Einbau von Sulfonsäuregruppen ionenleitend gemacht wurden. Es wurden jedoch auch nicht fluorierte Ionenaustauschermembranen hergestellt und erprobt. Die funktionellen Gruppen der Elektrolytmembran sind chemisch an das Polymer gebunden. Daher befindet sich in der Regel keine freie Säure in der Brennstoffzelle.

Die Arbeitstemperatur der PEFC beträgt ca. 50 – 60 °C, da die Ionenleitfähigkeit dieser Polymere entscheidend vom Wassergehalt abhängig ist. Wassermanagement ist daher eines der Schlüsselprobleme der PEFC. Das Austrocknen der Membran kann zu irreversiblen Schäden, bis hin zur Zerstörung der Zelle führen.

Als Katalysatoren wird in der Regel kohlegetragertes Platin verwendet. In den letzten Jahren ist es gelungen, die notwendigen Edelmetallgehalte auf deutlich unter  $1 \text{ mg/cm}^2$  zu senken. Infolge des sauren Elektrolyten ist die PEFC  $\text{CO}_2$ -abweisend. Sie kann infolge der geringen Arbeitstemperatur nur geringe Mengen an CO tolerieren ( $<10 \text{ ppm}$ ). Durch Zumischung geringer Mengen an Luftsauerstoff bzw.  $\text{H}_2\text{O}_2$  zum Brennstoff kann die CO-Toleranz jedoch gesteigert werden.

Die PEFC ist in der Lage, dynamisch auf schnelle Lastwechsel zu reagieren. Ferner können hohe Leistungsdichten erzielt werden. Daher eignet sich dieser Brennstoffzellentyp besonders für den Fahrzeugantrieb. Ferner sind Anwendungen in der Kraft-Wärme-Kopplung bzw. zum Antrieb von Elektrogeräten möglich. PEFC-Systeme mit einer Leistung von bis zu 250 kW wurden realisiert.

Für die Anwendung in Straßenfahrzeugen kommen nur die AFC, die PAFC und die PEFC in Frage. In jüngster Zeit wurde auch der Einsatz kleiner SOFCs zur Bordstromversorgung vorgeschlagen (BMW). Das Einsatzpotential der verschiedenen Brennstoffzellentypen im Straßenverkehr wird erheblich durch die Reaktion der Brennstoffzellen auf Lastwechsel und durch die Zeit bis zum Erreichen der Betriebsbereitschaft beeinflusst (Tabelle 1-2).

Der Einsatz der PAFC wird infolge der langen Startzeiten auf Fahrzeuge mit langer Einsatzdauer (Busse, Lkws) beschränkt bleiben. AFC-betriebene Fahrzeuge sind auf eine existierende Wasserstoff-Infrastruktur angewiesen. Für eine weite Verbreitung von Brennstoffzellen in Straßenfahrzeugen eignet sich somit vor allem die PEFC. Aus diesem Grund wird in den folgenden Ausführungen ausschließlich auf die PEFC eingegangen.

Tabelle 1-2: Charakteristische Eigenschaften verschiedener Brennstoffzellentechnologien

System	Lastwechsel	Betriebsbereitschaft	Besondere Probleme
AFC	schnell	sofort	$\text{CO}_2$ -empfindlich
PEFC	schnell	sofort	CO-empfindlich
PAFC	langsam	30 Minuten aus „hot standby“	Kathodenkorrosion bei OCP
SOFC	schnell wenn auf Betriebstemperatur (Gefahr von Rissbildung)	Mehrere Stunden nach Kaltstart	Werkstoffverträglichkeit (thermisch, chemisch)

### 1.3 Komponenten des Systems

Die PEFC erzeugt Elektrizität durch die „kalte, elektrochemische Verbrennung“ von Wasserstoff in der Form von Gleichstrom. Ein komplettes System beinhaltet demzufolge neben der eigentlichen Brennstoffzelle noch Komponenten, die der Bereitstellung von Wasserstoff und der Konditionierung der elektrischen Energie dienen. Eine Schemazeichnung eines Komplettsystems ist in Abbildung 1-3 gezeigt.

Das komplette Antriebssystem kann demzufolge in folgende Module untergliedert werden:

- Triebstoffmodul
- Brennstoffzellenmodul
- Elektrischer Modul
- Antriebsmodul.

Die einzelnen Komponenten werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

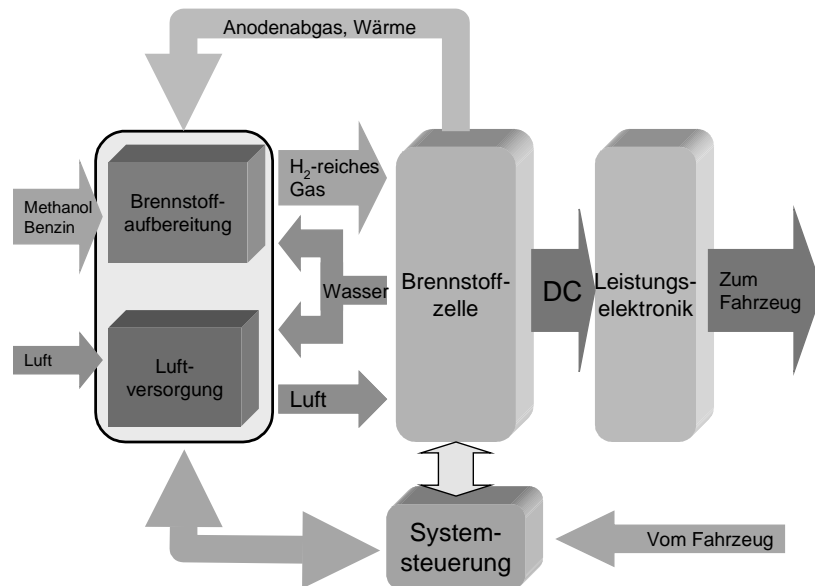


Abbildung 1-3: Komponenten eines Brennstoffzellensystems für den Fahrzeugantrieb.

### 1.3.1 Brennstoffzellenstack

Brennstoffzellenstacks, die zum Antrieb von Straßenfahrzeugen verwendet werden, sind in der Regel in bipolarer Bauweise in der sogenannten Filterpressenanordnung aufgebaut. Zwischen den einzelnen aktiven Zellen sind zur Abfuhr der Abwärme Kühlzellen eingefügt. Der Brennstoffzellenstack wird durch Endplatten abgeschlossen. Diese Platten erfüllen die Funktion eines Stromsammlers und erlauben den Anschluss zur Gas- und Kühlmittelversorgung.

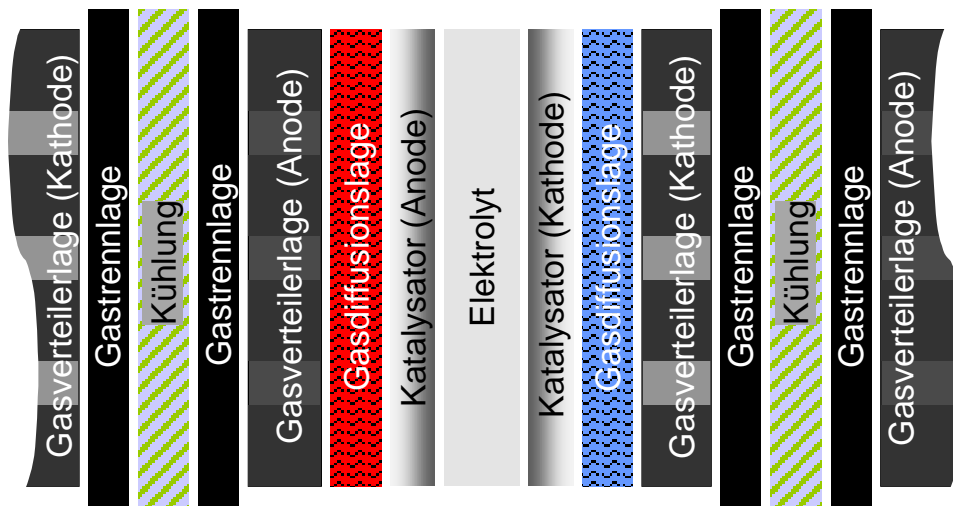


Abbildung 1-4: Stackaufbau: Darstellung als funktionelle Lagen

In Abbildung 1-4 ist schematisch ein Ausschnitt eines Brennstoffzellenstacks gegliedert nach den Funktionen der einzelnen Schichten dargestellt. Im Stack enthaltene Bauteile integrieren die Funktion einer oder mehrerer dieser Schichten. So werden häufig die Funktionen Gastrennung, Kühlung sowie anoden- und kathodenseitige Gasverteilung in das Bauteil „Bipolarplatte“ integriert. Elektrolyt sowie anoden- und kathodenseitige Katalysatorschicht sind häufig in das Bauteil Elektrode-Membran-Elektroden-Einheit (EME bzw. MEA) integriert. Selbstverständlich ist auch eine veränderte Zusammenfassung von Funktionen in Stackbauteile möglich.

Der Brennstoffzellenstack wird typischerweise aus folgenden Bauteilen gefertigt:

- Elektrode-Membran-Elektroden-Einheit (EME bzw. MEA)
- Gasdiffusionsschichten
- Bipolarplatte
- Dichtungen
- Endplatten.

Der Brennstoffzellenstack wird über die Endplatten mittels Stehbolzen/Zuganker zusammengehalten. Für Fahrzeuganwendungen werden typischerweise Stacks mit einer Länge von 120 bis 300 Zellen verwendet, womit sich Zellspannungen zwischen 72 V und 180 V im Auslegungspunkt (0,6 V/Zelle) ergeben. Im Auslegungspunkt ist ferner eine Leistungsdichte von 0,25 bis 0,5 W/cm<sup>2</sup> anzustreben. Geht man von einer Leistung von 35 kW für einen 120-zelligen Stack aus, so wird bei einer Leistungsdichte von 0,5 W/cm<sup>2</sup> eine aktive Zellfläche von ca. 580 cm<sup>2</sup> benötigt. Abbildung 1-5 zeigt eine Schemazeichnung eines Brennstoffzellenstacks.

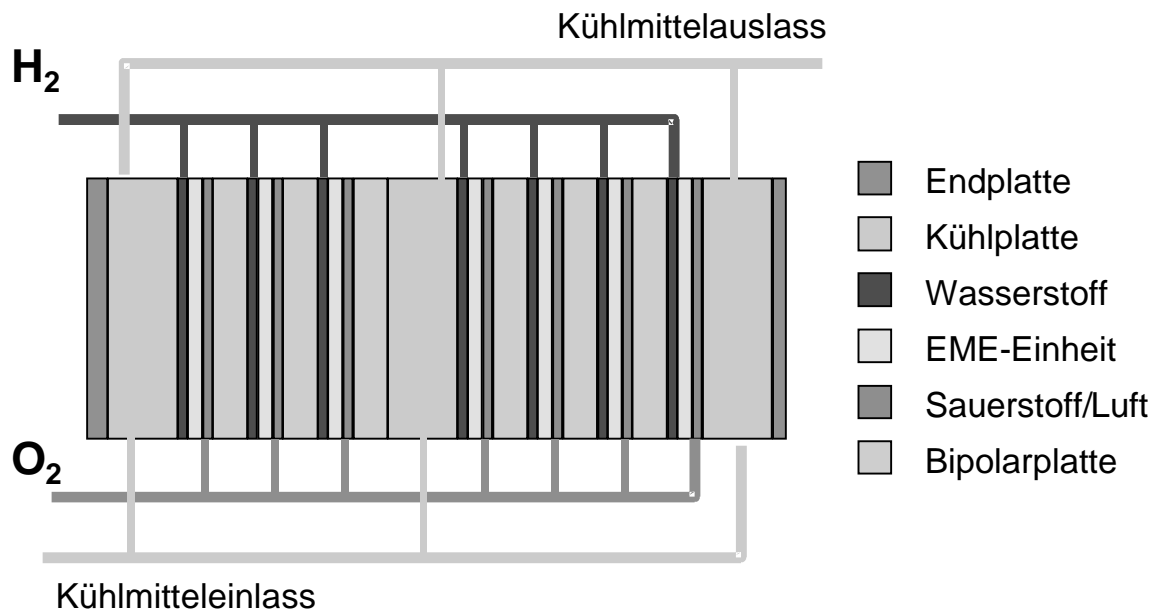


Abbildung 1-5: Schemazeichnung eines Brennstoffzellenstacks

### **Elektrode-Membran-Elektroden-Einheit**

Die EME besteht aus der eigentlichen Elektrolytmembran, die mit katalytisch aktiven Elektroden beschichtet ist. Sie ist das Herzstück der PEFC. Ein wesentliches Kriterium der EME ist die innige Verbindung zwischen Katalysatorschicht und Elektrolytmembran.

Der Katalysatorschicht folgt gasseitig eine Gasdiffusionslage, die üblicherweise aus einem hydrophobisierten Graphitfilz oder einer Compositlage besteht.

Es gibt grundlegend zwei verschiedene Herstellprinzipien für EMEs.

- Aufbringen einer dünnen Katalysatorschicht auf die Elektrolytmembran
- Herstellung kompletter Gasdiffusionselektroden und deren Übertragung auf die Membran.

Als industrielle Hersteller für fertig konfektionierte EMEs stehen die Firmen W.L GORE, 3M und E-Tek zur Verfügung. Von den Katalysatorherstellern Johnson-Matthey und Degussa sowie vom Membranentwickler Aventis wird ebenfalls die Herstellung von EMEs geplant.

### **Elektrolytmembran**

Als Elektrolytmembran werden saure Kationenaustauscherpolymere verwendet. In Tabelle 1-3 ist die Entwicklungsgeschichte verschiedener Membranmaterialien dargestellt.

Die ersten Polymerelektrolytmembranen bestanden aus sulfonierten Phenolsulfonsäuren bzw. sulfoniertem Polystyrol. Mit Hilfe dieser Materialien war es möglich, Brennstoffzellen herzustellen und zu betreiben. Die ersten Zellen zeigten jedoch nur geringe Stabilität unter Einsatzbedingungen. Die Elektrolytmembranen neigten zur Versprödung und bildeten bereits nach wenigen Tagen Löcher. Ein Durchbruch hinsichtlich der Lebensdauer wurde durch den Einsatz fluorierter Polymere erreicht. Eine herausragende Rolle spielt hierbei das von der Firma DuPont entwickelte Nafion<sup>®</sup>.

Tabelle 1-3: Technische Entwicklung von Polymermembranmaterialien

Zeit	Membran	Leistungsdichte [mW/cm <sup>2</sup> ]
1959-1961	Phenolsulfonsäure	5-10
1962-1965	Polystyrolsulfonsäure	40-60
1966-1967	Polytrifluorstyrolsulfonsäure	75-80
1968-1970	Nafion <sup>®</sup> (Experimentell)	80-100
1971-1980	Nafion <sup>®</sup> (Produktion)	600-800
1980-1996	Fluorierte (Experimentell)	1.000-1500
1998	Nafion <sup>®</sup> (Produktion)	>> 900
1998	Sulfonierte Polyphenylensulfone (Experimentell)	300-1.000

Die hohe Leitfähigkeit der Polymere wird durch Quellung in Wasser erreicht. Die Sulfonsäuregruppen der Polymere werden durch einen Wasserfilm miteinander verbunden. Ein Modell dieser Struktur ist in Abbildung 1-6 am Beispiel des Nafions<sup>®</sup> gezeigt.

Trocknet die Membran aus, so führt dies zur Schrumpfung der Folie, ferner sinkt ihre Leitfähigkeit. Das Absinken der Leitfähigkeit ist bei Nafion<sup>®</sup> ab einer Temperatur von ca. 70 °C zu beobachten. Wird die Membran jedoch im ständigen Kontakt mit flüssigem Wasser gehalten, so ist auch ein Einsatz bei höherer Temperatur möglich.

Infolge der starken Abhängigkeit der Leitfähigkeit und der Außenabmessungen der Elektrolytmembran vom Quellungszustand (Wassergehalt), muss beim Betrieb einer PEFC besonders auf den Wasserhaushalt geachtet werden. Austrocknung der Membran, auch wenn dies nur an wenigen Stellen geschieht, kann zu deren Zerstörung führen.

Elektrolytmembranen sind derzeit kommerziell z. B. von DuPont, Asahi Glass, Chloride Engineers, Tokuyama Soda und A.L. Gore erhältlich. Es handelt sich hierbei um im wesentlichen fluorierte Grundpolymere. Entwicklungsarbeiten an teilfluorierten und fluorfreien Membranen werden z. B. bei Ballard Advanced Materials, der Dais-Corporation und Aventis (früher Hoechst) durchgeführt. Infolge der gegenwärtig geringen Nachfrage nach Elektrolytmembranen werden diese zurzeit nur im Labor- oder Technikummaßstab hergestellt. Demzufolge betragen die Membrankosten etwa US\$ 600,-/m<sup>2</sup>.

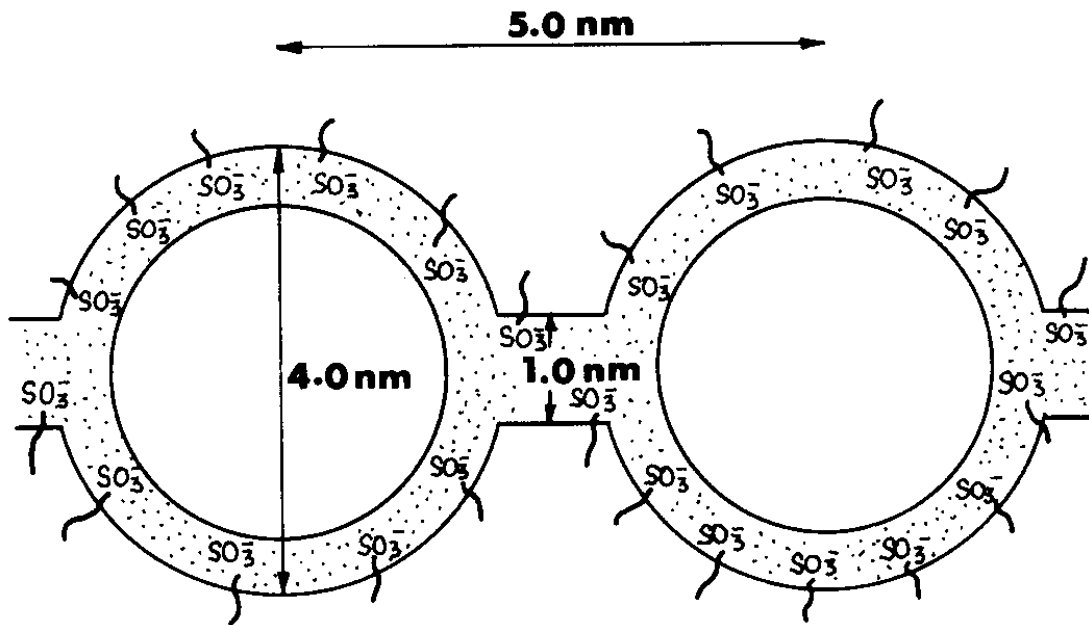


Abbildung 1-6: Strukturmodell einer Nafion®-Membran

Vollfluorierte Materialien wie Nafion® zeichnen sich durch hohe Beständigkeit aus. Wird ein Austrocknen der Membran verhindert, so sind Standzeiten zu erwarten, die über die für Automobilanwendungen benötigten 5000 Stunden hinausgehen. Es wird sogar diskutiert, Nafion® Ionenaustauschermaterial aus gebrauchten MEAs wiederzugewinnen.

Für teilfluorierte und fluorfreie Materialien wurden mittlerweile ebenfalls Beständigkeiten von mehr als 4000 Stunden in Brennstoffzellen nachgewiesen. Das Hauptargument zur Entwicklung teilfluorierter und fluorfreier Materialien sind die bei Massenproduktion geringeren Kosten für diese Materialien. Membrankosten von weniger als 50 US\$/m<sup>2</sup> erscheinen realisierbar. Ferner können bei der Verbrennung fluorierter Materialien hochtoxische Substanzen entstehen.

Das Kostensenkungspotential vollfluorierter Materialien wie Nafion® ist infolge der während des Herstellungsprozesses auftretenden Zwischenstufen

begrenzt. Jedoch könnte Nafion<sup>®</sup> unbestätigten Angaben von DuPont zufolge im Großmaßstab für ca. US\$ 50,-/m<sup>2</sup> produziert werden<sup>1</sup>.

### **Katalysatoren**

Infolge der niedrigen Arbeitstemperatur und des sauren Elektrolyten benötigt die PEFC platinhaltige Katalysatoren. Seit Beginn der 80er-Jahre gelang es durch konsequente Optimierung der Katalysatoren und der Elektrodenstrukturen den Edelmetallbedarf von 64 mg/kW auf < 1g/kW zu senken.

Die eingesetzten Pt-Katalysatoren sind allerdings sehr anfällig gegen Vergiftung durch im Wasserstoff enthaltene Spuren von CO. Beim Einsatz reiner Pt-Katalysatoren dürfen höchstens 10 ppm CO im Wasserstoff enthalten sein. Dies erfordert eine sehr effiziente Reinigung des Wasserstoffs.

Der Einsatz von Legierungskatalysatoren (Pt/Ru, Pt/Sn etc.) bzw. die Dosierung geringer Mengen von Luft oder H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> zum Anodengas steigert die CO-Toleranz der Brennstoffzelle auf CO-Gehalte von ca. 50 bis 100 ppm. Die weitere Optimierung der Katalysatoren muss zu einer weiteren Erhöhung der CO-Toleranz führen.

### **Gasdiffusionsschichten**

Gasdiffusionsschichten bestehen in der Regel aus Graphitfilz bzw. einem Compositgewebe. Als Hersteller treten die Firmen E-Tek (Composit) sowie Toray (Graphitfilz) häufig in Erscheinung. Brennstoffzellentaugliche Graphitfilze werden ebenfalls bei der Firma SGL Carbon entwickelt. Die Porenstruktur der Gasdiffusionsschichten muss den Zutritt von Gasen (Wasserstoff/Sauerstoff) zur Reaktionszone und gleichzeitig den Transport von Wasser gewährleisten. Dazu wird die Porenstruktur der Gasdiffusionsschichten in der Regel mit PTFE hydrophobisiert. Neben der Gasverteilung dienen die Gasdiffusionsschichten auch zur vollflächigen elektrischen Kontaktierung der Reaktionsschicht.

### **Bipolarplatten**

Bipolarplatten dienen zur elektrischen Verschaltung, zur Zuführung und Verteilung von Reaktanden und Kühlmittel und zur Trennung der Gasräume.

<sup>1</sup> Vgl. Kahlhammer, F.; Prokopius, P.R.; Roan, V.P.; Voecks, G.E.: Status and Prospects of Fuel Cells as Automobile Engines, 1998.

Die Bipolarplatte muss folgende Eigenschaften erfüllen:

- Chemische Stabilität gegen feuchte oxidierende und reduzierende Bedingungen
- Gasdichtigkeit
- Hohe Leitfähigkeit
- Geringe Übergangswiderstände
- Planparallelität < 20 µm
- Niedrige Kosten (Material und Fertigung).

Es gibt grundsätzlich drei verschiedene Möglichkeiten, diese Anforderungen zu erfüllen:

- Metallische Bipolarplatten
- Graphitische Bipolarplatten
- Compositmaterialien.

Als metallische Werkstoffe kommen Edelstähle bzw. beschichtete sonstige Werkstoffe (Aluminium, Titan etc. in Betracht).

Während sich graphitische Materialien vor allem durch chemische Beständigkeit und geringe Übergangswiderstände auszeichnen, zeigen metallische Werkstoffe in der Regel eine bessere Gasdichtigkeit, Maßhaltigkeit und höhere elektrische Leitfähigkeiten. In Tabelle 1-4 sind qualitativ die Vor- und Nachteile der jeweiligen Werkstoffklassen zusammengestellt.

Tabelle 1-4: Bewertung von Bipolarplattenmaterialien

	Metall	Graphit	Composit
Chemische Stabilität	0	+	+
Gasdichtigkeit	++	-	0
Leitfähigkeit	+	+	-
Übergangswiderstand	0	+	0
Planparallelität	+	0	0
Materialkosten	+	-	+
Fertigungskosten	+	--	++

Bipolarplatten sind kritische Funktionselemente des PEFC-Stacks. Sie tragen auch zu einem erheblichen Anteil zu den Kosten und zum Gewicht des Stackes

bei. Betrachtet man typische Werkstoffdicken für Bipolarplatten, so ergibt sich das in Tabelle 1-5 dargestellte Bild:

Tabelle 1-5: Einfluss verschiedener Bipolarplattenmaterialien auf die erzielbare Leistungsdichte von PEFC-Stacks

Material	Dichte in g/cm <sup>3</sup>	Typische Platten- dicke in mm	Gewicht der Bipolarplatte pro Aktivfläche in g/cm <sup>2</sup>	Gewicht der Bipolarplatte @ 0,5 W/cm <sup>2</sup> in kg/kW
Graphit	2,25	1,5 <sup>b)</sup>	0,35	0,7
Edelstahl	ca. 8	0,1 <sup>a)</sup>	0,08	0,16
Aluminium	2,7	0,5 <sup>b)</sup>	0,14	0,27
Titan	4,5	0,5 <sup>b)</sup>	0,23	0,45

<sup>a)</sup> Tiefziehteile, Angaben von Siemens WO 98/33224

<sup>b)</sup> Glatte Bipolarplatten, eigene Modellstacks

Gegenwärtig scheint sich noch keines der vorgeschlagenen Bipolarplattenkonzepte endgültig durchgesetzt zu haben. Einige Stackentwickler haben jedoch Prototypen in den verschiedenen Technologien vorgestellt.

Tabelle 1-6: Bipolarplattentechnologien

Bipolarplattenmaterial	Hersteller/Entwickler
Graphit	Ballard
Graphit Composit	Energy Partners, SGL-Carbon, Proton Motor
Geprägter Edelstahl	Siemens, General Motors
Metall-Laminate	H-Power
Aluminium/Titan	De Nora

### Dichtungen

Brennstoffzellenstapel in bipolarer Bauweise weisen erhebliche Längen an Dichtkanten auf (ca. 6,5 m/kW). Aus diesem Grund kommt einem preisgünstigen, wirksamen Dichtungskonzept eine erhebliche Bedeutung zu. Dichtungen können sowohl in die Bipolarplatten als auch in die EME-Einheiten funktionell integriert werden.

### Endplatten

Der Zellstapel wird über die Endplatten mechanisch fixiert. Dies erfolgt in der Regel über Stehbolzen am Rand der Zellen oder über Zuganker durch die

Zellfläche. Zur Gewährleistung einer optimalen Stromableitung muss der Zellstapel über die gesamte Aktivfläche fixiert werden. Die Endplatten müssen demzufolge eine hohe Steifigkeit aufweisen. Trotz der hohen mechanischen Anforderungen dürfen die Endplatten das Gewicht des Brennstoffzellenstacks nicht allzu sehr erhöhen. Bei ihrer Konstruktion muss daher auf leichte Materialien und steife Strukturen geachtet werden.

### 1.3.2 Brennstoffaufbereitung

Die PEFC benötigt zum Betrieb Wasserstoff. Reiner Wasserstoff kann als komprimiertes Gas, verflüssigt oder chemisch gebunden als Metallhydrid an Bord eines Fahrzeugs mitgeführt werden. Abbildung 1-7 zeigt die zur Speicherung von 50 l Benzinäquivalent benötigten Volumina und Speichergewichte. Man erkennt die höhere Energiedichte der flüssigen Kohlenwasserstoffe (Benzin, Diesel). Methanol hat etwa die Hälfte der Energiedichte von Benzin.

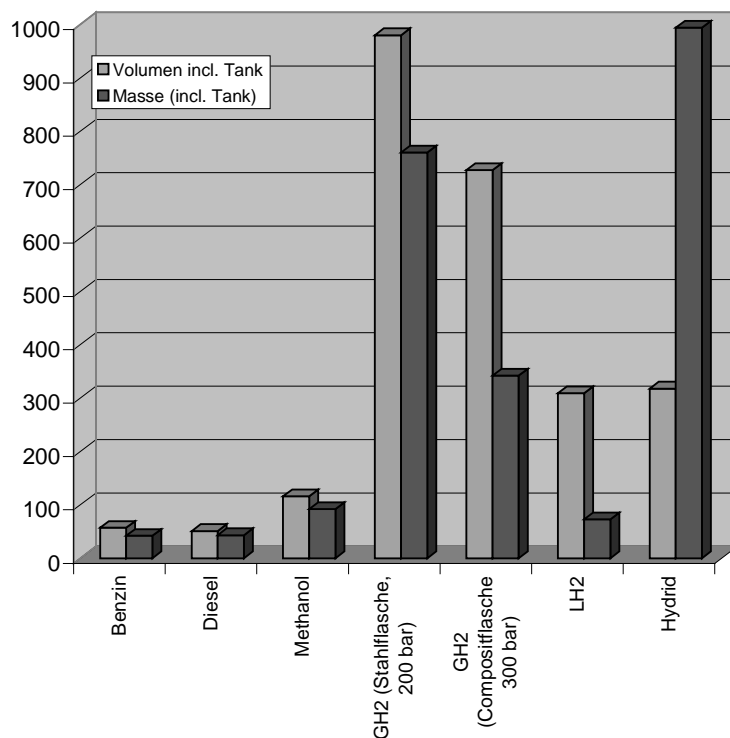


Abbildung 1-7: Benötigte Tankvolumina und Speichermassen zur Unterbringung der Energie von 50 l Benzinäquivalent

Die Herstellung von Wasserstoff ist ein in der Petrochemie gängiger Prozess. Hierzu stehen im großtechnischen Maßstab Anlagen zur Verfügung. Neben

den Großanlagen wurde in den letzten Jahren modulare Erdgasreformer in der 200 kW-Klasse entwickelt (Praxair, ICI). Diese Anlagen sind jedoch für eine direkte Integration in Fahrzeuge zu groß.

Infolge der nicht flächendeckend vorhandenen Wasserstoff-Infrastruktur ist der Einsatz von PEFC-angetriebenen Fahrzeugen mit Wasserstoff gegenwärtig auf Fahrzeugflotten (Busse, Lieferfahrzeuge etc.) beschränkt. Für eine weitere Verbreitung der PEFC-Technologie ist daher der Einsatz eines einfach erhältlichen und handhabbaren Treibstoffs unerlässlich. Die Versorgung der PEFC mit Wasserstoff geeigneter Qualität im Fahrzeug wird demnach zu einer erheblichen Herausforderung bei der Systementwicklung.

Der in PEFCs verwendete Wasserstoff darf, abhängig vom verwendeten Katalysatorsystem, 10 bis 50 ppm an CO enthalten. Beimengungen von CO<sub>2</sub> sind unschädlich. Die PEFC kann daher mit Wasserstoff, der durch Aufbereitung von Alkoholen oder Kohlenwasserstoffen an Bord des Fahrzeugs erzeugt wird, erst nach einer Entfernung des bei der Treibstoffaufbereitung entstehenden CO betrieben werden. Im Folgenden werden die Verfahren zur Wasserstoffherstellung kurz skizziert.

### **Dampfreformierung**

Wasserstoff kann durch katalytische Umsetzung von Kohlenwasserstoffen oder Alkoholen mit Wasserdampf in einer endothermen Reaktion hergestellt werden. Die Prozesstemperatur beträgt bei Methanol ca. 280 °C. Kohlenwasserstoffe bzw. höhere Alkohole benötigen Prozesstemperaturen oberhalb von 700 °C. Die Dampfreformierung muss zur Vermeidung von Rußabscheidungen im Katalysator mit überschüssigem Wasserdampf betrieben werden. Bei den üblichen Prozessbedingungen hat das Rohgas einen CO-Gehalt von ca. 1 Prozent bei der Methanolreformierung. Die Reformierung von Kohlenwasserstoffen führt zu CO-Gehalten von ca. 9 Prozent. Kohlenwasserstoffreformer werden demzufolge noch Reaktoren nachgeschaltet, in denen das im Gas enthaltene CO bei tieferen Temperaturen mit Wasserdampf zu Wasserstoff und CO<sub>2</sub> umgesetzt wird (Shift-Reaktor).

### **Partielle Oxidation**

Bei der partiellen Oxidation (POX) wird der Brennstoff mit einer unterstöchiometrischen Menge an Sauerstoff umgesetzt. Die Reaktion ist exotherm. Rußabscheidung wird in der Regel durch Luftvorwärmung und Zumischung von Wasserdampf verhindert. Das Rohgas kann durch nachgeschaltete Katalysatorbetten geleitet werden, in denen unverbrannte Brennstoffanteile und Wasserdampf katalytisch umgesetzt werden. (Konzept A.D. Little/Epyx.) In Großanlagen wird vor den Reaktor eine Luftzerlegungsanlage geschaltet.

### **Autotherme Reformierung**

Als autotherme Reformierung werden Prozesse bezeichnet, die katalytische partielle Oxidation und Reformierung in einem Reaktor vereinen. Dieses Konzept wird von Johnson Mathey in ihrem „Hot-Spot-Reaktor“ verfolgt.

### **CO-Feinreinigung**

Die Gasprozessor-Rohgase haben in der Regel selbst nach dem Durchlaufen eines Shiftreaktors einen für die PEFC deutlich zu hohen CO-Gehalt ( $>0,5\%$ ). Daher muss das Gas in einer weiteren Reinigungsstufe aufbereitet werden. Hierfür stehen prinzipiell zwei Technologien zur Verfügung.

#### 1. Selektive Oxidation (PROX)

Hierbei wird das Gas mit Sauerstoff vermischt und bei Temperaturen um ca.  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  über einen Katalysator (Pt, bzw. Pt/Ru) geleitet. Hierbei wird bevorzugt der CO-Anteil oxidiert. PROX-Reaktoren sind in der Regel mehrstufig aufgebaut. Die Reaktion ist exotherm. Selektive Oxidation wird bei den meisten Entwicklern von Gasprozessoren verwendet.

#### 2. Diffusion durch eine wasserstoffpermeable Membran

Wasserstoff diffundiert bei Temperaturen von ca.  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  nahezu ungehindert durch eine dünne Palladiummembran. Dieses Reinigungsverfahren liefert reinen Wasserstoff und bietet sich besonders bei druckbetriebenen Gasprozessoren an. In dieser Technologie hat die britische Firma Wellmann CJB besondere Erfahrung.

### **Zusammenfassung**

Der Gasprozessor zur Wasserstoffherstellung an Bord eines Fahrzeuges besteht aus einer kaskadenförmigen Verschaltung mehrerer Reaktoren.

1. Dampfreformer bzw. POX-Reaktor
2. Gasgrobreinigung (bei der Aufbereitung von Kohlenwasserstoffen)
3. Gasfeinreinigung.

Die thermische Integration der verschiedenen Reaktoren ist derzeit noch nicht abschließend gelöst. Infolge der endothermen Reaktion ist die Dynamik der Dampfreformierung abhängig von einem effizienten Wärmeübergang innerhalb des Reaktors. Sie liefert bei stöchiometrischem Umsatz jedoch das wasserstoffreichste Gas. Die Dynamik der Partielle Oxidation und autotherme Reformierung ist infolge der exothermen Reaktionsführung inhärent schneller. Die Reinigungsstufen (Shift und PROX) sind ebenfalls exotherm und somit dynamisch.

Tabelle 1-7 zeigt die maximal erzielbaren Wasserstoffgehalte bei der Aufbereitung von Methan. Man erkennt, dass – sofern kein reiner Sauerstoff zur Verfügung steht – die partielle Oxidation zur Erzielung nennenswerter Wasserstoffanteile im Produktgas mit einem Reformierungsschritt gekoppelt werden sollte. In der Realität sind die in Tabelle 1-7 angegebenen Wasserstoffgehalte nach Durchlauf des Gasprozessors geringer.

Gegenwärtig sind nur wenig belastbare Daten für die tatsächliche Gaszusammensetzung der verschiedenen Technologien publiziert. Für den Multi-Fuel-Prozessor von A.D. Little/EPYX wird nach einer PROX-Feinreinigungsstufe ein Wasserstoffgehalt von 40 Prozent bei der Aufbereitung von Benzin und 45 Prozent bei der Behandlung von Ethanol angegeben.

Brennstoffzellen können in der Regel den im Gas enthaltenen Wasserstoff nicht komplett umsetzen. Technische Brennstoffzellenstacks werden bei Verwendung von Reformatwasserstoff (75 % H<sub>2</sub>-Anteil, 25 % CO<sub>2</sub>-Anteil) zur Vermeidung unterversorgter Regionen in einzelnen Zellen mit einem Wasserstoffumsatz von ca. 70 bis 80 Prozent betrieben. Bei dieser Betriebsweise hat also das aus der Brennstoffzelle abströmende Gas einen Wasserstoffgehalt zwischen 37 und 47 Prozent.

Brenngase mit einer dem A.D-Little/EPYX Gasprozessor entsprechenden Wasserstoffgehalt erfordern somit Brennstoffzellenstacks mit einer besonders effizienten Gasverteilzone.

Tabelle 1-7: Maximal erzielbare Wasserstoffgehalte bei der Aufbereitung von Methan

Prozess	Reaktionsgleichung	Wasserstoffgehalt bei stöchiometrischem Umsatz in %
Dampfreformierung	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2$	80
Partielle Oxidation (Sauerstoff)	$\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2$	67
Partielle Oxidation (Luft)	$\text{CH}_4 + \text{O}_2 + 4 \text{N}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2 + 4 \text{N}_2$	29
Autotherme Reformierung (Sauerstoff)	$\text{CH}_4 + 0,25 \text{O}_2 + 1,5 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 3,5 \text{H}_2$	78
Autotherme Reformierung (Luft)	$\text{CH}_4 + 0,25 \text{O}_2 + \text{N}_2 + 1,5 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 3,5 \text{H}_2 + \text{N}_2$	64

## 2 Entwicklungsstand und Angebot von PEFC-Systemen

Der Einsatz von PEFCs wurde mittlerweile in verschiedenen Anwendungsfeldern demonstriert. Allein seitens der Fahrzeugindustrie werden (Demonstrations-) Projekte von folgenden Firmen durchgeführt: DaimlerChrysler, Ford, Ballard, General Motors/Opel, MAN/Siemens (Bus), Siemens/Linde/(BMW) (Gabelstapler), De Nora/Auwärter (Neoplan-Bus), Toyota, Honda, Nissan, Mazda, Renault, Peugeot/Citroen, VW/Volvo.

Bei diesen Demonstrationsvorhaben kann zwischen zwei Basiskonzepten unterschieden werden:

### 1. Reiner Brennstoffzellenantrieb

Das Brennstoffzellensystem muss die gesamte Fahrdynamik abdecken.

Dieses Konzept wird am ehesten mit den NECAR-Fahrzeugen von DaimlerChrysler verfolgt. Diese benötigen jedoch ebenfalls eine Batterie für den Startvorgang.

### 2. Brennstoffzellenhybrid

Bei diesem Konzept, das unter anderem Toyota verfolgt, wird die Spitzenleistung (z. B. beim Beschleunigen) mittels einer Batterie bereitgestellt. Die Brennstoffzelle ist hier geringeren dynamischen Belastungen unterworfen.

## 2.1 Brennstoffzellen-Demonstrationsfahrzeuge

DaimlerChrysler hat mit der NECAR-Flotte eine Reihe von brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen vorgestellt. Dies begann 1994 mit der Vorstellung von NECAR 1, einem „rollenden Brennstoffzellenlabor“ auf Basis des MB 100-Transporters. Das Fahrzeug wurde mit Druckwasserstoff betrieben. Im Jahr 1996 wurde NECAR 2 auf Basis eines Minivans der V-Klasse vorgestellt. Auch dieses Fahrzeug wird mit Druckwasserstoff betrieben, der aus dachmontierten Tanks kommt. Das Fahrzeug bietet Platz für 6 Personen. Ein erstes Fahrzeug mit Methanolreformer wurde mit NECAR 3 im Jahr 1997 vorgestellt. Das Fahrzeug basiert auf der Mercedes A-Klasse. Die Brennstoffzellen befinden sich im Unterbodenbereich. Infolge des noch etwas voluminösen Gasprozessors bietet das Fahrzeug nur zwei Sitzplätze. Ein weiterer Schritt in Richtung eines serientauglichen Fahrzeugs wurde mit NECAR 4 im Jahr 1998 getan. Das Fahrzeug wird mit Flüssigwasserstoff betrieben und basiert ebenfalls auf der Mercedes A-Klasse. Demnächst wird die Vorstellung

von NECAR 5 erwartet, das wiederum mit Methanolreformer ausgestattet sein soll.

Auch andere Firmen haben mittlerweile eine Vielzahl an Demonstrationsfahrzeugen entwickelt. Opel/General Motors zeigte ein Fahrzeug auf Basis des Opel-Zafira, das mit Methanol angetrieben werden kann. Ford hat ein Fahrzeug mit Wasserstoffantrieb (P 2000) vorgestellt. Brennstoffzellenbetriebene Konzeptfahrzeuge werden auch von Renault, VW, Mazda, Nissan und Honda erwartet.

In der Einführungsphase eignen sich Brennstoffzellenantriebe besonders für flottengestützte Fahrzeuge, da so Wasserstoffversorgung und Wartung einfacher zu bewerkstelligen sind. Erste Versuchsbusse, angetrieben von einer phosphorsauren Brennstoffzelle, wurden 1990 und 1998 an der Georgetown University vorgestellt. Die Systemtechnik wurde von H-Power geliefert. In Chicago und Vancouver werden seit 1997 versuchsweise mit PEM-Brennstoffzellen betriebene Linienbusse von Ballard eingesetzt. Es handelt sich hierbei um konvertierte Linienbusse, die normalerweise mit Dieselmotoren angetrieben werden. Ein Demonstrationsbus (NEBUS) wurde 1997 von DaimlerChrysler vorgestellt. Dieser Bus in Niederflurtechnik wird mit speziell entwickelten Radnabenmotoren angetrieben. Vor kurzem wurde ein Mi-di-Bus von der Firma Neoplan in Oberstdorf in Betrieb genommen.

## 2.2 Brennstoffzellen-Hybridfahrzeuge

Ein erstes Versuchsmuster eines brennstoffzellenbetriebenen Hybridfahrzeugs geht bereits auf das Jahr 1966 zurück, als Kordes in einer Austin A-40 Limousine eine 3,5 kWh Bleibatterie mit einer 90 V 6 kW alkalischen Wasserstoff-Luft-Brennstoffzelle verband<sup>2</sup>. Daneben wurde auf der gleichen Basis 1967 ein Motorrad entwickelt, bei dem 40 Ni-Cd Zellen mit zwei 8 V 400 W Hydrazin-Luft-Brennstoffzellen angetrieben wurden. Die Entwicklung dieses Zelltyps wurde, da sich Hydrazin als karzinogen herausstellte, eingestellt.

Auch aktuelle Entwicklungen basieren auf der Hybridtechnologie. Die Fahrzeuge RAV4 Sport-Utility (Toyota) liefern mit einer 10 kW später 25 kW PEMBZ, der Demo FCEV Station Wagon (Mazda) mit einer 25 kW PEMFC und auch der Zafira Minivan (GM/Opel) mit einer 50 kW PEMFC in Kombination mit einer Batterie. Von Chrysler wurde ein Versuchsfahrzeug auf Basis eines Jeep-Commander mit Benzinreformer vorgestellt.

<sup>2</sup> Kordes, K.: Brennstoffbatterien, 1984.

Beide Konzepte konnten also erfolgreich in Fahrzeugen demonstriert werden. Eine Entscheidung, welches Konzept sich letztendlich durchsetzen wird, kann gegenwärtig nicht getroffen werden. Zwar erlaubt die Hybridlösung auch regeneratives Bremsen und ermöglicht somit eine effizientere Brennstoffnutzung. Dies wird allerdings mit einer erheblichen Gewichtszunahme durch die benötigten Batterien erkauft.

Generell erscheint der reine Brennstoffzellenantrieb weniger komplex und somit langfristig kostengünstiger herstellbar zu sein.

### 2.3 Hersteller von PEFC-Stacks

PEFC-Stacks werden mittlerweile von verschiedenen Firmen entwickelt (Tabelle 2-1). Hierunter befinden sich auch verschiedene Kleinunternehmen, vor allem aus den USA. Brennstoffzellenstacks in „Fahrzeuggröße“ sind jedoch keine „marktgängigen“ Produkte.

Die Technologieführerschaft bei Stack- und Systementwicklung kann derzeit dem Ballard/Daimler-Benz-Konsortium zugeschrieben werden.

Siemens hat vor Kurzem ein großes PEFC-System zum Antrieb von U-Booten ausgeliefert. Auf Basis dieser Technologie werden auch verschiedene Demonstrationsvorhaben durchgeführt (Gabelstapler, Bus). Ein neues „light weight-, low cost-“ Konzept wurde vorgestellt.

Tabelle 2-1: Entwickler von PEFC-Stacks (Auswahl)

Name	Standort	Größe	Stackleistung in kW	Technologie
Siemens	Deutschland	IND	~ 34	Metall BPP
Proton Motor	Deutschland	KMU	~ 1 –10	Composit BPP
De Nora	Italien	IND	~ 5 - 10	Metall BPP
Ballard	Canada	IND	25	Graphit BPP
Allied Signal	USA			
General Motors	USA	IND	25	Metall BPP
IFC	USA	IND		
Energy Partners	USA	KMU	~ 10	Composit BPP
Plug Power	USA	KMU	~ 10	
H-Power	USA	KMU	~ 1,5	Metall BPP
American Power	USA	KMU	~ 1,5	
Sanyo	Japan	KMU	~ 1,2	Graphit BPP

## 2.4 Entwickler von Gasprozessoren

Es existieren verschiedene Entwicklungsaktivitäten für Gasprozessoren. Tabelle 2-2 zeigt eine Zusammenstellung verschiedener Entwicklungsprojekte der Industrie und industrienaher Forschungsorganisationen. Die Arbeiten befinden sich im Versuchs- bzw. Prototypenstadium. Gasprozessoren sind bisher nicht industriell verfügbar.

Tabelle 2-2: Entwickler von Gasprozessoren

Hersteller	Methanol	Benzin	Dampfref.	POX	Shift	PROX
A.D. Little	Sekundär	Primär		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Daimler-Crysler	Primär	Sekundär	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>
GM	Primär	Sekundär	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Honda	Primär			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
HBC		Primär		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
IFC	Primär	Sekundär	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Johnson Matthey	Primär	Sekundär	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Mitsubishi	Primär		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Nissan	Primär		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Toyota	Primär		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Wellman CJB	Sekundär	Primär		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Fraunhofer ISE		Primär (Erdgas, Propan)	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
FZ-Jülich	Primär	Sekundär (Propan)	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>

## 2.5 Kostensituation

Zu Beginn der 90er-Jahre wurden PEFCs bestenfalls als „Laborkuriositäten“ betrachtet. Die Zellen und Stacks hatten trotz des Einsatzes beträchtlicher Mengen an Edelmetall (Platinbeladung zwischen  $4 \text{ mg/cm}^2$  und  $8 \text{ mg/cm}^2$ ) und unkonventioneller Konstruktionswerkstoffe geringe Leistungsdichten.

Im vergangenen Jahrzehnt gelang es, den Edelmetallbedarf durch Optimierung von Katalysatoren und Elektrodenmikrostruktur drastisch zu senken. Die heute üblicherweise angebotenen EMEs weisen eine Edelmetallbeladung von  $0,6 \text{ mg/cm}^2$  auf. Zellen mit Edelmetallbeladungen um  $0,1 \text{ mg/cm}^2$  konnten ebenfalls erfolgreich betrieben werden. Neben der Senkung des Edelmetallanteils gelang es, massenfertigungstaugliche Konzepte für eine Stacktech-

nologie zu entwickeln. Die jüngst erfolgte Entwicklung von Multi-Fuel-Prozessoren brachte einen weiteren Schritt hin zu automobiltauglichen Systemen.

Laut Aussagen der Fahrzeugindustrie sind die Kostenziele für fahrzeugtaugliche PEFC-Systeme bei ca. DM 100,- pro kW, dabei entfallen einschließlich Systemkonfektionierung auf Stack, Gasprozessor und Peripherie je ca. 35 DM/kW.

Gegenwärtig werden die Kosten von PEFC-Stacks durch die Materialien bestimmt. Die Preise für PEFC-Stacks liegen derzeit bei ca. 10.000 bis 20.000 DM/kW. Tabelle 2-3 zeigt eine Zusammenstellung der Material- und Herstellungskosten wie sie derzeit am ZSW anfallen. Als Vergleich sind die Zielkosten angegeben, die einer Studie von Kalhammer et al. zu Grunde liegen. Die Autoren dieser Studie kommen zu dem Schluss, dass, basierend auf den Angaben der befragten Unternehmen, Stackkosten von weniger als DM 100/kW bei Massenfertigung erreichbar sein werden.

Die Kostensituation für Gasprozessoren und sonstige Peripherieaggregate wie Luftverdichter ist weniger übersichtlich. Die Erreichbarkeit der Kostenziele ist mit größeren Unsicherheiten behaftet.

Tabelle 2-3: Material- und Herstellungskosten für PEFC-Stacks

	Heute (Hochgerechnet aus ZSW- Kleinstacks)	Ziel (s. Kahlhammer et al.)
Leistungsdichte	0,3 W/cm <sup>2</sup>	1 W/cm <sup>2</sup>
MEA	5.200 DM/kW	<17 DM/kW
Bipolarplatten (Material)	2.500 DM/kW	<9 DM/kW
Bipolarplatten (Bearbeitung)	1.000 DM/kW	Integriert in BPP-Kosten
Gasdiffusionsschichten	1.000 DM/kW	Integriert in MEA
Endplatten, Kleinteile	800 DM/kW	?
Dichtungen	1.000 DM/kW	Integriert in BPP
Montage/Test	2.400 DM/kW	<9 DM/kW
Gesamt	13.900 DM/kW	< 35 DM/kW

## 2.6 Betriebserfahrungen

Verschiedene Hersteller berichten über den Langzeitbetrieb von Brennstoffzellensystemen in der Literatur. Für phosphorsaure Brennstoffzellensysteme sind Betriebszeiten von über 40.000 Stunden nachgewiesen. Ergebnisse unabhängiger Lebensdauerests für die PEFC sind infolge der rasanten Technologieentwicklung gegenwärtig nur begrenzt verfügbar.

Im Folgenden sind einige Erfahrungen zusammengefasst, die beim Betrieb von PEFCs am ZSW gesammelt wurden.

### CO-Toleranz

PEFCs benötigen zum Betrieb hinreichend sauberen (CO-freien) Wasserstoff. Die CO-Empfindlichkeit des PEFC-Stacks kann durch Dosage einer geringen Menge an Luft bzw.  $H_2O_2$  zum Anodengas gesenkt werden. Hohe CO-Gehalte führen zu Oszillationen der Zellspannung unter Last. Wird die Brennstoffzelle versehentlich mit hohen CO-Gehalten belastet, so ist die resultierende Vergiftung in der Regel reversibel.

### Befeuchtung

Die Leitfähigkeit der Elektrolytmembran ist stark von deren Wassergehalt abhängig. Der Wasserhaushalt innerhalb der Elektrolytmembran ist ein komplexer Vorgang, der vom Feuchtigkeitsgehalt der Betriebsgase, den Druck- und Temperaturverhältnissen sowie der Produktwasserbildung abhängt.

Bei hohen Temperaturen oder bei der Passage trockener Gase mit hohen Durchsätzen verliert die Membran an Feuchtigkeit. Dies kann im Extremfall zu punktförmigen Austrocknungen führen. An diesen Stellen bilden sich sogenannte „Hot-Spots“, die im Extremfall zur Ausbildung von Löchern in der Membran führen können.

Beim Betrieb der PEFC muss somit auf angemessene Befeuchtung der Gase geachtet werden. Eine vollständige Rehydratisierung ausgetrockneter Membranen im Betrieb kann nicht gewährleistet werden.

### Gasversorgung

Die Einzelzellen in einem PEFC-Stack sind gasseitig parallel geschaltet. Tritt infolge verstopfter Gaskanäle oder unangemessener Gasversorgung eine Unterversorgung einzelner Zellen mit Wasserstoff ein, so kann eine Verpolung dieser Zellen eintreten, wodurch die Zellen in den „Elektrolysebetrieb“ gezwungen werden. Dies hat in der Regel irreversible Schädigungen der Katalysatorschicht der MEA zur Folge.

### **Wartung und Instandhaltung**

Der PEFC-Stack enthält in der Regel keine durch den Betreiber wartungsfähigen Teile. Bei Ausfällen einzelner Zellen bzw. Leckagen von Gasen bzw. Kühlflüssigkeiten muss daher der Hersteller hinzugezogen werden. Da für PEFC-Systeme gegenwärtig nur einige wenige veröffentlichte Betriebsdaten vorliegen, können keine gesicherten Aussagen über die Zuverlässigkeit und den Wartungsaufwand von PEFC-Stacks getroffen werden.

Für PAFC-Systeme im stationären Einsatz liegen detaillierte Daten über Ausfälle vor. PAFC-Anlagen zeichnen sich durch hohe Verfügbarkeiten von ca. 90 Prozent aus. Bei der Analyse der Ausfallursachen zeigt sich, dass die meisten Ausfälle in den „konventionellen“ Anlagenteilen (Gasprozessor, Wasserbehandlungssystem etc.) zu suchen sind. Ähnliche Verhältnisse können auch für PEFC-Systeme erwartet werden.

## 3 Einsatzmöglichkeiten von Brennstoffzellen im automobilen Umfeld

Im Fahrzeugbereich ist die Anwendung der Brennstoffzelle nicht nur auf den Antrieb fixiert. Für die folgenden Fälle wäre ein Einsatz von Brennstoffzellen im Fahrzeug möglich:

- BZ als direkter Fahrzeugantrieb
- BZ im Hybridfahrzeugantrieb (BZ als Reichweitenextender)
- BZ als Bordnetzversorger
- BZ als erweiterter Bordnetzversorger (z. B. für Campingbereich)
- BZ als Ruhestromkompensator

Diese Anwendungen unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich des Leistungsbereichs und auch der geforderten Dynamik (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Leistung und Dynamik unterschiedlicher BZ-Anwendungen

Anwendungen	Leistung	Dynamik
Fahrzeugantrieb	> 50 kW	Hoch
Hybrid – Reichweitenextender	10 kW	Niedrig
Bordnetzversorgung	3-5 kW	Mittel-Hoch
Erweiterte Bordnetzversorgung	500 W	Mittel-Hoch
Ruhestromkompensation	1 W	Niedrig

Die geforderte Dynamik beeinflusst entscheidend die Wahl des Brennstoffzellensystems. Eine hohe Dynamik können vor allem Niedertemperatursysteme gewähren. Bei Hochtemperatursystemen kommt es durch die mit den Leistungsschwankungen verbundenen hohen Temperaturschwankungen zu Einbußen in der Lebensdauer.

Die weniger dynamischen Hochtemperatursysteme haben aber den Vorteil, dass Kohlenwasserstoffe direkt als Brennstoff genutzt werden können. So ist die Verwendung von Benzin oder Diesel als Brennstoff prinzipiell denkbar.

Neben dem direkten Fahrzeugantrieb eröffnen sich für Brennstoffzellen weitere Einsatzfelder im Fahrzeug. In jüngster Zeit nimmt der elektrische Leistungsbedarf von Fahrzeugen infolge des zunehmenden Einsatzes elektrischer Geräte stetig zu. Dies hat bei heute üblichen Fahrzeugen erhebliche Verluste durch die riemengetriebene Lichtmaschine zur Folge. Neuere Entwicklungen deuten auf eine weitere Erhöhung des elektrischen Leistungsbedarfs durch sogenannte „by wire-Lösungen“ auch bei Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschinen hin. Hierbei werden Lenkung (steer by wire) bzw. Bremsen (brake by wire) durch elektrisch betriebene Aggregate unterstützt. Zur Minimierung der elektrischen Verluste wird eine Erhöhung der Bordnetzspannung erforderlich sein. Brennstoffzellen als „eingebautes“ leistungsfähiges Kraftwerk können den Einsatz solcher „by wire-Lösungen“ begünstigen.

Ein weiteres Einsatzfeld eröffnet sich durch die Möglichkeit des Einsatzes elektrisch betriebener Klimaanlage. Diese Klimaanlage könnten außerhalb des Motorraums positioniert werden, wodurch eine Verringerung der Leistungsaufnahme erreicht werden kann.

### 3.1 Brennstoffzellen als Antrieb

In Abbildung 3-1 ist der Wirkungsgradverlauf verschiedener Kfz-Antriebe (Golf-Klasse) dargestellt. Die Kurven für Verbrennungsmotoren orientieren sich am gegenwärtigen Stand der Technik.

Man erkennt, dass Brennstoffzellenantriebssysteme besonders effizient bei Teil-Last arbeiten. Beim Betrieb unter Voll-Last sind unter Umständen nur geringere Wirkungsgrade als bei Verbrennungskraftmaschinen erzielbar.

Die Emissionen klassischer Luftschadstoffe, die durch brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge verursacht werden, sind auch unter Einschluss des Gasprozessors deutlich geringer als die von Verbrennungskraftmaschinen. Sie unterschreiten selbst die nach der EURO 4-Norm zulässigen Werte<sup>3</sup>.

Betrachtet man die Effizienz und Emissionen, so eignen sich Brennstoffzellenfahrzeuge bevorzugt für den Einsatz unter Teillast in belasteter Umgebung (z. B. Stadtverkehr). Wird das Fahrzeug bevorzugt unter Nennlast betrieben (z. B. Autobahnfahrt), so schwinden die Vorteile des Brennstoffzellensystems.

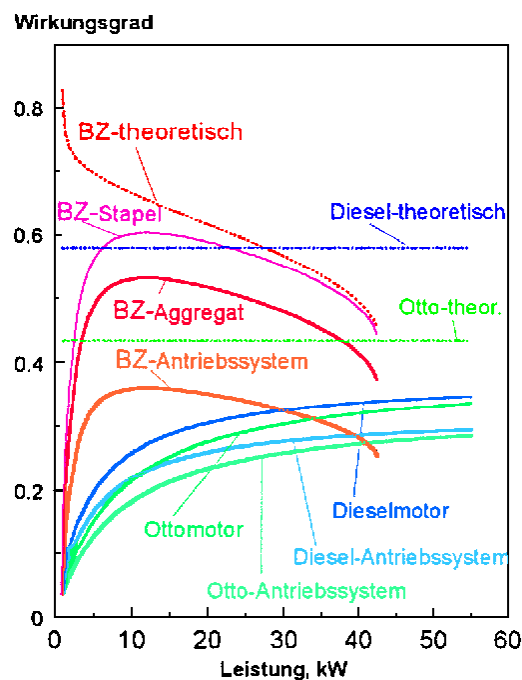


Abbildung 3-1: Wirkungsgradverlauf bei Antrieben mit Verbrennungsmotoren bzw. Brennstoffzellen (siehe Fußnote 3)

<sup>3</sup> Carpetis, C.: Energie- und Schadstoffbilanzen von Elektrofahrzeugen mit Batterien und/oder Brennstoffzellen-Antrieben im Vergleich zu Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor, 1997.  
Kolke, R.: Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastung, 1999.

Bilanziert man den kumulierten Energieaufwand verschiedener Energieumwandlungsketten (well to wheel efficiency), so schneidet das mit Druckwasserstoff betriebene Brennstoffzellenfahrzeug am günstigsten ab<sup>4</sup>.

Eine spezielle Form der mobilen Energieversorgung mit Brennstoffzellen stellt der Range-Extender in Elektrofahrzeugen dar. Ein solches Stromquellenhybrid besteht aus einem batteriegetriebenen Elektrofahrzeug, dessen Akkumulator ständig durch eine unter optimalen Bedingungen arbeitende Brennstoffzelle aufgeladen wird.

Prinzipiell bestehen bei der Einführung dieses Hybrids die gleichen Probleme wie beim reinen BZ-Fahrzeug. Auf Grund der teilweise kleineren Leistungen wird die Verwendung von Kleinstreformern, die ungünstige Wirkungsgrade durch ein geringes Verhältnis von Reformervolumen zu -oberfläche aufweisen, recht problematisch. Daher bietet sich die Verwendung von Wasserstoffspeichern, z. B. Hydridwasserstoff an.

### 3.2 Bordnetzversorgung

Die Forderungen an das Bordnetz werden auf Grund zunehmender Verbraucher und auch zunehmender Leistungen von Einzelverbrauchern (z. B. Scheibenheizung, Sitzheizung usw.) immer höher. Zwei Tendenzen werden in diesem Zusammenhang sichtbar:

- Minimierung der Verluste durch Übergang zum 42 V-Bordnetz
- Erhöhung des Wirkungsgrades der Elektroenergieerzeugung auf ca. 40 Prozent durch Verwendung einer Brennstoffzelle. Konventionell liegt man durch die Kombination von Verbrennungsmotor und Lichtmaschine bei nur ca. 15 Prozent.

Auch hier bietet sich auf Grund der hohen Dynamik und der Möglichkeit des Anfahrens bei Raumtemperatur die PEFC an. Die geringe Leistung (3-5 kW) der Anwendung schränkt auch hier die Verwendung von Reformern zur Wasserstofferzeugung ein. Man wird daher auch in diesem Fall auf Wasserstoffspeicherung zurückgreifen müssen. Erste Erfahrungen dazu liegen bei BMW und DaimlerChrysler vor. DaimlerChrysler nutzt eine 3,2 kW PEFC und einen Metallhydridwasserstoffspeicher, der 18 kWh pro Füllung liefern kann.

Um diesen logistisch nicht einfachen Weg der Wasserstoffspeicher zu umgehen, setzt BMW in einer Weiterentwicklung auf die Hochtemperaturbrenn-

<sup>4</sup> FVV-Brennstoffzellen-Studie, 1998.

stoffzelle (SOFC). Damit kann Benzin direkt als Brennstoff ohne Reformierung verwendet werden. Durch die relativ geringe Leistung dieser Anwendung sind die auftretenden Wärmeverluste jedoch relativ gering. Den Nachteil einer geringen Dynamik und langer Anfahrzeiten der Brennstoffzelle wird man durch eine weitgehend permanente Grundlastfahrweise und Leistungsspitzenabpufferung mit Batterien umgehen. In Stillstandszeiten besteht zumindest theoretisch die Möglichkeit der Einspeisung in ein Elektronenenergie- und Wärmeenergienetz.

Bei Geländefahrzeugen und auch Lkws besteht zusätzlich zur konventionellen Bordnetzversorgung z.T. ein erheblicher Key-off-Verbrauch, im Camping- und Fahrerbereich durch den Betrieb von Fernsehern, kleinen Küchengeräten, Kleinkühlschränken usw.

Ein längerer Betrieb dieser Zusatzgeräte über die Bordnetzatterie führt zu deren totaler Entladung. Brennstoffzellen mit einer Leistung bis ca. 500 W können über einen längeren Zeitraum solche Zusatzversorgung übernehmen.

Auch hierfür bietet sich die PEFC mit einer Wasserstoffversorgung an. Eine solche Anlage könnte portabel als herausnehmbarer Block oder in die Konstruktion des Fahrzeugs integriert eingesetzt werden.

Bei Fahrzeugen ab dem oberen Mittelklassenbereich beträgt der Verbrauch der fahrzeuginternen Key-off-Verbraucher etwa 1 W, d. h. am Tage 24 Wh. Damit wäre eine 12 V 75 Ah-Batterie nach einem guten Monat vollständig entladen. Darüber hinaus führt dieser kleine Entladestrom zur Sulfatierung und Passivierung der Batterie. Dies bringt vor allem bei langer Lagerhaltung und bei Übersee-Exporten Probleme.

Für den Anwendungsfall der Ruhestromkompensation ist die Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC) sehr geeignet. Neben dem Betrieb bei Normaltemperatur kann man als Brennstoff flüssiges Methanol einsetzen, das direkt an der Anode, d. h. ohne Reformier umgesetzt werden kann. Jedoch sind die spezifischen Leistungen der DMFC zurzeit wesentlich geringer als die einer H<sub>2</sub>-PEFC. Gründe sind die Vergiftung der Anode durch Zwischenprodukte der Methanoloxidation, ein Methanoltransfer durch den Separator zur Kathode, der den Stromwirkungsgrad senkt und eine Verringerung der Kathodenspannung durch Mischpotentialbildung infolge der Oxidation des transferierten Methanol.

Trotz der geringeren spezifischen Leistung (W/cm<sup>2</sup>) der DMFC bietet sich auf Grund der einfachen Infrastruktur der Brennstoffbereitstellung ihr Einsatz für diesen Anwendungsfall an.

### 3.3 Konkurrierende Technologien

Heutige **Verbrennungsmotoren** haben trotz ihrer über 100-jährigen industriellen Entwicklungsgeschichte noch Verbesserungspotential bezüglich Effizienz und Schadstoffemissionen. Dies kann unter anderem durch neue Motortechnologien, wie variable Ventilsteuerung, Zylinderabschaltung, Hochaufladung oder Kraftstoff-Direkteinspritzung erfolgen. Um den Betrieb des Motors bei allen Fahrzeuggeschwindigkeiten nahe am Bestpunkt zu gewährleisten, kann ein stufenloses Getriebe eingesetzt werden. Ferner kann der Kraftstoffbedarf heutiger Fahrzeuge durch Gewichtsreduktion weiter gesenkt werden. Die notwendige zusätzliche elektrische Energie soll ein effizienter „Kurbelwellen-Startergenerator“ bereitstellen.

Einer Analyse des Umwelt-Bundesamtes zufolge können Verbrennungsmotoren einen Wirkungsgrad bis zu 31 Prozent erreichen. Dem wird ein Wirkungsgrad des Brennstoffzellenantriebs von 35 Prozent gegenübergestellt<sup>5</sup>.

Die Entwicklung von **Elektrofahrzeugen** wurde durch die „Zero-Emissions-Gesetzgebung“ in Kalifornien erheblich gefördert. Das California Air Resources Board (CARB) gibt alljährlich eine Liste verfügbarer Fahrzeuge heraus, die den verschiedenen Emissionsklassifikationen entsprechen<sup>6</sup>. Gegenwärtig sind batteriebetriebene Elektrofahrzeuge die einzigen kommerziell verfügbaren Null-Emissions-Fahrzeuge (ZEV).

Ein Haupthindernis, das einer breiten Markteinführung von Elektrofahrzeugen entgegensteht, ist die begrenzte Kapazität der für Traktionszwecke zur Verfügung stehenden Akkumulatoren.

Klassische Bleiakkumulatoren erlauben eine Fahrzeugreichweite von ca. 60 km. Höhere Reichweiten (ca. 100 – 140 km) können mit alkalischen Akkumulatoren (Ni-Cd bzw. Ni-Metallhydrid) erreicht werden. Diese Systeme sind jedoch gegenwärtig nur zu sehr hohen Kosten erhältlich.

Fortgeschrittene Akkumulatoren wie die Lithium-Ionenbatterie oder die Hochtemperatur-Natrium-Nickelchloridbatterie (ZEBRA) würden zwar eine Fahrzeugreichweite von ca. 200 km ermöglichen, sie sind aber kommerziell nicht verfügbar. Die Entwicklung der ZEBRA-Batterie wurde Ende 1998 eingestellt. Lithium Ionenbatterien sind derzeit nur als Prototypen erhältlich.

Trotz beträchtlicher Fortschritte bei der Entwicklung von Hochenergiebatterien und batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen ist in naher Zukunft nicht mit

<sup>5</sup> Kolke, R.: Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastung, 1999.

<sup>6</sup> <http://www.arb.ca.gov/msprog/ccbg/ccbg.htm>

einer breiten Markteinführung zur rechnen. Ein signifikanter Markt für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge kann sich voraussichtlich nur durch einen gesetzgeberischen Eingriff entwickeln<sup>7</sup>.

Die Kombination von Elektroantrieb und Verbrennungsmotor **Hybridfahrzeuge** vermeidet den Nachteil geringer Reichweite von batteriegetriebenen Elektrofahrzeugen. Eine Reihe solcher Fahrzeuge wurde bereits vorgestellt (z. B. Audi Duo, Toyota Prius). Diese Fahrzeuge zeichnen sich durch verringerten Treibstoffverbrauch aus. Bei Bedarf kann auch komplett emissionsfrei im elektrischen Modus gefahren werden. Dafür müssen ein erhöhtes Fahrzeuggewicht und ein komplexeres System in Kauf genommen werden.

### 3.4 Technischer Stand, Kosten und Marktchancen

Die technische Machbarkeit der Anwendung von Brennstoffzellen in Kraftfahrzeugen wurde bereits erfolgreich demonstriert. Sicherlich waren und sind auch in Zukunft im technischen Bereich nicht nur unerhebliche Schwierigkeiten zu überwinden.

Der entscheidende Faktor für die Markteinführung sind jedoch die Kosten, wobei diese natürlich immer auch ein Spiegelbild der technischen Schwierigkeiten darstellen. Die vom Markt akzeptierten Kosten richten sich in der Regel an den Kosten der Wettbewerbstechnologien aus. Da diese in unterschiedlichen Anwendungsbereichen unterschiedlich sind, werden es auch die akzeptierten Kosten der Brennstoffzellensysteme sein. Abbildung 3-2 gibt dazu einen generellen Überblick.

Für die PEM-Brennstoffzellentechnologie kann man heute im kW-Maßstab von etwa 10.000 DM/kW<sub>el</sub> ausgehen. Um im Fahrzeugantrieb mit konventionellen Verbrennungstechnologien im PKW-Bereich wettbewerbsfähig zu werden, liegen die Zielkosten bei < 100 DM/kW<sub>el</sub>.

<sup>7</sup> Atkin, G.; Storey, J.: Electric and hybrid vehicle technology, 1998.

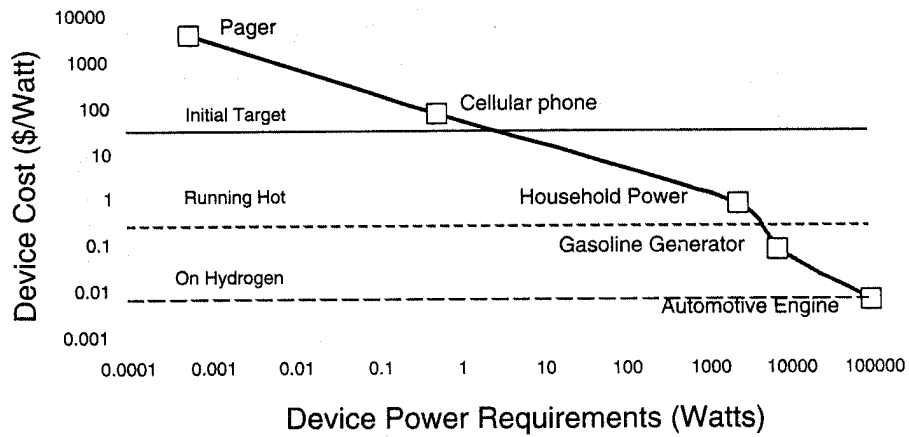


Abbildung 3-2: Akzeptierte Kosten für verschiedene Brennstoffzellenanwendungen (Hockaday, R.; Navas, C.: Fuel Cells Bulletin No. 10, 1999)

Die größten Kostenreduktionspotentiale (siehe Abbildung 3-3) liegen im Bereich der Materialentwicklung. Konkret heißt das für die PEM-Brennstoffzelle:

- weitere Senkung des spezifischen Platingehalts (g Pt/kW<sub>el</sub>)
- weitere Senkung der PEM-Membrankosten
- weitere Senkung der Bipolarplattenkosten

ohne Qualitätsreduzierung. Auch im Designbereich gibt es noch erhebliche Reserven.

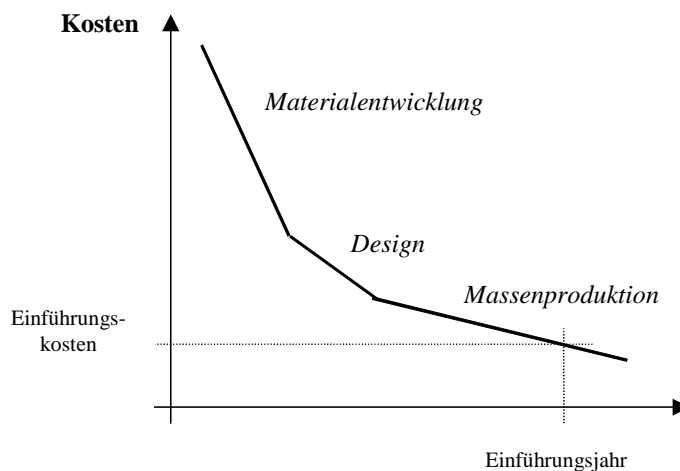


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung der Kostenentwicklung im zeitlichen Ablauf

Der Anteil der Massenproduktion am Kostenreduktionspotential tritt wahrscheinlich gegenüber der Materialentwicklung und dem Design etwas zurück.

Als Einführungstermin für BZ-Pkw werden je nach Unternehmen die Jahre 2003-2005 angegeben. Diese Einführungsjahre sind aber nicht gleichzusetzen mit einer kostendeckenden Produktion. Mit Sicherheit werden in diesem Zeitraum (2003-2005) auch die ersten PEFC-Pilotfahrzeuge gebaut werden. Inwieweit dann größere Serien in den Markt eingeführt werden können, hängt von der weiteren Kostenentwicklung und vor allem von der Brennstoff-Infrastruktur ab. Daher ist es begrüßenswert, dass alle größeren Automobilfirmen, die an der BZ-Fahrzeugentwicklung beteiligt sind, auch frühzeitig die Kooperation mit den Ölkonzernen suchen. Da bei Bussen die kritischen Kosten im Bereich von ca. 800 DM/kW liegen, wäre eine Einführung von BZ-Bussen u.U. schon vor dem BZ-Pkw denkbar.

Wie schnell die angeführten Potentiale realisiert werden können, hängt entscheidend auch von den aufgewendeten finanziellen Mitteln ab. Diese Mittel sind im Vergleich zu den in der gesamten BZ-Historie aufgewendeten gewaltig. Allein die Allianz Ballard/DaimlerChrysler/Ford stellt geschätzte 3,7 Mrd. DM zur Verfügung<sup>8</sup>. Zum ersten Mal steht auf dem 160 Jahre langen Weg der Brennstoffzelle eine Industrie hinter den Entwicklungen.

Wahrscheinlich wird sich aber im Sog der Anstrengungen im mobilen Bereich sogar eher die stationäre Anwendung am Markt durchsetzen können, denn für die Kraft-Wärmekopplung liegen die akzeptablen Kosten bei 1.000-2.000 DM/kW<sub>el</sub><sup>9</sup>.

Es soll auch nicht verschwiegen werden, dass es Gruppen gibt, die der Entwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen eher pessimistisch gegenüberstehen<sup>10</sup>, da die mit Brennstoffzellensystemen anvisierten Ziele der Emissionsminderungen und Ressourcenschonungen wesentlich kostengünstiger durch verbrauchsoptimierte Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren realisiert werden könnten. Das trifft heute mit Sicherheit noch zu. Leider wird das gewaltige Entwicklungspotential der erst am Anfang stehenden Brennstoffzellentechnologie bei diesen Betrachtungen nicht berücksichtigt.

<sup>8</sup> Maruo, K.: KFB-Report, 1998.

<sup>9</sup> Jörisen, L.; Garche, J.; Rohland, B.; Dienhart, H.; Heinzl, A.; Bünger, U.: Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung – eine Energieoption für die Zukunft?, 1998.

<sup>10</sup> Kolke, R.: Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastung, 1999.

Kolke, R.; Troge, A.: Brennstoffzellen für den Straßenverkehr, 1999.

## 4 Literatur

- Atkin, G.; Storey, J.: Electric and hybrid vehicle technology 98, 34, 1998
- Carpetis, C.: Energie- und Schadstoffbilanzen von Elektrofahrzeugen mit Batterien und/oder Brennstoffzellen-Antrieben im Vergleich zu Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor, DLR-97 44417 IB 404 STB-Bericht Nr. 16, 1997
- FVV-Brennstoffzellen-Studie, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Heft 657, Frankfurt 1998
- Hockaday, R.; Navas, C.: Fuel Cells Bulletin No. 10, S. 9, 1999  
<http://www.arb.ca.gov/msprog/ccbg/ccbg.htm>
- Jörissen, L.; Garche, J.; Rohland, B.; Dienhart, H.; Heinzl, A.; Bünger, U.: Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung – Eine Energieoption für die Zukunft?, Themenhefte Forschungsverbund Sonnenenergie, 1998
- Kahlhammer, F.; Prokopius, P.R.; Roan, V.P.; Voecks, G.E.: Status and Prospects of Fuel Cells as Automobile Engines, Report prepared for the California Air Resources Board, July 1998
- Kolke, R.: Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastung, Brennstoffzellenfahrzeuge Umweltbundesamt, 1999
- Kolke, R.; Troge, A.: Brennstoffzellen für den Straßenverkehr – Eine Kosten-Nutzen-Betrachtung aus Umweltsicht. ZfAW 1/99, S. 68, 1999
- Kordes, K.: Brennstoffbatterien, Springer-Verlag, Wien, New York, 1984
- Maruo, K.: KFB-Report 1998-37, ISBN: 91.88371-11-5, siehe auch <http://www.h2forum.org/reports/alliances.html> und <http://www.kfb.se>



## Einflussfaktoren und Szenarien der Diffusion

### Kapitel 3

Bearbeiter: Elna Schirrmeister, ISI  
Wilhelm Mannsbart, ISI  
Frank Marscheider-Weidemann, ISI

### Inhalt

<b>1</b>	<b>Ausgangssituation</b>	<b>51</b>
1.1	Politische Rahmenbedingungen für Brennstoffzellenfahrzeuge	52
1.2	Einflußfaktoren und Szenarienentwicklung	56
<b>2</b>	<b>Szenarien „Durchbruch im In- oder Ausland“</b>	<b>61</b>
<b>3</b>	<b>Szenario „Konkurrenz“</b>	<b>64</b>
<b>4</b>	<b>Literatur</b>	<b>66</b>
<b>5</b>	<b>Anhang:</b> Brennstoffzellenstrategien ausgewählter Automobilhersteller (Stand 1999)	<b>68</b>

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1-1:	Standards („low emission standards“) für Personenkraftwagen und leichte und mittelschwere Lkw in Kalifornien (Gesamtfahrleistung 50.000 Meilen bzw. 120.000 Meilen)	53
Tabelle 2-1:	Annahmen zu den Szenarien	60

## Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1-1:	Brennstoffzellenstrategien ausgewählter Automobilhersteller	52
Abbildung 1-2:	Vorgeschriebene Mindestanteile der „Low emission“- Fahrzeuge bei den Neuzulassungen in Kalifornien in Prozent (Quelle: Kolke/Troge, 1999)	54
Abbildung 2-1:	Wirkung der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Marktdurchdringung von Pkw mit Brennstoffzellen- Antrieb	59

## 1 Ausgangssituation

Die im Vergleich zu Verbrennungsmotoren deutlich niedrigeren (angestrebten) Schadstoffemissionen der Brennstoffzellen (BZ) im Fahrzeug dürften infolge der Umweltbelastungen in großen Ballungszentren in weniger als zehn Jahren das Zeitalter der brennstoffzellengetriebenen Straßenfahrzeuge einläuten. Während vor wenigen Jahren das Brennstoffzellen-Auto als eine technisch und ökonomisch kaum realisierbare Innovation betrachtet wurde, wurden in den letzten Jahren Forschung und Entwicklung sehr stark intensiviert und auch mit sichtbarem Erfolg betrieben. Die im globalen Wettbewerb stehenden Automobilkonzerne forschen alleine oder in strategischen Kooperationen oder Allianzen, vergleiche Abbildung 1-1. Ziel der Anstrengungen ist ein baldiger Masseneinsatz insbesondere der Polymermembran-Brennstoffzelle (PEFC) als Fahrzeugantrieb im Alltag. Nach dem gegenwärtigen technologischen Stand (siehe Kapitel 2) ist – zumindest als Zwischenschritt – die Reformierung des Wasserstoffs an Bord gegenüber dem direkten Wasserstofftank der wahrscheinlichere Pfad. Er steht deshalb in dieser Studie auch im Vordergrund.

Dabei werden verschiedene Konzepte verfolgt, z. B. der **Wasserdampf-Reformer** (Beispiel: DaimlerChrysler), der Methanol oder komprimiertes Erdgas verarbeitet, oder der **POX-Multifuel-Reformer** (partial oxidation; zurzeit als Laborversion), der mit beliebigen Kohlenwasserstoffen, d. h. Benzin und Diesel, Erdgas oder Ethanol etc. laufen kann (Forschungsprogramm des U.S. Department of Energy, Arthur D. Little, Plug Power, Los Alamos National Laboratory). Die Nutzung der **bestehenden Infrastruktur** für Kraftstoffe steht dabei im Vordergrund.

Das zuerst genannte Konzept hat nicht zuletzt eine **dauerhaft gesicherte Versorgung mit Kraftstoffen** im Auge. Hinzu käme eine deutliche Verringerung des Anstiegs der CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Erdatmosphäre (gegenüber **herkömmlichen** Benzin- oder Dieselmotoren pro gefahrenem km mindestens 30 Prozent Reduktion). Die Erzeugung von Methanol aus kohlenstoffhaltiger Biomasse wäre sogar CO<sub>2</sub>-neutral. Stickoxide würden überhaupt nicht entstehen. Geringere Lärmemissionen sind bei Brennstoffzellen-Pkw in Gebieten mit niedrigen Höchstgeschwindigkeiten erreichbar, weil die Geräuschentwicklung der Elektromotoren immer unterhalb der Roll- und Fahrtwindgeräusche liegt.

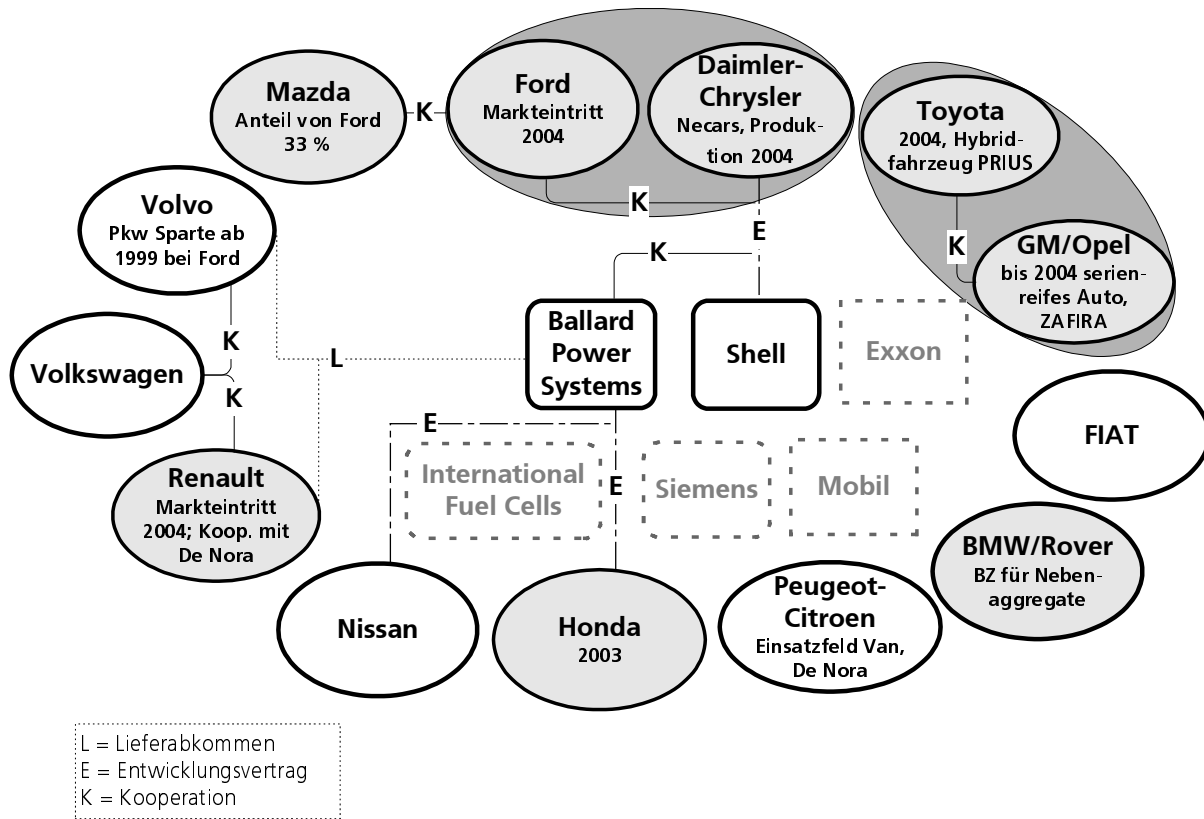


Abbildung 1-1: Brennstoffzellenstrategien ausgewählter Automobilhersteller

## 1.1 Politische Rahmenbedingungen für Brennstoffzellenfahrzeuge

Gerade die **künftige Emissionsgesetzgebung**, insbesondere zur Vermeidung von verkehrsbedingten Smog-Wetterlagen in **Ballungsgebieten**, spielt bei den Motiven der Automobilhersteller eine große Rolle. Die hohen Stickoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen waren zum Beispiel 1990 in Kalifornien (seit 1963 „California Clean Air Act“ und seitdem mehrere Verschärfungen in sogenannten amendments) der Anlass zum „California Low Emission Vehicle Program“, d. h. zur schrittweisen Einführung emissionsarmer Antriebe für **Teile des Neuwagenmarktes**. Dieser Ansatz dürfte weltweit Schrittmacher im Falle der ökologischen Verbesserung der Fahrzeug- und Betankungstechnik sein, wie dies Anfang der 80er-Jahre auch für die Katalysator-technik der Fall war. Da eine Festlegung des Gesetzgebers auf neue Antriebslösungen nicht erfolgte, sind auch neue, innovative Konzepte, wie z. B. Brennstoffzellen, möglich.

Tabelle 1-1: Standards („low emission standards“) für Personenkraftwagen und leichte und mittelschwere Lkw in Kalifornien (Gesamtfahrleistung 50.000 Meilen bzw. 120.000 Meilen)

Emissionen	NMOG (NMVOC) (g/Meile)	CO (g/Meile)	NO <sub>x</sub> (g/Meile)	PM (nur Diesel)
Kalifornien 1998	0,25	3,4	0,4	
Transitional Low Emission Vehicle (TLEV)	0,125 / 0,156	3,4 / 4,2	0,4 / 0,6	0,04
Low Emission Vehicle (LEV)	0,075 / 0,090	3,4 / 4,2	0,05 / 0,07	0,01
Ultra Low Emission Vehicle (ULEV)	0,04 / 0,055	1,7 / 2,1	0,05 / 0,07	0,01
Super Ultra Low Emission Vehicle (SULEV)	0,010	1,0	0,02	0,01
Zero Emission Vehicle (ZEV)	0	0	0	0

NMVOC = Non Methane Volatile Organic Compounds  
 Quelle: [www.arb.ca.gov/msprog/levii/overview.htm](http://www.arb.ca.gov/msprog/levii/overview.htm); 30.06.1999, California Air Resources Board

Nach dem vom California Air Resources Board (ARB) eingeführten Programm sollen bis 2004 (ursprünglich 1998 auf Basis batteriegetriebener Elektroautos) die durchschnittlichen „Nicht-Methan-Kohlenwasserstoff-Emissionen“ aller Pkw inklusive derjenigen von leichten und mittelschweren Lkw um rund 50 Prozent gesenkt werden (Tabelle 1-1). Durch die Einführung von Emissionsstandards im Neuwagengeschäft sollen die großen Autofirmen bewegt werden, einen progressiv steigenden Mindestanteil an emissionsarmen Fahrzeugen auf den Markt zu bringen.

Um in absehbarer Zeit in Kalifornien überhaupt ohne Strafge­lder Automobile mit Verbrennungsmotoren verkaufen zu können, ist somit auch eine Quote emissionsfreier Fahrzeuge anzubieten („Zero emission vehicles“ (ZEV); siehe Abbildung 1-2: 10 Prozent im Jahr 2003). Aktuelle Vorschläge sehen eine teilweise Anrechnung auf diesen Prozentsatz von Fahrzeugen vor, die zu der Kategorie der SULEV zählen, wie z. B. Brennstoffzellen-Fahrzeuge mit Methanol-Reformer. Diese Anrechnung soll das Marktvolumen der Fahrzeuge dieser Kategorie vergrößern, um economies of scale bei der Produktion dieser Fahrzeuge mit neuen Antriebskonzepten erreichen zu können. Beim Kauf eines „low-“(LEV), „ultra-low-(ULEV)“ oder „super-ultra-low-emission vehicles (SULEV)“ wird von der California Energy Commission (CEC) ein Zuschuss gewährt. Daneben können 55 Prozent der entstehenden Zusatzkosten steuerlich gutgeschrieben werden. Weitere Fördermöglichkeiten werden auf lokaler Ebene angeboten (Kolke, 1999).

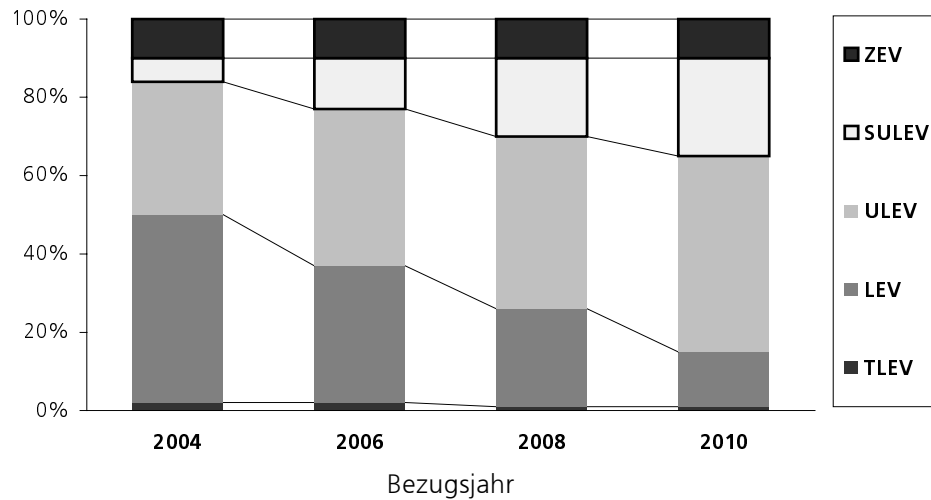


Abbildung 1-2: Vorgeschriebene Mindestanteile der „Low emission“-Fahrzeuge bei den Neuzulassungen in Kalifornien in Prozent (Quelle: Kolke/Troge, 1999)

Im April 1999 wurde die **California Fuel Cell Partnership** (kalifornische Partnerschaft für Brennstoffzellenfahrzeuge) gegründet. Bis zum Jahr 2001 soll die Praxistauglichkeit von Brennstoffzellenfahrzeugen untersucht werden. Die Unterstützung sowohl der Regierung als auch der Kraftstoffindustrie wird als wichtige Voraussetzung betrachtet (siehe auch <http://www.drivingthefuture.org/>).

Beteiligt sind neben dem „California Air Resources Board“ und der „California Energy Commission“ auch der Brennstoffzellenhersteller Ballard Power Systems, die Automobilhersteller DaimlerChrysler und Ford Motor Company sowie die Mineralölunternehmen ARCO, Shell und Texaco. Weitere Automobilhersteller und Energielieferanten wurden aufgefordert, sich diesem Vorhaben anzuschließen. Zuletzt (Oktober 1999) sind Honda und Volkswagen dazugestoßen.

Bis zum Jahre 2001 plant DaimlerChrysler den Test von fünf Brennstoffzellenfahrzeugen in Kalifornien. Zwischen 2000 und 2003 sollen rund 50 Brennstoffzellen-Pkw und -Busse in Betrieb genommen werden. Von den beiden zuerst beteiligten Automobilfirmen sollen jeweils 15 Brennstoffzellenautos bereitgestellt werden. Im Falle des Tests der rund 20 Brennstoffzellenbusse ist eine Kooperation mit kalifornischen Verkehrsbetrieben geplant.

Daneben sollen unter alltäglichen Betriebsbedingungen Fragen der Kraftstoffinfrastruktur einer Klärung nähergebracht werden (Wasserstoff, Methanol „und möglicherweise eine umweltfreundlichere Form von Benzin“) und ein Ansatz erarbeitet werden, den kalifornischen Markt auf die neue An-

triebstechnologie vorzubereiten (Wasserstoff-Gazette II/99, Stromthemen 6/99).

Aus der Sicht der Automobilhersteller ist die Definition künftiger Absatzmärkte von besonderer Bedeutung. Dabei kann der Gesetzgeber in **Kalifornien**, der für eine **nachhaltige Reduktion der verkehrsbedingten Emissionen** sorgen will, eine besondere Rolle spielen. Ähnliche Auflagen wären in **anderen Ballungsräumen** vorstellbar, beispielsweise in den Ballungszentren Deutschlands und Westeuropas, aber auch Japans, in denen im Sommerhalbjahr häufig die Grenzwerte von troposphärischem Ozon überschritten werden, die zu erheblichen Beeinträchtigungen von Stadtbewohnern führen.

Durch den Brennstoffzellenantrieb sei es aber nach Bekundungen der Fahrzeughersteller nicht nur möglich, Techniken in Bezug auf den **Umweltaspekt** zu verbessern, sondern auch im Hinblick auf Kundennutzen, Wirtschaftlichkeit und die **Lebensdauerkosten** (Panik; Friedrich, 1998). Durch internationale Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen („starke Partner“, die global aktiv sind) steigt die Wahrscheinlichkeit, einen Durchbruch erzielen zu können (siehe Übersicht im Anhang und Abbildung 1-1).

Am Standort Deutschland wird der Brennstoffzellenantrieb von einer Reihe von Industrieunternehmen (mit Standort in Baden-Württemberg wie DaimlerChrysler in Kirchheim-Nabern; daneben vor allem noch Opel in Mainz-Kastel) vorangebracht. Andere Automobilhersteller wie BMW verhalten sich hinsichtlich der Brennstoffzelle (noch) reserviert (siehe Übersicht im Anhang), sind aber an anderen Antriebskonzepten wie z. B. dem Wasserstoffverbrennungsmotor interessiert. Weiterhin sind einige Forschungs- und Hochschulinstitute engagiert (Ewe, 1998). Ein eigenständiges, umfassendes Forschungsprogramm existiert bisher nicht. Forschungsprojekte werden auf verschiedenen Ebenen (EU, Bund, Länder) und aus unterschiedlichen Fördermaßnahmen unterstützt. Im BMBF-Leitprojekt „PEFC-Brennstoffzelle“ sind beispielsweise Teams aus verschiedenen Branchen vertreten:

- BASF: Katalysatoren für den Reformer,
- Degussa-Hüls und Heraeus: Katalysatoren für den Reformer und Elektroden-Membraneinheiten,
- Hoechst: Elektroden-Membraneinheiten,
- Siemens: Brennstoffzellen-Stacks und
- DaimlerChrysler: Brennstoffzellen-Stacks und Gaserzeugung im Reformer.

## 1.2 Einflußfaktoren und Szenarientwicklung

Die vorangegangenen Ausführungen haben gezeigt, dass eine Vielzahl von Faktoren die zukünftige Rolle und die Dynamik des Einsatzes von Brennstoffzellen als Fahrzeugantrieb beeinflusst. Tabelle 1-2 zeigt die nach den Ergebnissen der Studie wichtigsten Einflußgrößen und ihre Wirkungsrichtungen im Überblick. Je nach Entwicklung dieser Einflussfaktoren wird die Verbreitung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen eher gehemmt oder eher gefördert. Die tatsächliche Entwicklung ist in vielen Fällen unsicher.

Deshalb sind im Rahmen der Untersuchung Szenarien entwickelt worden. Diese Szenarien basieren jeweils auf einer in sich konsistenten Kombination von Annahmen und werden im Vergleich zu einem **Referenz-Szenario** dargestellt. Hinsichtlich der Einflussfaktoren im Referenz-Szenario wird davon ausgegangen, dass sich mittel- und langfristig die Produktion von Pkw nicht ändert und sich damit die Branche (Infrastruktur, Ausrüster, Zulieferer, Fertigungsverfahren) nicht wandelt. Neue Antriebe spielen somit für die Differenzbetrachtungen im Rahmen der Input-Output-Analyse beim Referenz-Szenario keine Rolle.

Bei den Einflussfaktoren können drei Gruppen unterschieden werden (Abbildung 1-3):

- Typ A: Für die Einflussfaktoren dieses Typs gibt es nur eine Annahme, die als sehr wahrscheinlich eingeschätzt wird. Daher wird für alle Szenarien die gleiche Annahme zugrunde gelegt. Dies gilt z. B. für die Annahme, dass die Energiepreise in den nächsten Jahren relativ stabil und niedrig bleiben.
- Typ B: Die Entwicklung der Einflussfaktoren dieses Typs ist noch ungewiss, aber von großer Bedeutung, da sie sich auf andere Einflussfaktoren auswirkt. Diese „treibenden“ Faktoren hängen nicht von der Entwicklung anderer Einflüsse ab. Es werden zwei unterschiedliche Annahmen betrachtet, dies gilt z. B. für die Akzeptanz des Verbrauchers.
- Typ C: Die Entwicklung dieser Einflussfaktoren ist noch ungewiss und hängt von anderen Faktoren ab. Es werden zwei unterschiedliche Annahmen berücksichtigt, die jeweils von den Annahmen für die „treibenden“ Einflüsse abgeleitet werden, z. B. Annahmen zur Infrastruktur.

Tabelle 1-2: Einflussfaktoren der Brennstoffzellendiffusion und ihre Wirkungsrichtung

	Hemmende Aspekte	Fördernde Aspekte
Verhalten der Kfz-Hersteller	Einige Automobilhersteller wollen Kosten vermeiden für F&E von neuer, nicht „auto-typischer“ Motorentwicklung.	Führende Automobilhersteller haben die Brennstoffzelle als strategisches Projekt definiert und bereits für Marketingzwecke eingesetzt (siehe Tabelle 2-2). Gemeinschaftsentwicklungen reduzieren die FuE Kosten.
Entwicklung von technischen Alternativen	Verbrennungsmotor: etablierte Technik (Hersteller und Verbraucher), bei hoher Leistung mäßig guter Wirkungsgrad. Niedrige Abgasemissionen können durch verbrauchsoptimierte Fahrzeuge mit Ottomotor kostengünstiger realisiert werden (Quelle:UBA). Verbrennungsmotor mit Wasserstoff oder Erdgas als Kraftstoff ist für einige Hersteller die alternative Lösung. Batterie-Elektromotor-Antriebe: Kein Handling von Chemikalien nötig, keine lokalen Emissionen beim Betrieb.	Andere Antriebe haben schlechtere Wirkungsgrade. Verbrennungsmotor: hat schlechtere Emissionswerte (NMVOC, NOx, CO), die Technologie des Verbrennungsmotors ist bereits sehr weit entwickelt, Quantensprünge sind daher schwierig zu erreichen. Batterie-Elektromotor-Antriebe: noch geringe Reichweite oder hohes Batteriegewicht und hohe Batteriekosten, viele Automobilhersteller haben die Entwicklung zu Gunsten der Brennstoffzelle zurückgestellt.
Technische Reife und Wirtschaftlichkeit	Derzeit hohe Kosten für PEFC-Zelle, müssen auf 80 -100 DM/kW gesenkt werden. Einsatz von MeOH: Reformier noch entwicklungsbedürftig. PEFC empfindlich gegen CO. Optimierung nötig für: Energie + Stoffmanagement, Brennstoffzellensystem, Brenngaserzeugung; kompakte und leichte Bauweise des gesamten Antriebs; Spezifikation neuer Kraftstoffe. Evtl. weniger Ladevolumen (-> hängt ab von der Baugröße des Reformers). Restlaufsicherheit noch ungeklärt. Der Kompressor ist laut, schwer und verbraucht Energie. Platineinsatz ist sehr teuer.	Strategische Entscheidung führender Hersteller für die Brennstoffzelle. Derzeit erste Prototypen (u. a. NECAR III und NECAR IV) und Planungen für Massenfertigung in 2004. Hoher Wirkungsgrad der Brennstoffzelle im gesamten Lastbereich. PEFC niedrige Betriebstemperatur (60-80°C), auch kleine Leistung kann erzeugt werden. Gute Startfähigkeit. Bei PEFC Betrieb mit Wasserstoff, Methanol (MeOH), Ethanol, Erdgas, Benzin... möglich. Massenfertigung von Membran soll die Kosten erheblich reduzieren. Effizienzsteigerungen der Membran sollen einen Betrieb ohne Kompressor ermöglichen. Platin kann recycled werden. Platin kann geleased werden.
Methanol über die Infrastruktur verfügbar	Schaffung angepasster Infrastruktur (z. B. ist MeOH korrosiv) erfordert hohe Investitionen noch vor der Markteinführung der Brennstoffzelle. Wenn keine einzige Kraftstoffalternative flächendeckend eingeführt wird, sind höhere Kosten der Kraftstoffe zu befürchten. Die Stadtwerke etc. haben Interesse, Erdgas abzusetzen.	Methanol ist gut zu tanken und nicht krebserregend (wie Benzin und Diesel). Mineralölwirtschaft kann vorhandene Infrastruktur weitgehend nutzen (MeOH, Wasserstoff). In einem Gemeinschaftsprojekt von Automobilherstellern und Unternehmen der Mineralölwirtschaft wird über die zukünftige Infrastruktur diskutiert. In Kalifornien und Kanada gibt es erste Kooperationen zwischen Automobilherstellern und Mineralölindustrie.

	Hemmende Aspekte	Fördernde Aspekte
Energiepreise	<p>Derzeitige allgemeine Annahme, daß die internationalen Energiepreise auf mittlere Sicht nicht steigen werden (Effekt der Liberalisierung, Globalisierung, technischer Fortschritt bei Exploration und Förderung).</p> <p>Methanol/Wasserstoff auf Basis Erdgas hängt stark vom Erdgaspreis ab, der näher an den Erdölpreis heranrückt.</p>	<p>Auf lange Sicht: Mineralölpreis und Erdgaspreis steigen erst nach 2015 merklich gegenüber heute an. Die Ökosteuer wird regelmäßig EU-weit erhöht, um Kyoto-Verpflichtungen zu erfüllen.</p>
Akzeptanz der Käufer	<p>Die Zuverlässigkeit des VM ist dem Käufer seit vielen Jahren bekannt. Neben wirtschaftlichen Aspekten (siehe Umweltpolitik und Wirtschaftlichkeit), muß die mit einem neuen Produkt verbundene Unsicherheit der Käufer berücksichtigt werden.</p>	<p>Mit dem neuen Antrieb soll nach Angaben der Hersteller eine verbesserte Funktionalität erzielt werden (keine Vibration durch den Motor, geräuscharm, Klimatisierung im Stand etc.).</p> <p>Hohes Marktpotential für Automobile mit alternativem Antrieb. (Das WZB schätzt die Marktpotentiale des Elektromotors ohne Unterscheidung zwischen Batterie- und Brennstoffzellen-Antrieb auf 8% bis 50% des Gesamtmarktes, da bisherige Nutzer mit dem Fahrverhalten für den „every-day traffic“ weitgehend zufrieden sind.)</p> <p>Umweltbewusste Käufer sind aus Imagegründen für Brennstoffzelle.</p>
Umweltprobleme	<p>Große Bedeutung der Klimaschutzpolitik (Reduktion der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen). Eine erhebliche Reduzierung dieser Emissionen ist nach Ansicht des UBA auch bei der Brennstoffzelle nicht sichergestellt.</p> <p>In der EU wird das Problem des troposphärischen Ozons weiterhin verdrängt.</p>	<p>In Ballungsgebieten werden auch in Zukunft die verkehrsbedingten Emissionen (ähnlich wie in Kalifornien) und die Ozon-Episoden im Sommer ein großes Problem darstellen. Diese können durch die Brennstoffzelle reduziert werden. Bei geringen Geschwindigkeiten reduziert sich auch die Lärmbelastung. Weitere Lärmreduzierungen sind möglich, wenn der Kompressor gekapselt wird oder entfällt.</p>
Umweltpolitik/ Verkehrspolitik	<p>Sicherheitsaspekte sind beim VM gut untersucht.</p> <p>Auf Grund der unsicheren Kosteneffizienz sind öffentliche Gelder verloren, wenn sich die Brennstoffzelle nicht bewährt (UBA).</p>	<p>Klimagasdiskussion und Sommersmog.</p> <p>Nationale Emissions-Gesetzgebungen führen zu automobiltechnischen Innovationen, um Mega-Städte langfristig bewohnbar halten zu können.</p> <p>Laufende öffentliche Projekte.</p> <p>Vorgaben der Gesetzgebung in Kalifornien und anderen Staaten der USA: bis 2004 sollen 10 % der Fahrzeuge im Markt „no emission cars“ sein, sonst Strafzahlungen.</p>

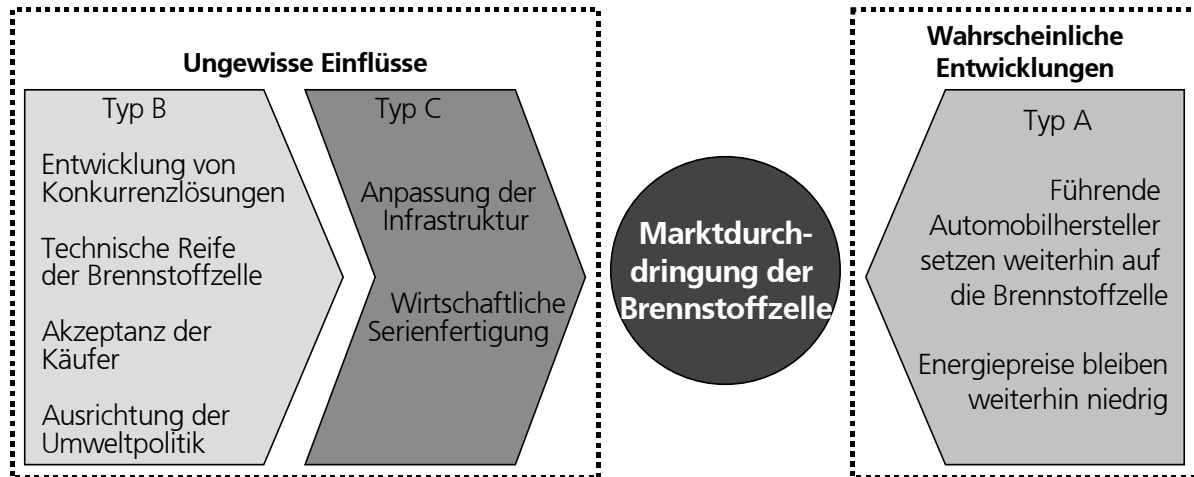


Abbildung 1-3: Typologie der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Marktdurchdringung von Pkw mit Brennstoffzellen-Antrieb

Aus den möglichen, konsistenten Szenarien wurden die Szenarien ausgewählt, die in ihrer zeitlichen Marktdurchdringung am weitesten auseinander liegen, bzw. sehr unterschiedliche Auswirkungen auf die deutsche Industrie haben (Tabelle 1-3).

Die gewählten Szenarien „Durchbruch“ im In- oder Ausland und „Konkurrenz“ stellen die möglichen Pole für die Marktdurchdringung der PEFC-Brennstoffzelle dar, die sich aus den untersuchten Einflussfaktoren ergeben.

- Im ersten Szenario erfolgt ein **„Durchbruch im Inland“**. Es wird eine erste Serienfertigung ab dem Jahr 2004 in Deutschland aufgebaut. Für dieses Szenario wird der überwiegende Einbau in Pkw der Mittelklasse angenommen.
- Eine Variante des ersten Szenarios geht davon aus, dass es zu einem **„Durchbruch im Ausland“** kommt. Die erste Serienfertigung wird in diesem Szenario z.B. in Japan oder in den USA ab dem Jahre 2004 aufgebaut.
- Im Szenario **„Konkurrenz“** wird eine Serienfertigung erst nach dem Jahr 2010 unterstellt (Vorserie erst 2005 bis 2010). Die technischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen für eine Serienfertigung werden erst zu einem späteren Zeitpunkt erreicht. Bis dahin werden mobile Brennstoffzellen nur in geringen Stückzahlen gefertigt und konzentrieren sich auf Nischenanwendungen.

Tabelle 1-3: Annahmen zu den Szenarien

Einflussfaktoren		Szenarien „Durchbruch In-/Ausland“	Szenario „Konkurrenz“
1(A)	Verhalten der Automobilhersteller	führende Automobilhersteller behalten Strategie in Richtung Brennstoffzelle bei	führende Automobilhersteller behalten Strategie in Richtung Brennstoffzelle bei
2(B)	Konkurrenzlösungen	geringe Marktdurchdringung	große Marktdurchdringung
3(B)	technische Reife der Brennstoffzelle	kurzfristig technische Reife erreichbar	erst mittelfristig technische Reife
4(C)	wirtschaftliche Serienfertigung aller Komponenten (economy of scale)	kurzfristig realisierbar, wenn die technische Reife erreicht ist	erst mittelfristig wirtschaftliche Serienfertigung
5(C)	Methanol über die Infrastruktur verfügbar	wenn das Marktpotential sichergestellt ist, kann kurzfristig reagiert werden	Mineralöl und Erdgaswirtschaft sträuben sich, da unsicherer Absatz
6(A)	Energiepreise	relativ stabile niedrige (reale) Energiepreise	relativ stabile niedrige (reale) Energiepreise
7(B)	Akzeptanz der Käufer (Fall: brennstoffzellenbetriebener Pkw)	hoch	niedrig (konventionelle Antriebskonzepte und 3 Liter-Pkw bevorzugt)
8(A)	Umweltprobleme	in Ballungsräumen hohe verkehrsbedingte Emissionen	in Ballungsräumen hohe verkehrsbedingte Emissionen
9(B)	Umweltpolitik zur Reduktion von Emissionen	erklärtes politisches Ziel, tendenziell Brennstoffzelle bevorzugt	Fortführung der bisherigen Umwelt- und Verkehrspolitik

Für alle Szenarien wird gemeinsam angenommen, dass auf mittlere Sicht keine Erhöhung der globalen (realen) Energiepreise erfolgen wird. Andererseits werden eine kontinuierliche Erhöhung der Mineralölsteuer sowie – insbesondere in Ballungsgebieten – Bemühungen zur nachhaltigen Verringerung von verkehrsbedingten Emissionen unterstellt. Es bleibt jedoch ungewiss, ob die Brennstoffzelle explizit durch die Umweltpolitik gefördert werden wird oder ob Konkurrenzlösungen zur Reduzierung der Emissionen in Ballungsgebieten favorisiert werden. Ebenfalls einheitlich ist die Einschätzung in beiden Szenarien, dass technische Probleme wie z. B. der zurzeit noch hohe Platinverbrauch (als Katalysator für die PEFC-Membran) zumindest mittelfristig gelöst werden können und es keinen technologischen Bruch in der Entwicklung gibt, wie sie z. B. die Entwicklung von hocheffizienten Nano-Röhrchen zur Wasserstoffspeicherung darstellen würden (Greschik, 1999).

Die Szenarien **unterscheiden** sich vor allem hinsichtlich

- der unterschiedlichen Erwartungen, den Verbrennungsmotor zumindest teilweise zu einem bestimmten Zeitpunkt **nennenswert** substituieren zu können (Reduktion der Anschaffungskosten, Start der Serienfertigung).
- der Einschätzung der Entwicklung der **Umweltpolitik** (Emissionsgesetzgebung, Klimaschutzpolitik), einschließlich unterschiedlicher Besteuerung von Kraftstoffen,
- der Umstellung des **Tankstellennetzes** (z. B. Reformierung des Methanols, d. h. Methanolweg oder methanolloser Weg) sowie
- der **Akzeptanz** der Käufer.

## 2 Szenarien „Durchbruch im In- oder Ausland“

In den vergangenen Jahren haben sich weltweit nach und nach eine Reihe von Forschungs- und Entwicklungsallianzen formiert, um die Brennstoffzellen-Technologie voranzubringen (z. B. Gruppe um DaimlerChrysler (DC), Ford und Mazda bzw. Ballard Power Systems mit DC Fuel Cell Engines). Renault, Volvo, VW und andere Firmen (De Nora, Ansaldo, Air Liquide sowie ECN und Johnson Matthey) kooperieren in einem EU-Forschungsprojekt. Auf der anderen Seite arbeiteten Global Player zunächst eigenständig an diesem Konzept (General Motors (GM)/Opel und Toyota), die nun seit 1999 gemeinsame Aktivitäten haben.

Von einer Reihe von Fahrzeugherstellern wurden sogar Zieljahre für die Kommerzialisierung öffentlich bekannt gegeben. Im Einzelnen wurden zum **wahrscheinlichen Markteintritt** von Pkw mit Brennstoffzellenantrieb in nennenswertem Umfang folgende Jahre genannt (ohne Betrachtung der Einsatzfelder Lkw und Bus):

- General Motors (GM)/Opel wollen bis **2004** ein serienreifes Automobil auf den Markt bringen. Es existieren sowohl Projekte zum Wasserdampf-Reformer (Kraftstoff Methanol) als auch Projekte mit POX-Multifuel-Reformer (Kraftstoff Benzin oder Diesel). Bereits 1998 wurde ein Brennstoffzellen-Fahrzeug auf Basis eines Compact Van vorgestellt (Zafira).

- Von DaimlerChrysler wurde in Kooperation mit Ballard Power Systems (Kanada) die Entwicklung der Brennstoffzellen-Technologie zur Marktreife (Wasserdampf-Reformer und Kraftstoff Methanol) als „strategisches Unternehmensprojekt“ (Panik; Friedrich, 1998) in Angriff genommen. Zusammen mit Ballard Power wurden Gemeinschaftsunternehmen gegründet. Auch Ford hat sich diesem Forschungsverbund angeschlossen (Kooperationsvertrag und Beteiligung).

Dieser Gruppe wurde vielfach attestiert, dass sie technisch eine Führungsrolle erreicht hat. Starke Kostensenkungen und Optimierungen (auch bei der Leistungselektronik), Serienfertigung und die globale Lösung der Tankstellen-Infrastruktur werden als der Schlüssel zum Erfolg gesehen. Durch die Optimierung der gesamten Konzeption des Fahrzeugs auf den neuen Antrieb sollen vor allem die Anschaffungskosten deutlich gesenkt werden (Panik; Friedrich, 1998). Im Jahr 1997 wurde von DC ein zweisitziges, auf der A-Klasse basierendes Fahrzeug vorgestellt (Necar III; Betankung mit Methanol), im Frühjahr 1999 in Washington D. C. ein weiteres Prototypfahrzeug (Necar IV mit einem Flüssigwasserstoff-Speicher). Die nächste Generation soll, wie Necar III, Methanol tanken und dieses im Fahrzeug in einem Reformer in Wasserstoff umwandeln. Für **2004** wurde die Serienfertigung angekündigt (rund 100.000 Fahrzeuge pro Jahr).

Auf welchem nationalen Markt der Brennstoffzellen-Antrieb zuerst in nennenswertem Umfang seine Bewährungsprobe bestehen muss, ist zur Zeit noch offen. Da jedoch davon auszugehen ist, dass eine eventuelle Produktion in der Nähe dieses Lead-Marktes angesiedelt wird, soll das Szenario „Durchbruch“ nach Inland und Ausland differenziert werden. Eine kanadische Gruppierung (unter Beteiligung von Ballard Power Systems, Methanex und Petro-Canada) hat im Juni 1999 angekündigt, dass sie bis 2004 die Einführung eines kommerziell tragfähigen Vertriebsnetzes für passende Kraftstoffe (u.a. Methanol) vorbereiten will (Pilotprojekt in Kanada). Somit sind die Aktivitäten in Kalifornien kein Einzelfall.

- Von einer dritten Gruppe, deren Mitglieder bei einem EU-Joule-Projekt beteiligt sind (Renault, VW, Volvo), wurde **kein Zeitpunkt** für einen Markteintritt genannt. Auch andere Unternehmen machen hierzu keine konkreten Angaben.
- In Japan spielt Toyota bei der Entwicklung des Brennstoffzellen-Antriebs eine führende Rolle. Ursprünglich war ein schneller Einstieg im Alleingang geplant (2003). Im April 1999 wurde mit General Motors eine breiter angelegte Zusammenarbeit bei der Entwicklung von „Autos der Zukunft“ bekanntgegeben. Bei der von Toyota entwickelten PEM-Brennstoffzelle wird der zusätzliche Leistungsbedarf von einer Nickelmetallhydrid-Batterie zur Verfügung gestellt.

Nachdem mit General Motors, Ford, DaimlerChrysler, Toyota und Honda die weltweit führenden Automobilhersteller ihre Strategie in Richtung Brennstoffzellen-Antrieb intensiviert haben, wird im **Szenario „Durchbruch“** die Markteinführung eines Pkw der Mittelklasse als potentieller Nachfolger des Verbrennungsmotors für das Jahr **2004** unterstellt. Es wird angenommen, dass die intensiven Forschungsarbeiten der Unternehmen kurzfristig zur technischen Reife führen und auf dieser Grundlage mit Hilfe heute bereits bekannter Großserienproduktionsverfahren eine höhere Wirtschaftlichkeit erreicht werden kann. Die Akzeptanz der Käufer wird durch die verbesserte Funktionalität erreicht. Weiterhin ist kurzfristig keine große Marktdurchdringung von Konkurrenzlösungen zu erwarten.

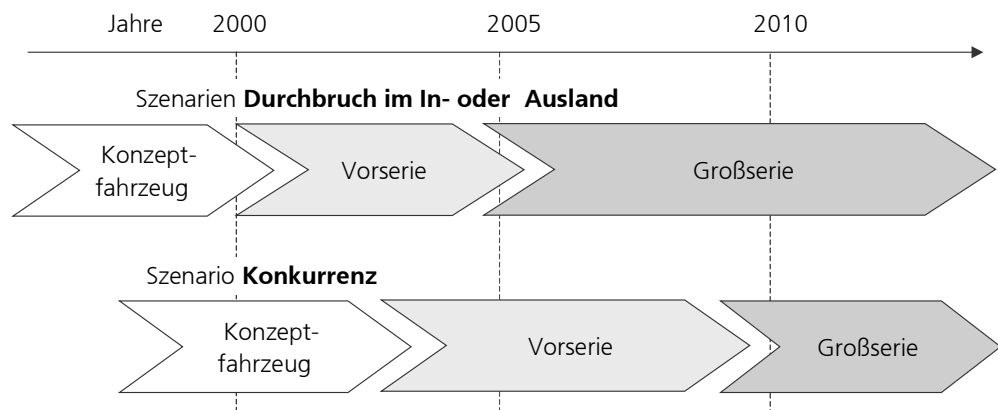


Abbildung 2-1: Szenarien zur Markteinführung eines Mittelklasse-Pkw mit Brennstoffzellenantrieb

Folgende **Teilschritte** werden danach, orientiert an Veröffentlichungen von DaimlerChrysler, als wahrscheinlich angenommen (siehe hierzu Abbildung 2-1): Nach der Präsentation eines Konzeptfahrzeugs ist bereits im Jahr 2000 eine Vorserie vorgesehen. Nach mehrjährigen Tests soll dann ab dem Jahr 2004 eine Großserie möglich sein. Zugleich wird angenommen, dass bis dahin der Start einer Methanol-Kraftstoffwirtschaft erfolgt ist.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Shell (Pkw-Szenarien, 1999): Gemäß einem Szenario „Neue Ordnung“ („Politik und Wirtschaft schaffen neue globale Rahmenbedingungen“) beginnt bereits ab 2005 die Markteinführung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen. Der Anteil am Bestand dürfte 2010 rund 1,5 Prozent (oder 700.000 Fahrzeuge) und 2020 rund 20 Prozent (oder 10 Mio. Stück) betragen. Ein zweites Szenario („Kreative Vielfalt“: es dominiert der einzelne Mensch; der Staat verliert an Einfluss) nimmt an, dass diese Fahrzeuge zunächst eine Nischenfunktion einnehmen und erst ab 2015 zunehmende Verbreitung finden werden. Im Jahr 2020 dürften sie erst einen Anteil von 7 Prozent am gesamten Pkw-Bestand erreichen. Esso Energieprognose (1998): Gegen einen Einsatz vor 2005 sprechen der hohe Preis, die Unhandlichkeit (hohes Gewicht, großer Platzbedarf) und die geringe Reichweite. Deshalb ist eine Produktion von Prototypen nicht vor 2005 zu erwarten. Mit einer Verbreitung des BZ-Antriebs in nennenswertem Umfang kann nach Esso erst nach 2010 gerechnet werden.

### 3 Szenario „Konkurrenz“

Das Szenario „Konkurrenz“ zur Markteinführung eines Brennstoffzellenantriebs im Pkw der Mittelklasse reflektiert ein deutlich pessimistischeres Bild für die Marktchancen der mobilen Brennstoffzelle.

Es wird in diesem Szenario angenommen, dass bis zur verzögerten Einführung der Brennstoffzelle Konkurrenzlösungen eine große Marktdurchdringung erreicht haben werden. Fraglich ist vor allem auch, ob die technische Reife in wenigen Jahren erreicht wird und das Kostenproblem (Anschaffungskosten) bereits auf mittlere Sicht gelöst werden kann (Ewe, 1998). So muss eine Reihe technischer Verbesserungen erzielt werden, um einerseits den Platzbedarf und andererseits die Herstellungskosten erheblich zu reduzieren. Die heutigen Kosten einer PEFC-Folie liegen z. B. bei einem 50 kW-Aggregat (Pkw der Mittelklasse) über 10.000 DM. Der Platinverbrauch muss drastisch reduziert werden. In Versuchsfahrzeugen trägt jeder qm Membran rd. 40 g Platin (Katalysator), d. h. etwa 10 qm PEFC im Fahrzeug des Jahres 2004 repräsentieren nach aktuellem Stand einen Wert von rund 8.000 DM. Starke Kostenreduktionen sind vor allem für Komponenten eines PEFC-Stacks nötig. Nicht zuletzt muss eine Membran entwickelt werden, die nur noch wenige Prozent der heutigen kostet (siehe hierzu Kapitel 2 und 5).

Auf Grund eines noch relativ geringen „Kommerzialisierungswillens“ (Bün-ger, 1998) bei der **stationären Anwendung** von BZ (Hausenergieversorgung oder generell in der dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung) wird angenommen, dass von dieser Seite kein kurzfristiger Effekt zur Kostensenkung bei der mobilen Brennstoffzelle ausgehen dürfte. Im Gegensatz zum mobilen Einsatz können in diesem Fall aber höhere Kosten im Einzelfall in Kauf genommen werden, z. B. wenn längere Stromversorgungsleitungen verlegt werden müssen.

**Akzeptanzprobleme** können auftreten, wenn die Sicherheitsaspekte nicht vollständig geklärt sind und der Kunde nicht bereit ist, für die verbesserte Funktionalität einen höheren Preis zu zahlen. Auch die künftige **Versorgungsinfrastruktur** für alternative Kraftstoffe (hier: Methanol bzw. Biodiesel, Ethanol oder Wasserstoff) wird als Engpass eingeschätzt, falls es nicht zu einer internationalen Festlegung auf eine Variante (z. B. Methanol) kommen sollte und der Absatzmarkt als gesichert angenommen werden kann.

Durch die EG-Richtlinien 98/69/EG und 98/70/EG existieren zwar einheitliche Abgasgrenzwerte für Pkw sowie Anforderungen an die Kraftstoffqualitäten für 2005 (sogenannte Euro 4-Norm). Bei den zurzeit **offenen Umwelt-**

**zielen** wird aber angenommen, dass international keine schnellen Fortschritte zu erwarten sind (Beispiele: CO<sub>2</sub>-Emissionen, Minderung des Ressourcenverbrauches, Lärmreduzierung). Auch die Umsetzung des kalifornischen „Low Emission Vehicle Programs“ war beispielsweise früher geplant. Mangels Alternativen zu batteriegetriebenen Elektroautos mit ihren Nachteilen ergaben Nachverhandlungen eine Fristverlängerung von 1998 auf 2003. Eine weitere Verschiebung wäre nicht undenkbar.

Ohne klare Leistungsziele für den Umweltschutz und ohne Kosteneffizienzkriterien besteht nach Untersuchungen des **Umweltbundesamtes** (Kolke, 1998; Kolke/Troge, 1999) sogar die Gefahr, dass sich der Brennstoffzellenantrieb aus Sicht des Umweltschutzes in einigen Jahren nicht bewähren könnte. Eine Förderung mit öffentlichen Geldern wäre somit nicht ohne Risiko. Den nahezu euphorischen Argumenten (auch aus Umweltschutzgründen) einzelner Vertreter der Industrie stehen Ergebnisse einer Analyse des Umweltbundesamtes gegenüber, die das Brennstoffzellen-Konzept „derzeit aus Umweltsicht nicht als kosteneffizient betrachtet“. Kosten-Nutzen-Berechnungen ergaben sogar, dass „Emissionsminderungen und Ressourcenschutz für die absehbare Zeit – volkswirtschaftlich gesehen – wesentlich kostengünstiger durch **verbrauchsoptimierte Fahrzeuge mit Ottomotor mit niedrigsten Abgasemissionen (Ultra Low Emission Vehicle oder Euro 4-Standard)** realisiert werden können als durch Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb“.

Im Gegensatz zu den optimistischen Verlautbarungen der wichtigsten globalen Hersteller zum Ende des Jahrhunderts (Serienfertigung ab 2004) wird im Szenario „Konkurrenz“ eine zeitliche Verzögerung der Verbreitung des Brennstoffzellen-Pkw in nennenswertem Umfang um gut fünf Jahre angenommen. Esso hat 1998 in einer Energieprognose („Mehr Intelligenz im Verkehr“) eine grobe Einschätzung der Verbreitung frühestens nach 2010 gegeben. Das Szenario „Kreative Vielfalt“ der deutschen Shell AG geht ebenfalls davon aus, dass es erst zu einem späteren Zeitpunkt als 2005 ein wettbewerbsfähiges Serienfahrzeug mit neuer Antriebstechnik geben wird.

Zwar enthält diese Studie die Information, dass von Exxon im Rahmen einer Kooperation mit General Motors insbesondere Treibstoffe für den Brennstoffzellen-Antrieb entwickelt werden. Daneben werden hohe Energieeffizienz und niedrige Emissionen attestiert. Insgesamt ließ aber eine Reihe von Defiziten eine Produktion von Prototypen bzw. Konzeptfahrzeugen nicht vor 2005 realistisch erscheinen (beschränkte Reichweite, Unhandlichkeit).

Daraus wird für das **Szenario „Konkurrenz“** gefolgert, dass mit einer beachtlichen Verbreitung dieser Antriebsart **erst nach 2010** zu rechnen ist (vgl. Abbildung 4). Zwar dürften bereits sehr früh Konzeptfahrzeuge verfügbar sein. Allerdings konzentriert sich der Einsatz von Brennstoffzellenantrieben zunächst noch auf Nischen in den Jahren 2005 bis 2010.

Eine Serienfertigung in Deutschland mit Stückzahlen über 100.000 Stück ist im Szenario „Konkurrenz“ erst nach mindestens fünf weiteren Jahren Erprobung, weiteren Reduktionen der Anschaffungskosten im Vergleich zu heutigen Antrieben und einer weitgehenden Umstellung der Infrastruktureinrichtungen vorstellbar.

## 4 Literatur

- Bünger, U. (1998): Einsatzbereiche kleiner PEM-Brennstoffzellen zur dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung. VDI-Berichte 1383. Energieversorgung mit Brennstoffzellenanlagen '98. Stand und Perspektiven. Tagung Essen, 24. und 25. März 1998
- Deutsche Shell AG (1999): Mehr Autos – weniger Emissionen. Szenarien des Pkw-Bestands und der Neuzulassungen in Deutschland bis zum Jahr 2020. Hamburg, 1999
- Erdmann, G.; Wiesenberg, R. (1998): Emissionsgesetzgebung und alternative Automobilantriebe in Kalifornien. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 100 (1998)5
- ESSO Energieprognose (1998): Mehr Intelligenz im Verkehr. Hamburg, 1998
- Ewe, T. (1998): Die rollende Revolution. Bild der Wissenschaft 8/1998
- Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. , FVV: Brennstoffzellen-Studie. Ganzheitliche Systemuntersuchung zur Energiewandlung durch Brennstoffzellen. Frankfurt am Main, 1998
- Greschik, S.: Ohne Halt bis Wladiwostok. Die Zeit, S. 49, 18. November, 1999
- KFB-Rapport (1998:37): Strategic Alliances for the Development of Fuel Cell Vehicles. Autor: Kanehira Maruo. Göteborg, 1998
- Knie, A., Berthold, O. u.a. (1997): Consumer user patterns of electric vehicles. Wirtschaftszentrum Berlin für Sozialforschung. Berlin, 1997

- Kolke, R. (1998): Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastungen, Brennstoffzellenfahrzeuge. 1. Berichtsstand, Bewertungsgrundlagen. Berlin, 1998
- Kolke, R.; Troge, A. (1999): Brennstoffzellen für den Straßenverkehr. Eine Kosten-Nutzen-Betrachtung aus Umweltsicht. ZfAW 1/1999
- Panik, F.; Friedrich, J.,K.-H. (1998): Die Entwicklung des Brennstoffzellen-Elektroantriebsstranges in der Kooperation. EUROFORUM-Fachtagung Brennstoffzellen: Brennstoffzellen auf dem Vormarsch. 26. und 27.10.1998 in Stuttgart
- Shell: siehe Deutsche Shell AG
- Staatsanzeiger Baden-Württemberg Nr. 29 (26.7.1999): Programm für die Automobilzulieferindustrie (S.6)
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (1999). Statistische Berichte Verkehr: Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern am 1. Januar 1999
- Stromthemen (1999): Heft 6/1999, S.4: Welchem Auto-Konzept gehört die Zukunft?
- Verband der Automobilindustrie e.V. , VDA (1999): VDA-Pressedienst vom 28.01.1999
- Wasserstoff-Gazette (1999): verschiedene Ausgaben (Newsletter von Hyweb und dem Deutschen Wasserstoff-Verband, DWV; L-B-Systemtechnik GmbH)
- Internet: <http://www.Hyweb.de/Neuigkeiten/gazette.html>

## 5 Anhang: Brennstoffzellenstrategien ausgewählter Automobilhersteller (Stand 1999)

### Internationale PEFC-Aktivitäten (Auswahl):

Allied Signal Aerospace, Analytic Power (USA), Ansaldo (I), Ballard Power (CAN), Energy Partners (USA); De Nora (I), H-Power (USA), International Fuel Cells (USA), Siemens (D), Magnetmotor (D). Aktivitäten der Europäischen Union (Joule, FP5).

	Favorisierter Antrieb	Geplante Einsatzfelder (Fahrzeugtyp)	Angestrebter Markteintritt	Alternativen, konkurrierende Lösungen
<b>General Motors (GM)</b> Zentren für alternative Antriebe bei Opel (Mainz-Kastel) und in den Standorten in den USA (GM-R&D-Center, Warren, Mich., Rochester, N.Y.)	PEFC; April 1999: Kooperation mit Toyota für 5 Jahre zur Beschleunigung der Entwicklung von Fahrzeugen mit neuen Antriebskonzepten, u.a. zukünftiges System Design, Kraftstoff-Auswahl sowie Kraftstoffweiterbehandlung als Voraussetzung für die Produktion von Brennstoffzellen-Fahrzeugen.	Einsatzfeld: Pkw „Fuel Cell-Light-Duty“-Fahrzeugprogramm mit Ballard, Basis Methanol.  März 1998: „GM-Sintra-fuel cell test vehicle with methanol fuel processor (50 kW, 150 km/h)“.	2004 Detroit Auto Show 1998: „GM unveiled a fuel cell hybrid engine that would run on methanol“. „GM plans to produce a production ready fuel cell electric vehicle by 2004“. Opel: 1998: Präsentation eines BZ Autos auf Basis des Zafira (Compact Van) Ziel: bis 2004 serienreifes Automobil am Markt.	Offiziell auch Batteriefahrzeug (z.B. EV1) entsprechend den kalifornischen Vorschriften.  Opel: Batterie (Verbesserung der Kapazität).
<b>Ford</b> (inkl. Pkw-Sparte von Volvo)  Eröffnung eines Forschungszentrums in Aachen im Juni 1999	PEFC  Gemeinsame Entwicklung mit DaimlerChrysler  Prototyp P2000 wurde im Juni 1999 in Aachen vorgestellt. Calif. Fuel Cell Partnership (Demonstrationsprojekt).		2004 (Festlegung der Konzernspitze vom Juni 1999).	Offiziell auch Batteriefahrzeug (entspr. kaliforn. Vorschriften). Entwicklung dreier Wasserstoff-BZ Prototyp-Autos (50 kW) als Teil des Ford P2000 Projekt (PNGV-Programm). E 85 Konzept: 85 % Ethanol, 15 % Benzin
<b>Volvo</b> (Pkw-Sparte ab 1999 bei Ford)	PEFC Kooperation mit VW, Renault	Lieferabkommen mit Ballard		Forschungsaktivitäten bei Batterie-Elektromotor-Antrieben eingestellt

	Favorisierter Antrieb	Geplante Einsatzfelder (Fahrzeugtyp)	Angestrebter Markteintritt	Alternativen, konkurrierende Lösungen
<b>DaimlerChrysler</b>				
Kooperation mit Ford, Kooperation mit Shell	PEFC (Methanol-Brennstoffzellen-Elektroantriebssystem, Vertrieb Ballard, Kanada). In die Entwicklung sind von 1992 – 1996 rund 120 Mio. DM geflossen. Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie zur Marktreife als „strategisches Unternehmensprojekt“ (Pamik, Friedrich, 1998). California Fuel Cell Partnership (Demonstrationsprojekt)	Einsatzfelder: Pkw, Lkw, BUS Kooperation mit Ballard Power Systems seit 1993, Erwerb von 25 % Ballard Power Systems, 1996: NECAR II, 1997: NEBUS, 1998: NECAR III (Methanol-Reformer), 1999: NECAR IV (Flüssigwasserstoff). Gründung DBB Fuel Cell Engines GmbH (Gemeinschaftsunternehm. von DB und Ballard; Anteil. von Ford) und Ballard Power Systems GmbH.	2004: Produktion von etwa 100.000 Fahrzeugen/Jahr. Intensive Gespräche mit der Mineralölwirtschaft mit dem Ziel gemeinsamer Markteinführungsstrategien für Brennstoffzellenfahrzeuge.	Offiziell auch Batteriefahrzeug (entspr. kalifornischen Vorschriften). Für Flotten-Fahrzeuge (Busse, Lkw u. ä.) PEM-Zelle mit Wasserstoff.
<b>Volkswagen</b>	PEFC (Methanol reforming technology), Kooperation mit Volvo, Johnson Matthey (reformer), UK und ECN (NL); EU-Joule III-Proj. (s. Renault). Calif. Fuel Cell Partnership.	Einsatzfeld: Pkw Lieferabkommen mit Ballard 1999: 20 kW Golf Hybrid Basis Methanol und Batterie. Präsentation anl. Expo 2000.		Hybridfahrzeuge (VM + Batterie-Elektromotor-Antrieb)
<b>Toyota</b>	PEFC, ab April 1999 Kooperation mit General Motors (5 Jahre) bei „Autos der Zukunft“	Einsatzfeld: Pkw 1996: Fahrzeug R4V4 Basis Wasserstoff, 1997: Fahrzeug mit Methanol-Reformer Fun-Car mit 20 kW e PEFC	ursprünglich 2003 (siehe GM)	Offiziell auch Batteriefahrzeug entspr. kalifornischen Vorschriften. Hybridfahrzeug PRIUS, derzeit 11.000 Fahrzeuge in Japan verkauft. Bei BZ-Antrieb: Einsatz von Akkus für Höchstleistungen, z.B. 25 kW BZ mit 25 kW Ni-metalhydridbatterie.

Favorisierter Antrieb	Geplante Einsatzfelder (Fahrzeugtyp)	Angestrebter Markteintritt	Alternativen, konkurrierende Lösungen
<p><b>BMW</b></p> <p>Laut BMW überwiegen für den Antrieb die Vorteile des Verbrennungsmotors, aber für die Nebenaggregate wird BZ erprobt. Prioritär: Erprobung von Wasserstoff-Verbrennungsmotoren. PEFC: EU-Projekt für Methanol-Reformierung.  März 1999: SOFC als Batterieersatz zur Bordstromversorgung.  PEFC</p>	<p>Einsatzfeld: Pkw, Nebenaggregate</p>	<p>2010</p>	<p>Neben Elektroantrieb: Erdgas Hybridfahrzeuge (wahlweise mit Erdgas oder Benzin) sowie Wasserstoffauto.</p>
<p><b>Renault</b></p> <p>The Fuel Cell Electric Vehicle of Extended range (FEVER), EU-Joule-Projekt (Car of Tomorrow; zus. mit VW und Volvo).</p> <p>Seit 1999 gemeinsames Forschungsprogramm mit PSA Peugeot Citroen (4 Jahre) zu Bedingungen der Serienproduktion eines Fahrzeugs mit Brennstoffzelle, spätestens im Jahr 2010. Kooperation mit CEA, Air Liquide, De Elf, Total (bei Reformierung, Kraftstoffversorgung) sowie Air Liquide und Valeo (bei den Flüssigkeitskreisläufen, Energieaustausch).</p> <p>Hinweis: Im Juni 1999 wurde vom französischen Ministerium für Bildung, Forschung und Technologie ein Steuerungskomitee für ein Technologie-Netzwerk „Brennstoffzelle“ eingesetzt, das sich auf drei Anwendungsgebiete spezialisiert: <b>Fahrzeugantrieb</b>, Wärme- und Strombereitstellung sowie tragbare Anwendungen.</p>	<p>Einsatzfeld: Pkw</p> <p>1997: 30 kW-Fahrz. Basis flüssiger Wasserstoff, Kooperation mit De Nora</p>	<p>2010</p> <p>siehe gemeinsames Forschungsprogramm mit PSA Peugeot Citroen</p>	<p>Batterie-Elektromotor-Antrieb</p>

	Favorisierter Antrieb	Geplante Einsatzfelder (Fahrzeugtyp)	Angestrebter Markteintritt	Alternativen, konkurrierende Lösungen
<b>Peugeot-Citroen (PSA)</b>	PEFC Prioritär: batteriebetriebene Elektroautos (nach Einführung von staatl. Zuschüssen Verkauf von 4000 Fahrzeugen) Siehe Renault.	Einsatzfeld: Van, 1998: 30 kW Van (30 kW BZ und 30 kW Batterie), Basis Wasserstoff, Kooperation mit De Nora (siehe Renault)	(2010) siehe gemeinsames Forschungsprojekt mit Renault	Projekt „Hydro-gen“
<b>Nissan</b>	PEFC Entwicklungsvertrag mit Ballard.	Einsatzfeld: Pkw	(2004)	Offiziell auch Batteriefahrzeug entspr. kaliforn. Vorschriften. Batterie-Elektromotor-Antrieb: Lithiumionen-Batterie
<b>Honda</b>	PEFC Entwicklungsvertrag mit Ballard. Kooperation mit drei japanischen Firmen bei der Entwicklung von Brennstoffzellen. Nach Firmenangaben vom Juni 1999 Nutzung kleinerer und leichter BZ als die von Ballard angebotenen. Einsatz von Methanol-Reformern, die den flüssigen Kraftstoff in Wasserstoff umwandeln oder Einsatz von reinem Wasserstoff, falls Tankstellen Methanol nicht speichern dürfen. California Fuel Cell Partnership.	Einsatzfeld: Pkw	2003 <b>Erster Prototyp für 2000 angekündigt.</b> Produktionsbeginn ab 2003 mit 300 Fahrzeugen/Jahr für die Märkte in Japan und in den USA.	Ursprünglich Batterieautos. Batterie-Elektromotor-Antrieb: Nickelhydroxid. <b>Ab Mai 1999: Wechsel der Entwicklungsanstrengungen auf Brennstoffzellen</b> , da in den letzten 3 Jahren in den gesamten USA nur weniger als 2400 Elektrofahrzeuge (Pkw und Lkw) verkauft oder geleast wurden (d.h. wegen zu geringer Akzeptanz).

	Favorisierter Antrieb	Geplante Einsatzfelder (Fahrzeugtyp)	Voraussichtlicher Markteintritt	Alternativen, konkurrierende Lösungen
<b>Mazda</b> (Anteil von Ford: 33,4 %)	PEFC AIST (MITI)-unterstützt	Einsatzfeld: Pkw Dezember 1997: erstes Brennstoffzellenfahrzeug (Mazda Demio Hydrogen FCEV: 90 km/h, 170 km Reichweite, 20 kW- fuel-cell system, 4x5 kW).	(2004)	Offiziell auch Batteriefahrzeug entspr. kaliforn. Vorschriften
<b>Neoplan</b>	PEFC Partner: De Nora u.a.	Einsatzfeld: Bus Bisherige Aktivitäten: Kleinbus 15 kW e PEFC H-Power, 1998; Stadtbus N4114, 35 bis 50 kW e De Nora, Schwungradspeicher		Schwungradspeicher (Magneto Dynamic Storage, MDS)
<b>MAN</b>	PEFC, Kooperation mit Siemens, Linde	Einsatzfeld: Bus 1999: 120 kW e Bus-Projekt.		

**Quellen:** Geschäftsberichte und Broschüren der Unternehmen; Angaben im Internet; Hartkopf 1998; Hasenauer 1998; Hühlein, Stolten 1998 sowie Forschungszentrum Jülich; Panik/Friedrich 1998; Euroforum-Fachtagung Brennstoffzellen (Stuttgart, Oktober 1998), Stromthemen (versch. Ausg.), Wasserstoff-Gazette (Newsletter von Hyweb und DWV; L-B-Systemtechnik).



## Die Betankungsinfrastruktur, Stand und Perspektiven

### Kapitel 4

Bearbeiter: Gunter Hackenjos, IWW

### Inhalt

<b>0</b>	<b>Vorbemerkungen</b>	<b>75</b>
<b>1</b>	<b>Ausgangsbedingungen bei Kraftstoffverbrauch und Angebot</b>	<b>78</b>
1.1	Rückläufiger Kraftstoffverbrauch	78
1.2	Bestehende Betankungsinfrastruktur	81
<b>2</b>	<b>Brennstoffzellen-Kraftstoffe</b>	<b>82</b>
2.1	Grundsätzliche Anforderungen an Kraftstoffe	84
2.2	Kraftstoffe, Speicherung und Betankung	88
2.2.1	Wasserstoff	90
2.2.2	Methanol	94
2.2.3	Erdgas	95
2.2.4	Benzin, Diesel	98
<b>3</b>	<b>Einschätzungen der Kraftstoffindustrie / Tankstellenbetreiber</b>	<b>98</b>
3.1	Schriftliche Stellungnahmen nach Anfrage	98
3.2	Selbstdarstellung der Unternehmen	101
3.2.1	Esso	101
3.2.2	Shell	102
3.2.3	Deutsche BP / BP Amoco	105
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>105</b>
<b>5</b>	<b>Literatur</b>	<b>107</b>

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1-1	Prognose PKW-Kennzahlen Deutschland bis 2020 (Quelle: Esso Energieprognose '98)	80
Tabelle 3-1:	Große Tankstellenbetreiber in Deutschland	99

## Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 2-1	Prinzipielle Energie-Alternativen für Fahrzeugantriebe	83
Abbildung 2-2	Zielfelder der Bewertung von Kraftstoffen für Straßenfahrzeuge	84
Abbildung 2-3:	Prinzipdarstellung einer Fast-Fill-Anlage	96

## 0 Vorbemerkungen

Das Vorhandensein bzw. der zügige Aufbau einer Kraftstoff-Versorgungsinfrastruktur gehört zweifellos zu den kritischen Determinanten der Markteinführung und -durchdringung der Brennstoffzellen-Technologie im Straßenverkehr. Ausgangsbedingungen und Perspektiven eines solchen Veränderungsprozesses werden im Folgenden untersucht. Die Analyse stützt sich dabei im wesentlichen auf

- Angaben von Mineralölwirtschaft und Tankstellennetz-Betreibern: Publikationen der Öffentlichkeitsarbeit (in gedruckter oder elektronischer Form) und interne Dokumente, die von Fachabteilungen zur Verfügung gestellt wurden
- Angaben der Automobilindustrie, die zum Teil im Zuge der Arbeiten für die übrigen Arbeitspakete des Projektes erhoben wurden.

Fahrzeug- und Kraftstoff-Industrie stehen kurz vor richtungsweisenden Entscheidungen, die einschneidende Änderungen in der Versorgung des motorisierten Verkehrs mit Treibstoffen zur Folge haben werden: Mit Beginn des neuen Jahrhunderts gelangen neue Motortechnologien zur Marktreife, die teils erheblich veränderte Anforderungen an die heute gebräuchlichen Kraftstoffe stellen. Stichworte im konventionellen Bereich sind etwa die verschärften Abgasnormen Euro 3 und Euro 4, die in den Jahren 2000 bzw. 2005 verbindlich werden, Direkteinspritzung, DeNOx-Katalysator, Partikelfilter, schwefelarme Kraftstoffe und die „Selbstverpflichtung der Industrie“, Verbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen weiter signifikant zu senken.

Bis zum Ende des nächsten Jahrzehnts wird die Nachfrage nach heutigem, bleifreiem Normalbenzin spürbar abnehmen. Das Vordringen von Fahrzeugen mit reduziertem Verbrauch wird überdies zunächst die Nachfrage nach den übrigen Otto-Kraftstoffen verringern und sich später auch auf den Verbrauch von Diesel-Kraftstoff auswirken.

Von einem weiteren Technologiesprung kann gesprochen werden, sollten sich neue Antriebskonzepte tatsächlich am Markt etablieren. Große Chancen werden hier der Brennstoffzelle eingeräumt, in deren Entwicklung beispielsweise alleine DaimlerChrysler, zusammen mit anderen Entwicklungspartnern, in den nächsten Jahren 1,4 Milliarden DM investieren will.

Die Brennstoffzelle benötigt Wasserstoff (H<sub>2</sub>) als Energieträger, jedoch kann nach Auffassung des größten Tankstellenbetreibers in Deutschland an eine

flächendeckende H<sub>2</sub>-Versorgung bestenfalls langfristig gedacht werden. Die ARAL AG beteiligt sich an dem Gemeinschaftsprojekt mit DaimlerChrysler, um die Wasserstoffversorgung von fahrzeugseitigen Brennstoffzellen mit alternativen Kraftstoffen, wie Methanol, aber auch mit konventionellen Erdölprodukten, Otto- oder Diesel-Kraftstoff, zu erproben. In ihnen ist Wasserstoff in unterschiedlichen Anteilen enthalten.

Welche Lösung sich zur Versorgung der Brennstoffzelle durchsetzen wird, ist noch nicht absehbar. In den USA wird konventioneller Kraftstoff als H<sub>2</sub>-Träger bevorzugt. DaimlerChrysler setzt im Pkw auf Methanol, untersucht aber auch andere Energieträger mit Wasserstoff. Für Nutzfahrzeuge wird gasförmiger Wasserstoff erprobt.

Für eine Übergangszeit scheinen konventionelle Kraftstoffe auf Erdölbasis zur Wasserstoff-Bereitstellung am ehesten geeignet, die Zeit bis zur technologischen und wirtschaftlichen Praxisreife der reinen Wasserstoff-Technologie zu überbrücken. Gründe hierfür sind hoher Investitionsaufwand für eine neue, reine Wasserstoff-Infrastruktur, höhere Kundenakzeptanz und eine relativ günstige Gesamtenergie- und Emissionsbilanz bei heutigen Erdölprodukten. Problematisch ist in diesem Zusammenhang die derzeit noch energieaufwendige Wasserstoff-Bereitstellung aus Wasser mittels Elektrizität (Elektrolyse), die umweltverträglich nur durch großtechnische Nutzung von regenerativen Energien, hier vor allem Solarenergie, möglich ist.

1998 wurde von einem Industrie-Konsortium das Projekt „Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie (VES)“ angestoßen mit dem Ziel, in einer konzertierten Aktion von Wirtschaft und Politik (unter Einbeziehung des (damaligen) Bundesministeriums für Verkehr) eine ambitionierte Strategie für einen breiten Einsatz alternativer Energie- und Antriebssysteme im Verkehr zu erarbeiten und umzusetzen.

Mitglieder des Konsortiums:

BMW AG, München	Aral AG, Bochum
DaimlerChrysler AG, Stuttgart	RWE AG, Essen
MAN AG, München	Deutsche Shell AG, Hamburg
Volkswagen AG, Wolfsburg.	

Angestrebte Ergebnisse der Projektphase I:

- Auswahl von ein bis zwei zukunftsfähigen Energieträgern für Straßenfahrzeuge einschließlich deren Produktionspfade

- Handlungsempfehlung zum Aufbau einer Infrastruktur für die gesamte Energiekette und darauf abgestimmter Produktion von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben
- Strategiekonzept für die Markteinführung mit wettbewerbsentscheidenden Terminen
- Realisierungsvorschlag für notwendige staatliche Rahmenbedingungen
- Handlungsempfehlungen zur Erweiterung der Initiative auf Europa.

Die Zusammensetzung des Konsortiums aus Unternehmen der Kraftfahrzeugindustrie und der Mineralölwirtschaft zeugt von der Erkenntnis, dass ein gemeinsames Vorgehen beider Branchen notwendig ist, da mittlerweile der Nutzen alternativer Antriebsarten unter den Aspekten der Endlichkeit der Vorräte an fossilen Brennstoffen und der drohenden Übernutzung der Erdatmosphäre als Senke für klimarelevante Emissionen als unstrittig erkannt ist. Als weitere erhoffte positive Effekte werden eine Wiederherstellung bzw. Stabilisierung der Marktführerschaft auf dem Gebiet der alternativen Energie- und Antriebssysteme innerhalb von zehn Jahren und langfristig die Unabhängigkeit des Straßenverkehrs von Öl- und Gas-Importen angesehen.

Die Zielsetzung der „Verkehrswirtschaftlichen Energiestrategie“ unterscheidet sich naturgemäß vom Ansatz der Arbeiten in diesem Verbundforschungsprojekt. Zum Einen gibt es a priori keine ausschließliche Konzentration auf die Brennstoffzellen-Technologie, da die beteiligten Automobilhersteller auch andere Entwicklungspfade zum Teil intensiv verfolgen. Zum Anderen ist zu erwarten, dass die durch die bisherigen Entwicklungsinvestitionen der beteiligten Unternehmen bereits geschaffenen Fakten in das Ergebnis einfließen werden. Sollten sich die Unternehmen, die in ihren jeweiligen Branchen über relativ große Marktanteile verfügen, auf einen Entwicklungspfad der VES einigen, wird dieser einen klassischen Top-down-Prozess einer Technologie-Einführung darstellen, und es ist anzunehmen, dass dieser durch andere Wettbewerber praktisch nicht zu unterlaufen sein wird; anders als in der Vergangenheit bei konkurrierenden Technologien, z. B. in der Unterhaltungselektronik, wo sich nach anfänglichem Gleichgewicht zwischen mehreren Systemen am Ende (mehr oder weniger zufällig) ein Produkt durchsetzte, wird hier ein Angebots-Oligopol die Entscheidungsfindung des Marktes im Vorfeld einschränkend beeinflussen. Vorteilhaft an diesem Vorgehen ist jedoch in jedem Fall die Bündelung der investiven Kräfte, eine erhebliche Reduktion der Kosten für weitere Forschung und Entwicklung, damit einhergehend tendenziell niedrigere Verbraucherpreise, und die Sicherheit der Konsumenten hinsichtlich künftiger Kraftstoffversorgung und Technologiestabilität.

Erste Ergebnisse der VES waren bis Ende des Jahres 1999 geplant.

## 1 Ausgangsbedingungen bei Kraftstoffverbrauch und Angebot<sup>1</sup>

Die emissionsbezogenen, problematischen Auswirkungen des Straßenverkehrs bleiben (nach Ansicht der ESSO AG) beherrschbar: Der Verkehr wird zwar mit wachsender Anzahl an Pkw und steigenden Güterverkehrsleistungen noch weiter zunehmen, der Kraftstoffverbrauch und die daraus resultierenden Umweltbelastungen sollen jedoch deutlich zurückgehen:

- Senkung der Schadstoffemissionen durch neue Motortechnologien und umweltfreundlichere Kraftstoffqualitäten
- Effizienzerhöhung durch verbessertes Verkehrsmanagement, Nutzung elektronischer Verkehrslenkung (Telematik) und weiterer Ausbau der Infrastruktur, mit Senkung zumindest des staubedingten Kraftstoffverbrauchs und resultierender Schadstoffemissionen
- Senkung des Kraftstoffverbrauchs bis 2020 um etwa 20 Prozent durch sparsamere Motoren und eine Verlagerung zu niedrigeren Hubraumklassen.

Im Folgenden wird die Einschätzung der ESSO AG zur Entwicklung des Verkehrssektors in Deutschland von 1997 bis zum Jahr 2020 zusammengefasst (Quelle: ESSO Energieprognose '98, Schwerpunkt Straßenverkehr). Die Prognose geht von der Erwartung aus, dass „durch politische Weitsicht und ökonomische Vernunft Rahmenbedingungen geschaffen werden, in denen die Potentiale zukünftiger Technologien und moderner Verkehrsmanagementsysteme genutzt werden können.“ Auf diese Weise ließen sich „die Mobilitätsbedürfnisse der Bürger und die Gütertransporterfordernisse der Wirtschaft mit den Ansprüchen des Umweltschutzes verbinden.“

### 1.1 Rückläufiger Kraftstoffverbrauch

Die Analyse der ESSO kommt zu dem Schluss, dass zwei häufig zu hörende Behauptungen falsch sind

- der Straßenverkehr – und mit ihm die Schadstoffemissionen – werden ins Uferlose steigen,
- neue Antriebssysteme und Antriebsenergien werden die heutigen Motoren und Kraftstoffe vom Markt verdrängen.

---

<sup>1</sup> Dieser Abschlussbericht enthält nur eine Zusammenfassung zu den untersuchten Entwicklungen. Das ausführliche Arbeitspapier (Hackenjós, 1999) kann auf Wunsch zur Verfügung gestellt werden.

Nach dieser Einschätzung werden Benzin- und Diesel-Kraftstoff im Prognosezeitraum die beherrschenden Kraftstoffe im Straßenverkehr bleiben, langfristig ist jedoch mit sinkender Nachfrage zu rechnen. Der Verbrauch von Otto- und Diesel-Kraftstoff auf der Straße nimmt bis 2020 um rund 11 Millionen Tonnen oder 21 Prozent auf rund 42 Millionen Tonnen ab (Otto-Kraftstoff von 30 auf 20 Millionen Tonnen; Diesel-Kraftstoff von 23 auf 22 Millionen Tonnen).

Maßgeblich hierfür sind folgende Gründe:

1. Ähnlich wie in anderen hochindustrialisierten Volkswirtschaften nähert sich die Pkw-Dichte allmählich der Sättigungsgrenze. Die Pkw-Bestände steigen bis 2020 auf 49,7 Millionen Einheiten (1997: 41,4 Millionen), wobei die jährlichen Zuwachsraten zurückgehen. Ein Teil des Zuwachses ist durch den Nachholbedarf in den neuen Bundesländern erklärt, der jedoch um das Jahr 2005 gedeckt sein wird. Bis dahin wird sich die Pkw-Dichte in den Neuen Bundesländern jener in den Alten Bundesländern angeglichen haben. Auch der Straßengüterverkehr wird künftig langsamer wachsen. Der Wandel von der Industrie- zur Dienstleistungsgesellschaft wird einen dämpfenden Einfluss auf das Güterverkehrsaufkommen haben. Allerdings wird wegen der zentralen Lage der Bundesrepublik in Europa - insbesondere vor dem Hintergrund der weiteren Öffnung und Integration Osteuropas - der Transitverkehr noch an Bedeutung gewinnen. Dies wird sich auf den Dieserverkauf in Deutschland jedoch nur zum Teil auswirken, da - begünstigt durch die hohe Reichweite einer Lkw-Tankfüllung und die im Ausland oft niedrigeren Diesel-Preise - ein Auftanken in Deutschland nach Möglichkeit vermieden wird. Insgesamt wird erwartet, dass der Dieserverbrauch im Straßengüterverkehr bis 2005 noch um 18 Prozent wachsen, danach allerdings rückläufig sein wird.
2. Der spezifische Kraftstoffverbrauch wird im Prognosezeitraum deutlich abnehmen, bei Benzin-Pkw von 8,9 auf 6,2 l/100 km und bei Diesel-Pkw von 7,4 auf 4,3 l/100 km. Als Gründe hierfür werden angegeben:
  - effizientere Energieausnutzung der traditionellen Kraftfahrzeugmotoren
  - neue Technologien, z. B. Direkteinspritzung bei Benzin- und Dieselmotoren
  - Gewichtsreduzierung der Fahrzeuge durch Einsatz neuer Materialien
  - Tendenz zu kleineren Pkw als Zweit- und Drittwagen
  - Vermeidung von Verkehrsstauungen durch elektronische Verkehrslenkung

- zunehmender Anteil von sparsamen Diesel-Pkw an der Pkw-Flotte – von 13,5 Prozent heute auf 25 Prozent in 2020.
- Die Kraftfahrzeugindustrie bemüht sich, verbrauchseffizientere Fahrzeuge zu entwickeln. Dies wird unter anderem auch durch die „freiwillige Selbstverpflichtung“ des Verbandes der Automobilindustrie (VDA) dokumentiert, den spezifischen Verbrauch von neu zugelassenen Pkw bis 2005 um 25 Prozent im Vergleich zu 1990 zu senken. Eine ähnliche Verpflichtung ist der europäische Automobilverband (ACEA) eingegangen – 25 Prozent Rückgang zwischen 1995 und 2008. Vergleichbare Anstrengungen werden bei der Entwicklung von Lkw und Bussen unternommen.
- Die durchschnittliche Pkw-Fahrleistung wird sinken – bei Diesel-Pkw um 2.200 auf 14.500 km und bei Benzin-Pkw um 200 auf 11.800 km pro Jahr. Der wesentliche Grund hierfür liegt im wachsenden Anteil von Zweit- und Drittfahrzeugen.

Tabelle 1-1 Prognose Pkw-Kennzahlen Deutschland bis 2020 (Quelle: Esso Energieprognose '98)

<b>Pkw Kennzahlen Deutschland</b>	<b>1990</b>	<b>1996</b>	<b>1997</b>	<b>2000</b>	<b>2010</b>	<b>2020</b>
Kraftfahrzeugdichte (Pkw/1000 EW)	449	501	504	524	579	611
Anzahl Pkw (Mio.)	35,5	41,0	41,4	43,2	47,5	49,7
davon:						
Benzin Pkw	31,3	35,4	35,8	36,6	37,2	34,3
Diesel Pkw	4,2	5,6	5,6	6,5	9,5	12,2
sonstige Pkw *	–	–	–	0,1	0,8	3,2
Spez. Verbrauch (l/100 km)						
Benzin Pkw	9,6	8,9	8,9	8,5	7,4	6,2
Diesel Pkw	8,1	7,5	7,4	7,0	5,8	4,3
Jahresfahrleistung (km/Jahr)						
Benzin Pkw	13.100	12.100	12.000	12.000	11.800	11.800
Diesel Pkw	17.500	16.800	16.700	16.100	15.000	14.500

\*) Brennstoffzelle, Erdgas-, Flüssiggas-, Elektro-, Hybrid- und Wasserstoffantrieb

Die dargestellte Entwicklung geht auch davon aus, dass längerfristig alternative Antriebstechnologien für Straßenfahrzeuge und die entsprechenden Kraftstoffe eine zunehmende Rolle spielen werden. ESSO erwartet, dass im Jahre 2020 etwa 3,2 Millionen Pkw oder 7 Prozent der Gesamtflotte in Deutschland mit alternativen Kraftstoffen betrieben und/oder alternative Antriebstechnologien haben werden. Zu den alternativen Kraftstoffen gehören Erdgas, Flüssiggas, Bio-Diesel, Wasserstoff und Methanol. Zu den alternativen Antriebsarten zählen Hybrid- und Elektromotoren (mit oder ohne Brenn-

stoffzelle). Diesen Technologien ist gemeinsam, dass sie - beim gegenwärtigen Entwicklungsstand - neben Vorteilen auch deutliche Nachteile haben, die einer stärkeren Marktdurchdringung derzeit noch im Wege stehen.

Bis zum Ende des Prognosezeitraums werden alternative Kraftstoffe und Antriebsarten nur in begrenztem Umfang zum Einsatz kommen – allerdings mit steigender Tendenz.

Ursächlich dafür sind nach gegenwärtigem Stand

- die noch hohen Kosten (Wasserstoff, Elektrizität, Brennstoffzelle, Bio-Diesel),
- die unausgereifte Technik (Wasserstoff, Elektrizität, Brennstoffzelle),
- der begrenzte Aktionsradius (Elektrizität, Wasserstoff, druckkomprimiertes Erdgas, Brennstoffzelle),
- die begrenzte Verfügbarkeit des Einsatzstoffes (Wasserstoff, Bio-Diesel).

Jede neu hinzukommende Kraftstoffart erhöht die Gesamtkosten der Versorgungsinfrastruktur. Unter der Voraussetzung, dass bisherige Tankstellen-Standorte auch für die Abgabe alternativer Kraftstoffe genutzt werden können, müssen doch neue Tank- und Zapfeinrichtungen geschaffen werden, da keine sofortige und vollständige Verdrängung bisheriger Produkte stattfindet. Neben den hierfür nötigen Investitionen dürfte an manchen Standorten auch der nur begrenzt zur Verfügung stehende Platz ein Hindernis darstellen.

## 1.2 Bestehende Betankungsinfrastruktur

In den vergangenen gut 20 Jahren hat sich im deutschen Tankstellenmarkt ein deutlicher Wandel vollzogen. Trotz einer Zunahme des Bestandes an Benzin-Pkw von 14,65 Millionen im Jahr 1971 (Westdeutschland) auf 34,42 Millionen im Jahr 1994 (Gesamtdeutschland) und eines Anstiegs des Benzinabsatzes über Tankstellen von rund 21 auf 37 Millionen Kubikmeter hat sich die Zahl der Tankstellen in diesem Zeitraum von fast 43.000 auf nur noch 18.300 verringert. Demzufolge versorgte 1971 eine Station im Schnitt 340 Pkw, Ende 1994 waren es mit knapp 1.900 Pkw gut fünfmal so viele. Ähnlich entwickelte sich der Benzinabsatz pro Tankstelle. Allein rund 2 Millionen Liter Otto-Kraftstoff werden heute im Durchschnitt pro Jahr abgegeben. Bis zu 2.000 Kundenkontakte pro Tag sind an Straßenstationen keine Seltenheit. Mit einem durchschnittlichen Umsatz von rund 1 Million DM pro Station und Jahr kommt den Tankstellen-Shops eine bedeutende Stellung im Bereich der Tankstellenplanung zu. Das Erscheinungsbild der Tankstellen beinahe aller Marken wurde in den vergangenen Jahren qualitativ verbessert und damit der Marktsituation, in der die Merkmale des eigentlichen Produktes gegenüber

den Zusatznutzen („Erlebniswelt Tankstelle“) in den Hintergrund traten, angepasst.

Mit der Modernisierung des Designs ging die Weiterentwicklung der technischen Einrichtung einher: Mehrprodukt-Zapfsäulen mit Gasrückführung („Saugrüssel“), flüssigkeitsdichte Stationsfahrbahnen, elektronische Zahlungssysteme, vollautomatische Waschanlagen mit Wasserwiederaufbereitung, um nur einige Beispiele zu nennen.

Weitere Stationsmodernisierungen, technische Weiterentwicklungen und Investitionen in die Verbesserung der Produktqualität - auch unter Umweltschutz-Aspekten - werden das Kraftstoff- und Schmierstoffgeschäft der Mineralölgesellschaften auch künftig prägen.

## 2 Brennstoffzellen-Kraftstoffe

Das Schema in Abbildung 2-1 zeigt die Zusammenhänge zwischen Primärenergieträgern, den derzeit sich in Anwendung befindlichen Kraftstoffen für Fahrzeugantriebe (v.a. Benzin, Diesel) und den dazu am häufigsten genannten Alternativen.

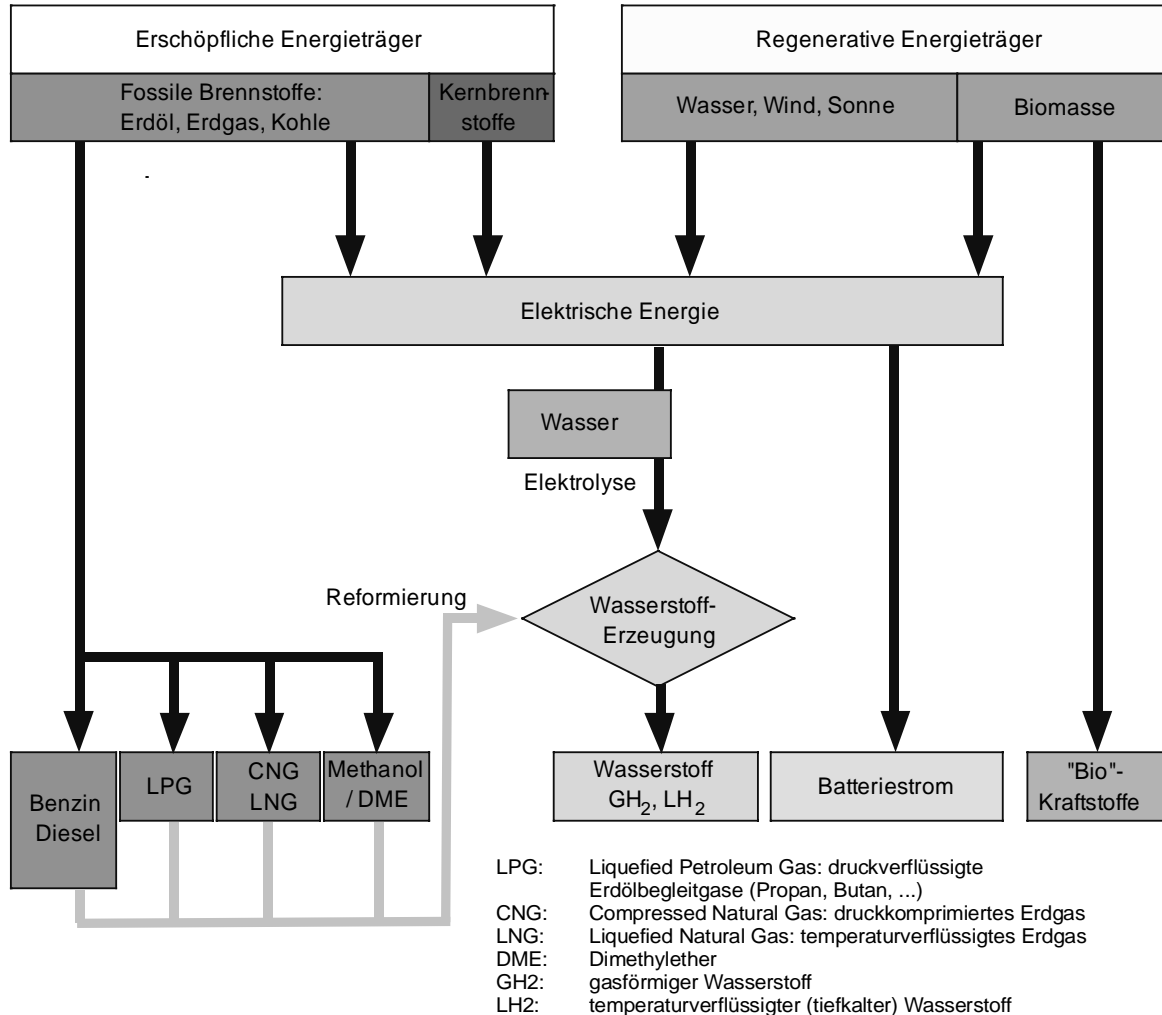


Abbildung 2-1 Prinzipielle Energie-Alternativen für Fahrzeugantriebe

Das Schema berücksichtigt die Tatsache, dass auch die Zwischen- und Endprodukte der fossilen Energieträger Erdöl und Erdgas, als Kohlenwasserstoff-Verbindungen und somit Träger von Wasserstoff, geeignet sind, durch Reformierung den in ihnen gebundenen Wasserstoff abzugeben. Nicht berücksichtigt hingegen sind Gewinnungspfade, die wegen hoher Kosten und/oder ihres schlechten Verhältnisses von Arbeitsenergieaufkommen zu Primärenergieeinsatz lediglich „Umweglösungen“ darstellen, so beispielsweise die Verflüssigung von Kohle zur Gewinnung von Kohlenwasserstoffen oder die Nutzung von Wasserstoff zur Gewinnung von Batteriestrom (mittels Brennstoffzelle).

Eine sich aus diesen Tatsachen ergebende Konsequenz ist die Universalität der Energieform Elektrizität und des Energieträgers Wasserstoff.

## 2.1 Grundsätzliche Anforderungen an Kraftstoffe

Um generell die Eignung einer Substanz als Kraft- oder Betriebsstoff für Fahrzeuge zu beurteilen, müssen Bewertungskriterien aufgestellt und entsprechend der Interessenlage der Akteure und ihren teilweise zueinander in Konkurrenz stehenden Zielen berücksichtigt werden. Die Akteure und ihre im hier diskutierten Zusammenhang relevanten Beziehungen untereinander lassen sich nach Abbildung 2-2 grob schematisieren.

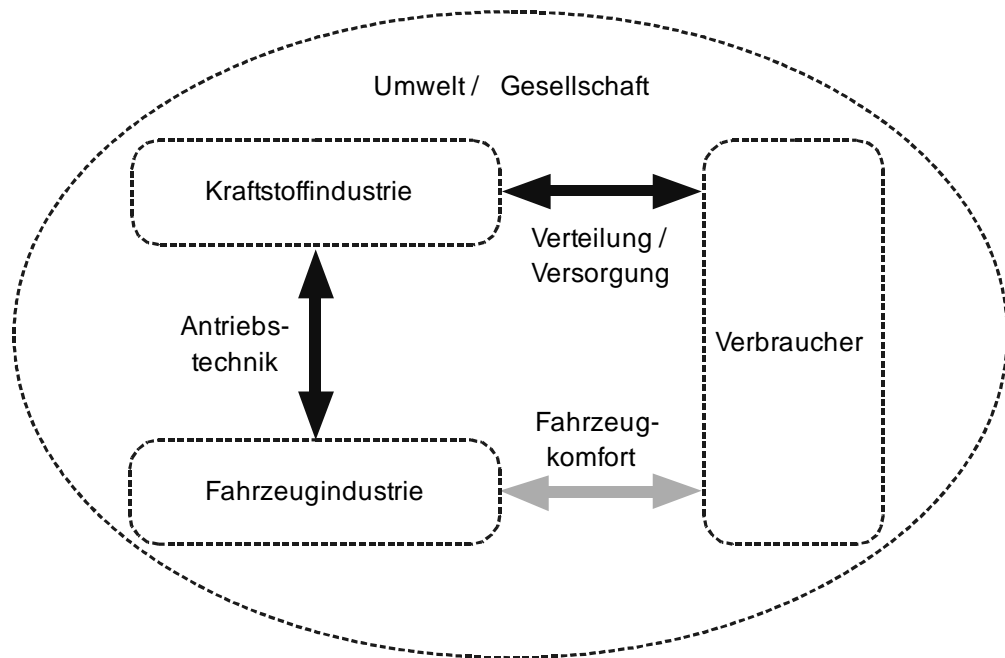


Abbildung 2-2 Zielfelder der Bewertung von Kraftstoffen für Straßenfahrzeuge

## **Beschreibung der Zielfelder:**

### Umwelt

Global:	Klimaänderungspotential (CO <sub>2</sub> -Emissionen)
Regional:	Smog (Sommer-/Winter-) (Ruß und Partikel) Versauerungspotential (Stickstoff, Schwefel) Eutrophierungspotential (Stickstoff) Verschmutzung (Ruß) Substanzschäden (Stickstoff, Schwefel)
Lokal:	Lärmbelästigung Geruchsbelästigung Gesundheitsgefährdung (Toxizität, auch Benzolproblematik)

### Gesellschaft:

Verfügbarkeit:	stofflich-physikalisch wirtschaftlich (handels-)politisch Bevorratungsnotwendigkeit
Wirtschaftlichkeit:	Energiebilanz des Gewinnungs-/Herstellungsprozesses Wertschöpfungsanteil Kosten der Umstellung oder der Parallelverwendung von Alternativen
Sicherheit:	technische Beherrschbarkeit

### Verbraucher:

Verfügbarkeit:	flächendeckende Versorgung
Kosten:	Endverbraucherpreise
Sicherheit:	Gesundheitsgefährdung, technisches Risikopotential
Nutzer- freundlichkeit:	Tankvorgang (Selbstbedienung/Fachpersonal, Zeitaufwand)
Fahrleistung:	Leistungsumsetzung Reichweite der Tankfüllung Emotionale Akzeptanz

### Kraftstoffindustrie:

Investitionen:	Neuinvestitionen, Ersatzinvestitionen Laufende Produktionskosten Rückstandsentsorgung/-verwertung
----------------	---

Kraftstoffverteilung und -versorgung:

Verteilung:	Aufbau neuer Versorgungsinfrastrukturen Nutzung vorhandener Versorgungsinfrastrukturen
Lagerung:	Aufbau neuer Speichereinrichtungen Nutzung vorhandener Anlagen Speicherbarkeit, Lagerkosten
Handling:	Transportierbarkeit, Transportkosten Sicherheitsanforderungen

Fahrzeugindustrie:

FuE-Aufwand für neue Antriebskonzepte  
Markteinführung, -durchdringung  
Laufende Produktionskosten  
Höherer Aufwand durch diversifizierte Modellreihen  
Serviceinfrastruktur

Fahrzeugtechnik:

Antriebstechnische Kriterien  
    prinzipielle Eignung  
    Energiedichte  
Speichertechnische Kriterien  
    Energiedichte (pro Volumeneinheit / pro Gewichtseinheit)  
Fahrzeugseitige Betankungsvorrichtungen.

Neben den sachbezogen unterschiedlichen Anforderungen und Interessen bestehen auch solche in Bezug auf Raum und Zeit.

Umwelt und Gesellschaft haben in der Regel langfristige Forderungen an die wirtschaftliche Kategorie „Kraftstoffversorgung“ als Teilaspekt der Daseinsvorsorge. Globale Umweltverträglichkeit, insbesondere minimale CO<sub>2</sub>-Emissionen, und möglichst geringe, an Nachhaltigkeitskriterien orientierte weitere Schadstoffemissionen stehen im Vordergrund. Lokale Umweltbeeinträchtigungen lassen sich gegebenenfalls durch technische Regelwerke oder Vorschriften mit lokalem oder regionalem Bezug auffangen. Gesellschaftliche Forderungen bestehen in der langfristigen Verfügbarkeit des Energieträgers, der somit sowohl stofflich-physisch als auch wirtschaftlich zu erbringen sein muss. Für die langfristige Verfügbarkeit der Vorräte verlangt deren globale Verteilung Beachtung; Nachfragekonkurrenz und Konzentration weltweit in wenigen „hot spots“ können zu unerwünschten politischen Zwangssituationen führen. Netto-Energieausbeute und der Anteil der eigenen Volkswirtschaft an der Wertschöpfungskette sind ebenso von Interesse wie der Aufwand, den eine Volkswirtschaft für eine eventuell notwendige Total-Umstellung oder eine parallele Verwendung mehrerer Energieträger betreiben

muss. Schließlich müssen die verwendeten Energieträger und ihre Eigenschaften auch die Anforderungen des inhärenten Sicherheitsbedürfnisses einer Gesellschaft erfüllen.

Die langfristigen Interessen der Industrie dürften insbesondere die Versorgungssicherheit und damit die Planbarkeit von Investitionszyklen berühren. Die Kraftstoffwirtschaft wird geneigt sein, die Zahl der angebotenen Alternativen gering zu halten, da Produktionsanlagen sowie Transport- und Betankungsinfrastrukturen der unterschiedlichen Substanzen in der Regel technisch nicht kompatibel ausgelegt sind bzw. die Herstellung der Kompatibilität unverhältnismäßig teuer ist. Einige Alternativen stellen besondere, teilweise extreme technische Anforderungen an Lager-, Transport- und Verteileinrichtungen, deren Erfüllung ebenfalls hohe Kosten verursacht. Die Fahrzeugindustrie wiederum hat Interesse daran, Forschung und Entwicklung in der Antriebstechnik auf bereits etablierte Alternativen zu konzentrieren und dort verfügbares technisches Wissen zu vertiefen und zu vervollständigen. Neue Antriebskonzepte bergen in der Regel ein Risiko bei der Markteinführung; unter anderem führen sie zu einer horizontalen Aufweitung der angebotenen Modellpalette, für die Service-Infrastruktur in Form von Ersatzteilversorgung und Wartungs- und Reparaturkapazität vorgehalten werden muss. Wegen der mittel- und langfristig jedoch absoluten Endlichkeit fossiler Brennstoffe müssen sich Kraftfahrzeughersteller bereits heute in ihrem eigenen Interesse mit Alternativen zum Verbrennungsmotor befassen.

Der Endverbraucher stellt an die Versorgung die Forderung der sicheren, billigen und flächendeckenden Verfügbarkeit für die im Gebrauch befindliche Fahrzeugflotte<sup>2</sup>. Die Verbraucherpreise je Leistungseinheit (Fahrzeugkilometer) dürfen aus Gründen der Marktakzeptanz keine großen Differenzen aufweisen. Der Tankvorgang darf zeitlich nicht aufwendig sein und keine hohen Anforderungen an den durchschnittlichen Konsumenten stellen. Ebenfalls wesentlich sind Sicherheitsaspekte für die Kunden-Akzeptanz, die erfahrungsgemäß nicht ausschließlich durch ökonomische sondern auch in hohem Maße durch emotionale Kriterien bestimmt wird.

Letztlich bestimmend für den Einsatz alternativer Kraftstoffe ist jedoch ihre technisch-wirtschaftliche Einsatzreife in Serienfahrzeugen, als Schnittstelle zwischen flächendeckender Kraftstoffversorgung und Fahrzeugtechnik. – Die Alternative muss prinzipiell zum Fahrzeugbetrieb geeignet sein, und Energiedichte bzw. Energieumsetzung in kinematische Leistungseinheiten dürfen von der üblichen Bandbreite etablierter Kraftstoffe nicht stark negativ abweichen. Betankung und fahrzeugseitige Speicherung müssen technisch und wirtschaftlich möglich sein, und Speichermasse bzw. -volumen dürfen auch hier nicht von den durch konventionelle Kraftstoffe vorgegebenen Größen-

---

<sup>2</sup> Historische Fahrzeuge bleiben als Ausnahme unberücksichtigt.

ordnungen signifikant nach oben abweichen. Im Idealfall sind verschiedene Kraftstoffe komplementär verwendbar, d. h. die Motortechnik erlaubt den wahlweisen Einsatz verschiedener Kraftstoffe, bzw. Gemische daraus in unterschiedlichen Anteilen, verwirklicht beispielsweise in sogenannten Flexible-fuel-Fahrzeugen, die mit Gemischen aus Benzin und Methanol betrieben werden. Diese Betriebsform hat bestimmte Vorteile, vor allem auf der Emissionsseite. Negativ fällt die geringere Energiedichte und damit erhöhtes Speichervolumen ins Gewicht, jedoch gleichen höhere Motorleistungen diesen Nachteil durch verminderten Verbrauch wieder aus. Als technische Entwicklung sind Flexible-fuel-Fahrzeuge vermutlich durchaus interessant, jedoch für den europäischen Markt wegen ihrer nicht signifikant besseren Eigenschaften kaum von Interesse [Schindler, 1997, S. 85]. Verbrennungsmotoren sind in dieser Hinsicht bereits technisch hoch entwickelt, belegen am Markt aber nur eine Nischenposition.

Aus den aufgeführten Kriterien (und anderen, hier nicht berücksichtigten) stellen die Gruppen, insbesondere Kraftstoff- und Fahrzeugindustrie, jeweils eigene Kosten-Nutzen-Überlegungen an. Den Konsumenten fällt in diesem Entscheidungsprozess die zwar passive (diese Gruppe besitzt kaum aktive Gestaltungsmöglichkeiten), jedoch mächtige Rolle der letzten Instanz zu, da neue Technologien unter Konkurrenzbedingungen kaum am Endverbraucher vorbei am Markt eingeführt werden können. – Staatliche Instanzen werden im Idealfall in einer Art Monitoring-Prozess darauf achten, dass gesamtwirtschaftliche Zielsetzungen (einschließlich der Umweltziele) eingehalten werden.

## 2.2 Kraftstoffe, Speicherung und Betankung

Protonenleitende Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen (PEMFC), als einzige für mobile Anwendungen ernsthaft in Frage kommende Variante, benötigen gegenwärtig hochreines Wasserstoffgas als Brennstoff. Schon CO-Gehalte von mehr als 10 ppm schädigen die Platin-Katalysatoren nach heutigem Stand der Technik (siehe hierzu ausführlich Arbeitspaket 1). Aus diesem Grund muss das Wasserstoffgas, und ebenso die Luftsauerstoffzufuhr, besonderen Reinheitsanforderungen entsprechen.

In dieser Hinsicht reiner Wasserstoff stammt aus elektrolytischen Prozessen. Wasserstoff aus fossilen Quellen, gewonnen durch Dampfreformierung, Partialoxidation oder Vergasung von Biomasse, muss durch katalytische Prozesse, durch Pendeldruckabsorption oder Metallmembranverfahren nachgereinigt werden.

Fossil befeuerte mobile PEMFC-Systeme müssen besonders hohen Anforderungen hinsichtlich ihrer Gesamt-Effizienz und Gesamtherstellkosten genügen. Dies gilt insbesondere für

- Kosten und Wirkungsgrad des Reformers,
- Kostenminimierung der Gasreinigung,
- Absenkung der Druckniveaus und den damit verbundenen Anforderungen an Kompressorleistung.

Für eine ernsthafte Einführung von Brennstoffzellen im Straßenverkehr kommen verschiedene Konzepte in Betracht [Wurster 1997]:

- Wasserstoffgewinnung vor Ort an öffentlichen Tankstellen, durch Elektrolyse von Wasser oder durch Dampfreformierung von Erdgas; Befüllung der Fahrzeuge mit gasförmigem Wasserstoff
- Wasserstoffgewinnung vor Ort an Tankstellen für Flottenfahrzeuge, aus Vergasung von Biomasse; Befüllung der Fahrzeuge mit gasförmigem Wasserstoff
- Massenproduktion von flüssigem Wasserstoff aus kostengünstigen erneuerbaren Energien (siehe beispielsweise Shell Hydro Power Island<sup>3</sup>), Transport über See in Spezial-Tankschiffen, Verteilung durch Kühl-Tanklastwagen an die Zapfsäulen und Befüllung der Fahrzeuge mit Flüssig-Wasserstoff
- industrielle Herstellung von Methanol aus Erdgas oder aus Biomasse, bzw. durch Hydrogenisierung von CO<sub>2</sub> (von großen CO<sub>2</sub>-Emittenten) mit Wasserstoff aus erneuerbaren Energien; Verteilung des Methanols wie herkömmliche Kraftstoffe über Tankstellen
- Tanken von Otto- oder Dieseldieselkraftstoff und Umwandlung in Synthesegas und Wasserstoff an Bord des Fahrzeugs durch partielle Oxidation.

Grundsätzlich können drei Ansätze der Kraftstoff-Betankung und Speicherung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen unterschieden werden:

- Wasserstoff-Speicherung als komprimiertes Gas (Hochdrucktanks, Metallhydride, Graphit-Nanostrukturen) oder in flüssiger Form (tiefkalter Flüssigwasserstoff)
- Wasserstoff-Speicherung in H<sub>2</sub>-reichem flüssigem Methanol
- Wasserstoff-Speicherung in H<sub>2</sub>-reichen Kohlenwasserstoffen wie Otto- und Dieseldieselkraftstoff.

Der dritte Ansatz erfordert keinerlei Änderungen in der Infrastruktur und stellt daher eine ideale Kulisse für ein Einführungs-Szenario dar. Andererseits wird hierdurch die Einführung erneuerbarer Energien in den Transportsektor verhindert oder wenigstens verzögert.

---

<sup>3</sup> Diese Form der Rohstoffausbeutung konterkariert allerdings in besonderem Maße das Konzept der Nachhaltigkeit; in Island entsteht bereits Widerstand gegen die ausgelösten Veränderungen der Wasserlandschaft und möglicher langfristiger Folgen für den Naturhaushalt der Insel

Der zweite Ansatz ist dem dritten ähnlich und erfordert lediglich kleinere Investitionen (Austausch von Kunststoff-Schläuchen und –Dichtungen). Zusätzlich wurden hier bereits Komponenten erneuerbarer Energien (Biomasse, Hydrogenisierung von CO<sub>2</sub>) eingeführt.

Der erste Ansatz erfordert weitgehende Eingriffe in die bestehende Infrastruktur, enthält jedoch die langfristige Möglichkeit einer flexiblen Einführung erneuerbarer Energiequellen im Transportsektor.

Da die Anpassung der Infrastruktur, abhängig vom Marktanteil von Brennstoffzellen-Fahrzeugen und technisch-wirtschaftlicher Lebensdauer bestehender Anlagen ohnehin mehrere Jahre dauern wird, kann man alle drei Konzepte als sich in zeitlicher Folge ergänzend und daher nicht in Konkurrenz zueinander betrachten.

### 2.2.1 Wasserstoff

Wasserstoff kann aus allen Primärenergieträgern direkt durch chemische Prozesse (Reformierung von Kohlenwasserstoffen) erzeugt werden. – Mittels Konvertierung von in Synthesegas (Gemische aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff, Zwischenprodukt industriechemischer Prozesse) enthaltenem CO mit Wasserdampf zu Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) kann aus diesem Synthesegas ebenfalls Wasserstoff gewonnen werden. – Die Methode mit dem geringsten CO<sub>2</sub>-Potential ist die Elektrolyse (Zerlegung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff durch Elektrizität). – Insbesondere letztere Möglichkeit bietet praktisch eine Perspektive mit „Ewigkeitscharakter“, da Stromerzeugung mit regenerativen Energien (Wasserkraft, Windkraft, Solarenergie) global betrachtet zeitlich unbegrenzt möglich ist; auch die Vorräte an Kernbrennstoffen zur Stromerzeugung reichen erheblich weiter als die derzeit bekannten Vorkommen an fossilen Energieträgern.

Seine Bedeutung als Kraftstoff erhält Wasserstoff nicht alleine durch die Brennstoffzelle; er ist auch als Brennstoff für Verbrennungsmotoren seit Jahren in der Erprobung. Vor allem unter diesem Aspekt richteten sich bisherige Entwicklungsaktivitäten auf praxis- und verkehrstaugliche Erzeugungs- und Speichertechnologien.

Problemfeld bei Wasserstoff ist die Speicherung. Mit einer Dichte von 0,08988 g/Liter bei Normaldruck und 0°C ist es das leichteste aller chemischen Elemente.

Als Druckgas kann Wasserstoff bislang nicht effizient gespeichert werden. Selbst bei einem Druck von 200 bar erreicht der Anteil des gespeicherten Gases nur etwa 1 Prozent des Speichergewichtes. Ähnliche Werte (bei Wegfall der Überdruckproblematik) erreichen bestimmte Metalllegierungen (FeTiH<sub>2</sub>),

wobei ausgenutzt wird, dass diese bei Kontakt mit Wasserstoff ein Hydrid bilden und so Wasserstoff in fester Form binden können. Eine weitere Möglichkeit bildet die Hydrierung von Toluol zu Methylcyklohexan (MCH) oder Benzol zu Cyclohexan und Dehydrierung zur Freisetzung des Wasserstoffs vor Gebrauch im Antriebsaggregat. Jedoch sind auch hier die Voraussetzungen für mobile Anwendungen auf Grund der hohen Massen der Trägermaterialien und der Dehydrierungsanlage ungünstig.

Neuere untersuchte Werkstoffe (Graphit-Nanofasern, auch Nano-Kohlenstoff-Fasern) sollen jedoch eine hocheffiziente Speicherung ermöglichen. Wasserstoff lagert sich dabei in mehreren Lagen auf Graphitfasern mit Querschnitten von 5-100 Nanometern und Längen von 5-100 Mikrometern an. Die Beladung des Speichers erfolgt unter Drücken von 13,6 MPa in einem Zeitraum von zwischen 4 h und 24 h. Der Speicherdruck soll bei 4-5 MPa liegen. Bei einem Speicherdruck über ca. 3 MPa kann der Speicher den eingelagerten Wasserstoff bei Raumtemperatur behalten. Die maximale Speicherfähigkeit des Systems soll je nach Art des verwendeten Graphits bis zu 75 Prozent des Kohlenstoffgewichts in Wasserstoff erreichen können. Wird der Druck reduziert, können bis zu 95 Prozent der adsorbierten Wasserstoffmenge wieder freigesetzt werden. Ein Fahrzeugtank von etwa 25 l Volumen und 87 kg Masse soll einem Brennstoffzellen-Pkw mit vier Sitzplätzen bis zu 8.000 Kilometer Reichweite ermöglichen (Quelle: hyweb). Am 09.02.99 teilte die leitende Entwicklerin, Nelly Rodriguez (Northeastern University, Boston, MA USA), anlässlich ihres Vortrags auf der neunten Jahrestagung des kanadischen Wasserstoffverbands mit, dass sie davon ausgehe, dass GNF-Speicher in etwa drei Jahren als kommerzielles Produkt verfügbar seien.

Ein wesentlich besseres Verhältnis von gespeicherter Menge zu Speichergewicht als mit bisheriger Druckgasspeichertechnik kann mit flüssigem Wasserstoff erreicht werden. Wegen des Siedepunkts von  $H_2$  von  $-252,87^\circ C$  ist die Speicherung in Vakuum-superisolierten Tanks bei  $-253^\circ C$  nötig. Wegen der enormen Differenz zur Außentemperatur gelingt die Isolierung nicht vollständig, permanentes leichtes Verdampfen von Wasserstoff ist die Folge. Versuche ergaben, dass die Verluste (durch ein Überdruckventil) bei Tankgrößen für mobile Anwendungen bei etwa 2 Prozent täglich liegen, wenn kein Verbrauch stattfindet. Bei regelmäßigem Verbrauch liegt kein Verlust vor, da der Wasserstoff-Dampf in den Betrieb gelangt [Schindler, 1997]. BMW gibt an, dass eine verlustfreie Speicherung über drei Tage gewährleistet ist [BMW, 1998].

Wegen der extremen Anforderungen an das Speichermaterial war lange Zeit die geometrische Form des Speichers Restriktionen unterworfen. Mittlerweile wurden jedoch auch hier Erfolge erzielt, und dem Tank, wie dem normalen Benzintank, eine flexiblere Form gegeben und eine Unterbringung in Serienkarosserien ermöglicht. Derzeitige Testfahrzeuge verfügen über einen hochisolierten 140-Liter-Tank. Für wasserstoffgetriebene Verbrennungsmotoren

der aktuellen Generation entspricht diese Tankfüllung einem Energiegehalt von etwa 40 Litern Otto-Kraftstoff. Auch sicherheitstechnische Anforderungen werden erfüllt: In Worst-case-Untersuchungen wurden Wasserstoff-Tanks systematisch denkbaren Havarie-Situationen ausgesetzt, ohne dass es zu einer befürchteten Knallgas-Explosion gekommen wäre. Selbst unbemerkte Lecks im Tank stellen für das Fahrzeug keine Gefahr dar, da Wasserstoff extrem flüchtig ist und stets durch hochgelegene Öffnungen entweicht. Fahrzeughersteller, die sich speziell mit der Entwicklung des Wasserstoff-Verbrennungsmotors und damit auch der Speicherung von flüssigem Wasserstoff befasst haben, betrachten diesen Teil der Fahrzeugtechnik heute nicht mehr als Problem [BMW, 1998].

Besondere Anforderungen stellt flüssiger Wasserstoff an die Betankungsanlagen: Wegen der extremen Temperatur und der Notwendigkeit der Luftabgeschlossenheit des Treibstoffs ist es nicht mehr auch nur ansatzweise möglich, bisher eingesetzte Tankvorrichtungen zu verwenden. Nachdem anfangs flüssiger Wasserstoff von unten in den Tank eingefüllt wurde und das durch Verdampfung über der Flüssigkeit entstehende Gaspolster ständig abgelassen werden musste und damit verloren war, beruht das derzeitige Konzept auf dem „Einregnen“ des Wasserstoffs von oben: auf dem Weg durch den Tank kondensiert an den Tröpfchen der bereits verdampfte Wasserstoff und geht auf diese Weise nicht mehr verloren. Dieses Betankungsverfahren hat neben der Verlustfreiheit auch massive Zeitvorteile: es gelang, die Betankungszeit für einen 140-Liter-Tank von knapp einer Stunde auf unter drei Minuten zu senken.

Die Betankung mit gasförmigem Wasserstoff erfordert gegenüber der herkömmlichen Kraftstoff-Betankung nur den Luftabschluss, der mit relativ unaufwendiger Verbindungs- und Verschlusstechnik realisiert werden kann. Diese ist im wesentlichen von den bereits vorhandenen Druckgas-Betankungsanlagen bekannt und derzeit Stand der Technik. Kritisch ist noch die Betankungsdauer.

Die Betankung mit flüssigem Wasserstoff hingegen erfordert deutlich aufwendigere und komplexere Technologie. Neben den temperaturbeständigen Materialien scheint auch die vollautomatische Betankung mittels Roboter unumgänglich zu sein. Dies wiederum bedingt fahrzeugseitige Erkennungs- und Positionierungshilfen (Transponder) und Sensoren.

Die Betankungsproblematik beider Wasserstoffarten kann als technisch gelöst angesehen werden. Beide Formen haben spezifische Vor- und Nachteile. Insbesondere bei der teuren Flüssig-Variante ist derzeit nicht abzusehen, ob und wann eine Investitionsdynamik in Gang kommen kann, die eine Wechselwirkung von niedrigen Stückpreisen pro Betankungsanlage und höheren Anlagenzahlen ermöglicht.

Parallel und in Ergänzung zur Entwicklung der Flüssigwasserstoff-Betankung wurde eine vollautomatische Anlage zum „Robot-Tanken“ entwickelt und zunächst auf dem Gelände der Solar-Wasserstoff-Bayern GmbH in Neunburg vorm Wald (Oberpfalz) als Versuchsanlage errichtet. Die Nachfolge-Anlage, als Weiterentwicklung des nicht öffentlichen Prototyps, wird im Frühjahr 1999 am Flughafen München als „erste der Öffentlichkeit zugängliche automatische Wasserstoff-Tankstelle für Pkw“ eröffnet [<http://www.hyweb.de/h2muc/>].

Die Anlage besteht aus zwei parallelen Versorgungssträngen zur Betankung von drei Niederflur-Gelenkbussen mit gasförmigem Wasserstoff ( $\text{GH}_2$ ) sowie zur Betankung von Pkw mit flüssigem Wasserstoff ( $\text{LH}_2$ ). Der gasförmige Wasserstoff wird autonom vor Ort mittels Elektrolyse hergestellt. Der flüssige Wasserstoff wird extern erzeugt, per Trailer angeliefert und im  $\text{LH}_2$ -Tank gespeichert.

Die Betankung des Pkw mit Flüssigwasserstoff erfolgt vollautomatisch über einen eigens entwickelten Tankroboter. Die  $\text{LH}_2$ -Tankstelle ist öffentlich zugänglich außerhalb des Flughafenvorfelds angeordnet.

Der elektrolytisch erzeugte gasförmige Wasserstoff wird in einem Hydridspeichersystem zwischengelagert. In Verbindung mit einem speziellen Heiz- und Kühlsystem sorgt dieser Hydridspeicher dafür, dass der nachgeschaltete Verdichter - auch bei schwankender Wasserstoffproduktion der Elektrolyse - immer mit konstantem Ansaugdruck betrieben werden kann. Der Kompressor verdichtet das Wasserstoffgas auf den Fülldruck des  $\text{GH}_2$ -Hochdruckspeichers, von wo aus es über die  $\text{GH}_2$ -Zapfsäule in die Fahrzeugspeicher der Busse gelangt.

Die Querverbindung zwischen Flüssig- und Gaswasserstoffschiene stellt die Wasserstoffversorgung der Busse bei Wartungsarbeiten am Elektrolyseur sicher. In diesem Fall wird der tiefkalte flüssige Wasserstoff erst mit der  $\text{LH}_2$ -Hochdruckpumpe auf das Druckniveau des Hochdruckspeichers gebracht, im  $\text{LH}_2$ -Verdampfer in die Gasphase überführt und dann in den  $\text{GH}_2$ -Hochdruckspeicher gefördert.

Die einzelnen Anlagenteile sind in einer übergeordneten Leittechnik zusammengefasst, die die Betriebsabläufe der Gesamtanlage regelt und gemeinsam mit einem Wasserstoff-Sensorsystem Aufrechterhaltung und Sicherung des Betriebs gewährleistet.

Im Januar 1999 wurde auf dem Gelände der Hamburger Gaswerke in HH-Tiefstack „die erste öffentliche Wasserstoff-Tankstelle Europas“ in Betrieb genommen. Gasförmiger Wasserstoff aus Hamburger Industrieproduktion wird in Druckgasflaschen auf einem Trailer an die Tankstelle gebracht. Über Zwischenverdichter und Zwischenspeicher gelangt der Wasserstoff aus dem

Trailer in die Zapfsäule. Nach einer einjährigen Testphase soll im Rahmen des Projektes W.E.I.T. (Wasserstoff-Energie Island Transfer) in Island regenerativ aus Wasserkraft erzeugter und per Schiff nach Hamburg transportierter Wasserstoff zum Einsatz kommen.

Zunächst wird nur eine Flotte von sechs Lieferfahrzeugen mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren der am Projekt beteiligten Unternehmen betankt. Der Tank besteht aus drei Druckgasflaschen. Mit einer Reichweite von ca. 150 km reicht die Tankfüllung für die Fahrstrecke eines Tages aus. Die Treibstoffkosten pro km liegen bei 0,22 DM und sind 0,7 DM oder rund 50 Prozent teurer als bei Dieselantrieb. Nach Angaben des Betreibers liegt die absolute Dauer des Tankvorgangs in etwa bei der Dauer eines „normalen“ Tankvorgangs; berücksichtigt man die geringere Reichweite der Fahrzeuge, die täglich eine Tankfüllung erfordert, ist die relative Tankdauer etwa um den Faktor 4 länger.

Die Tankanlage umfasst eine Zapfsäule, Messtechnik und die Kompressoranlage, die Kosten liegen nach Angaben des Betreibers bei DM 350.000.

### 2.2.2 Methanol

Methanol (Methylalkohol) ist der einfachste Alkohol, mit der chemischen Struktur  $\text{CH}_3\text{OH}$  und der Elementarzusammensetzung:

- Kohlenstoff: 37,5 Gewichts-Prozent
- Sauerstoff: 50,0 Gewichts-Prozent
- Wasserstoff: 12,5 Gewichts-Prozent.

Methanol erfüllt viele der im Sinne des Verbrennungsmotors an einen „technisch idealen Kraftstoff“ gestellten Anforderungen. Es ist giftig (tödliche Dosis ab 10 g) und kann auch über Hautkontakt in den Körper dringen, das Gefährdungspotential liegt jedoch nicht höher als bei heute gängigen Kraftstoffen. Methanol gilt wegen seiner Mischbarkeit mit Wasser und seiner biologischen Abbaubarkeit als wenig wassergefährdend, jedoch als chemisch aggressiv, da es viele Kunststoffe und Mineralsalze löst und daher eine angepasste Werkstoffauswahl erfordert.

Die industrielle Erzeugung von Methanol aus schwefelarmem Synthesegas ist heute Stand der Technik. Das Synthesegas wird nahezu ausschließlich aus Erdgas erzeugt. In den letzten Jahren ist eine größere Zahl von Methanol-Anlagen entstanden, in denen sonst nicht verwertbares Begleitgas aus der Erdölförderung genutzt wird, das heute in vielen Ländern nicht mehr abgefackelt oder unverbrannt freigesetzt werden darf. Das Gas steht in diesem Fall praktisch kostenfrei zur Verfügung und erlaubt somit sehr niedrige Bereit-

stellkosten. Geht man von der Erzeugung aus Erdgas in Raffinerien im Inland aus, ergeben sich Produktkosten von etwa 250 DM/t Methanol (12,50 DM/GJ). Eine andere ähnlich kostengünstige Bereitstellungsmöglichkeit bietet die Kohlevergasung (Importkohle oder Braunkohle) [Schindler, 1997].

Die regenerative Gewinnung von Methanol aus Biomasse wird an dieser Stelle vernachlässigt.

Methanol wird bislang hauptsächlich als leistungsstarker Kraftstoff für bestimmte Flugzeugmotoren und für Rennfahrzeuge verwendet und ist somit Sondernutzungen vorbehalten. Großmaßstäbliche Erfahrungen mit der Betankung liegen noch nicht vor.

Als Flüssigkeit mit hohem Siedepunkt und niedrigem Dampfdruck ist es problemlos tankbar, die Gesundheitsgefährdung kann durch Gasrückführung beim Tankvorgang minimiert werden.

Kritisch zu sehen ist die Aggressivität gegenüber den bislang verwendeten Materialien von Tank- und Zapfanlagen. Umgangen werden kann dieses Problemfeld durch Einsatz Methanol-tauglicher Materialien bei Neu-, Erweiterungs- und Ersatzinvestitionen. Herkömmliche Tankanlagen haben eine wirtschaftliche Nutzungsdauer von zehn Jahren; bis zum flächendeckenden Einsatz von Methanol für Brennstoffzellen-Fahrzeuge bliebe für die Investitionen also genügend Zeit, selbst unter Berücksichtigung des Umstands, dass die Tankstellenbetreiber gerade eine Investitionsrunde hinter sich haben.

Insbesondere Mineralölfirmer mit großen eigenen Erdgasvorkommen zeigen starkes Interesse an dieser Variante, da mit relativ geringen Investitionen praktisch die vorhandene Infrastruktur weitergenutzt werden kann und die bisherigen Öl-Einsätze lediglich durch Erdgas substituiert werden könnten.

### 2.2.3 Erdgas

Erdgas, einer der Grundpfeiler der Energieversorgung stationärer Verbrennungsanlagen, ist als Kraftstoff für Fahrzeuge in der üblichen Darreichungsform aus dem Leitungsnetz ungeeignet und muss für mobile Anwendungen entweder als Druckgas (CNG, auf 200 bis 250 bar komprimiert) oder Flüssiggas (LNG, -160 °C, 2 bar) bereitgestellt werden, da die übliche Reichweite eines Pkw sonst nur mit einem etwa 50 m<sup>3</sup> fassenden Tank (bei Normaldruck) zu erreichen ist. Erdgas enthält etwa 25 Gewichts-Prozent Wasserstoff.

Erdgastankstellen befinden sich derzeit, ihrer geringen Anzahl entsprechend, noch im Stadium fortgeschrittener Prototypen, wobei bislang nur Betriebserfahrungen mit CNG vorliegen: Erdgas aus dem Versorgungsnetz kann an Tankstellen vor Ort auf das notwendige Druckniveau gebracht werden, wobei

der Energieaufwand hier bei einem Bruchteil der bei Raffinerungsprozessen für Benzin und Diesel eingesetzten Energie liegt.

Zur Betankung der Erdgasfahrzeuge bieten sich i.d.R. zwei Möglichkeiten an:

- Schnellbetankung mit Großkompressoren: der Kompressor befüllt zunächst ein Bündel von Druckflaschen, den sogenannten Zwischenspeicher, aus dem dann das komprimierte Erdgas über eine Zapfsäule innerhalb weniger Minuten in den Fahrzeugtank strömt. Abbildung 2-3 zeigt die Prinzipskizze einer Schnellbetankungsanlage. Fast-fill-Anlagen sind in Größenordnungen bis 1,5 Mio. DM realisiert; Module sind jedoch bereits ab 250.000 DM zu haben.
- Langsambetankung mit Kleinkompressoren: ein Kleinkompressor, der an das Gas-Niederdrucknetz angeschlossen wird, verdichtet das Erdgas und befördert es über eine flexible Leitung direkt in den Fahrzeugtank. Ein Tankvorgang für eine 80 l-Flasche dauert etwa vier bis fünf Stunden. Das Auto kann während der Betankung nicht gestartet werden, bei Erreichen des Enddrucks schaltet der Kompressor automatisch ab. Dieses Konzept bietet sich für Fahrzeugflotten an, die pro Tag mit einer Tankfüllung auskommen. Die Betankung kann dann z. B. über Nacht erfolgen. Slow-fill-Anlagen sind bereits ab 10.000 DM erhältlich.

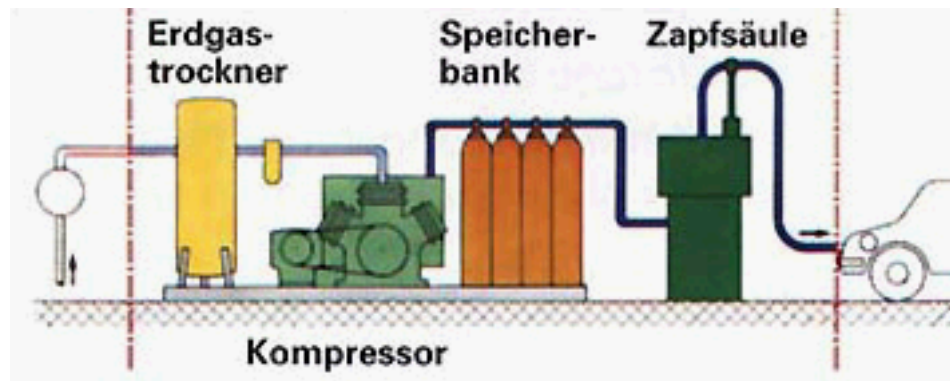


Abbildung 2-3: Prinzipdarstellung einer Fast-fill-Anlage

Eine Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von Erdgastankstellen durch den Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft e.V. (BGW) kam zu dem Ergebnis, dass pauschale Aussagen auf Grund der individuellen Planung von Erdgastankstellen nicht gemacht werden können. Beispielrechnungen zur Verdeutlichung des Einflusses verschiedener Parameter auf die Gesamtwirtschaftlichkeit kamen zu den folgenden Ergebnissen:

Bei kleineren Tankstellen (z. B. 20 Fz/Tag) haben die Investitionsaufwendungen entscheidenden Einfluss auf die Höhe des erforderlichen Kraftstoffpreisniveaus. Im Umkehrschluss bedeutet dies wiederum, dass eine Minimierung der Investitionsaufwendungen das wirksamste Instrument ist, um eine Reduzierung des Kraftstoff-Nettopreises herbeizuführen.

- Bei größeren Tankstellen ist die Situation genau umgekehrt. Die Investitions- und Betriebskosten haben nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtkostenstruktur. Hier sind die Gasbezugs- und Hilfsenergiekosten die entscheidenden Parameter.
- Bei der Planung größerer Tankstellen sollte bei der Standortwahl auch geprüft werden, ob der Anschluss an ein Gasnetz im Hochdruckbereich möglich ist. Die Hilfsenergiekosten können beispielsweise durch den Anschluss eines Kompressors an eine 16-bar-Leitung um rd. die Hälfte reduziert werden.
- Darüber hinaus wird mit Inbetriebnahme einer Erdgastankstelle in der Regel noch keine hohe Auslastung erreicht, wobei jedoch gerade das Auslastungskriterium entscheidenden Einfluss auf die Gesamtkostenbilanz hat. Um einen möglichst hohen Auslastungsgrad zu erreichen, wird empfohlen, die Tankstelle modular auszulegen, so dass sie parallel zur zeitlichen Entwicklung des zu betankenden Fahrzeugbestandes erweitert werden kann. Dies setzt bei der Planung der Tankstelle eine möglichst genaue Potentialanalyse voraus.
- Neben der Betrachtung von Pkw und Kleintransportern ist entscheidend, andere Fahrzeuge in die Potentialanalyse mit einzubeziehen. Insbesondere vor dem Hintergrund einer möglichst hohen Auslastung der Tankstelle ist dieser Aspekt von Bedeutung: so kann z. B. durch den Einsatz von Erdgasbussen im Rahmen eines Kooperationsmodells mit dem örtlichen Nahverkehrsunternehmen eine Grundauslastung der Erdgastankstelle erreicht werden.
- Um jedem Unternehmen, das an einer Erdgastankstelle interessiert ist, die Möglichkeit der Anschaffung zu bieten, wird die Möglichkeit des Leasings von Erdgastankstellen angeboten.

Die Verflüssigung von Erdgas zu LNG muss mit zusätzlichem Energieaufwand im Vorfeld und im industriellen Maßstab erfolgen. Flüssiggas muss, wie Benzin/Diesel und im Gegensatz zu Erdgas, mit eigenen Tankfahrzeugen verteilt werden.

## 2.2.4 Benzin, Diesel

Benzin (Otto-Kraftstoff) und Diesel sind flüssige Kohlenwasserstoffe und weltweit die verbreitetsten Kraftstoffe für Straßenfahrzeuge, wegen ihrer beinahe ausschließlichen Verwendung in Europa und Nordamerika. Obwohl sehr viele chemische Zusammensetzungen bekannt sind und theoretisch als Kraftstoffe Verwendung finden können, sind in den Ländern mit hoher Pkw-Dichte praktisch nur genormte Produkte am Markt erhältlich. Zahlreiche internationale Normen und Spezifikationen der Kraftstoffarten hinsichtlich Zündfähigkeit, Klopfestigkeit, Leistungsdichte und Additivierung führten zu einer Optimierung der Motortechnik.

Otto-Kraftstoff enthält etwa 13,0 und Diesel-Kraftstoff etwa 13,3 Gewichts-Prozent Wasserstoff.

Praktisch die gesamte Betankungsinfrastruktur in Europa und Nordamerika ist auf die Versorgung mit Benzin und Diesel ausgerichtet. Die Flächendeckung kann als vollständig bezeichnet werden (siehe Kapitel 1.2).

## 3 Einschätzungen der Kraftstoffindustrie / Tankstellenbetreiber

### 3.1 Schriftliche Stellungnahmen nach Anfrage

Die in Tabelle 3-1 aufgeführten Unternehmen, die zusammen 10.532 von insgesamt 17.066<sup>4</sup> Tankstellen in Deutschland (Stand 1.1.1998) betreiben, wurden schriftlich um nähere Angaben über eigene Perspektiven zur Um- bzw. Ausrüstung ihrer Tankstellen auf alternative Kraftstoffe für die Brennstoffzelle (Methanol, Wasserstoff) gebeten, insbesondere über

- nötige Grundvoraussetzungen (z. B. seitens der Kfz-Hersteller)
- Zeithorizont
- Kostenerwartungen
- eigene Szenarien
- mögliche Zulieferer und deren Positionierung (Branche, national/international, ...).

---

<sup>4</sup> davon 1.503 „Freie“ Tankstellen (BFT) und 3.105 (geschätzt) „sonstige“.

Tabelle 3-1: Große Tankstellenbetreiber in Deutschland

Unternehmen (Mitglieder im Mineralölwirtschaftsverband, MWV)	Anzahl Tankstellen in Deutschland
Aral AG	2.422
Deutsche Shell AG	1.677
DEA Mineralöl AG	1.608
ESSO A.G.	1.456
Deutsche BP Holding AG	1.180
Elf Oil Deutschland GmbH	604
Conoco Mineraloel GmbH	597
Agip Deutschland AG	424
Fina Deutschland GmbH	361
Total Deutschland GmbH	189
OMV Deutschland GmbH	14

Drei der elf angeschriebenen Unternehmen antworteten. Ein weiteres Unternehmen hatte bereits im Rahmen einer vorangehenden Anfrage Unterlagen überlassen. Da den Unternehmen im Rahmen der Untersuchung vertrauliche Behandlung der spezifischen Angaben zugesichert worden war, können die Antworten hier nur anonymisiert wiedergegeben werden. Ergänzend werden im anschließenden Abschnitt Positionen der Industrie auf der Basis öffentlich zugänglicher Quellen dargestellt.

### Unternehmen I

Konkrete Pläne zum Ausbau der Tankstellen-Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (Methanol, Wasserstoff) zum Betrieb von Fahrzeugen mit Brennstoffzellen-Antrieb bestehen bei diesem Unternehmen derzeit nicht.

Vielmehr wird das Konzept verfolgt, Brennstoffzellen-Fahrzeugen den Einstieg in den Markt dadurch zu erleichtern, dass die bestehende Infrastruktur mit Kraftstoffen auf Kohlenwasserstoff-Basis genutzt werden kann. Daher wird auch als Ziel der Zusammenarbeit mit einem großen Automobilhersteller und dessen Brennstoffzellen-Entwicklungspartner die Entwicklung einer geeigneten Reformertechnik genannt, mit der an Bord der Fahrzeuge Wasserstoff aus Kohlenwasserstoffen abgespalten werden kann.

Das Unternehmen weist darauf hin, dass in diesem Zusammenhang häufig übersehen würde, dass die vorhandene Infrastruktur zur Lagerung und Verteilung von Kohlenwasserstoff-Kraftstoffen für Methanol nicht geeignet ist. Er-

fahrungen und Erkenntnisse aus Methanol-Projektstudien Ende der 70er- und Anfang der 80er-Jahre hätten eindeutig gezeigt, dass praktisch alle Beschichtungen in Lager- und Stations-Tanks und in den Tankwagen sowie Elastomere (Dichtungen, Zapfschläuche) nur äußerst mangelhafte Beständigkeit gegenüber Methanol aufweisen.

### **Unternehmen II**

Das Unternehmen verweist zum gegenwärtigen Zeitpunkt auf die erwarteten Ergebnisse der „Verkehrswirtschaftlichen Energiestrategie“ unter Federführung des Bundesministeriums für Verkehr. Es wird davon ausgegangen, „dass auf Grund der vorhandenen Infrastruktur sowie der, auch langfristig, ausreichenden Verfügbarkeit von rohölstämmigen Kraftstoffen diese auch als Kraftstoff für Brennstoffzellen-Fahrzeuge eingesetzt werden, anstelle von Methanol.“ Das Unternehmen erklärt seine jederzeitige Bereitschaft im Falle geänderter Rahmenbedingungen mit der Folge verstärkter Nachfrage nach anderen als den bisher genutzten Kraftstoffen, diese Kraftstoffe zu vertreiben und die dazu nötigen Investitionen (ohne Angabe von konkreten Zahlen oder Größenordnungen) zu tätigen.

### **Unternehmen III**

Das Unternehmen verfolgt nach eigenen Angaben aufmerksam die Entwicklung von alternativen Betankungskonzepten, weist jedoch darauf hin, dass die Errichtung von Betankungsanlagen für alternative Kraftstoffe wie z. B. Erdgas, Methanol und Wasserstoff unter rein ökonomischen Aspekten zur Zeit nicht möglich sei und vom Unternehmen daher ausschließlich im Einzelfall zu Testzwecken und unter finanzieller Beteiligung von dritter Seite vorgenommen wird. Das abwartende Verhalten wird erklärt mit der Rolle der unternehmenseigenen Tankstellenkette am Kraftstoffmarkt, das seinen Marktanteil über niedrige Preise an seinen eigenen und den von ihm betriebenen Supermarkt-Tankstellen bestreitet und aus diesem Grunde keine eigenen, längerfristig orientierten Technologie-Entwicklungen betreiben bzw. verfolgen kann.

Das Unternehmen geht davon aus, dass eine relevante Nachfrage nach Wasserstoff sich erst in ca. 20 Jahren am Kraftstoffmarkt bemerkbar machen wird, sofern bis zu diesem Zeitpunkt die erforderlichen Rahmenbedingungen geklärt sind. Hierzu zähle auch, dass die Energiebilanz wesentlich optimiert würde und bereits in den nächsten Jahren ein ausreichendes Angebot an entsprechend ausgerüsteten Fahrzeugen dem Markt zur Verfügung stehe. Zusätzlich seien langfristige, verlässliche politische Rahmenbedingungen erforderlich, um Investitionen der Industrie zu unterstützen und zu fördern.

Das Unternehmen verweist darauf, dass nach heutiger Kenntnis die Errichtung einer Betankungsanlage für Wasserstoff ca. eine Million DM erfordert,

eine Summe vergleichbar in etwa den aktuellen Kosten einer eigenen kompletten Tankstelle, wobei jedoch bei größerer Verbreitung der Anlagen von deutlichen Preisreduzierungen ausgegangen wird. Überschlägig wird die „Einführung von Wasserstoff“ an allen unternehmenseigenen 650 Tankstellen mit einer auf heutiger Basis wirtschaftlich nicht zu vertretenden Investition in Höhe von mindestens 500 Mio. DM angegeben.

Zusätzlich wird angemerkt, dass auf Grund von gesetzlichen Auflagen, z. B. für die Einhaltung von Sicherheitsabständen bei der Lagerung von Wasserstoff, nicht jede Tankstelle für die zusätzliche Ausstattung mit diesem Produkt geeignet sei.

Abschließend wird der Zuversicht Ausdruck verliehen, dass die Mineralölindustrie, wie in der Vergangenheit mehrfach bewiesen, Schwierigkeiten bewältigen kann und sich neuen Herausforderungen stellen wird. Das Unternehmen beabsichtigt aus den genannten Gründen zwar nicht, hier eine Vorreiterrolle zu übernehmen, will jedoch die weitere Entwicklung abwarten und zu gegebener Zeit eine Entscheidung über die Ausrüstung seiner Tankstellen mit zusätzlichen Zapfanlagen für alternative Kraftstoffe treffen.

## 3.2 Selbstdarstellung der Unternehmen

Im Folgenden wird eine Zusammenfassung der relevanten Pressemitteilungen und Selbstdarstellungs-Medien der Unternehmen gegeben.

### 3.2.1 Esso

#### ESSO I (Energieprognose 1998)

„Mehrere große Kraftfahrzeughersteller arbeiten an Kraftfahrzeugprototypen mit Brennstoffzellenantrieb. Exxon entwickelt im Rahmen einer Zusammenarbeit mit General Motors insbesondere Treibstoffe für die Brennstoffzelle. [...]“

Der Vorteil des Einsatzes von Benzin liegt darin, dass die vorhandene Infrastruktur genutzt werden kann. Diese Antriebsart zeichnet sich durch hohe Energieeffizienz und niedrige Emissionen beim Betrieb aus. Dagegen stehen noch der hohe Preis, die Unhandlichkeit (hohes Gewicht, großer Platzbedarf) und die beschränkte Reichweite. Diese Defizite lassen eine Produktion von Prototypen nicht vor 2005 erwarten. Mit einer Verbreitung des Brennstoffzellenantriebs in nennenswertem Umfang kann jedoch nach unserer Einschätzung erst nach 2010 gerechnet werden.“

**ESSO II** (Pressemitteilung, Hamburg, 30.10.98)  
*„Exxon und Toyota forschen gemeinsam“*

Exxon Corporation und die Toyota Motor Corporation haben am 27. Oktober 1998 eine langjährige Zusammenarbeit bei der Entwicklung von Antriebssystemen der nächsten Generation vereinbart. Gemeinsam soll das vorhandene Wissen in der Kraftstoff- und Automobiltechnik genutzt werden, um die Entwicklungsgeschwindigkeit bei Verbrennungsmotoren und Hybridantrieben zu erhöhen. Das gilt auch für die dafür nötigen Kraft- und Schmierstoffe.

Die Vereinbarung sieht vor, dass Exxon und Toyota marktbezogene und technologische Informationen austauschen und die kritischen Schnittstellen für die Entwicklung untersucht werden.

Die Zusammenarbeit umfasst vor allem ein gemeinsames Forschungsprogramm zur Entwicklung gemeinsamer Lösungen auf der Motor- und Treibstoffseite, um verbesserte Energieeffizienz und weniger Emissionen zu erreichen. [...]

„Eines unserer wichtigsten Entwicklungsziele ist es, die Leistungsausbeute von Kohlenwasserstoffen in Fahrzeugen mit möglichst niedrigen Emissionen zu verbessern“, sagte Bill Innes, Präsident der Exxon Research and Engineering Company, „und durch die Zusammenarbeit mit Toyota bei der Entwicklung optimaler Motorsysteme auf Treibstoffbasis das Fachwissen unserer beiden Gesellschaften auf diesem wichtigen Gebiet zusammenzuführen. Exxon hat schon in der Vergangenheit großen Wert darauf gelegt, Wettbewerbsvorteile durch gezielte Forschung zu erreichen.“ [...]

### 3.2.2 Shell

**Shell I** (Pressemitteilung, Hamburg, 4.3.99)  
*„Shell eröffnet Solar-Tankstellen in Deutschland und Holland“*

Die Deutsche Shell Aktiengesellschaft, Hamburg, und Shell Nederland B.V. haben am 4. März jeweils zwei Solar-Tankstellen offiziell in Betrieb genommen. Die Tankstellen auf deutscher Seite liegen in Hamburg [...]; die holländischen Stationen befinden sich in Meerkerk (südlich von Utrecht) und Wezep (südlich von Zwolle). Sie sind mit unterschiedlichen Solaranlagen ausgestattet. So sollen verschiedene Systeme der umweltfreundlichen Stromgewinnung an gewerblichen Standorten getestet werden.

Der umweltfreundlich erzeugte Strom kann auch getankt werden: In Zusammenarbeit mit der Hamburgische Elektrizitäts-Werke AG (HEW) hat die Deutsche Shell gesonderte Ladestationen für Elektromobile eingerichtet, an

denen die Autofahrer „grünen“ Strom für 42,3 Pfennig je kWh zapfen können. Shell nutzt die Projekte zugleich als Auftakt, um den gesamten Energieverbrauch an Tankstellen, der in den vergangenen Jahren mit der Einrichtung von Backshops, Tiefkühltruhen und anderen Anlagen beträchtlich gestiegen ist, auf Einsparpotentiale zu überprüfen. Die neuen Tankstellen stärken die Solar-Achse Holland-Deutschland mit dem Shell Solarwerk in Helmond auf der einen, und der im Herbst 1999 in Betrieb gehenden Solarzellenfabrik in Gelsenkirchen auf der anderen Seite. Die Shell Gruppe beabsichtigt, in Europa eine ganze Reihe von Solar-Tankstellen zu bauen. In Deutschland kommen 1999 noch acht weitere Stationen hinzu.

Die Tankstellen in Hamburg sind Teil des gemeinsamen „newpower“-Projektes, das die Deutsche Shell und HEW Ende Februar angekündigt haben. Beide Unternehmen werden ab 1. Juni interessierten Verbrauchern Strom aus ausschließlich regenerativer Erzeugung anbieten. Die Kooperation sieht auch den Bau zusätzlicher Anlagen zur Erzeugung von Ökostrom vor.

[...] Das Segel besteht aus 24 Shell Standardmodulen und erreicht mit weiteren Solarmodulen, [...] die in zwei Lichtbändern im Tankstellendach integriert sind, einen Jahresenergieertrag von 3200 kWh. Die [andere] Shell Station [...] ist mit 56 Sondermodulen ausgerüstet, die Pilkington Solar aus braungoldenen Shell Solarzellen angefertigt hat. Der Jahresenergieertrag beläuft sich auf 3500 kWh. [...] „

## **Shell II** (Pressemitteilung, Hamburg, 26.2.99)

*„newpower - Shell und HEW steigen mit regenerativ erzeugtem Strom in ein neues Geschäftsfeld ein*

Unter dem Namen „newpower“ werden die Deutsche Shell AG, Hamburg, und die Hamburgische Elektrizitäts-Werke AG (HEW) im Rahmen einer Kooperation ausschließlich regenerativ erzeugten Strom anbieten. [...] Ziel der Kooperation ist es, den Einsatz erneuerbarer Energien voranzubringen und neue Geschäftsfelder zu erschließen. Mit ihrer Kooperation bauen Shell und HEW ihre bestehenden Engagements auf den Gebieten der erneuerbaren Energien aus. [...]

Das neue Stromangebot wird 9,2 Pfennig/kWh teurer sein als der herkömmliche Strom, bezogen auf den jeweiligen Arbeitspreis des gültigen Haushaltstarifs. Bei einem durchschnittlichen Haushalts-Stromverbrauch von 2.600 kWh/Jahr entspricht dies einer zusätzlichen monatlichen Belastung von rund 21 Mark. [...]

[...] ist der Neubau von Windkraftanlagen und Photovoltaikanlagen für Hamburg geplant. [...]

Dr. Fritz Vahrenholt, im Vorstand der Deutschen Shell unter anderem verantwortlich für erneuerbare Energien, begrüßt die Erweiterung des Shell Angebotes an Stromkunden: „Shell stellt bereits Solarzellen her, engagiert sich im Bereich Biomasse und bereitet den Einstieg in die Windenergie vor. Die Erzeugung und der Handel mit Strom aus erneuerbaren Quellen ist für Shell eine natürliche Ergänzung der Aktivitäten. Wir sehen hier eine große Marktchance in der Zukunft. Und mit den Hamburgische Elektrizitäts-Werken haben wir einen kompetenten Partner für dieses neue Geschäftsgebiet gefunden.“

Shell Studien gehen davon aus, dass Mitte des nächsten Jahrhunderts rund die Hälfte der weltweit genutzten Energie aus regenerativen Quellen stammen könnte. Shell investiert bis 2003 weltweit rund eine Milliarde Mark in den Ausbau erneuerbarer Energien. Im Herbst dieses Jahres wird Shell in Gelsenkirchen die weltweit größte Solarzellenfabrik in Betrieb nehmen. Die Produktion wird bei jährlich rund 13 Millionen Solarzellen mit einer Kapazität von 25 MW liegen. [...] „

**Shell III** (Pressemitteilung, Hamburg, 17.8.99)

*„Shell und DBB vereinbaren Forschungsk Kooperation. Einführung des Brennstoffzellenfahrzeugs im Visier.*

Gemeinsame Presse-Information von Daimler-Benz und Shell International

[...] DBB Fuel Cell Engines GmbH, eine Tochtergesellschaft der Daimler-Benz AG, und Shell International Oil Products BV haben eine Vereinbarung zur Zusammenarbeit in der Forschung unterzeichnet, die Grundlage eines frühzeitigen Eintritts in eine neue Ära sauberer und sparsamerer Automobile sein könnte.

DBB, ein Gemeinschaftsunternehmen von Daimler-Benz mit Ballard Power Systems in Kanada und Ford Motor Company in den USA, ist führend auf dem Gebiet der Entwicklung von Kfz-Antriebssystemen auf der Basis der Brennstoffzelle, eines bahnbrechenden neuen Antriebs, der Wasserstoff in elektrische Energie umwandelt. [...]

Daimler-Benz hat bereits eine Reihe von Prototypen vorgestellt, die entweder direkt mit Wasserstoff oder mit aus Methanol erzeugtem Wasserstoff betrieben werden. Zur Absicherung einer breiten technologischen Basis für den Einsatz von Brennstoffzellen in Personenwagen untersucht Daimler-Benz alle sich anbietenden technischen Möglichkeiten. Neue Ansatzpunkte könnte unter anderem der „Multi-Fuel-Prozessor“ bieten.

Shell ist überzeugt, mit der schon in der Praxis getesteten CPO-Technologie (Catalytic Partial Oxidation/katalytische Teiloxidation) zur Lösung der noch

anstehenden Probleme beizutragen. Die CPO-Technologie wandelt flüssigen Kraftstoff in Gas mit hohem Wasserstoffanteil um. Mit der Forschungsvereinbarung wird das Ziel verfolgt, die CPO-Technologie zusammen mit dem Brennstoffzellenantrieb nutzbar zu machen. Das Ergebnis könnte ein Auto sein, das die ökologischen Vorteile des Brennstoffzellenantriebs mit der Möglichkeit verbindet, das Auto bequem an vorhandenen Tankstellen aufzutanken. [...] „

Bereits 1997 gründete die Royal Dutch/Shell Gruppe einen Geschäftsbereich für erneuerbare Energien, „Shell International Renewables“. In diesem fünften Geschäftsbereich wurden die Aktivitäten auf den Gebieten Solarenergie, Biomasse und Forstwirtschaft zusammengefasst und ausgebaut. Die Investitionen der Shell Gruppe in den kommenden fünf Jahren belaufen sich auf über eine halbe Milliarde Dollar.

Der Weltmarkt für Solarenergie wurde seinerzeit auf ein Umsatzvolumen von etwa einer Milliarde Dollar geschätzt. Shell International Renewables peilt einen Anteil von zehn Prozent an dem rasch wachsenden Solargeschäft noch vor dem Jahr 2005 an.

### 3.2.3 Deutsche BP / BP Amoco

Wie Royal Dutch/Shell hat sich auch BP Amoco stark im Geschäftsbereich Solarenergieerzeugung engagiert. Zwischen 1985 und 1998 wurden 500 Mio. US-\$ investiert, BP beansprucht die Marktführerschaft auf dem Gebiet der photovoltaischen Energieerzeugung mit mehr als 100 Mio. US-\$ Umsatz 1998.

Konkrete Aussagen zu Wasserstoff-Projekten werden nicht gemacht.

## 4 Zusammenfassung

Die Maschen des Netzes der Tankstellen in Deutschland sind in den letzten Jahren weiter geworden; auch künftig wird die Zahl der Tankstellen in den alten Bundesländern zurückgehen. Im gesamten Bundesgebiet bemühen sich die Betreibergesellschaften, weniger aber dafür größere Tankstellen zu erhal-

ten, um somit Skalenvorteile zu realisieren. Erlöse aus Dienstleistungen und Warenverkäufen (Shop-Geschäft) haben einen immer größeren Anteil am Umsatz und Gewinn der einzelnen Tankstelle.

Die zu erwartende Einführung neuer Antriebsarten für Kraftfahrzeuge, über das bisherige Nischendasein hinaus, stellt in den nächsten Jahren eine Herausforderung für die Kraftstoffwirtschaft in ihrer bisherigen Form dar. Mit hoher Wahrscheinlichkeit werden alternative Antriebskonzepte auch alternative Kraftstoffe erfordern: Erdgas, Methanol, Wasserstoff.

Die sich ergebenden Fragestellungen sind:

- Werden diese Kraftstoffe ebenfalls über das bisherige Tankstellennetz vertrieben?
- Werden sich, auf Grund anderer Grundstoffe und deren Verfügbarkeit, neue Anbieter auf Dauer etablieren können
- Welche Investitionen sind nötig, welches sind mögliche und günstige Zeitpfade für die Errichtung neuer Versorgungseinrichtungen?

Derzeit sind die meisten dieser Fragen noch unbeantwortet.

- Die Mineralölgesellschaften als Tankstellenbetreiber können am Substitutionsprozess aktiv teilnehmen und den Strukturwandel zu ihren Gunsten mitgestalten.
- Chemieunternehmen, Gaslieferanten und Stromerzeuger könnten als neue Anbieter für Methanol, Erdgas oder Wasserstoff eigene Versorgungsstrukturen aufbauen.
- Studien über die Kosten neuer Infrastrukturen liegen vor; Methanol benötigt vergleichsweise geringe Investitionen an den Verteilereinrichtungen, Erdgas ist netzgebunden praktisch überall verfügbar und, nach Anforderung an die Tankeinrichtung differenziert, mit niedrigen bis mittleren Investitionen in Tankanlagen als Kraftstoff verfügbar; Wasserstoff erfordert, folgt man den bisherigen Konzepten, hohe Investitionen in Tankautomaten.

Die zeitliche und räumliche Einführung neuer Tankeinrichtungen wird ferner auch davon abhängig sein, welche Stückzahlen an Fahrzeugen mit neuen Antriebsarten von den Fahrzeugherstellern angeboten werden, und ob diese bevorzugt zunächst in Flotten eingestellt werden oder direkt flächendeckend an einzelne Privatkunden verkauft werden.

Derzeit liegen noch keine zugänglichen Konzepte vor, jedoch werden in den nächsten Monaten hierzu seitens der Fahrzeughersteller wichtige Entscheidungen getroffen werden. Die Ergebnisse der eingangs erwähnten „Ver-

kehrswirtschaftlichen Energiestrategie“ des Konsortiums aus Mineralölwirtschaft und Fahrzeugindustrie wird aus der Perspektive der unmittelbar von dem Wandel Betroffenen deren Einschätzungen und strategischen Perspektiven deutlich machen.

Die Politik sollte, mit Blick auf Emissionsminderungspotential und Versorgungssicherheit der alternativen Kraftstoffe, den neuen Entwicklungen Rechnung tragen und insbesondere durch die Instrumente der mittel- und langfristigen Kraftstoff- und Energiebesteuerung früh Planungssicherheit schaffen.

## 5 Literatur

- Altmann, M.; Blandow, V.; Bünger, U.; Eckstein, U.; Schindler, J.: Kostenstruktur ausgewählter Wasserstoffbereitstellungspfade für typische Anwendungen. Studie im Auftrag der Daimler Benz AG. Ottobrunn, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 1995
- Aral AG. Alternative Kraftstoffe – Fachreihe Forschung und Technik, Teil 4. 1. Aufl. 1997. Bochum, Aral AG, 1997
- Aral AG: Verkehrstaschenbuch 1998/99. 41. Aufl. 1998. Bochum, Aral AG 1998
- Biedermann, P.; Menzer, R.; Grube, Th.; Dienhart, H.; Pehnt, M.; Dreier, T.: Brennstoffzellen-Studie – Vorhaben Nr. 686: Ganzheitliche Systemuntersuchung zur Energiewandlung durch Brennstoffzellen. Abschlussbericht FVV, 1998
- BMW AG: ALex – Aktuelles Lexikon „Wasserstoffantrieb“. Firmenschrift. München, BMW AG, AK-2, 1998
- Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft e.V. (BGW): Markteinführungsstrategie für Erdgasfahrzeuge. Bonn, 1999
- Esso AG: Energieprognose 1998. Hamburg, 1998
- Esso AG: Tankstellen in Deutschland. Hamburg, 1998

- Frank, D.; Schindler, V.: Alternative Kraftstoffe und Antriebe. Vortragsmanuskript, Berlin 1996. München, BMW AG Verkehr und Umwelt, 1996
- Gehring, H.: Immer mehr Serviceroboter. In: VDI Nachrichten 51 (1997), Nr.39, S.13
- Hackenjos, G.: Die Betankungsinfrastruktur, Stand und Perspektiven, unveröffentlichtes Manuskript, Karlsruhe 1999
- Hacker, V.: Technologische Übergangsstrategien zur regenerativen Energiewirtschaft, TU Graz, Dissertation. Graz, 1998
- Henke, R.: Der stählerne Tankwart. In: Bild der Wissenschaft, Band 1995 (1995), Nr.6, S.16-20
- Huß, Chr.; Nordheimer, R.: BMW Wasserstoff-Forschungsfahrzeuge – Wegbereiter eines neuen Zeitalters. Vortragsmanuskript. (XII. Weltwasserstoffkonferenz <1998, Buenos Aires>). München, 1998
- Mahlmeister, S.: NGV – Natural Gas for Vehicles: Wirtschaftlichkeitsschwellen für den Einsatz und Betrieb von erdgasbetriebenen Fahrzeugen sowie der Errichtung von Erdgastankstellen auf dem deutschen Markt. Diplomarbeit. Institut für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung, Universität Karlsruhe. Karlsruhe, 1996
- Nierhaue, B.: Neue Herausforderungen an die Energieversorgung des Straßenverkehrs – Was die Autos zukünftig antreibt. Vortragsmanuskript. (Kolloquium der Aral-Forschung <28.08.1998, Essen>). Bochum, Aral AG, 1998
- Nierhaue, B.: Technik der Wasserstoff-Logistik und Betankung. Vortragsmanuskript. (Fachsymposium „Brennstoffzellen in modernen Energie- und Verkehrssystemen“ <27.07.1998, Bayer. Wirtschaftsministerium, München>). Aral AG, Bochum, 1998
- o.V.: Shell sieht Wasserstoff als Energieträger der Zukunft. In: Deutsche Verkehrs-Zeitung DVZ (1999), Nr.17
- o.V.: Fuel Cells hit the road. In: The Economist (1999) S. 91-92, April 24<sup>th</sup> 1999
- Schindler, V.: Kraftstoffe für morgen – Eine Analyse von Zusammenhängen und Handlungsoptionen; mit 63 Tabellen / Volker Schindler. – Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Budapest; Hongkong; London; Mailand; Paris; Santa Clara; Singapur; Tokio, Springer, 1997. – ISBN 3-540-62049-4

- Schindler, V.: Kraftstoffe für den Straßenverkehr von morgen. – Eine Analyse von technisch-wirtschaftlichen Zusammenhängen und Handlungsoptionen. Firmenschrift. München, BMW AG, 1996
- Schraft, R.D.; Haegele, M.; Schlaich, P.; Barth, O.; Kroth, E.; Fischer, A.: A Robot System for Automatic Fuel Refilling: (International Symposium on Industrial Robots <27, 1996, Mailand>). In: Italian Machine Tool Manufacturers' Association; Italian Society for Industrial Robots; International Federation of Robotics, 27th International Symposium on Industrial Robots 1996. Mailand, 1996. S.183-191
- Schraft, R.D.; Haegele, M.; Kroth, E.; Fischer, A.: A Robot System for Automatic Fueling of Automobiles: (International Robots & Vision Conference <1997, Detroit/Mich.>; International Symposium on Robotics <28, 1997, Detroit/Mich.>). In: Automated Imaging Association; Robotic Industries Association, Ann Arbor/Mich.; International Federation of Robotics: International Robots & Vision Conference 1997. Ann Arbor, Mich.: Robotic Industries Association, 1997. S.7-9 - 7-19
- Teagan, W.P.; Bentley, J.; Barnett, B.: Cost reductions of fuel cells for transport applications: fuel processing options. In: Journal of Power Sources 71 (1998), S.80-85. – ISSN 0378-7753
- Thomas, C.E.; Kuhn, I.F.; James, B.D.; Lomax, F.D.; Baum, G.N.: Affordable hydrogen supply pathways for fuel cell vehicles. In: International Journal for Hydrogen Energy 23 (1998), No.6, S.507-516. – ISSN 0360-3199
- Thomas, C.E.; Kuhn, I.F.; James, B.D.; Lomax, F.D.: Market penetration scenarios for fuel cell vehicles. In: International Journal for Hydrogen Energy 23 (1998), No.10, S.949-966. – ISSN 0360-3199
- Wurster, R.: PEM Fuel Cells in Stationary and Mobile Applications – Infrastructural Requirements, Environmental Benefits, Efficiency Advantages and Economical Implications; Vortragsmanuskript; Electric and Lighting Industry Biennial, September 29th to October 4th 1997, Buenos Aires. Ottobrunn, 1997
- Verkehrsclub der Bundesrepublik Deutschland e.V. (VCD) (Hrsg.): Alternative Antriebe: Erdgas, Sonne, Raps & Co. Bonn, 1999
- Zittel, W.: Untersuchung über eine Einstiegsstrategie für den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur für mobile Anwendungen in Deutschland. Studie im Auftrag der Industrie. Ottobrunn, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 1995

**Internet:**

Allgemeine Informationen zu Wasserstofftechnologie und Brennstoffzellen:  
hyweb – Wasserstoff und Brennstoffzellen Informationssystem  
(dort auch weitere links) <http://www.hyweb.de/>

Graphit-Nanofaser-Speicher für Wasserstoff: Northeastern University, Boston, MA (USA) <http://www.numag.neu.edu/9711/nfuel.html>

Wasserstofftankstelle Flughafen München: <http://www.hyweb.de/h2muc/>

Wasserstofftankstelle Hamburg:  
<http://www.hew.de//umwelt/willkommen.html>

Tankroboter: IEEE and Fraunhofer IPA Database on Service Robots  
<http://www.ipa.fhg.de:8080/300/320/srdatabase/index.shtml>

Erdgasfahrzeuge und –infrastruktur: <http://www.erdgasfahrzeuge.de/>

# Technologische Veränderungen beim Übergang vom konventionellen Antriebsstrang zur mobilen Brennstoffzelle

## Kapitel 5

Bearbeiter: Lutz Demuß, wbk

### Inhalt

<b>1</b>	<b>Ausgangssituation und Vorgehensweise</b>	<b>115</b>
<b>2</b>	<b>Systemdefinition des Methanol-Brennstoffzellen-Antriebsstrangs</b>	<b>117</b>
<b>3</b>	<b>Die neuen Komponenten des Methanol-Brennstoffzellensystems</b>	<b>125</b>
3.1	Das Stromerzeugungssystem	125
3.2	Die Motorelektrik	128
3.3	Das Getriebe	131
3.4	Die Abgasanlage	131
3.5	Das Kühlsystem	132
3.6	Das Kraftstoffsystem	132
3.7	Sonstige Komponenten des Antriebssystems	133
3.8	Zusammenfassung	135
<b>4</b>	<b>Veränderungen gegenüber dem konventionellen Antriebstrang</b>	<b>136</b>
4.1	Der Verbrennungsmotor	137
4.2	Die Motorelektronik	139
4.3	Die Motorelektrik respektive Steuerungs- und Sensortechnik	139
4.4	Die Abgasanlage	140
4.5	Das Getriebe	141

4.6	Das Kühlsystem	141
4.7	Das Kraftstoffsystem	142
4.8	Sonstige Komponenten des Antriebssystems	142
<b>5</b>	<b>Die veränderte Wertschöpfungsstruktur des Antriebsstrangs</b>	<b>143</b>
5.1	Wertschöpfungsstruktur des konventionellen Antriebs	144
5.2	Zielkosten des Brennstoffzellen-Antriebssystems	144
5.3	Zielkosten der Brennstoffzellen-Komponentengruppen	146
5.4	Zielkosten des Stromerzeugungssystems	148
5.5	Zielkosten des Gaserzeugungssystems, Kompressor-Expandereinheit und der Peripherie	150
<b>6</b>	<b>Die Auswirkungen des Innovationssprungs auf die eingesetzten Fertigungsverfahren</b>	<b>152</b>
6.1	Betroffenheit der Ausrüster	152
6.2	Die Fertigungsverfahren des Brennstoffzellen-Antriebs	153
6.2.1	Das Stromerzeugungssystem	154
6.2.1.1	Das Brennstoffzellenstack	154
6.2.1.2	Die Fertigungsverfahren des Gaserzeugungssystems	156
6.2.1.3	Kompressor- Expandereinheit	163
6.2.2	Die Reluktanzmotoren	164
6.3	Veränderungen bei den Fertigungsverfahren	165
<b>7</b>	<b>Literatur</b>	<b>166</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>169</b>
A.	Komponenten, die bei der Gegenüberstellung der Fertigungsverfahren berücksichtigt wurden	169
B.	Fertigungsverfahren mit stark abnehmender Bedeutung	170
C.	Fertigungsverfahren mit abnehmender Bedeutung	172

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 3-1:	Neue Komponenten von Hybrid-Brennstoffzellen-Fahrzeugen	135
Tabelle 4-1:	Komponenten des Verbrennungsmotors	138
Tabelle 4-2:	Veränderungen der Motorelektronik	139
Tabelle 4-3:	Veränderungen der Motorelektrik	140
Tabelle 4-4:	Veränderungen der Abgasanlage	141
Tabelle 5-1:	Wertschöpfungsanteile des Benzinmotor-Antriebs	144
Tabelle 5-2:	Wertschöpfungsanteile des Brennstoffzellen-Antriebs	146
Tabelle 5-3:	Wertschöpfungsanteile des Stromerzeugungssystems	149
Tabelle 5-4:	Wertschöpfungsanteile der Katalysatoren	151
Tabelle 6-1:	<b>Fertigungsverfahren des Brennstoffzellenstack</b>	156
Tabelle 6-2:	Technologien des Gaserzeugungssystems	162
Tabelle 6-3:	Fertigungsverfahren des Verdampfers, Dampf- und PROX-Reaktors, Brenners und POX-Reformers	163
Tabelle 6-4:	<b>Fertigungsverfahren der Kompressor/Expandereinheit</b>	164
Tabelle 6-5:	<b>Fertigungsverfahren für Reluktanzmotoren</b>	165

## Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1-1:	Verbrennungsmotorprinzip versus Methanol-Brennstoffzellenprinzip	116
Abbildung 2-1:	Das Methanol-Brennstoffzellen-Antriebssystem	118
Abbildung 2-2:	Chemische Gasreinigung mit Shift- und PROX-Reaktoren	122
Abbildung 2-3:	Physikalische Gasreinigung mit Gastrennmembran	123
Abbildung 4-1:	Veränderungen durch die Brennstoffzelle gegenüber einem konventionellen Fahrzeug im Überblick	143
Abbildung 5-1:	<b>Veränderte Wertschöpfungsanteile</b>	148
Abbildung 6-1:	Betroffenheit der Ausrüster	153
Abbildung 6-2:	Kompakter Methanol-Reformer von Mitsubishi	157
Abbildung 6-3:	Geprägte Platten	158
Abbildung 6-4:	Platten-Wärmetauscher	158
Abbildung 6-5:	Aufbau eines katalytischen Brenners	160
Abbildung 6-6:	Aufbau eines POX-Reformers	161
Abbildung 6-7:	Funktionsprinzip eines POX-Reformers	162



## 1 Ausgangssituation und Vorgehensweise

In diesem Kapitel werden zum Einen die Unterschiede der eingesetzten Fertigungsverfahren zwischen dem gegenwärtigen, konventionellen Antriebsstrang (Ottomotor) und dem zukünftigen Brennstoffzellen-Antriebsstrang analysiert. Zum Anderen werden die Veränderungen der Wertschöpfungsstrukturen auf Basis eines Target-Costing-Ansatzes quantifiziert.

Bei der Brennstoffzellentechnologie handelt es sich um eine Substitutionstechnologie, die sich gegenüber dem seit einem Jahrhundert bewährten Verbrennungsmotor durchsetzen soll. Dies wird nur gelingen, wenn das Brennstoffzellenfahrzeug die strengen Basisanforderungen des konventionellen Fahrzeugmarktes erfüllen wird:

- Zuverlässigkeit und hohe Lebensdauer (ca. 10 Jahre, 3000-4000 Stunden)
- strenge Volumen- und Gewichtszwänge (bei Verbrennungsmotoren zur Zeit 1 kW/kg)
- Dynamik (Lastwechsel und –spreizung)
- Kaltstartfähigkeit
- Betrieb mit Umgebungslufttemperaturen von -30 bis +40 °C
- Einfriertauglichkeit
- Start-up-Zeit (wesentlich weniger als 1 Minute)
- Emissionen
- Robustheit
- Sicherheit
- Reichweite
- sehr niedriges Kostenniveau<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Vgl. Dietrich, G.; Technologischer Innovationssprung: Die Brennstoffzelle, 1999, S.3

Daneben haben die Komponenten noch den besonderen technischen Anforderungen einer Massenfertigung zu genügen. Diese Anforderungen müssen bei der Systemauslegung und bei der Auswahl der Komponenten berücksichtigt werden.

Die Brennstoffzellen-Fahrzeuge werden mit Wasserstoff betrieben, der entweder in flüssigem oder gasförmigem Zustand im Fahrzeug gespeichert oder aus anderen Treibstoffen wie Methanol durch einen Reformierungsprozess gewonnen wird. Welcher Treibstoff der bessere ist, lässt sich allgemeingültig nicht beantworten; vielmehr muss es für jeden Einsatzfall unter Berücksichtigung verschiedener Parameter (u.a. Reichweite, Individual- oder Flottenbetrieb, Möglichkeiten der Infrastrukturbereitstellung, Notwendigkeit für Null-Emissions-Fahrzeuge, Kosten für Antrieb und Infrastruktur) individuell entschieden werden<sup>2</sup>. Die folgenden Untersuchung gehen davon aus, dass Brennstoffzellenfahrzeuge sich zunächst mit Methanol als Treibstoff im Individualbetrieb durchsetzen werden, weil Methanol wie Benzin und Diesel betankt werden kann und die Betankungsinfrastruktur prinzipiell vorhanden ist.

Ein typischer Methanol-Brennstoffzellen-Antriebsstrang besteht aus einem Gaserzeugungssystem, welches Wasserstoff für das Brennstoffzellensystem im Fahrzeug produziert. Das Brennstoffzellensystem wiederum liefert den Strom für einen elektrischen Antriebsmotor, den Traktionsmotor, welcher ein Drehmoment liefert, das über ein Getriebe die Reifen antreibt (vgl. Abbildung 1-1).

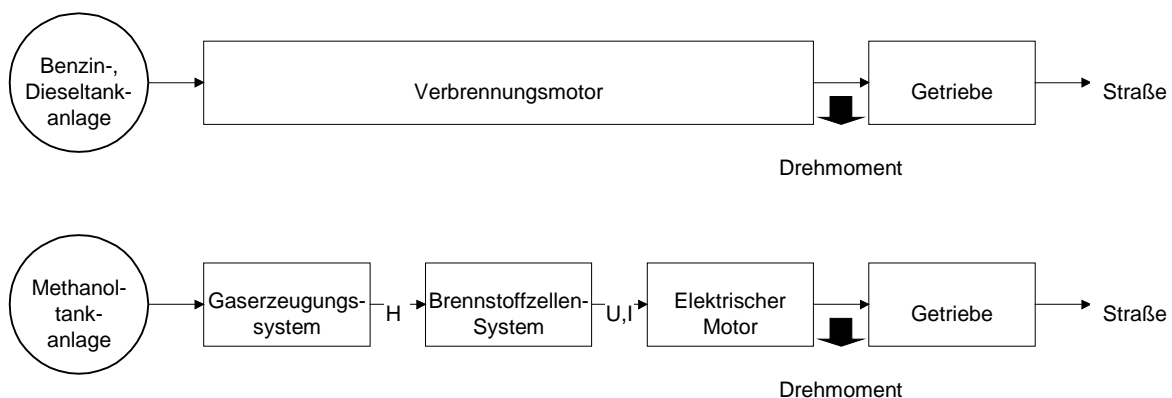


Abbildung 1-1: Verbrennungsmotorprinzip versus Methanol-Brennstoffzellenprinzip

<sup>2</sup> Vgl. Tillmetz, W.; Hornburg, G.; Dietrich, G.; Polymermembran-Brennstoffzellen-Systeme, 1995, S.133

Auf Komponentenebene gibt es verschiedene Systemkonfigurationen, um obiges Methanol-Brennstoffzellen-Antriebsprinzip umzusetzen. In Kapitel 2 wird deshalb aus all den Alternativen ein Referenzsystem für die Studie definiert, Kapitel 3 erläutert anschließend die einzelnen Komponenten des Referenzsystems. Die neuen Komponenten des Brennstoffzellen-Antriebssystems werden in Kapitel 4 den Komponenten des konventionellen Antriebssystems gegenübergestellt, um die Art der Betroffenheit der konventionellen Komponenten festzustellen. Kapitel 5 zeigt quantitativ die veränderte Wertschöpfungsstruktur des neuen Antriebssystems, Kapitel 6 beschäftigt sich qualitativ mit den Veränderungen bei den nachgefragten Fertigungsverfahren durch das neue Antriebskonzept.

Die Ergebnisse dieser Kapitel basieren auf Literaturrecherchen und Experten-gespräche. Insbesondere lehnen sie sich an die Fahrzeugkonzepte der Prototypen NECAR III und IV an, welche von DaimlerChrysler auf Basis einer A-Klasse realisiert wurden. Die Untersuchungen gingen allerdings nicht allein von den „Prototypetechnologien“ aus, sondern versuchten bereits, eine spätere Serienfertigung zu antizipieren.

## 2 Systemdefinition des Methanol-Brennstoffzellen-Antriebsstrangs

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, ein Brennstoffzellen-Antriebssystem auszulegen. Abbildung 2-1 zeigt die gewählte Systemlösung im Überblick.

Im Folgenden soll das Konzept eines Brennstoffzellen-Antriebssystems definiert werden, welches als Grundlage aller weiteren Untersuchungen dieser Studie dient.

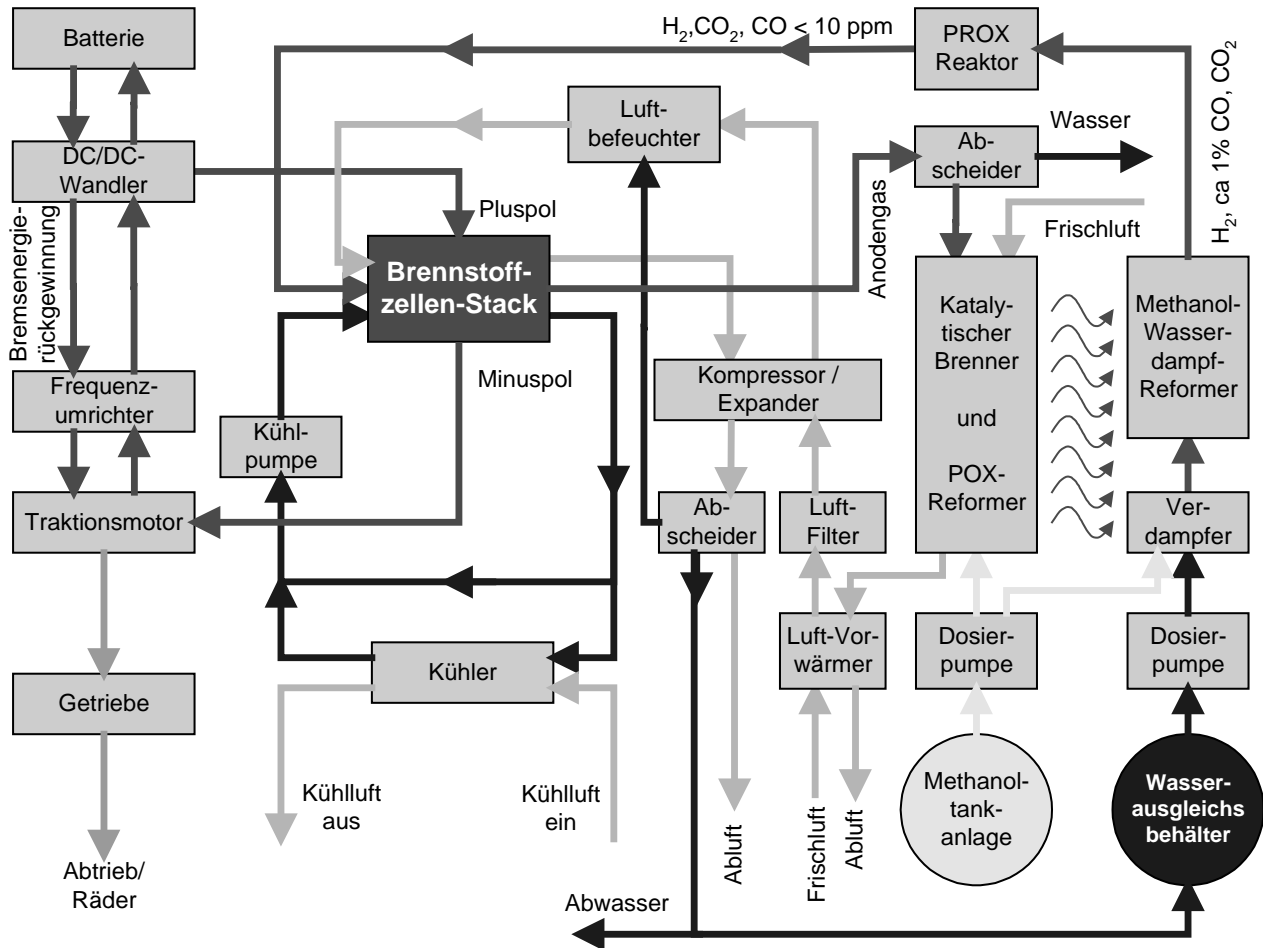


Abbildung 2-1: Das Methanol-Brennstoffzellen-Antriebssystem

### Festlegung des Brennstoffzellentyps

In den Prototypen Nekar 3 und 4 kommt für das Brennstoffzellensystem eine PEM–Brennstoffzelle (Proton Exchange Membrane oder Polymer Electrolyte Membrane) zum Einsatz. Sie zeichnet sich gegenüber anderen Brennstoffzellentypen aus durch

- eine 3-5fach höhere Leistungsdichte (kompakte Bauweise, geringes Einbauvolumen und reduzierte Materialkosten)
- einen Niedertemperaturbetrieb um 100°C (schnelle Aufheizphase von wenigen Minuten, das heißt schnelles und einfaches Anfahren und Abschalten)
- Einsatz von kostengünstigeren Materialien und erprobten Kühlkreisläufen der heutigen Verbrennungsmotoren, einfache Dichtungstechnik)
- die Verwendung einer Kunststoffolie als Elektrolyt ohne Einsatz von hochkorrosiven Säuren, Laugen oder Salzen (kein „Verbrauch“ von Elektrolyten, keine Korrosionsprobleme insbesondere in der Peripherie, einfache Regelung des Wasserhaushalts, einfaches „Handling“ bei der Herstellung)
- den einfachen Betrieb bei erhöhten Drücken bis zu 10 bar (deutliche Zunahme der Zellenleistung) hinsichtlich Wirkungsgrad bzw. Leistungsdichte
- kompakte Bauweise der gesamten Anlage; insbesondere ist das Volumen der peripheren Bauteile wie Rohrleitungen und Wärmetauscher umgekehrt proportional zum Betriebsdruck, wodurch Kostenvorteile auch bei den peripheren Anlageteilen realisiert werden können
- einen Betrieb bei hohen Spannungen bis zu 400 V (niedrige elektrische Verluste, gute spezifische Leistungsdichten, geringe Kosten)
- einen sehr dynamischen Betrieb über den gesamten Leistungsbereich (0 bis Vollast)
- die modulare Bauweise (kostengünstige Fertigung verschiedener Systeme mit unterschiedlichen Leistungen)<sup>3</sup>.

Dementsprechend wurde sie auch als technische Lösung für das in dieser Studie zu Grunde gelegte Brennstoffzellen-Konzept herangezogen.

<sup>3</sup> Vgl. Tillmetz, W.; Hornburg, G.; Dietrich, G.; Polymere Membran-Brennstoffzellen-Systeme, 1995, S.128

### **Festlegung des Betriebsluftdrucks der Brennstoffzelle**

Um diese Vorteile nutzen zu können, wird angenommen, dass der kathodenseitige Luftdruck der Zelle durch eine Kompressor-Expandereinheit auf ca. 2-3 bar erhöht wird. In diesem Bereich wird der optimale Betriebsdruck als Kompromiss aus Leistungssteigerung der Brennstoffzelle und der Leistungsminderung durch den beträchtlichen Verdichtungsaufwand der Luft vermutet. Es wird damit unterstellt, dass die Gewichts-, Komplexitäts- und Kostennachteile einer zusätzlichen Komponente - der Kompressor-Expandereinheit - im Betrachtungszeitraum der Studie, das heißt innerhalb der nächsten 10 Jahre, geringer sind als die dadurch realisierten Vorteile. Langfristig könnten jedoch PEM-Brennstoffzellen auf den Markt kommen, die die nötige Leistungsdichte für eine mobile Anwendung auch bei einem Luftbetrieb nahe dem Atmosphärendruck erreichen. In diesem Fall wäre die Kompressor-Expandereinheit überflüssig<sup>4</sup>.

### **Festlegung des Reformierprozesses**

Es wird ferner unterstellt, dass in den nächsten 10 Jahren nicht mit einer Wasserstoff-Infrastruktur und ausreichender Speicherbarkeit von Wasserstoff im Pkw gerechnet werden kann. Diese Lösung bleibt auf Flottenfahrzeuge beschränkt. Im Gaserzeugungssystem muss die Wasserstoffgewinnung für die PEM-Brennstoffzelle deshalb über eine Reformierung aus gut speicherbaren, flüssigen Kraftstoffen wie Methanol im Pkw erfolgen (Indirekt-Methanol-Brennstoffzelle). Direkt-Methanol-Brennstoffzellen, die die Verfahren der elektrochemischen Oxidation von Methanol ohne Zwischenschritte einer Reformierung benutzen, befinden sich noch nicht auf dem Entwicklungsstand der PEM-Brennstoffzelle, so dass auch mit dieser Technologie im Betrachtungszeitraum der Studie nicht gerechnet werden kann<sup>5</sup>.

Für die Gewinnung von Wasserstoff aus Methanol stehen drei Reformierprozesse zur Auswahl, die sich vor allem bezüglich der Wärmeversorgung des Prozesses unterscheiden: Die endotherme Dampfreformierung, bei welcher von außen Energie zugeführt werden muss, die partielle Oxidation, bei welcher es sich um eine exotherme Reaktion handelt, das heißt der Reaktionsprozess gibt Wärme ab, und die autotherme Reformierung, die eine Kombination der beiden Prozesse darstellt, wodurch eine ausgeglichene Wärmebilanz erreicht werden kann<sup>6</sup>. Zur Zeit gibt es abgesehen von Prototypen noch

<sup>4</sup> Überblick über den aktuellen Stand der Forschungsarbeiten bei Siemens findet sich in Große, J.; Waidhas, M.; Fortschritte bei der PEM-Brennstoffzellenentwicklung, 1998, S.159 ff. Tillmetz, W.; Hornburg, G.; Dietrich, G.; Polymere Membran-Brennstoffzellen-Systeme, 1995, S.128.

<sup>5</sup> Vgl. Große, J.; Waidhas, M.; Fortschritte bei der PEM-Brennstoffzellenentwicklung, 1998, S.155

<sup>6</sup> Vgl. Schübler, M.; Entwicklung eines kaltstartfähigen Reaktors für die autotherme Reformierung von Methanol, 1998, S. 4

keinen Reformer für die mobile Anwendung. Die Entwicklungsaktivitäten konzentrieren sich auf die vielversprechende autotherme Reformierung und die endotherme Dampfreformierung. Da die Automobilhersteller überwiegend die Dampfreformierung präferieren<sup>7</sup>, wurde sie auch für die Studie als Grundlage genommen.

### Festlegung des Gasreinigungssystems

Ein Nachteil der PEM-Brennstoffzelle ist die hohe Empfindlichkeit gegenüber Kohlenmonoxid (CO), welches u.a. bei der Methanol-Wasserdampfreformierung als Nebenprodukt mit einem Anteil von ca. 1 Prozent entsteht. Damit die Brennstoffzelle nicht vergiftet, muss die CO-Konzentration im Brenngas unter 10 ppm, das heißt weniger als 10 CO-Moleküle pro eine Million Katalysator-Atome (z.B. Platin) gedrückt werden. Das Kohlenmonoxid kann entweder chemisch oder physikalisch entfernt werden.

Bei den chemischen Verfahren ist es das Ziel, mit Hilfe der gewählten katalytisch unterstützten Reaktionen möglichst ohne Nebenreaktionen den CO-Gehalt im Brenngas auf einen Wert <10 ppm zu senken. Zu den chemischen Verfahren zählen die CO-Konvertierung, die (selektive CO-) Methanisierung und die selektive CO-Oxidation<sup>8</sup>, wobei für die Methanol-Dampfreformierung die letztere bevorzugt eingesetzt wird. Für die selektive CO-Oxidation wurden verschiedene Verfahren und Katalysatoren untersucht<sup>9</sup>. Prinzipiell wird bei diesem Verfahren der restliche Kohlenmonoxidanteil des Rohgases der Methanol-Dampfreformierung, nachdem es mit zusätzlicher Luft als Oxidationsmittel vermischt wurde, in einem PROX-Reaktor (**PR**referential **OX**idation Reaktor) bei Temperaturen um 120 °C durch Reaktionsbeschleuniger (Katalysatoren wie z.B. Platin) zu CO<sub>2</sub> oxidiert (vgl. Abbildung 2-2). Diesen Weg verfolgt DaimlerChrysler<sup>10</sup>.

Die physikalische Lösung arbeitet mit einem Wasserstoffseparator. Dieser besteht aus zwei Gasräumen, welche durch eine Palladium-Membran getrennt sind. In einem befindet sich das Gasgemisch des Reformers. An der Edelmetallmembran spalten sich die Wasserstoffmoleküle in einzelne Atome, durchdringen die Folie bei ca. 315 °C nahezu ungehindert und bilden auf der Rückseite wieder H<sub>2</sub>. Das entstandene Gas ist rein und praktisch frei von CO<sup>11</sup> (vgl.

<sup>7</sup> Vgl. Kalhammer, F.R.; Status and Prospects of Fuel Cells as Automobile Engines, 1998, S. III-27, ebenso vgl. Dietrich, G.; Technologischer Innovationssprung: Die Brennstoffzelle, 1999, S. 3

<sup>8</sup> Colsmann, G.; Verfahrenstechnische Optimierung der Brenngaserzeugung für Brennstoffzellen in Kraftfahrzeugen, 1995, S. 53

<sup>9</sup> Ausführlich werden die Verfahren vorgestellt in Colsmann, G.; Verfahrenstechnische Optimierung der Brenngaserzeugung für Brennstoffzellen in Kraftfahrzeugen, 1995, S. 79 ff.

<sup>10</sup> Vgl. Kalhammer, F.R.; Status and Prospects of Fuel Cells as Automobile Engines, 1998, S. III-27

<sup>11</sup> Vgl. Herstellung von CO-freiem Brenngas, Forschungszentrum Jülich, [www.stp-news.de/archiv/archiv61n.html](http://www.stp-news.de/archiv/archiv61n.html)

Abbildung 2-3). Bei einer effektiven Abstimmung des Separators mit dem Methanol-Wasserdampf-Reformer kann auf einen Shift- und PROX-Reaktor verzichtet werden. Das getrennte CO kann, nachdem das restliche Wasser kondensiert und abgedrückt worden ist, in dem katalytischen Brenner als Brenngas genutzt werden.

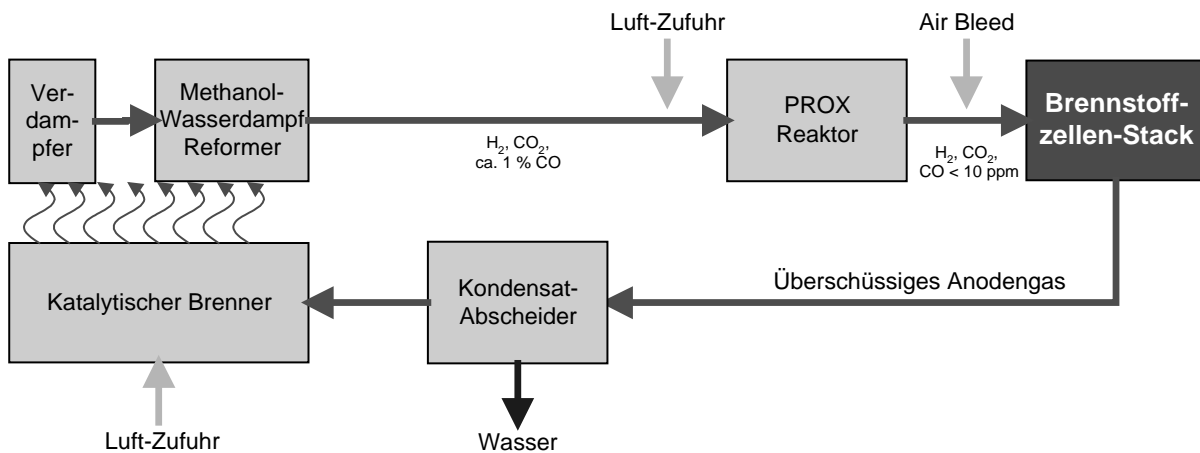


Abbildung 2-2: Chemische Gasreinigung mit Shift- und PROX-Reaktoren<sup>12</sup>

Der Vorteil der physikalischen Lösung besteht darin, dass die Wasserstoffversorgung der Brennstoffzelle „dead ended“ sein kann, das heißt, dass das überschüssige Anodengas (bestehend aus CO und CO<sub>2</sub>), welches in der Brennstoffzelle sonst nicht oder nur schwer durch die PEM-Membran diffundiert, nicht abgeführt werden muss. Dadurch reduziert sich die Komplexität des gesamten Systems<sup>13</sup> und das Brennstoffzellensystem ist kompatibel mit Fahrzeugsystemen mit reiner Wasserstoffspeicherung. Der Nachteil besteht in den hohen Kosten, die durch den Palladiumanteil verursacht werden. Aus diesem Grund ist nach Meinung des Forschungszentrums Jülich im günstigsten Fall ab ca. 2005 mit Antriebssystemen mit Gastrennmembran und reinem H<sub>2</sub> zu rechnen<sup>14</sup>, also noch innerhalb des Betrachtungszeitraums dieser Studie.

<sup>12</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Cleghorn, S. et al.; PEM Fuel Cells for Transportation and Stationary Power Generation Applications, 1996, S. 1642

<sup>13</sup> Cleghorn, S. et al.; PEM Fuel Cells for Transportation and Stationary Power Generation Applications, 1996, S. 1642

<sup>14</sup> FVV-Brennstoffzellen-Studie, 1998, S. 1.2-15

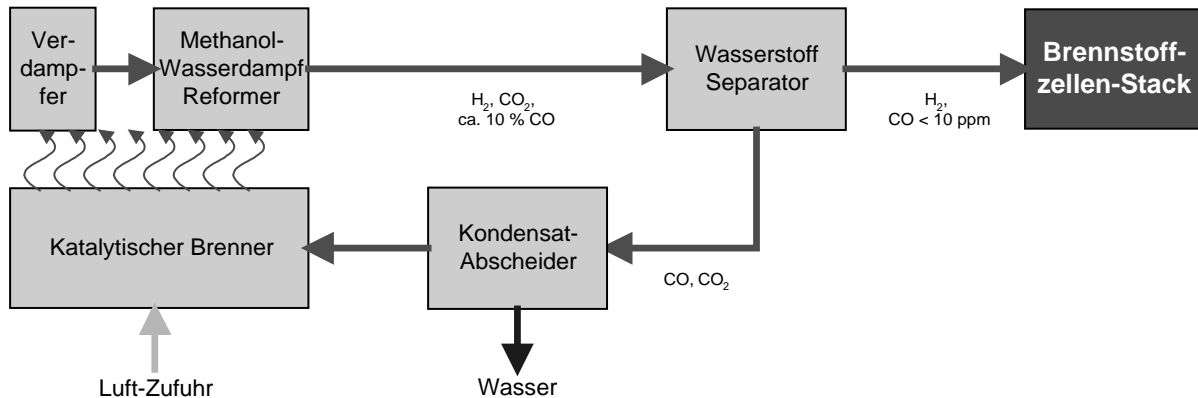


Abbildung 2-3: Physikalische Gasreinigung mit Gastrennmembran<sup>15</sup>

Da die meisten Automobilhersteller die chemische Lösung präferieren, soll auch in dieser Studie von einer chemischen Lösung ausgegangen werden, welche nur aus einem PROX-Reaktor besteht.

### Festlegung des elektrischen Energiespeichers

Des Weiteren wird in dieser Studie davon ausgegangen, dass die ersten marktfähigen Brennstoffzellen-Fahrzeuge mit einer Batterie als zusätzlichem Energiespeicher ausgestattet sein werden<sup>16</sup>. Dadurch kann in der Startphase die notwendige Energie beispielsweise für Pumpen und Steuerung des Stromerzeugersystems bereitgestellt werden, es wäre ein früheres Losfahren möglich, indem die Zeit überbrückt wird, die das System benötigt, um auf Betriebstemperatur zu kommen<sup>17</sup>, und die Funktionsfähigkeit von elektrischen Komponenten wäre auch bei ausgeschalteter Brennstoffzelle gewährleistet. Zusätzlich wird dadurch die Bremsenergieerückgewinnung über den Traktionsmotor erst realisierbar, indem die Energie in der Batterie zwischengespei-

<sup>15</sup> Eigene Darstellung in Anlehnung an Cleghorn, S. et al.; PEM Fuel Cells for Transportation and Stationary Power Generation Applications, 1996, S. 1642

<sup>16</sup> Damit handelt es sich im weiteren Sinne um serielle Hybridfahrzeuge, vgl. Biermann, J.-W.; Bady, R.; Hybridantriebs-Strukturvarianten, Betriebsstrategien sowie deren Vor- und Nachteile

<sup>17</sup> Vgl. auch Hoehl, K.; Wüchner, E.; Die A-Klasse: Träger künftiger Antriebssysteme, 1999, S.14.7

chert wird. Wirkungsgradsteigerungen von bis zu 10 Prozent wären möglich, das heißt Gesamtwirkungsgrade über 40 Prozent<sup>18</sup>.

### **Festlegung der Einbauform und Bauart des Traktionsmotors**

Es werden zwei Einbauformen von E-Motoren unterschieden. Zum Einen die Radnabenmotoren, bei welcher der elektrische Antrieb direkt in die Radnabe integriert wird, und zum Anderen zentral liegende Motoren. Der Vorteil der Radnabenmotoren entsteht aufgrund der Substitution des Getriebes und der Differentiale sowie der Integrationsmöglichkeit von Allradantrieb, ABS, ASR und Fahrstabilitätsregelung<sup>19</sup>. Nachteilig ist das hohe Gewicht und die Größe, weshalb sie wohl nicht für Pkw in Frage kommen; sowohl beim batteriebetriebenen Elektrofahrzeug (ZEBRA) als auch beim NECAR 3 kommt jeweils ein zentral liegender E-Motor zum Einsatz. Radnabenmotoren werden aber beispielsweise bei Bussen eine große Rolle spielen.

Bei der Bauart der zentral liegenden Traktionsmotoren bieten sich 3-Phasen Asynchronmotoren und (Switched-)Reluktanzmotoren an. Asynchronmotoren sind heute wegen der sehr guten Wirkungsgrade und des robusten und wartungsfreien Aufbaus am häufigsten im Einsatz. Sie können auch schon ohne produktionstechnische Schwierigkeiten gefertigt werden. Vielversprechender ist jedoch der Switched-Reluktanzmotor, bei dem das Magnetfeld kreisförmig um den Läufer läuft, so dass dieser nachgezogen wird. Dieser Motor zeichnet sich durch einen einfachen, mechanischen Aufbau und damit potentiell geringere Fertigungskosten sowie durch gute Wirkungsgrade, über den Fahrzyklus gerechnet, aus<sup>20</sup>. Die technische Realisierung des laufenden (geschalteten) Magnetfelds dagegen stellt sehr hohe Anforderungen an die Steuerung des E-Motors, weshalb leistungsstarke Reluktanzmotoren bisher nur für größere, zentral liegende E-Motoren eingesetzt werden können. Zur Zeit wird an einer verbesserten kompakten Elektronik sowie an einem verbesserten Steuerverfahren zur Reduzierung des Geräusches des Umrichters gearbeitet<sup>21</sup>. Für eine kurzfristige (Serien-)Anwendung wird dieser Antrieb deshalb noch nicht verfügbar sein. Im Rahmen der Studie wird aber unterstellt, dass innerhalb des Betrachtungszeitraums ein Serieneinsatz möglich sein wird.

<sup>18</sup> Vgl. Appleby, J. A.; The futur of fuel cells, 1999, S. 60

<sup>19</sup> Vgl. Biermann, J.-W.; Bady, R.; Hybridantriebe-Strukturvarianten, Betriebsstrategien sowie deren Vor- und Nachteile

<sup>20</sup> Vgl. Bitsche, O.; v. Raumer, T.; Friedrich, J.; Switched-Reluctance-Fahrzeugantriebe, 1998, S. 147

<sup>21</sup> Vgl. Bitsche, O.; v. Raumer, T.; Friedrich, J.; Switched-Reluctance-Fahrzeugantriebe, 1998, S. 153

### 3 Die neuen Komponenten des Methanol-Brennstoffzellensystems

Als neue Komponenten eines Methanol-Brennstoffzellen-Antriebs werden im Folgenden alle Komponenten eines Brennstoffzellenfahrzeuges bezeichnet, die verglichen mit den Komponenten eines heutigen Fahrzeuges der A-Klasse mit Benzinmotor neu, verändert bzw. angepasst worden sind. Im Folgenden sollen die Komponenten und deren Funktionen vorgestellt werden. Die Komponenten wurden zu Gruppen zusammengefasst, welche bestimmte Systeme repräsentieren (z.B. Stromerzeugungssystem, Kraftstoffsystem) bzw. zu bestimmten Technologiearten gehören (z.B. Motorelektrik). Diese Art der Gruppierung erleichtert die spätere Zuordnung der betroffenen Wertschöpfung zu Branchen (siehe Kapitel 6).

#### 3.1 Das Stromerzeugungssystem

##### Das Brennstoffzellenstack

Einzelne Brennstoffzellen ergeben hintereinandergelagert einen Stack. Abgeschlossen wird dieser Stack an beiden Enden durch eine **Endplatte**. An diesen Endplatten befinden sich die Stromabgriffplatten, Zuganker, Gas- und Kühlwasseranschlüsse<sup>22</sup>. Beim Necar 4 besteht beispielsweise die Brennstoffzelle aus zwei Stacks mit je 35 kW<sub>e</sub> Leistung und jedes Stack besteht aus je 160 aneinandergelagerten Brennstoffzellen<sup>23</sup>.

Die Brennstoffzelle selbst besteht aus einer MEA-Einheit, Bipolarplatten und Dichtungen.

Die **MEA-Einheit** (**M**embrane-**E**lectrode **A**ssembly) wiederum setzt sich zusammen aus der PEM-Folie, einem Elektrokatalysator und den Gasdiffusionsschichten bzw. Elektroden. Bei der **PEM-Folie** handelt es sich um eine protonenleitende Polymermembran, die nur die Wasserstoffprotonen passieren lässt. Die PEM-Folie wird auf beiden Seiten mit **Elektrokatalysatoren** beschichtet. Dabei kommen sowohl für die Sauerstoff- (kathodenseitig) als auch für die Wasserstoffelektrode (anodenseitig) Edelmetalle wie z.B. Platin

<sup>22</sup> Vgl. Tillmetz, W; Hornburg, G;Dietrich, G; Polymermembran-Brennstoffzellen-Systeme, 1995, S.125

<sup>23</sup> Vgl. Necar 4, 1999, S.5

bzw. ein Katalysator auf Kobaltbasis zum Einsatz<sup>24</sup>. Durch die Edelmetalle wird eine katalytische Beschleunigung der Oberflächenprozesse an der PEM-Folie erreicht. Beidseitig der beschichteten PEM-Folie befindet sich jeweils eine **Gasdiffusionsschicht**. Sie hat einerseits die Funktion, die Gase Wasserstoff bzw. Sauerstoff gleichmäßig der Folie zuzuführen, andererseits führt sie die Produkte Strom, Wärme und Wasser in die Bipolarplatten ab. Wegen der Stromabführungsfunktion wird die Gasdiffusionsschicht oft auch als Elektrode bezeichnet.

Die Abtrennung der einzelnen Zellen erfolgt durch **Bipolarplatten**, die folgende Funktionen übernehmen: Elektrische Kontaktierung der Elektroden und Weiterleitung des Stroms zur benachbarten Zelle (Serienschaltung der Zelle), Versorgung der Zellen mit den Reaktionsgasen und Abtransport des erzeugten Wassers, Weiterleitung der bei der Reaktion entstehenden Abwärme an die benachbarte Kühlkammer, Abdichten der verschiedenen Gas- und Kühlkammern gegeneinander und nach außen<sup>25</sup>, wobei die Außenabdichtung insbesondere durch **Dichtungen** zwischen den Bipolarplatten erreicht wird.

Die technischen Merkmale des Referenz-Brennstoffzellenstacks dieser Studie lehnen sich an die Ballard „900“ Brennstoffzellen-Serie an, mit welcher beim Einsatz von zwei Stacks mit ca. 160 Zellen und 32,5 kW<sub>e</sub> pro Stack eine Leistung von zusammen 75 kW<sub>e</sub> bei 215 V erreicht werden kann und die speziell für die Serienfertigung und mobile Anwendung konzeptioniert worden ist.

### Das Gaserzeugungssystem

Das in dieser Studie betrachtete Gaserzeugungssystem besteht aus den Komponenten Verdampfer, Methanol-Wasserdampfreaktor, PROX-Reaktor, katalytischer Brenner, POX-Reformer und Abscheider.

Im **Verdampfer** werden Reinstwasser und Methanol vermischt und verdampft. Vom Verdampfer aus gelangt das Gas ohne weitere Pumpen in den **Methanol-Wasserdampfreaktor**, in welchem der Wasserstoff erzeugt wird, der als Synthesegas in die Brennstoffzellen gelangt. Das bei der Reformierung entstandene Kohlenmonoxid wird durch eine Gasreinigung, bestehend aus einem **PROX-Reaktor**, oxidiert.

<sup>24</sup> Die Firma ZeTek Power Ltd. hat einen neuen Katalysator auf Kobaltbasis entwickelt, durch den die Kosten der Zellen erheblich gesenkt werden können. Vgl. Das Ende des Platins in der PEM Zelle? Kobalt-Katalysator entwickelt, 1999

<sup>25</sup> Tillmetz, W; Hornburg, G; Dietrich, G; Polymermembran-Brennstoffzellen-Systeme, 1995, S.125

Beheizt wird der Verdampfer und der Methanol-Wasserdampfreformer direkt über einen sekundären Ölkreislauf, welcher die durch einen **katalytischen Brenner** erzeugt Prozesswärme zuführt. Der katalytische Brenner verbrennt den restlichen Wasserstoff des Anodenabgases der Brennstoffzelle, welches zuvor durch einen Abscheider vom restlichen Wasser befreit wurde. Zusätzlich kann noch Methanol hinzugezogen werden.

Um die Kaltstartfähigkeit, insbesondere die Start-up Zeit des Gaserzeugungssystems zu verbessern, wird für die Zeit des Warmlaufens ein **POX-Reformer (Partielle OXidation)** zur Unterstützung zugeschaltet. Die bei der POX-Reformierung entstehenden Produktgase können im katalytischen Brenner verbrannt werden und ermöglichen damit ein schnelles Erhitzen des Gaserzeugungssystems auf Betriebstemperatur. Der POX-Reformer wird ausschließlich mit Methanol und Frischluft betrieben.

### Die Kompressor-Expandereinheit

Ein **Luftkompressor** bringt die komprimierte Luft in die Brennstoffzelle. Mit einem **Expander** wird ein Teil der dabei eingesetzten Energie am Ausgang der Brennstoffzelle wieder zurückgewonnen. Angetrieben wird der Kompressor durch einen E-Motor.

### Sonstige Peripherie

Im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen treten bei Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen keine Verbrennungsgeräusche und Geräusche von rotierenden Massen auf. Die Brennstoffzelle selbst arbeitet lautlos und vibrationsfrei. Allerdings erzeugt die Bereitstellung komprimierter Gase durch den Luftkompressor einen nicht unerheblichen Lärm. Deshalb wird die angesaugte Luft durch einen **Ansaugschalldämpfer** geleitet, in welchem sie zugleich auch für die Brennstoffzelle mittels eines **Luftfilters** gereinigt wird. Nach der Luftverdichtung wird die relative Luftfeuchtigkeit der Frischluft den Anforderungen der Brennstoffzelle entsprechend in einem **Luftbefeuchter** geregelt, was für die PEM-Folie zwingend notwendig ist, weil sie ansonsten austrocknen würde. In einem **Luft-Vorwärmer** wird die Frischluft gegebenenfalls noch vorgewärmt. Dies ist insbesondere in der Warmlaufphase der Brennstoffzelle nach dem Starten und bei sehr niedrigen Temperaturen von großer Bedeutung.

Der Luftbefeuchter und der Methanol-Wasserdampfreformer benötigen Wasser, welches durch **Abscheider** aus dem dampfförmigen, kathoden- und anodenseitigen Abgasstrom gewonnen und einem **Wasser-Ausgleichsbehälter** selbstständig zugeführt wird. Da nur Reinstwasser in den Reformer gelangen soll, bedarf es eines **Deionisierungsfilters**, der aus Ionentauscher-Patronen

besteht. Die **Wasser-Dosierpumpe** und die **Methanol-Dosierpumpe** pumpen das Wasser bzw. das Methanol in den Verdampfer. Beide Pumpen werden durch Elektromotoren angetrieben.

Um die Aggregate der Gaserzeugung untereinander und mit dem Brennstoffzellenstack zu verbinden, sind spezielle **Leitungen** für gasförmige und flüssige Medien nötig. **Ventile** müssen den Druck für die Wasserstoff- und Luftversorgung regeln.

Ein Mantel bzw. eine **Hülle** aus Blech schützt das Stromerzeugungssystem gegen Einwirkungen von außen.

## 3.2 Die Motorelektrik

### Der Traktionsmotor

Der Traktionsmotor, als Reluktanzmotor gebaut, wird mit 3-Phasen-Gleichstrom betrieben. Für die Bereitstellung dieses Gleichstroms ist ein Umrichter vorgesehen, der auch die gesamte Motor- und Getriebesteuerung beinhaltet. Der E-Motor muss mit Wasser gekühlt werden. Für die Bereitstellung der elektrischen Energie werden **Kraftstromkabel** eingesetzt.

Ein Traktionsmotor muss ungefähr eine Dauerleistung von ca. 30 kW bis 9000 Umdrehungen bei einer Spitzenleistung von ca. 50 kW<sub>e</sub> bis 6000 Umdrehungen innerhalb eines Spannungsbereich von 215 V- 350 V erfüllen. Zur Erreichung der Anfahrtssteigfähigkeit muss ein Spitzenmoment von ca. 180 NM für 2 Minuten erreicht werden<sup>26</sup>.

### Der Gleichstromwandler

Brennstoffzelle, Antriebsmotor und Batterien liefern beziehungsweise benötigen unterschiedliche Gleichstromspannungen, sodass ein großer bidirektionaler DC/DC-Wandler benötigt wird, der die abgegebene Spannung der Brennstoffzelle für die weiteren Aggregate umwandelt. Alle Spannungen im Bereich zwischen 12 und 260 V sind abgreifbar. Umgekehrt stellt der Wandler auch die benötigten 260 V aus der Batterie zur Verfügung, welche zum Start des Brennstoffzellenfahrzeugs benötigt wird. Soll auch eine Steckdose für herkömmliche Elektrogeräte im Auto installiert werden, so bedarf es eines

<sup>26</sup> Vgl. Bitsche, O.; v. Raumer, T.; Friedrich, J.; Switched-Reluctance-Fahrzeugantriebe, 1998, S. 148

zusätzlichen DC/AC-Wandlers, um aus Gleichstrom Wechselstrom herzustellen.

### **Das Bordnetz**

Heutige Bordnetze der Brennstoffzellen-Versuchsfahrzeuge werden mit konventionellen 14 V betrieben, obwohl verglichen mit konventionellen Antriebssystemen höhere Leistungen von den Haupt- und Nebenaggregaten nachgefragt werden. Problematisch ist, dass für bestimmte Leistungen bei geringen Spannungen höhere Ströme fließen müssen, weshalb der Querschnitt der Kabel größer sein muss. Dies führt zu vielfältigen Problemen hinsichtlich des Platzbedarfs, der Befestigung, der Kabelführung und nicht zuletzt ist der Materialverbrauch erheblich höher. Aus diesen Gründen wird unterstellt, dass das Bordnetz eines Serienfahrzeuges mit höheren Spannungen betrieben wird, was bisherigen Bestrebungen in Richtung von 42 Volt-Bordnetzen entgegen kommt<sup>27</sup>.

### **Die Batterie**

Ähnlich wie bei Elektrofahrzeugen ist auch bei Brennstoffzellenfahrzeugen der elektrische Energiespeicher von besonderer Bedeutung. Auswahlkriterien sind auch hier Energiedichte, Leistungsdichte, zyklische Lebensdauer, energetischer Wirkungsgrad, Selbstentladung, Umweltverträglichkeit, Kosten und Verfügbarkeit. Hauptanforderung für den Einsatz in Hybridantrieben ist eine möglichst hohe verfügbare Leistungsdichte, um mit einer möglichst kleinen und leichten Batterie die hochdynamischen Entlade-/Ladevorgänge (insbesondere bei der Bremsenergieerückgewinnung) zu erreichen. Gleichzeitig muss die Batterie über eine hinreichend große Energiedichte verfügen, um eine genügende Reichweite zu ermöglichen<sup>28</sup>.

In den heutigen Prototypen werden noch 12 V-Batterien mit 88 Ah eingesetzt. In dieser Studie wird unterstellt, dass Batterien mit u.a. höheren Spannungen eingesetzt werden. Mit exakt welchen Spannungen und mit wie vielen Amperestunden die Batterie ausgelegt wird, hängt von der Systemauslegung des gesamten Fahrzeuges ab und kann nur schwer vorhergesagt werden. Es sind alle Auslegungen der Batterie von einer einfachen, welche nur die notwendigen Systeme mit Strom beim Nichtbetrieb der Brennstoffzelle versorgt, bis hin zu sehr leistungsfähigen Batterien, mit welchen das Fahrzeug mehrere

<sup>27</sup> Vgl. Feige, A.; Wandel in der Wertschöpfungskette, 1999, S. 138

<sup>28</sup> Vgl. Biermann, J.-W.; Bady, R.; Hybridantriebe-Strukturvarianten, Betriebsstrategien sowie deren Vor- und Nachteile

Minuten fahren kann, vorstellbar. Die Batterie wird direkt über den DC/DC-Wandler aufgeladen.

### **Elektromotoren für die Nebenaggregate**

E-Motoren werden für den Antrieb sämtlicher Nebenaggregate benötigt wie beispielsweise Kompressor-/Expandereinheit, Kühlwasserpumpe, Lüfter des Kühlers, Wasser-/und Methanol-Dosierpumpe, elektrische Vakuumpumpe für die Servolenkung, elektrisch betriebene Wärmepumpen für die Klima- und Heizungsanlage sowie elektrisch betriebene Unterdruckpumpen für den Bremskraftverstärker. Bei den Elektromotoren handelt es sich um die sehr effektiven Reluktanzmotoren, die schon heute in den Prototypen wie Nocar III und IV eingebaut werden. Sie sind besonders robust und die Leistungselektronik sitzt unmittelbar am Motor, weshalb sich ein eigener Schaltkasten für Steuerung, Sensorik, Schutz- und Diagnoseeinrichtungen erübrigt<sup>29</sup>. Dadurch sinken die Fertigungskosten, der Motor verliert zudem an Größe und Gewicht. Teilweise werden die E-Motoren mit Wasser gekühlt.

### **Die Steuerungs-, Mess- und Regelungstechnik**

Zur Systemregelung und -steuerung bzw. zur Sicherheitsüberwachung des Methanol-Brennstoffzellen-Antriebssystems bedarf es einer speziellen Hauptsteuerung, spezieller Sensortechnik und eines Frequenzumrichters.

### **Das Steuerungsmodul für das Antriebssystem**

Das Steuerungsmodul dient als zentrale Steuerung, die mit den Steuerungen der am Betrieb beteiligten Aggregate kommuniziert und parallel deren Zustand abfragen kann. Diese komplexe Steuerung muss insbesondere das chemisch-technische Gaserzeugungssystem hochdynamisch steuern und regeln.

### **Die Messtechnik**

Die Überwachungstechnik besteht aus Sensorsystemen für die Analytik von Gasen und Flüssigkeiten wie **Wasserstoffsensoren**, **Temperaturgebern** (beispielsweise das Kühlwasser), aber auch **Druck- und Flüssigkeitsstandgeber** und **Sensoren zur Zellspannungsüberwachung**.

<sup>29</sup> Vgl. Nocar IV, 1999, S. 7, und vgl. Nocar III, 1999, S. 7

### Der Frequenzumrichter des Traktionsmotors

Der Frequenzumrichter stellt den Gleichstrom für den Reluktanzmotor bereit, indem er die Elektroströme mit hoher Schaltfrequenz für den Traktionsmotor entsprechend der gewünschten Drehzahl kommutiert<sup>30</sup>. Der Frequenzumrichter muss wie der Traktionsmotor mit Wasser gekühlt werden.

### 3.3 Das Getriebe

Auch zukünftige Elektrofahrzeuge werden ein Getriebe benötigen, weil die hohen Drehzahlen der E-Motoren (bis zu 13000 U/min) auf fahrzeugtypische Drehzahlbereiche (1000-3000 U/min) transformiert werden müssen. Allerdings sind die neuen Getriebe nicht mehr mit den herkömmlichen vergleichbar.

Stand der Technik ist ein eingängiges Festgetriebe, das, bis auf die Parksperre, vollständig automatisiert ist, demnach ohne Kupplung auskommt und vom Start weg das volle Drehmoment des E-Motors übertragen kann. Eingesetzt werden heute Planetengetriebe bzw. Stirnradgetriebe. Experimentiert wird an zweigängigen Getrieben, und es ist vorstellbar, dass für spezielle Einsatzzwecke auch Fahrzeuge mit dreigängigen Getrieben ausgestattet werden. Die Funktion des Rückwärtsgangs wird durch Umpolung des E-Motors erreicht. Im Rahmen dieser Studie wird jedoch von einem einstufigen Getriebe mit einer Parksperre ausgegangen. Dieses Getriebe ist in einem kompakten Antriebsaggregat mit Traktionsmotor, angeflanschem Getriebe und Leistungselektronik (Umrichter) integriert<sup>31</sup>. Ein Problem der neuen Getriebe ist die Schmierung. Öl schäumt ab rund 10.000 Umdrehungen/Minute stark auf, so dass der Ölfilm abreißt. Um dieses Problem zu umgehen, werden Druckschmierungen eingesetzt.

### 3.4 Die Abgasanlage

Die Abgasanlage besteht aus einem **Abluftschalldämpfer** und der entsprechenden **Verrohrung** bis hin zum **Endrohr**. Die Abgasanlage ist im Vergleich zu Verbrennungsmotoren temperaturunkritisch, die feuchte Abluft wirkt aber durch das demineralisierte Wasser in Verbindung mit sauren „Ausblutungen“ der Elektrolytmembran verstärkt korrosiv, weshalb Edelstahl oder Nickellegierungen zum Einsatz kommen. Vorstellbar sind wegen der geringen Temperaturen auch temperaturfeste Kunststoffe.

<sup>30</sup> Vgl. Bitsche, O.; v. Raumer, T.; Friedrich, J.; Switched-Reluctance-Fahrzeugantriebe, 1998, S.

<sup>31</sup> Vgl. Hoehl, K.; Wüchner, E.; Die A-Klasse: Träger künftiger Antriebssysteme, 1999, S.14.7

### 3.5 Das Kühlsystem

Bei konventionellen Verbrennungsmotoren werden durch Abstrahlung und Auspuffgase rund 2/3 und durch den Einsatz eines Kühlers rund 1/3 der Wärme abgeführt. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen müssen nahezu 100 Prozent der entstehenden Wärmeenergie über den Kühlkreislauf abtransportiert werden, weshalb leistungsfähige Kühler und Lüftereinheiten eingesetzt werden. Das Hauptproblem der Kühlung von Brennstoffzellenfahrzeugen ist die geringe Differenz zwischen Kühlwasser und Außenlufttemperatur. Die Brennstoffzelle erhitzt das Wasser auf 80 bis 90°C. Bei einer angenommenen Lufttemperatur von 30-40°C im Sommer steht damit nur eine Differenz von rund 40 bis 50°C zur Kühlung zur Verfügung.

Der **Lüfter** wird angetrieben von einem E-Motor. Der **Kühler** zeichnet sich durch sehr eng aneinander liegende Kühlkanäle aus. Zwischen Kühler und Lüfter befindet sich die **Zarge**, die die Luftführung gewährleistet.

Eine **Kühlmittelpumpe**, angetrieben durch einem E-Motor, versorgt die Brennstoffzelle, das Gaserzeugungssystem, den Traktionsmotor, E-Motoren, das Getriebe, die Elektronik und die Steuerungen mit Kühlmittel. Da weitaus mehr Aggregate zu kühlen sind als bei herkömmlichen Automobilen, ist die **Verrohrung** aufwendiger und komplexer aufgebaut.

### 3.6 Das Kraftstoffsystem

Der Methanol-Tankvorgang wird für den Kunden gleich verlaufen wie bei einem konventionellen Fahrzeug. Die Tankanlage wird prinzipiell so bestehen bleiben, wie es aus herkömmlichen Fahrzeugen bekannt ist. Jedoch ist Methanol sehr korrosiv. Mit der Zeit greift es metallische Rohre und Tankwände an. Ferner kann Methanol Gummidichtungen und Kraftstoffschläuche aufquellen bzw. - durch Herauslösen der Weichmacher – verspröden lassen. Zusätzlich besteht Explosionsgefahr: Bei Temperaturen zwischen +10°C und +36°C bilden sich explosionsfähige Gasgemische in den Methanol-Tanks<sup>32</sup>. Die Risiken lassen sich mit zusätzlicher – wenn auch aufwendiger – Sicherheitstechnik beherrschen. Zudem gibt es Methanol-resistente Materialien, die dem Lösungsmittelleffekt widerstehen, ebenso Stoffe, die das Korrodieren verhindern. Noch ist nicht entschieden, welche Materialien für eine neuartige Behältertechnik zum Einsatz kommen werden. Möglich ist beschichteter Kunststoff oder rostfreier Edelstahl (CrNi). Entscheidungsrelevant ist neben den Kosten das Gewicht und die Formbarkeit der eingesetzten Materialien.

<sup>32</sup> Vgl. Ewe, T.; Die rollende Revolution, 1998, S. 43-44

Der Methanoltank besteht aus einem **Tank** mit einer Füllmenge von ca. 40 l und einem **Tank-Einfüllstutzen**, über welchen betankt wird. Die Kraftstoffpumpe gehört nicht mehr zum Kraftstoffsystem, sondern zur Gaserzeugung. Die während des Tankens verdrängte Luft wird über den **Entlüftungsstutzen** abgeführt. Das **Regenerierungsventil** sorgt für zeitgenaue Bereitstellung des Kraftstoffs an der Dosierpumpe. Bei geschlossenem Tankdeckel können insbesondere bei warmer Witterung Methanoldämpfe im Tank entstehen. Zur Vermeidung eines Überdrucks im Tank wird deshalb ein **Lüftungsventil** eingesetzt. Die dabei entweichenden Gase werden zur Reinigung durch einen **Aktivkohlefilter** geführt.

### 3.7 Sonstige Komponenten des Antriebssystems

#### Die Lenkung und das Fahrwerk

Die Servolenkung besteht u.a. aus einer Ölpumpe, die beim konventionellen Fahrzeug über Keilriemen angetrieben wird. Dieser Antrieb der **Lenkhilfepumpe** müsste über einen Elektromotor geschehen (Elektromechanische Servolenkung), damit die Lenkhilfe auch im Leerlauf funktionsfähig ist, was in dieser Studie auch unterstellt wird. Alternativ wäre auch eine speicherhydraulische Lenkhilfe möglich.

#### Die Bremsanlage

Bei Benzinmotoren speichert der Bremskraftverstärker einen Teil des vom Motor erzeugten Ansaug-Unterdrucks. Über entsprechende Ventile wird dann bei Bedarf die Pedalkraft durch Unterdruck verstärkt. Ähnlich einem Dieselmotor muss beim BZ-Fahrzeug der Unterdruck durch spezielle Unterdruckpumpen, die mit Elektromotoren angetrieben werden, erzeugt werden. Das bedeutet den Einsatz elektrischer **Vakuumpumpen**.

Da unterstellt wird, dass mittels Bremsenergierückgewinnung (Rekuperation) der Wirkungsgrad des Gesamtsystems erhöht wird, kann die Leistung der Reibungsbremsen reduziert werden<sup>33</sup>.

Die Realisation von **ABS** in Elektrofahrzeugen ist schon vollendet. Jedoch muss die ABS-Bremsung an die sogenannte Rekuperativ-Bremsung angepasst werden.

<sup>33</sup> Vgl. Feige, A.; Wandel in der Wertschöpfungskette, 1999, S. 137

Das Stabilisierungssystem ESP steht dagegen noch nicht für Elektrofahrzeuge zur Verfügung. Die Entwicklung solcher Geräte ist möglich, steht momentan aber nicht im Vordergrund.

### Die Heizungs- und Klimaanlage

Weil die Kühlwärme nicht zentral und auf niedrigem Temperaturniveau anfällt, muss zur Innenraumheizung ein spezielles Heizaggregat vorgesehen werden. Das kann eine Verbrennungsheizung üblicher Bauart sein, jedoch müsste sie strengere Abgasvorschriften einhalten. Alternativ kann es eine Elektroheizung sein.

Die Klimaanlage, deren Kompressor bisher von der Antriebswelle des Verbrennungsmotors betrieben wurde, müsste ebenfalls modifiziert werden. Zukünftig müsste ein E-Motor den Kompressor antreiben. Als Kühlmittel könnte ein Kohlenstoffdioxid dienen, so dass ein Kühlen wie auch ein Heizen des Fahrzeugs über die Klimaanlage möglich wäre. Beim Heizen wird die Klimaanlage somit zur Wärmepumpe. Der Heiz- und Kühlleistungsbedarf eines mittelgroßen Pkw beträgt etwa sechs bis acht Kilowatt. Um mindestens diesen Betrag müsste für die Kühlung wie auch für die Heizung die Stromversorgung höher dimensioniert werden.

Es ist davon auszugehen, dass zukünftig eine **Wärmepumpe** mit elektrischem Antrieb zum Einsatz kommt<sup>34</sup>.

<sup>34</sup> Nach Feige wäre allerdings der Einsatz einer Bauart mit thermischem Antrieb wie beispielsweise BVE-Thermolift noch besser. Damit wäre auch eine ökonomische Standheizung /-klimatisierung realisierbar, vgl. Feige, A.; Wandel in der Wertschöpfungskette, 1999, S. 137-138.

### 3.8 Zusammenfassung

Tabelle 3-1: Neue Komponenten von Hybrid-Brennstoffzellen-Fahrzeugen

<b>Stromerzeugungssystem</b>	<b>Motorelektrik</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <b>Brennstoffzellenstack</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• MEA-Einheit               <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ PEM-Folie</li> <li>◆ Elektrokatalysatoren</li> <li>◆ Gasdiffusionsschicht</li> </ul> </li> <li>• Bipolarplatte</li> <li>• Dichtungen</li> <li>• Endplatten</li> </ul> </li> <li>➤ <b>Gaserzeugungssystem</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verdampfer</li> <li>• Methanol-Wasserdampfpreformer</li> <li>• PROX-Reaktor</li> <li>• Katalytische Brenner</li> <li>• POX-Reformer</li> </ul> </li> <li>➤ <b>Luft-Verdichter und -Expander</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kompressor-/Expandereinheit</li> </ul> </li> <li>➤ <b>Sonstige Peripherie</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ansaugschalldämpfer</li> <li>• Luftfilter</li> <li>• Luftbefeuchter</li> <li>• Luft-Vorwärmer</li> <li>• Wasser-Abscheider anodenseitig</li> <li>• Wasser-Abscheider kathodenseitig</li> <li>• Wasserausgleichsbehälter</li> <li>• Deionisierungsfilter</li> <li>• Wasser-Dosierpumpe</li> <li>• Methanol-Dosierpumpe</li> <li>• Leitungen</li> <li>• Ventile</li> <li>• Hülle</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bordnetz</li> <li>• Batterie</li> <li>• Gleichstromwandler</li> <li>• Traktionsmotor</li> <li>• Kraftstromkabel</li> <li>• Elektrische Wärmepumpe</li> <li>• Elektromotoren für           <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Kompressor-/Expandereinheit</li> <li>◆ Kühlwasserpumpe</li> <li>◆ Lüfter des Kühlers</li> <li>◆ Wasser-Dosierpumpe</li> <li>◆ Methanol-Dosierpumpe</li> <li>◆ Vakuumpumpe d. Servolenkung</li> <li>◆ Unterdruckpumpe d. Bremskraftv.</li> </ul> </li> </ul> <p><b>Steuerungs-, Mess- u. Regelungstech.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Steuerungsmodul Antriebssystem</li> </ul> <p>➤ <b>Messtechnik</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wasserstoffsensoren</li> <li>• CO-Sensoren</li> <li>• Temperaturgeber</li> <li>• Druckgeber</li> <li>• Flüssigkeitsstandgeber</li> <li>• Spannungssensoren</li> </ul> <li>• Frequenzrichter f. Traktionsmotor</li> <p style="text-align: center;"><b>Getriebe</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Getriebe</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>Abgasanlage</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Abluftschalldämpfer</li> <li>• Verrohrung</li> <li>• Endrohr</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>Kühlsystem</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrischer Lüfter</li> <li>• Kühler</li> <li>• Zarge</li> <li>• Elektrische Kühlmittelpumpe</li> <li>• Verrohrung</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>Heizungs- und Klimaanlage</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrische Wärmepumpe</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>Lenkungs- und Fahrwerk</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrische Lenkhilfepumpe</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Kraftstoffsystem</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Methanoltank</li> <li>• Tankeinfüllstutzen</li> <li>• Tankverschluss</li> <li>• Entlüftungsstutzen</li> <li>• Regenerierungsventil</li> <li>• Aktivkohlefilter/LüftungsfILTER</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>Bremsanlage</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrische Vakuumpumpe</li> <li>• ABS-System</li> </ul>	

## 4 Veränderungen gegenüber dem konventionellen Antriebstrang

Die folgende Untersuchung bezüglich der Betroffenheit der Komponenten stellt die Basisinformationen für die weiteren Kapitel 5 und 6 zur Verfügung. Die Frage, die in diesem Kapitel beantwortet werden soll, ist, welche Komponenten des konventionellen Antriebs sind wie betroffen.

Hierzu soll ein Automobil gedanklich in seine Komponenten zerlegt werden. Dabei entstehen drei Klassen:

- **Unveränderte Komponenten**, die von der Einführung der Brennstoffzellentechnologie nicht betroffen sind. Dazu zählen z.B. Scheinwerfer und der größte Teil der Karosserie.
- **Modifizierte Komponenten**, die durch Einführung der Brennstoffzellentechnologie nur in veränderter Art und Weise beibehalten werden, wie beispielsweise das Kühlsystem oder das Getriebe, welches den neuen Anforderungen eines Elektroantriebes sehr stark angepasst werden muss.
- **Wegfallende Komponenten**, die durch Einführung der Brennstoffzellentechnologie überflüssig werden. Dazu zählt z.B. der Motor mit all seinen Komponenten.

Als Grundlage für die konventionellen Komponenten diene ein Fahrzeug der A-Klasse (A160) mit 1.598 cm<sup>3</sup> Hubraum und 75 kW<sub>m</sub>. Untersucht wurden nur die wesentlichen A- und B-Teile, das heißt keine Kleinteile wie Schrauben, Stecker etc.

Auf die unveränderten Komponenten des Pkw entfallen über 60 Prozent der Herstellkosten (siehe Abbildung Kap. 6, 1-2), diese werden im Folgenden nicht näher betrachtet. Die betroffenen Komponenten lassen sich in zwei Gruppen unterteilen. Entweder werden konventionelle Komponenten durch die neue Technologie vollständig substituiert (Wegfallende Komponenten) oder sie müssen wegen neuer Anforderungen angepasst werden (Modifizierte Komponenten). Vollständig substituierte Komponenten werden in den Tabellen mit „S“ markiert. Die anzupassenden, konventionellen Komponenten können jedoch noch einmal differenziert betrachtet werden: Und zwar zwischen den Komponenten der heutigen A-Klasse, die innerhalb des Betrachtungszeitraums mit hoher Wahrscheinlichkeit durch den technologischen Fortschritt eine aus heutiger Sicht bekannte Veränderung erfahren werden, und den Komponenten, die keinen wesentlichen technologischen Fortschritt erfahren werden. Diese Differenzierung soll die Betroffenheit heutiger Komponenten im Betrachtungszeitraum relativieren, indem Technologietrends, die

unabhängig von der neuen Brennstoffzellentechnologie geschehen und die anzupassenden Komponenten berühren, berücksichtigt werden.

Folglich werden die Komponenten, die aufgrund des technologischen Fortschritts voraussichtlich die gleiche Technologie einsetzen werden wie die Komponente des Brennstoffzellen-Fahrzeuges, in den Tabellen mit einem „T“ markiert, die Komponenten, die auch in der Zukunft anzupassen sind, mit einem „A“.

Der wichtigste Trend bei konventionellen Fahrzeugen besteht darin, dass immer mehr mechanisch und hydraulisch realisierte Funktionen elektrifiziert werden, indem die Nebenaggregate zukünftig einen elektrischen Antrieb erhalten, um die Sicherheit, den Komfort und die Effizienz von modernen Fahrzeugen zu erhöhen. Jedoch steigt damit auch der Bedarf an elektrischer Energie, die über ein leistungsfähiges Bordnetz verteilt werden muss. Zukünftig wird deshalb das 42 Volt-Bordnetz neben weiterhin einem 14 V-Bordnetz in konventionelle Fahrzeuge Eingang finden.

#### 4.1 Der Verbrennungsmotor

Die Bereitstellung eines Drehmomentes für Antrieb und Zusatzfunktionen wird im Brennstoffzellenfahrzeug vom Stromerzeugungssystem und dem Traktionsmotor geleistet. Aus diesem Grund fällt der Verbrennungsmotor mit allen dazu gehörenden Komponenten, wie sie in der Motorstückliste (vgl. Tabelle 4-1) genannt sind, vollständig weg<sup>35</sup>, vergleichbare Komponenten des Brennstoffzellen-Antriebs gibt es nicht.

<sup>35</sup> Das Saugmodul stellt das teuerste Zulieferteil des Motors dar. In ihm sind viele Funktionen vereint, die bei anderen Automobilen noch unabhängig voneinander verbaut werden. Aus diesem Grund sollen die Funktionen des Saugmoduls der A-Klasse aufgezeigt werden. Das Saugmodul ist eine hochintegrierte Komponente, die alle zur Luftführung und Gemischbildung (incl. Steuerung) erforderlichen Komponenten zu einem Komplettsystem zusammenfasst: Motorsteuergerät mit integriertem Heißfilm-Luftmassenmesser (HFM), Drosselklappensteller, Luftfilter und Luftfilterpatrone, Saugrohr mit Dichtungen, Resonator, Kraftstoffverteiler mit Einspritzventilen, Zündspulenmodul, Motorleitungssatz, vgl. Maute, N. et. al; Einsatz von hochintegrierten Ansaugsystemen bei Ottomotoren, 1998, S. 76-82

Tabelle 4-1: Komponenten des Verbrennungsmotors

<b>Komponenten des konventionellen Antriebs</b>		<b>Anzahl</b>	<b>Komponenten des Brennstoffzellen-Antriebs</b>		<b>Anzahl</b>
S	Zylinderkurbelgehäuse	1			
S	Zylinderlaufbuchse	4			
S	Kurbelwelle	1			
S	Kurbelwellenrad	1			
S	Kurbelwellenlagerdeckel	1			
S	Kurbelwellen Lagerdeckel Passlager	1			
S	Deckel	1			
S	Steuergehäuse	1			
S	Entlüftungsschlauch	1			
S	Ölwanne	1			
S	Ventilsitzring Einlass	4			
S	Ventilsitzring Auslass	4			
S	Zylinderkopfdichtung	1			
S	Zylinderkopfhaube	1			
S	Hauptlager, obere Hälfte	5			
S	Hauptlager, untere Hälfte	5			
S	Zylinderkopf	1			
S	Schwungrad mit Anlasszahnkranz	1			
S	Schwingungsdämpfer	1			
S	Pleuel	4			
S	Pleuelbuchse	4			
S	Pleuellager, obere Hälfte	4			
S	Pleuellager, untere Hälfte	4			
S	Kolben	4			
S	Nockenwelle (NW)	1			
S	NW-Lagergehäuse	1			
S	Nockenwellenrad	1			
S	Rollenkette Einfach	1			
S	Spannschiene	1			
S	Kettenspanner	1			
S	Einlassventil	4			
S	Auslassventil	4			
S	Ventilfeder	8			
S	Saugmodul	1			
S	Saugrohrstütze	1			
S	Zündkerze	4			
S	Zündspulenmodul	1			
S	Positionsgeber	1			
S	Positionsgeber	1			
S	Rollenkette	1			
S	Ölfilter	1			
S	Riemenscheibe Wasserpumpe	1			
S	Riemenspanner	1			
S	Keilrippenriemen	1			
S	Motorträger an Ölwanne	1			
S	Motorträger Drehmomentst.	1			
S	Regenerierventil	1			
S	Ölpumpe	1			

Keine vergleichbaren  
Komponenten

## 4.2 Die Motorelektronik

Mangels Verbrennungsmotor fällt die konventionelle Motorelektronik weg. An deren Stelle tritt eine komplexere Sensor- und Steuerungstechnik für das Gaserzeugungssystem und den Traktionsmotor (Frequenzumrichter des ReLUktanzmotors).

Tabelle 4-2: Veränderungen der Motorelektronik

Komponenten des konventionellen Antriebs		Anzahl	Komponenten des Brennstoffzellen-Antriebs		Anzahl
S	Zündspule	1			
S	Kurbelwellengeber	1			
S	Nockenwellengeber	1			
A	Motorsteuergerät <sup>36</sup>	1	Steuerungsmodul Antriebssystem		1
A	Temperaturgeber Kühlwasser	1	Wassertemperaturgeber		mind. 1
S	Ölstandssensor	1			
S	Klopfsensor	1			
A	Thermostat	1	Thermostat		mind. 1
A	O <sub>2</sub> Sonde	1	O <sub>2</sub> Sonde		mind. 1
			H <sub>2</sub> Sonde		mind. 1
			Druckgeber		mind. 1
			Flüssigkeitsstandgeber		mind. 1
			Spannungssensoren		mind. 1
			Frequenzumrichter f. Traktionsmotor		1

## 4.3 Die Motorelektrik respektive Steuerungs- und Sensortechnik

Ein Großteil der konventionellen Motorelektrik fällt weg, da das Stromerzeugungssystem weder einen konventionellen Starter noch eine Lichtmaschine zur Gewinnung von Strom benötigt. An deren Stelle treten neue, technologisch vergleichbare Elektrikkomponenten: neben dem Traktionsmotor insbesondere diverse Elektromotoren für Nebenaggregate.

<sup>36</sup> Das Motorsteuergerät ist im Saugmodul integriert und überwacht bzw. steuert u.a. die folgenden Baugruppen: Zündspule, Kurbelwellengeber, Nockenwellengeber, Klopfsensor, Lambda-Sonde, Regenerierventil, Temperaturgeber Kühlwasser, Relais Kraftstoffpumpe, Einspritzventile, Ölstandssensor, Pedalwertgeber. In dem Steuergerät integriert ist auch das Communication Area Network (CAN). Dabei handelt es sich um einen integrierten Bus, der die Informationen für den Fahrer zum Kombigerät im Fahrzeuginnenraum übermittelt. Im Kombigerät werden die Signale ausgewertet und die einzelnen Anzeigen gesteuert. Das Kombigerät wie auch das CAN werden prinzipiell auch in Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen gebaut.

Tabelle 4-3: Veränderungen der Motorelektrik

Komponenten des konventionellen Antriebs		Anzahl	Komponenten des Brennstoffzellen-Antriebs	Anzahl
T	Bordnetz (42V, 12V)	1	Bordnetz (42V)	1
A	Batterie (12V, 46 Ah)	1	Batterie	1
S	Starter (0,9kW)	1		
S	Starterkabelsatz	1		
S	Generator <sup>37</sup> (12 V, 90A)	1		
A	Motorleitungssatz	1	Motorleitungssatz	1
T	Elektr. Wärmepumpe (Heizung/Klima)	1	Elektr. Wärmepumpe (Heizung/Klima)	1
			DC/DC Wandler	1
			Traktionsmotor (55kW)	1
			Kraftstromkabel	1
			Reluktanzmotor Kompr./Exp. Einheit	1
			Reluktanzmotor	1
			Wasser-Dosierpumpe	1
			Reluktanzmotor	1
			Methanol-Dosierpumpe	1
T	Reluktanzmotor Kühlpumpe	1	Reluktanzmotor Kühlpumpe	1
T	Reluktanzmotor Lüfter d. Kühlers	1	Reluktanzmotor Lüfter d. Kühlers	1
T	Reluktanzmotor Vakuumpumpe Servolenkung	1	Reluktanzmotor Vakuumpumpe Servolenkung	1
T	Reluktanzmotor Unterdruckpumpe des Bremskraftverstärkers	1	Reluktanzmotor Unterdruckpumpe des Bremskraftverstärkers	1

#### 4.4 Die Abgasanlage

Bei der **Abgasanlage** fällt wegen der schadstofffreien Abgase der Brennstoffzelle der Einsatz von Katalysator und Lambdasonde weg. Bedingt durch die geringeren thermischen Anforderungen an die Abgasanlage können günstigere Materialien eingesetzt werden.

<sup>37</sup> Zukünftig werden Starter und Generator zu einer Komponente (Klauenpol-Startergenerator) zusammenfallen

Tabelle 4-4: Veränderungen der Abgasanlage

Komponenten des konventionellen Antriebs		Anzahl	Komponenten des Brennstoffzellen-Antriebs	
<b>Auspuffleitung vorn</b>				
A	Auspuffkrümmer (APK)		Auspuffkrümmer (APK)	1
S	Katalysator-Schalldämpfer-Gehäuse	1		
A	Abgasrohr zw. APK und KAT	1	Abgasrohr zw. APK und ASD	1
S	Katalysator	1		
S	KAT Monolit	1		
S	Lambda-Sonde (Regelsonde)	1		
S	Gehäuseschale obere Hälfte	1		
S	Gehäuseschale untere Hälfte	1		
S	Abgasrohr nach KAT	1		
<b>Auspuffleitung hinten</b>				
S	Abgasrohr am Flansch	1		
S	Abgasrohr vor Nachschalldämpfer	1		
S	Abschirmblech	1		
A	Nachschalldämpfer	1	Abluftschalldämpfer (ASD)	1
A	Endrohr	1	Endrohr	1

#### 4.5 Das Getriebe

Das Getriebe fällt in einem Fahrzeug mit Elektroantrieb wesentlich einfacher aus. Statt fünf Gängen und einem Rückwärtsgang wird nur eine einstufige Übersetzung und ein Park-Modus benötigt. Der Rückwärtsgang wird durch Umpolung des Motors erreicht. Dadurch bleibt der Aufbau prinzipiell gleich, jedoch fallen voraussichtlich 3 Festräder für die Gänge 3-5, 5 Losräder für die Gänge 2-5 und der Rückwärtsgang sowie ein Zwischenrad für den Rückwärtsgang weg. Ebenso wird die Kupplung überflüssig. Daraus folgt, dass das Getriebe als Ganzes angepasst werden muss. Es fällt kleiner und einfacher aus.

#### 4.6 Das Kühlsystem

Das Kühlsystem mit seinen Komponenten wird aufgrund eines größeren Kühlaufwandes des Brennstoffzellensystems im Verhältnis zu konventionellen Kühlsystemen wesentlich größer ausfallen müssen. In einem Brennstoffzellenfahrzeug können jedoch prinzipiell die gleichen Komponenten mit den gleichen Materialien eingesetzt werden wie in einem konventionellen Fahrzeug.

#### **4.7 Das Kraftstoffsystem**

Da das Kraftstoffsystem des Brennstoffzellenfahrzeugs die gleichen Komponenten benötigt wie ein konventionelles Kraftstoffsystem, müssen vor allem Modifikationen hinsichtlich der zum Einsatz kommenden Materialien vorgenommen werden (Edelstahl, methanolresistente Kunststoffe). Darüber hinaus wird die Kraftstoffpumpe aus dem Tank hin zum Gaserzeugungssystem verlegt. Eine Dosierpumpe fördert das Methanol für den Verdampfer.

#### **4.8 Sonstige Komponenten des Antriebssystems**

##### **Die Lenkung und das Fahrwerk**

Da aufgrund des technologischen Fortschritts davon auszugehen ist, dass die Lenkhilfepumpe der Servoanlage in Zukunft ohnehin mit einem elektrischen Antrieb ausgestattet sein wird, ergeben sich für die Lenkung keine zusätzlichen Veränderungen.

##### **Die Bremsanlage**

Gleiches gilt für die Vakuumpumpe zur Bremskraftverstärkung. Auch sie wird in der Zukunft mit einem elektrischen Antrieb ausgestattet sein. Jedoch kann die ganze Bremsanlage aufgrund der Bremsenergieerückgewinnung kleiner dimensioniert werden. Dies konnte im Rahmen der Studie nicht detailliert betrachtet werden.

##### **Zusammenfassung**

Durch die neue Antriebstechnologie werden bei einem konventionellen Antriebssystem die Komponentengruppen der Abbildung 4-1 betroffen sein. Der Verbrennungsmotor wird vollständig, Komponenten der Motorelektronik und -elektrik werden größtenteils substituiert. Getriebe, Abgasanlage, Kühlsystem und Tankanlage bleiben in ihrer Funktion bestehen, müssen jedoch den neuen Anforderungen eines Methanol-Brennstoffzellenfahrzeuges angepasst werden.

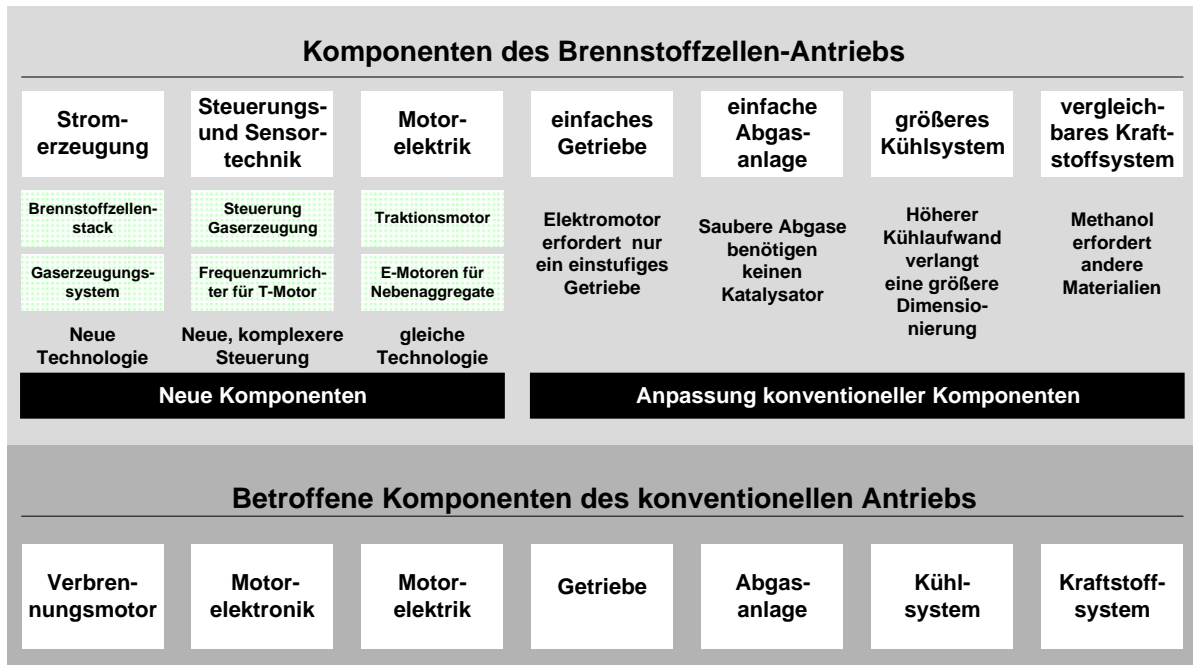


Abbildung 4-1: Veränderungen durch die Brennstoffzelle gegenüber einem konventionellen Fahrzeug im Überblick

## 5 Die veränderte Wertschöpfungsstruktur des Antriebsstrangs

Die veränderte Wertschöpfungsstruktur des Antriebsstrangs wird im Folgenden ermittelt, indem die Wertschöpfungsanteile der Komponenten des konventionellen Antriebs, die substituiert oder angepasst werden müssen, den Wertschöpfungsanteilen der neuen Komponenten des Brennstoffzellen-Antriebs gegenübergestellt werden. Nicht berücksichtigt werden die neuen Komponenten, die auch bei konventionellen Fahrzeugen vermutlich in Zukunft technologisch in die gleiche Richtung wie bei Brennstoffzellen-Fahrzeugen verändert werden.

## 5.1 Wertschöpfungsstruktur des konventionellen Antriebs

Zur Identifikation der Wertschöpfungsanteile des Benzinmotor-Antriebs wurden die Wertschöpfungsanteile der einzelnen Komponenten aus Stücklisten der A-Klasse ausgewertet. Die Kosten für die einzelnen Komponentengruppen wurden aufgrund von Literaturrecherchen und Expertengesprächen, insbesondere mit den Zulieferern, ermittelt, indem diese wettbewerbsneutrale Kosten für Komponenten nannten. Zuletzt wurden die absoluten Kosten in relative Kosteneinheiten umgewandelt, so dass die Wertanteile aller betroffenen Komponenten des konventionellen Antriebs 100 Werteinheiten repräsentieren. Die absoluten Kosten bewegen sich bei ca. 4000 DM, so dass jede Werteinheit ca. 40 DM entspricht. Die spezifischen Kosten pro Kilowatt liegen bei ca. 55 DM/kW<sub>mech</sub> auf Basis der 75 kW<sub>mech</sub> Antriebsleistung des untersuchten A160. Nicht berücksichtigt wurden beim Verbrennungsmotor sogenannte C-Teile, das heißt Kleinteile wie Stecker, Schrauben etc. Sie machen ca. 10 Prozent der gesamten Wertschöpfung aus, das heißt die spezifischen Kosten belaufen sich auf ca. 60 DM/kW<sub>mech</sub> mit C-Teilen. Typische spezifische Kosten liegen für Verbrennungsmotoren bei 50 – 80 DM/kW<sub>mech</sub><sup>38</sup>.

Tabelle 5-1: Wertschöpfungsanteile des Benzinmotor-Antriebs<sup>39</sup>

Komponentengruppe	Anteil	Werteinheit
<b>Verbrennungsmotor</b>	<b>45%</b>	<b>45</b>
<b>Motorelektronik</b>	<b>12%</b>	<b>12</b>
<b>Fahrzeugelektrik</b>	<b>9%</b>	<b>9</b>
<b>Getriebe</b>	<b>16%</b>	<b>16</b>
<b>Abgasanlage</b> , bestehend aus	<b>11%</b>	<b>11</b>
• Katalysator	(60%)	(6)
• Lambda-Sonde	(10%)	(1)
• Restlichen Komponenten	(30%)	(3)
<b>Kühlsystem</b>	<b>3%</b>	<b>3</b>
<b>Kraftstoffsystem</b>	<b>5%</b>	<b>5</b>
Summe	100%	100

## 5.2 Zielkosten des Brennstoffzellen-Antriebssystems

Die Kostenstruktur der Komponenten des Brennstoffzellen-Antriebs konnte mit obigem Vorgehen nicht ermittelt werden, weil die Kosten mangels einer

<sup>38</sup> Vgl. FVV Brennstoffzellen-Studie, 1998, S. 4-21

<sup>39</sup> Aufgrund von Rundungsungenauigkeiten kann die Summe der einzelnen Werteinheiten größer sein als die Gesamtsumme

Serienfertigung noch nicht bekannt sind. Statt dessen wurde ein Target-Costing-Ansatz gewählt. Ausgehend von den Zielkosten eines marktfähigen Brennstoffzellen-Antriebsstrangs wurden die verfügbaren Werteinheiten auf die einzelnen Komponenten heruntergebrochen. Dabei wurden insbesondere aus der Literatur geforderte bzw. als erreichbar erachtete Zielkosten für einzelne Komponenten bzw. Komponentengruppen berücksichtigt.

In der Studie wird unterstellt, dass sich der Brennstoffzellen-Antrieb langfristig nur dann am Markt durchsetzen kann, wenn sich die Kosten nicht über denen eines heutigen Turbo-Diesel-Antriebs bewegen werden, das heißt der Brennstoffzellen-Antrieb darf gegenüber dem Benzinmotor-Antrieb nicht mehr als 2000-3000 DM zusätzlich kosten<sup>40</sup>. Im Rahmen dieser Studie wurde ein Betrag von ca. 2000 DM angenommen, das heißt, dass der Brennstoffzellen-Antriebsstrang 50 Prozent teurer sein darf als die ermittelten Kosten des konventionellen Antriebsstrangs. Das entspricht 150 Werteinheiten, die auf die neuen Komponenten des Brennstoffzellen-Antriebs aufgeteilt werden können.

Es wurden nur für die wesentlichen Komponenten die Wertschöpfungsanteile ermittelt. Nicht betrachtet wurden wie beim konventionellen Antrieb, die C-Teile (z.B. Schrauben etc.). Ebenso sind in diese Analyse die Wasser-Abscheider und der Luftbefeuchter nicht mehr eingeflossen.

Die spezifischen Kosten des Brennstoffzellenantriebssystems liegen damit bei ca. 110 DM/kW<sub>e</sub> auf Basis einer 55kW<sub>e</sub> Antriebsleistung<sup>41</sup>. Berücksichtigt man noch C-Teile, so liegen die spezifischen Kosten bei ca. 120 DM/kW. Dieser Ansicht sind auch Wissenschaftler vom Daimler-Benz-Forschungszentrum in Ulm, wenn der gesamte Antriebstrang gegenüber dem Verbrennungsmotor konkurrenzfähig sein soll<sup>42</sup>. Sie gehen von marktfähigen Kosten weniger 100 DM/kW<sub>e</sub> aus. Fraglich ist jedoch, ob diese spezifischen Kosten auch erreicht werden können. Friedrich/Noreikat erwarteten noch 1996 für das Jahr 2010 bei einer Massenfertigung von 100.000 Stück spezifische Kosten von 200-400 DM/kW<sub>e</sub><sup>43</sup>. In der gleichen Quelle wird eine Studie von GM aufgeführt, welche Kosten von 100-110 DM/kW bei hohen Produktionszahlen als möglich ansieht. Diese Zahlen wurden von den Autoren als sehr optimistisch eingestuft. Die Zielsetzungen des PNGV-Programms in den USA (**P**rogram for **N**ew **G**eneration **V**ehicles) für konkurrenzfähige BZ-Antriebe liegen einschließlich Elektroantrieb zwischen 100 und 300

<sup>40</sup> Vgl. Efler, M.; Sauber, leise, Wasserstoff!; 1997; S. 116

<sup>41</sup> Die Antriebsleistung des Traktionsmotor entspricht nicht der vollständigen Leistung des Brennstoffzellenstacks von 75 kW<sub>e Stack</sub>

<sup>42</sup> Vgl. "Brennstoffzellen bald zum Niedrigpreis?", vdi Nachrichten vom 20.Juni 1997, Nr. 25, S. 12

<sup>43</sup> Vgl. Friedrich, J.; Noreikat, K. E.; State of the Art and Development Trends for Fuel Cell Vehicles, 1996, S.1762

DM/kW<sub>e</sub>, woran der BZ-Stack mit etwa 60 Prozent und der Reformer mit ca. 20 Prozent beteiligt ist<sup>44</sup>.

### 5.3 Zielkosten der Brennstoffzellen-Komponentengruppen

Die Komponentengruppen umfassen die in 3 vorgestellten Komponenten mit einer Ausnahme: der Ansaugschalldämpfer mit Luftfilter und der Luftvorwärmer wurden nicht dem Stromerzeugungssystem, sondern aufgrund der vergleichbaren Fertigungsart den Komponenten der Abgasanlage zugeordnet. Damit ergeben sich für die Komponentengruppen die in Tabelle 5-2 ermittelten Wertschöpfungsanteile.

Tabelle 5-2: Wertschöpfungsanteile des Brennstoffzellen-Antriebs<sup>45</sup>

Komponentengruppe	Anteil	Werteinheit
<b>Stromerzeugungssystem</b>	<b>45%</b>	<b>68</b>
<b>Steuerungs- Regelungs-, und Sensortechnik</b>	<b>23%</b>	<b>35</b>
• Frequenzumrichter	(65%)	(23)
• Steuerungsmodul	(31%)	(11)
• Sensoren	(4%)	(1)
<b>Fahrzeugelektrik</b>	<b>20%</b>	<b>30</b>
• Traktionsmotor	(76%)	(23)
• DCDC Wandler	(9%)	(3)
• Reluktanzmotor Kompressor/Expandereinheit	(5%)	(2)
• Reluktanzmotor Methanol-Dosierpumpe	(1%)	(0)
• Reluktanzmotor Wasser-Dosierpumpe	(1%)	(0)
• Batterie	(8%)	(2)
<b>Getriebe</b>	<b>4%</b>	<b>6</b>
<b>Abgasanlage, Ansaugschalldämpfer m. Luftfilter und Luftvorwärmer</b>	<b>1%</b>	<b>2</b>
<b>Kühlsystem</b>	<b>2%</b>	<b>3</b>
<b>Kraftstoffsystem</b>	<b>4%</b>	<b>5</b>
<b>Summe</b>	<b>100%</b>	<b>150</b>

Die höheren Kosten des **Methanol-Kraftstoffsystems** gegenüber einem konventionellen Kraftstoffsystem erklären sich aus dem Einsatz von teureren

<sup>44</sup> FVV Brennstoffzellen-Studie, 1998, S. 4-21 mit weiteren Quellen

<sup>45</sup> Aufgrund von Rundungsungenauigkeiten kann die Summe der einzelnen Werteinheiten größer sein als die Gesamtsumme

Materialien (Edelstahl, methanol-resistente Kunststoffe) und der aufwendigeren Sicherheitstechnik. Kostenmindernd ist der Wegfall der Benzinpumpe aus diesem Kostenblock.

Das im Wesentlichen unveränderte **Kühlsystem** verteuert sich durch die wesentlich größere Dimensionierung um 30 Prozent gegenüber dem konventionellen Kühlsystem.

Die **Abgasanlage** verbilligt sich insbesondere durch den Wegfall des Katalysators und der Lambda-Sonde. Zusätzlich können die eingesetzten Materialien günstiger sein, weil die thermische Beanspruchung geringer ist. Trotz der zusätzlichen Komponenten Ansaugschalldämpfer mit Luftfilter und Luft-Vorwärmer verbilligt sich diese Komponentengruppe um 80 Prozent gegenüber der Abgasanlage eines Benzinmotors.

Das **Getriebe** fällt wesentlich einfacher gegenüber dem Mehrganggetriebe des Benzinmotors aus, sodass sich die Kosten um 60 Prozent reduzieren.

Wesentlich zunehmen wird der Wertschöpfungsanteil für die **Motorelektrik** (+230 Prozent), hauptsächlich wegen des hohen Kostenanteils des Traktionsmotors. Ebenso wird die **Steuerungs- Regelungs-, und Sensortechnik** (+190 Prozent) stark an Gewicht zunehmen, hauptsächlich wegen der hohen Kosten des Frequenzumrichters für den Traktionsmotor.

Die Gegenüberstellung der Wertschöpfungsanteile beider Antriebsarten zeigt die quantitativen Verschiebungen auf (Abbildung 5-1).

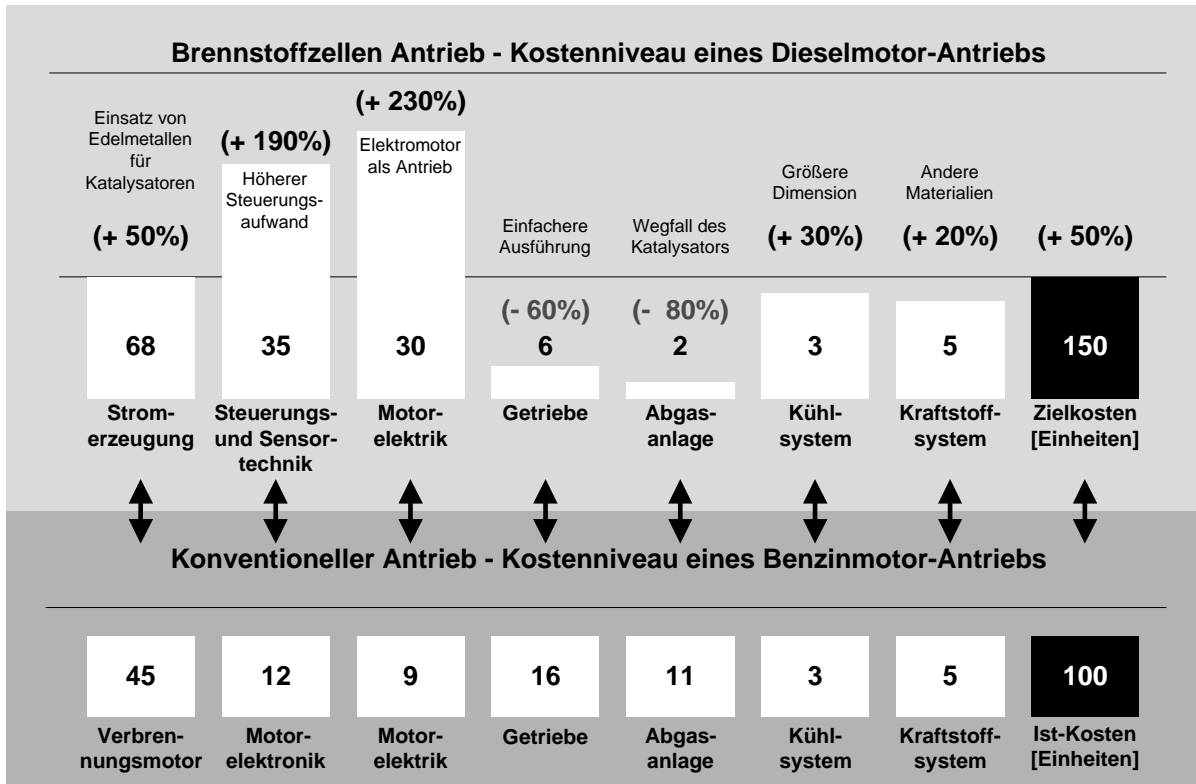


Abbildung 5-1: Veränderte Wertschöpfungsanteile<sup>46</sup>

#### 5.4 Zielkosten des Stromerzeugungssystems

Damit blieben für das Stromerzeugungssystem noch 68 Werteeinheiten, die wie in Tabelle 5-3 dargestellt aufgeteilt werden konnten.

<sup>46</sup> Aufgrund von Rundungsungenauigkeiten spiegelt sich die prozentuale Zunahme nicht unbedingt in den Werteeinheiten wider.

Tabelle 5-3: Wertschöpfungsanteile des Stromerzeugungssystems<sup>47</sup>

Komponentengruppe	Anteil	Werteinheit
<b>Brennstoffzellenstack</b>	<b>50%</b>	<b>34</b>
• MEA-Einheit	(50%)	(17)
• Bipolarplatten	(37%)	(13)
• Dichtungen	(8%)	(3)
• Endplatten	(5%)	(2)
<b>Gaserzeugungssystem</b>	<b>30%</b>	<b>20</b>
• Verdampfer	(10%)	(2)
• Methanol-Wasserdampfreformer	(40%)	(8)
• Katalytischer Brenner	(20%)	(4)
• PROX-Reaktor	(20%)	(2)
• POX-Reaktor	(10%)	(2)
<b>Kompressor/Expander-Einheit</b>	<b>15%</b>	<b>10</b>
<b>Peripherie</b>	<b>5%</b>	<b>3</b>
• Pumpen (für Kühlmittel, Wasser und Methanol)	(60%)	(2)
• Wasserausgleichsbehälter	(30%)	(1)
• Deionisierungsfilter	(10%)	(0)
<b>Summe</b>	<b>100%</b>	<b>68</b>

### Zielkosten des Brennstoffzellenstacks

Nach Ansicht von Wurster gilt es unter Experten als ausgemacht, dass der elektrochemische Teil des Systems, das Brennstoffzellenstack, in der Massenfertigung ausreichend kostengünstig gefertigt werden könnte<sup>48</sup>. Aufgrund dieses Target-Costing-Ansatzes müssten sich die spezifischen Kosten des Brennstoffzellenstacks langfristig bei ca. 18 DM/kW<sub>e Stack</sub> (basierend auf 75 kW<sub>e Stack</sub> Leistung der beiden Brennstoffzellenstacks) bewegen. Dies entspricht der Hälfte der günstigsten Kostenprognose für ein Stack in der Literatur: Nach Kalhammer sollen die Stackkosten bei 40.000 Stück im Jahr 2004 von 35 \$/kW<sub>e Stack</sub> auf 20 \$/kW<sub>e Stack</sub> im Jahr 2006 bei 100.000 Stück sinken<sup>49</sup>. Die Firma Ballard strebt mit ihrer „900“ Serie Stackkosten i.H.v. 20-35 \$/kW<sub>e Stack</sub> an<sup>50</sup>. In der Literatur finden sich auch Kostenaussagen zu den einzelnen Komponenten:

<sup>47</sup> Aufgrund von Rundungenungenauigkeiten kann die Summe der einzelnen Werteinheiten größer sein als die Gesamtsumme

<sup>48</sup> Wurster, R.; Technologie und mögliche Anwendungen der Brennstoffzelle, 1998

<sup>49</sup> Vgl. Kalhammer, F.R.; Status and Prospects of Fuel Cells as Automobile Engines, 1998, S. III-25

<sup>50</sup> Vgl. Kalhammer, F.R.; Status and Prospects of Fuel Cells as Automobile Engines, 1998, S. III-8

### **MEA Einheit**

So strebt 3M an, eine MEA als Roll-Gut zu entwickeln, die als Ganzes nicht mehr als 5-10  $\$/kW_{e\ Stack}$  kosten soll. Dabei sollen weniger als 1  $\$/kW_{e\ Stack}$  Fertigungskosten anfallen, beim Rest handelt es sich um Materialkosten<sup>51</sup>. Der günstigste Zielwert wurde auch der Studie zugrundegelegt und liegt somit bei 9-10  $DM/kW_{e\ Stack}$ .

Daraus folgt, dass die Kosten der MEA hauptsächlich von den eingesetzten Materialien bestimmt werden, das heißt der PEM und den Edelmetall-Katalysatoren: das Kostenziel der Membrane liegt bei 2-5  $\$/kW$ , das der Katalysatoren bei 2-3  $\$/kW_{e\ Stack}$ . Mit dem Fertigungsaufwand von 1  $\$/kW$  folgen für die MEA Kosten von 5-10  $\$/kW_{e\ Stack}$ .

### **Bipolarplatte**

Nach Kalhammer arbeitet Ballard an Bipolarplatten, die bei hohen Stückzahlen nur 1 \$ pro Stück kosten<sup>52</sup>. Da im gewählten Brennstoffzellen-Konzept ca. 307 Bipolarplatten eingesetzt werden, ergeben sich Kosten in Höhe von ca. 500 DM bei einem Dollarkurs von 1,65 DM. Diese Kosten wurden als Zielkosten in der Studie zugrundegelegt.

### **Dichtungen/Endplatten**

Der sehr hohe Dichtungsaufwand wurde mit ca. 100 DM pro Stack angenommen, für die Fertigung der Endplatten ein Aufwand von ca. 60 DM pro Stack. Mit diesen obigen Kostenannahmen zu den einzelnen Komponenten eines Brennstoffzellenstack könnten die Zielkosten für das Stack erreicht werden, wie Tabelle 5-3 zeigt.

## **5.5 Zielkosten des Gaserzeugungssystems, Kompressor-Expandereinheit und der Peripherie**

Im Gegensatz zum Brennstoffzellenstack gibt es nur sehr wenig Information über die Kosten des Gaserzeugungssystems, der Kompressor/Expandereinheit

<sup>51</sup> Vgl. Kalhammer, F.R.; Status and Prospects of Fuel Cells as Automobile Engines, 1998, S. III-23

<sup>52</sup> Vgl. Kalhammer, F.R.; Status and Prospects of Fuel Cells as Automobile Engines, 1998, S. III-7

und der Peripherie (Pumpen, Abscheider, etc.)<sup>53</sup>. So werden für das Gaserzeugungssystem entweder Zielkosten von einerseits 30-50 DM/kW<sub>e</sub> und andererseits von 200 DM/kW<sub>e</sub> bei Serienfertigung genannt<sup>54</sup>, oder es werden die Kosten des Gesamtsystems prozentual verteilt, wobei diese Berechnungen aber nur schwer nachvollziehbar sind<sup>55</sup>. Ob die Zielkosten für das Gaserzeugungssystem, die Kompressor/Expandereinheit und der Peripherie erreicht werden können, werden nach Wurster die nächsten Jahre zeigen<sup>56</sup>. Das Erreichen dieser Kostenziele wird den Erfolg bzw. Misserfolg des Brennstoffzellen-Antriebssystems maßgeblich beeinflussen.

Die Kosten des Gaserzeugungssystems werden hauptsächlich sowohl durch die Fertigungskosten der Verfahrenskomponenten bestimmt, die thermisch und physikalisch in einem effizienten und kompakten System zu integrieren sind<sup>57</sup>, als auch durch den effizienten Einsatz von kostenintensiven Katalysatoren. Die Materialkosten für die Katalysatormaterialien sind deshalb in Tabelle 5-4 explizit aufgeführt. Insgesamt werden im Rahmen dieser Studie für das Gaserzeugungssystem spezifische Kosten von ca. 10 DM/kW<sub>e Stack</sub> angenommen.

Tabelle 5-4: Wertschöpfungsanteile der Katalysatoren

Komponentengruppe	Anteil	Werteinheit
Methanol-Wasserdampfreaktor		
Plattenpaket	80%	7
Nicht-Edelmetall-Katalysator	20%	2
Katalytischer Brenner (KB)		
Behälter	20%	1
Edelmetall-Katalysator	80%	3
PROX		
Plattenpaket	25%	1
Edelmetall-Katalysator	75%	3

<sup>53</sup> Vgl. auch Kalhammer, F.R.; Status and Prospects of Fuel Cells as Automobile Engines, 1998, S. III-39

<sup>54</sup> Vgl. Große, J.; Weidhas, M.; Fortschritte bei der PEM-Brennstoffzellentechnologie, S. 161 mit weiteren Quellen

<sup>55</sup> Vgl. Kapitel 5.2: Zielkosten des Brennstoffzellen-Antriebssystems. Vgl. ebenso FVV Brennstoffzellen-Studie, 1998, S. 4-21 mit weiteren Quellen

<sup>56</sup> Vgl. Wurster, R.; Technologie und mögliche Anwendungen der Brennstoffzelle, 1998

<sup>57</sup> Vgl. Kalhammer, F.R.; Status and Prospects of Fuel Cells as Automobile Engines, 1998, S. III-39

## 6 Die Auswirkungen des Innovationssprungs auf die eingesetzten Fertigungsverfahren

Aufbauend auf den absehbaren technologischen Veränderungen der Komponenten ist es möglich, die Betroffenheit der eingesetzten Fertigungsverfahren und Ausrüster zu klassifizieren.

### 6.1 Betroffenheit der Ausrüster

Die Investitionsgüterausrüster können als negativ betroffen bezeichnet werden, wenn sie Ausrüster interner oder externer Zulieferer sind, die wegfallende Komponenten produzieren und sich ihnen durch technologisch vergleichbare neue Komponenten des Brennstoffzellen-Antriebs kein neuer Markt eröffnet (vgl. Abbildung 6-1). Zu dieser Kategorie zählen insbesondere viele Ausrüster für die Herstellung von Komponenten des Verbrennungsmotors und der Motorelektronik. Beispielsweise fallen darunter Ausrüster der Gesenkschmiede-Technologie, die derzeit für die Fertigung von Kurbel- bzw. Nockenwellen benutzt, beim Brennstoffzellen-Antrieb aber nicht mehr eingesetzt wird.

Anders sieht es beispielsweise für Ausrüster von Zulieferern der Fahrzeugelektrik aus: Zwar fallen beispielsweise der Starter und die Lichtmaschine weg, jedoch werden statt dessen Elektromotoren für den Antrieb von Kompressor, Kühlmittel- und Dosierpumpen sowie der Reluktanzmotor nachgefragt. Technologisch betrachtet handelt es sich um vergleichbare Komponenten. Für den Ausrüster bedeutet dies, dass er dem Zulieferer keine grundsätzlich neue Fertigungstechnologie bereitstellen muss, um am Innovationsprozess Teil zu haben.

Ausrüster der Zulieferer, die anzupassende konventionelle Komponenten fertigen, müssen keinen technologischen Innovationssprung befürchten, denn auch ihre Abnehmer werden damit nicht konfrontiert. Es kann aber zu quantitativen Anpassungen kommen, weil entweder umfangreichere Ausrüstungsinvestitionen anfallen können, beispielsweise für die größer zu dimensionierenden Kühlsysteme, oder aber geringere, wie es wegen der einfacheren Ausfertigung des Getriebes (weniger Zahnräder) zu erwarten ist. Deshalb werden im Folgenden die anzupassenden Komponenten nicht in der Analyse der betroffenen Fertigungsverfahren berücksichtigt.

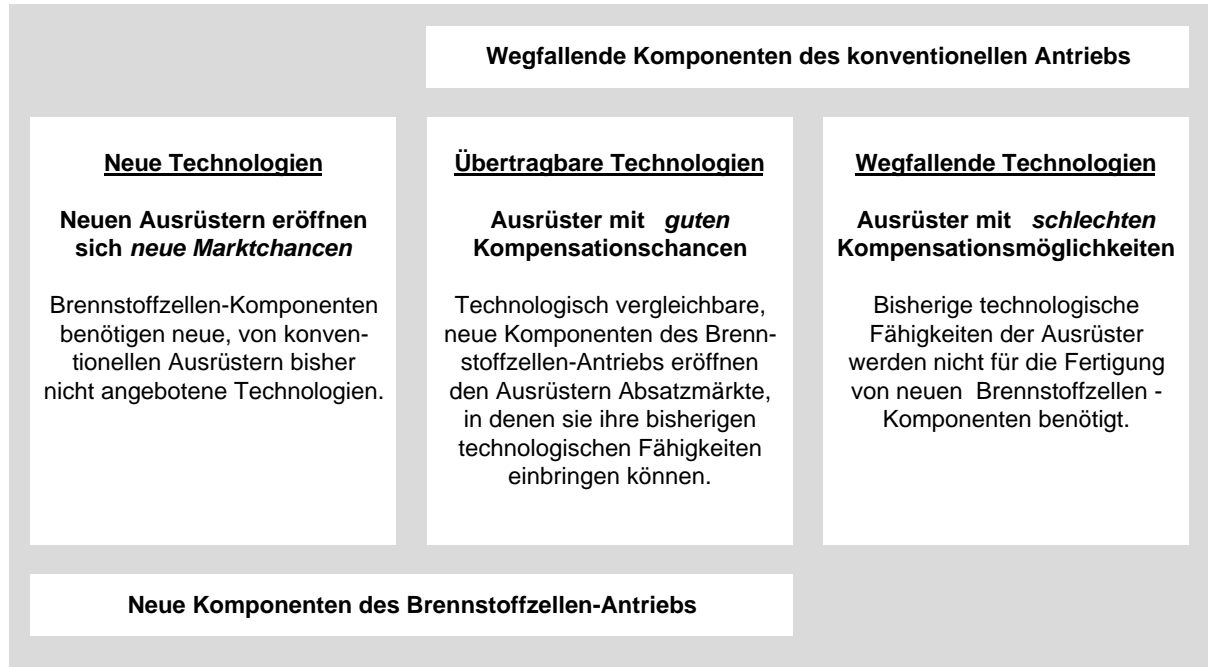


Abbildung 6-1: Betroffenheit der Ausrüster

## 6.2 Die Fertigungsverfahren des Brennstoffzellen-Antriebs

Den A- und B-Teilen des Antriebsstrangs, die von den Veränderungen in besonderem Umfang betroffen sind (Brennstoffzellenstack, Gaserzeugungssystem, Verdichter/Expander Einheit, Traktionsmotor), wurden die möglichen Fertigungsverfahren nach DIN 8580 zugeordnet, wie sie heutzutage eingesetzt werden oder eingesetzt werden könnten. Da zur Fertigung einer Komponente oft mehrere Alternativen bestehen, repräsentiert diese Zuordnung nur einen Ausschnitt aller Möglichkeiten. Jedoch sind durch die Gegenüberstellung wesentliche Trends erkennbar, wie sie in Abschnitt 6.4 zusammengefasst werden. Eine detaillierte Auflistung der Komponenten, die bei der Gegenüberstellung der Fertigungsverfahren berücksichtigt wurden, findet sich im Anhang. Eine quantitative Untersuchung, das heißt die Analyse von Fertigungsminuten und –kosten ist derzeit aufgrund der fehlenden Informationen bezüglich der neuen Komponenten des Brennstoffzellen-Antriebs nicht möglich.

Nicht betrachtet wurden spezifische Prüfverfahren und deren Vorrichtungen zur Qualitätssicherung. Die Betroffenheit lässt sich aber aus den wertschöpfenden Fertigungsverfahren ableiten. Für den Brennstoffzellen-Antrieb werden zukünftig Prüfverfahren für die Dichtheit der Komponenten des Gaser-

zeugungssystem und des Brennstoffzellensystems an Bedeutung gewinnen. Ebenso wurden Fügeverfahren nicht vertieft behandelt.

### 6.2.1 Das Stromerzeugungssystem

Allgemein sind zur Herstellung von effizienten, leichten und langlebigen Brennstoffzellen profunde Kenntnisse über Fluidtechnik, Katalyse, elektrochemische Prozesse, wie sie an den Elektroden auftreten, und Materialien unverzichtbar. Für die Fertigung von Gaserzeugungssystemen sind darüber hinaus spezielle Kenntnisse der chemischen Verfahrenstechnik notwendig.

#### 6.2.1.1 Das Brennstoffzellenstack

##### MEA-Einheit

Bei der Herstellung einer MEA-Einheit können folgende Verfahren zum Einsatz kommen:

Die DLR (**D**eutsches **Z**entrum für **L**uft- und **R**aumfahrt e.V.) setzt für die Gasdiffusionsschicht/Elektroden-Einheit eine spezielle Rolltechnik ein, wie sie auch bei der Produktion von Elektroden für Alkali-Batterien eingesetzt wird<sup>58</sup> (1.5.2 Herstellung von Faserplatten). Die Elektrode kann als Grafitpapier- oder, so gelöst von der Firma Proton Motor in Starnberg, als Graphitfilz hergestellt werden. Letzteres hat den Vorteil, dass sie als Rollware besonders für eine industrielle Verarbeitung geeignet ist. Die Katalysatoren werden entweder auf die Elektroden oder auf die PEM-Folie aufgetragen. Siemens beispielsweise hat experimentell nachgewiesen, dass das Sprühen (5.1.2 Anstreichen, Lackieren), der Siebdruck und das Drucken von Katalysatoren (5.1.6 Drucken, Bedrucken) als automatisierbare und später kostengünstige Serien-Fertigungsverfahren möglich sind<sup>59</sup>. Elektrode und PEM-Folie können durch ein Heißpressverfahren miteinander zu einer MEA-Einheit verbacken werden.

<sup>58</sup> Bervers, D.; Wagner, N.; von Bradke, M.; Innovation production procedure for low cost PEFC electrodes and electrode membrane structure, 1996, S.1767-1768

<sup>59</sup> Große, J.; Waidhas, M.; Fortschritte bei der PEM-Brennstoffzellenentwicklung, 1998, S. 159

## Bipolarplatten

Bipolarplatten werden für die Prototypen noch aus Grafit gebaut, in denen die Gaszufuhr- und Abfuhrkanäle eingefräst werden. Dieses Verfahren ist jedoch für eine Serienfertigung viel zu aufwendig und zu teuer<sup>60</sup>. Billiger und weniger aufwendig wären profilierte Bleche aus Edelstahl, insbesondere aus kostengünstigem Eisenbasislegierungen mit gutem Korrosionsverhalten<sup>61</sup>.

Die könnten hergestellt werden, indem das Blech, das als Keulware bereitgestellt wird, gewalzt (2.1.1 Walzen) und abgelängt (3.1.1 Scherschneiden) wird, Löcher gestanzt (3.1.1 Scherschneiden) und diese dann geprägt (2.2.2 Tiefziehen) werden. Diese metallische Prägeplatte müsste anschließend beschichtet werden, um sie gegen die korrosiven Prozessgase zu schützen. Als Oberflächenbeschichtungsmaterial käme beispielsweise Gold in Frage, was jedoch wegen der hohen Materialkosten als unrealistisch gesehen wird. Als Oberflächenbeschichtungstechnologie wäre Spritzen ideal, ist jedoch zur Zeit noch nicht verfügbar. Voraussichtlich werden deshalb chemische Beschichtungsverfahren eingesetzt, was auch in dieser Studie unterstellt wird (5.9.2 Chemisches Beschichten). Weitere Beschichtungsverfahren werden deshalb von der Industrie geprüft (chemische Beschichtungen, Plasmabeschichtung etc.). Die Oberflächen werden durch Reinigung (3.6.5 Chemisches Reinigen) und/oder Aufrauung, welches am einfachsten durch Raustrahlen bzw. Sandstrahlen (3.3.6 Strahlspanen) erreicht wird, auf die nachfolgende Beschichtung vorbereitet.

## Dichtungen

Die Dichtungen zwischen den Bipolarplatten und der MEA-Einheit werden spritzgegossen bzw. müssen eingelegt und eingeklebt werden (4.8 Kleben).

## Endplatten

Die Endplatten könnten aufgrund des einfachen kubischen Aufbaus durch Schwerkraftgießen gefertigt werden. Anschließend folgt die mechanische Bearbeitung wie Entgraten, Bohren (3.2.2 Bohren, Senken, Reiben) und Planfräsen (3.2.3 Fräsen).

<sup>60</sup> Nach Aussage von SGL-Carbon haben auch Bipolarplatten aus Graphit-Composite das Potential auf gleichem Kostenniveau gefertigt zu werden wie profilierte Bleche.

<sup>61</sup> Große, J.; Waidhas, M.; Fortschritte bei der PEM-Brennstoffzellenentwicklung, 1998, S. 159

## Zusammenbau

Ein Stack wird montiert, indem die einzelnen MEA-Einheiten, Bipolarplatten und die Endplatten gestapelt (4.1.1 Auflegen, Aufsetzen, Schichten) und durch Spanschrauben zu einem Block verspannt werden (4.3.1 Schrauben).

Tabelle 6-1: Fertigungsverfahren des Brennstoffzellenstack

Fertigungsverfahren nach DIN 8580	MEA-Einheit	Bipolarplatte	Dichtungen	Endplatten
1.1.1 Schwerkraftgießen				X
1.5.2 Herstellung von Faserplatten	X			
2.1.1 Walzen		X		
2.2.2 Tiefziehen		X		
3.1.1 Scherschneiden		X		
3.2.2 Bohren, Senken, Reiben				X
3.2.3 Fräsen				X
3.3.6 Strahlspanen		X		
3.6.5 Chemisches Reinigen		X		
4.1.1 Auflegen, Aufsetzen, Schichten	X	X	X	X
4.3.1 Schrauben		X	X	X
4.8 Kleben			X	
5.1.2 Anstreichen, Lackieren	X			
5.1.6 Drucken, Bedrucken	X			
5.9.2 Chemisches Beschichten		X		X

### 6.2.1.2 Die Fertigungsverfahren des Gaserzeugungssystems

Die folgenden Untersuchungen der Herstellungsverfahren eines Gaserzeugungssystems basieren auf den Konzepten von DaimlerChrysler und Mitsubishi. Mitsubishi hat einen Methanol-Reformer vorgestellt, der zehn Mal kompakter ist als vergleichbare Systeme (Abbildung 6-2). Auch das Konzept von DaimlerChrysler setzt sehr stark die Stapel-Bauweise für Reaktoren und Verdampfer ein. Bei Mitsubishi ist sogar der katalytische Brenner in dem Stapel-Paket integriert, wodurch ein Thermo-Ölkreislauf nicht mehr nötig wäre.

Abbildung 6-2: Kompakter Methanol-Reformer von Mitsubishi<sup>62</sup>

### Arten von Plattenwärmetauschern

Zukünftig bekommen sogenannte Plattenwärmetauscher bzw. -reaktoren eine zentrale Bedeutung für das Antriebssystem. Es gibt insgesamt vier Formen von Plattenwärmetauschern: Entweder können die Stahlplatten durch Spannschrauben und ggf. Versteifungsplatten an den Enden miteinander verschraubt werden (**geschraubte Wärmetauscher**). Dies erfordert Gummidichtungen zwischen den einzelnen Platten. Oder sie können miteinander verlötet werden, indem zwischen die Platten eine Kupferlage gelegt wird und das Plattenpaket dann unter Eigengewicht im Hochtemperatur-Vakuum-Ofen „gebacken“ wird (**gelötete Wärmetauscher**). Die Kupferlage verbindet und verdichtet die Platten. Dieses Verfahren ist insbesondere für kompakte Wärmetauscher geeignet. Die Kupferlage ist aber nicht zwingend notwendig, eine Verlotung ist auch ohne diese möglich. Statt die Platten miteinander zu verlöten, können sie auch miteinander verschweißt werden (**geschweißte Wärmetauscher**). Dies ist insbesondere bei Wärmetauschern nötig, die hohen Temperaturen ( $>300^{\circ}\text{C}$ ) und großen Drücken ausgesetzt werden.

<sup>62</sup> Vgl. Compact Methanol Reformer for Fuel Cells, 1998, S. 36



Abbildung 6-3: Geprägte Platten<sup>63</sup>

Eine weitere, neue Möglichkeit besteht in sogenannten Mikrowärmetauschern (**Mikro-Plattenwärmetauscher bzw. -reaktoren**). Dabei handelt es sich um mikrostrukturierte Metallfolien, die geschnitten, gestapelt, diffusionsgeschweißt oder gelötet werden. Dieser Mikrostrukturkörper ist ultrahoch vakuumdicht und hält Drücke bis mehrere hundert Bar aus<sup>64</sup>. Dieses Verfahren eignet sich nicht nur für den Bau von kompakten, hochbelasteten Mikrowärmetauschern bzw. -reaktoren, sondern auch für den Bau von konventionellen Wärmetauschern.



Abbildung 6-4: Platten-Wärmetauscher<sup>65</sup>

<sup>63</sup> Gea Ecoflex GmbH, Sarstedt

<sup>64</sup> Vgl. Schubert, K. et. al; Realization and Testing of Microstructure Reactors, Micro Heat Exchangers and Micromixers for Industrial Applications in Chemical Engineering, 1998, S. 91 mit weiteren Quellen

<sup>65</sup> Gea Ecoflex GmbH, Sarstedt

Tabelle 6-2 zeigt, welche Wärmetauschertypen im Rahmen dieser Studie für die Fertigung der Komponenten des Gaserzeugungssystems gewählt wurden. Daneben kommen noch gesinterte, gestapelte Katalysatorscheiben und Behälter zum Einsatz.

Für den Verdampfer bietet sich wegen der Betriebstemperaturen um 300°C ein gelöteter Plattenwärmetauscher noch an, eine geschweißte Lösung wäre aber prinzipiell auch denkbar. Der Dampf-Reformer muss aber aufgrund der höheren thermischen Beanspruchung und den Drücken geschweißt werden. Für den PROX-Reformer bietet sich ein Mikroreaktor an, durch welchen auf kleinstem Raum feinste, katalytisch beschichtete Gaskanäle günstigst gefertigt werden können.

### **Der Verdampfer**

Die Herstellungsverfahren und die Beschichtungstechnologie für einen Korrosionsschutz der geprägten Platten ist im Wesentlichen vergleichbar mit den Herstellungsverfahren der Bipolarplatten, das heißt es müssen Bleche gewalzt, gelängt, Löcher gestanzt und die Gasführungskanäle geprägt werden. Auf die Bleche wird am Ende durch chemisches Beschichten ein Korrosionsschutz aufgetragen. Bevor dies geschieht, müssen die Oberflächen wie bei den Bipolarplatten durch Reinigung und/oder Aufrauung für die nachfolgende Beschichtung vorbereitet werden.

### **Der Methanol-Wasserdampfreformer**

Im Gegensatz zum Verdampfer wird das Plattenpaket des Reformers zusammenschweißt, weshalb ein Spannungsarmglühen (6.2.1 Glühen) erforderlich ist. Die Nicht-Edelmetallkatalysatoren (Nickel oder Kupfer) können durch chemisches Beschichten aufgetragen werden. Um die spezifische Oberfläche der geprägten Platten zu erhöhen, können diese durch Sandstrahlen (3.3.6 Strahlspanen) aufgeraut werden. Die Bleche müssen vor der Oberflächenbehandlung gereinigt werden (3.3.5 Chemische Reinigung).

### **Der PROX-Reaktor**

Die Herstellung des PROX-Reaktors besteht aus den Schritten Metallfolie walzen und längen, Löcher sowie Strukturen ausstanzen, Folien stapeln und durch Diffusionsschweißen oder Hochtemperaturvakuumlöten miteinander verbinden. Zuletzt wird der Mikrowärmetauscher katalytisch beschichtet, indem die Gaskanäle mit einer Suspensionslösung mit Platin durchspült werden

(5.1.2 Anstreichen, Lackieren). Um die Oberflächen für die Beschichtung vorzubereiten, bietet sich auch hier an, die Oberflächen der Metallfolien vor der Beschichtung durch Sandstrahlen aufzurauen und zu reinigen. Um den PROX-Reaktors zu trocknen und ein künstlich beschleunigtes Ausdampfen von Lösungsmitteln zu erreichen, wird er wärmebehandelt (6.2.8 Aushärten).

### Der Katalytische Brenner

Der Katalytische Brenner arbeitet mit der Porenbrennertechnik, das heißt der Verbrennungsvorgang erfolgt in Hohlräumen eines Porenkörpers, der in das Reaktionsgebiet eingebracht ist. Diese Technologie zeichnet sich neben kleinen Baugrößen sowie einer großen Leistungsdynamik durch sehr geringe Schadstoffemissionen über den gesamten Betriebsbereich aus.

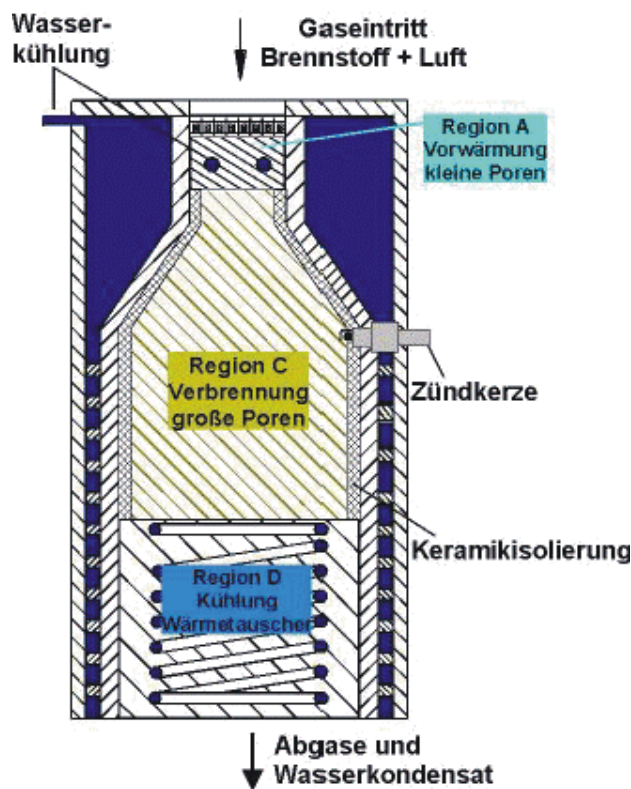


Abbildung 6-5: Aufbau eines katalytischen Brenners<sup>66</sup>

<sup>66</sup> Lehrstuhl für Strömungstechnik – Uni-Erlangen, [www.lstm.uni-erlangen.de/ber2/grundlag.html](http://www.lstm.uni-erlangen.de/ber2/grundlag.html)

Er besteht aus einem porösen Medium, dem Porenkörper (keramischer Werkstoff, beispielsweise Aluminiumoxid), welcher mit einem Edelmetall-Katalysator (meist Platin) beschichtet wird<sup>67</sup>, indem beispielsweise der Porenkörper in eine Suspensionslösung mit Platin getaucht wird (5.1.2 Anstreichen, Lackieren). Um den Körper zu trocknen und ein künstlich beschleunigtes Ausdampfen von Lösungsmitteln zu erreichen, wird der Porenkörper wärmebehandelt (6.2.8 Aushärten)

Der Behälter wird gefertigt, indem Bleche zugeschnitten, gebogen (2.4. Biegeumformungen), die Böden und Deckel tiefgezogen und dann miteinander verschweißt werden (4.6.2 Schmelzverbindungsschweißen).

### Der POX-Reformer

Der POX-Reformer besteht aus gestapelten, gesinterten Katalysatorscheiben, die von Spannplatten zusammengehalten und von einem Gehäuse umgeben werden (vgl. Abbildung 6-6). Zwischen den Spannplatten und den Katalysatorscheiben befinden sich Isolierscheiben.

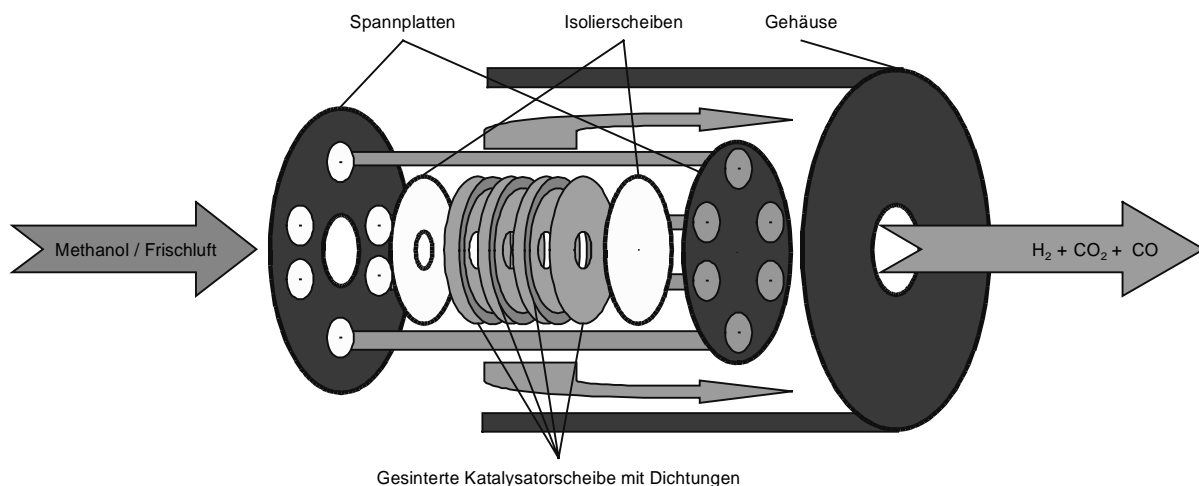


Abbildung 6-6: Aufbau eines POX-Reformers

<sup>67</sup> Vgl. Höhle, B. et. al; Hydrogen from methanol for fuel cells in mobile systems: development of a compact reformer, 1996, S.145

Der Reformierungsprozess wird erreicht, indem Methanol und Frischluft die porösen Katalysatorscheiben senkrecht zur Ebene durchströmen (vgl. Abbildung 6-7).

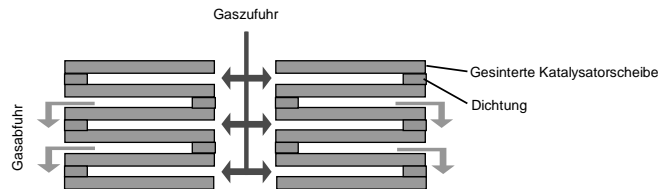


Abbildung 6-7: Funktionsprinzip eines POX-Reformers<sup>68</sup>

Hergestellt werden solche Katalysatorscheiben, indem Metallpulver mit Katalysatorkörnern (z.B. Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) gemischt, verpresst (1.4.1 Pressen) und zu einer porösen Scheibe versintert (6.4 Sintern) wird. Die Technik des Pressens und Sinterns zur Fixierung von Katalysatormaterial wird in der Elektrodenherstellung angewendet. Das Einbringen von Katalysatormaterial in eine metallische Schaumstruktur mit anschließendem Verpressen ist ebenfalls in der elektrochemischen Technik bekannt<sup>69</sup>. Anschließend werden die Platten gestapelt, mit den Endplatten verspannt und in einem Behälter verschraubt.

Tabelle 6-2: Technologien des Gaserzeugungssystems

	Gelötete Wärmetauscher	Geschweißte Wärmetauscher	Micro-Reaktor	Gestapelte Katalysatorscheiben	Behälter
Verdampfer	X				
Katalytische Brenner					X
Dampf-Reformer		X			
PROX-Reaktor			X		
POX-Reformer				X	X

## Zusammenfassung

Die Fertigungsverfahren der Tabelle 6-3 werden für die Herstellung des Gaserzeugungssystems zukünftig an Bedeutung gewinnen.

<sup>68</sup> Vgl. Schübler, M; Entwicklung eines kaltstartfähigen Reaktors für die autotherme Reformierung von Methanol, 1998, S.137

<sup>69</sup> Vgl. Schübler, M; Entwicklung eines kaltstartfähigen Reaktors für die autotherme Reformierung von Methanol, 1998, S.130-131

Tabelle 6-3: Fertigungsverfahren des Verdampfers, Dampf- und PROX-Reaktors, Brenners und POX-Reformers

Fertigungsverfahren nach DIN 8580	Verdampfer	Dampf-Reformer	PROX-Reaktor	Brenner	POX-Reformer
1.4.1 Pressen					X
2.1.1 Walzen	X	X			
2.2.2 Tiefziehen	X	X		X	X
2.4 Biegeumformungen				X	X
3.1.1 Scherschneiden	X	X		X	X
3.3.6 Strahlspanen	X	X	X		
3.6.5 Chemisches Reinigen	X	X	X		
4.1.1 Auflegen, Aufsetzen, Schichten	X	X	X		X
4.1.2 Einlegen Einsetzen				X	X
4.3.1 Schrauben					X
4.6.2 Schmelzverbindungsschweißen		X		X	X
4.7.3 Verbindungshochtemperaturlöten	X				
5.1.2 Anstreichen, Lackieren			X	X	
5.9.1 Galvanisches Beschichten		X			
5.9.2 Chemisches Beschichten	X				
6.2.1 Glühen		X			
6.2.8 Aushärten			X	X	
6.4 Sintern					X

### 6.2.1.3 Kompressor- Expandereinheit

Die wesentlichen Komponenten eines mechanischen Laders sind Verdichtergehäuse, Verdichter- und Expanderräder, Welle, Lagergehäuse/Rückwand, Lagerungen und Dichtungen (Kolbenring, Dichtbuchsen etc.). Tabelle 6-4 zeigt die eingesetzten Fertigungsverfahren für die wesentlichen Komponenten.

Tabelle 6-4: Fertigungsverfahren der Kompressor/Expandereinheit

Fertigungsverfahren nach DIN 8580	Verdichter-Gehäuse	Verdichter-Räder	Welle	Lager-Gehäuse	Lagerungen
1.1.1 Schwerkraftgießen		X		X	
1.1.2 Druckgießen	X				
1.1.5 Stranggießen			X		
3.1.1 Scherschneiden			X		X
3.2.1 Drehen	X	X	X	X	X
3.2.2 Bohren, Senken, Reiben	X	X		X	
3.2.3 Fräsen				X	
3.3.1 Schleifen mit rotierendem Werkzeug			X		
3.3.4 Honen					X

## 6.2.2 Die Reluktanzmotoren

Reluktanzmotoren bestehen im Wesentlichen aus Stator (Statorpaket mit Wickelungen), Rotorpaket, Welle, Gehäuse, Flanschlagerschild und Kugellagern. Die nötigen Fertigungsverfahren zur Herstellung der Komponenten sind bekannt: Stator- und Rotorpakete werden gefertigt, indem einzelne Stator- und Rotorbleche aus beschichteten, isolierten Blechen (5.1.2 Anstreichen/Lackieren) gestanzt (3.1.1 Scherschneiden) und gestapelt (4.1.1 Auflegen, Aufsetzen, Schichten) werden. Das Statorpaket erhält eine Wickelung aus Kupferdraht. Die Welle wird durch Stranggießen urgeformt und anschließend gedreht. Gehäuse und Flanschlagerschild sind aus Alu und werden durch Druckgießen hergestellt. Anschließend müssen sie mechanisch bearbeitet werden. Die wesentlichen Herstellungsverfahren für die Komponenten sind in Tabelle 6-5 aufgeführt.

Tabelle 6-5: Fertigungsverfahren für Reluktanzmotoren

Fertigungsverfahren nach DIN 8580	Stator	Rotor paket	Welle	Gehäuse	Flansch-Lagerschild
1.1.2 Druckgießen				X	X
1.1.5 Stranggießen			X		
3.1.1 Scherschneiden	X	X			
3.2.1 Drehen			X		
3.2.2 Bohren, Senken, Reiben				X	X
3.2.3 Fräsen				X	X
4.1.1 Auflegen, Aufsetzen, Schichten	X	X			
5.1.2 Anstreichen/Lackieren	X	X			

### 6.3 Veränderungen bei den Fertigungsverfahren

Im Rahmen des Projektes konnten drei Gruppen von Fertigungsverfahren identifiziert werden, die durch den Innovationsprozess unterschiedlich stark betroffen sein werden. Der Grad der Betroffenheit konnte durch eine Gegenüberstellung der wesentlichen Fertigungsverfahren von wegfallenden Komponenten des konventionellen Antriebs (Verbrennungsmotor, Motorelektrik, Katalysator der Abgasanlage) mit denen der voraussichtlich oder möglicherweise neu einzusetzenden Fertigungsverfahren für die Komponenten der Brennstoffzelle, des Gaserzeugungssystems und der Motorelektrik bestimmt werden. Wegen der großen Unsicherheiten von Prognosen über die Form der zukünftigen Serienfertigung ist keine Quantifizierung möglich. Qualitativ jedoch können nach heutigem Erkenntnisstand schon fertigungstechnologische Optionen für die neuen Komponenten eines Antriebsstranges auf der Basis der Brennstoffzelle aufgezeigt werden (vgl. auch die Anlage):

**Stark abnehmende Bedeutung** werden Fertigungsverfahren haben, die beim konventionellen Antrieb insbesondere für mechanisch beanspruchte bzw. rotatorische Antriebs- und Übertragungskomponenten (Kurbelwelle, Pleuel, Ventile) eingesetzt werden, bei denen es sich um hoch beanspruchte Teile (Gesenkformen, Spannungsarmglühen, Härten) mit hoher Maß- und Oberflächenqualität (Glattwalzen, Schleifen, Honen) handelt. Vergleichbar beanspruchte Komponenten gibt es beim Brennstoffzellen-Antrieb wegen seiner chemischen Verfahrenstechnik–Charakteristik nicht.

**Abnehmende Bedeutung** werden die Fertigungsverfahren haben, die für gegossene, kubische Komponenten aus Nichteisenmetallen eingesetzt werden. Darunter fallen beispielsweise das Druckgießen und die Verfahren der mechanischen Bearbeitung (Drehen, Bohren, Fräsen, Waschen). Diese Verfahren werden insbesondere für die Fertigung von Nebenaggregaten des

Brennstoffzellenantriebs (Kompressor/Expandereinheit, E-Motoren, Traktionsmotor, Pumpen) weiterhin benötigt, wenn auch in geringerem Umfang.

**Zunehmende Bedeutung** werden die Verfahren bekommen, die sich um die Herstellung (Walzen), Beschichtung (Korrosionsschutz und katalytische Beschichtungen) und Verarbeitung von Blechen drehen (Stanzan, Lochen, Prägen) sowie deren Fügeverfahren (Verbindungshochtemperaturlöten, Schichten/Stapeln). Diese Verfahren werden in großem Umfang insbesondere für die Fertigung von Hauptaggregaten des Brennstoffzellenantriebs (E-Motoren, Traktionsmotor, Verdampfer, Reformer, Bipolarplatten etc.) benötigt.

## 7 Literatur

- Appleby, J. A.; The future of fuel cells, Scientific American, 7/1999, S. 56-63
- Bervers, D.; Wagner, N.; von Bradke, M.; Innovation production procedure for low cost PEFC electrodes and electrode membrane structure, Proceedings of the 11<sup>th</sup> World Hydrogen Energy Conference, Stuttgart, June 1996, S.1767-1776
- Biermann, J.-W.; Bady, R.; Hybridantriebe – Strukturvarianten, Betriebsstrategien sowie deren Vor- und Nachteile; 5. Symposium „Elektrische Straßenfahrzeuge“ der Technischen Akademie Esslingen, 26./27. März 1998, aus [www.ika.rwth-aachen.de/publikat/by0398/index.htm](http://www.ika.rwth-aachen.de/publikat/by0398/index.htm)
- Bitsche, O.; v. Raumer, T.; Friedrich, J.; Switched-Reluctance-Fahrzeugantriebe, in: Innovative Fahrzeugantriebe, Tagung Dresden, 22.-23. Oktober '98. VDI Bericht 1418, VDI Verlag Düsseldorf, 1998, S. 147-153
- Cleghorn, S. et al; PEM Fuel Cells for Transportation and Stationary Power Generation Applications, 1996, Proceedings of the 11<sup>th</sup> World Hydrogen Energy Conference, Stuttgart, June 1996, p.1637-1646
- Compact Methanol Reformer for Fuel Cells, New Technology Japan, Tokyo, 1998, Band 25, Heft 11, S. 35-36

- Colsmann, G.; Verfahrenstechnische Optimierung der Brenngaserzeugung für Brennstoffzellen in Kraftfahrzeugen, Berichte des Forschungszentrums Jülich Nr. 3127, Forschungszentrum Jülich GmbH, 1995
- Dietrich, G.; Technologischer Innovationssprung: Die Brennstoffzelle, Tagungsbeitrag zur Herbsttagung 99 am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik (wbk), Universität Karlsruhe (TH), 21.10.1999, S.3
- Efler, M; Sauber, Leise, Wasserstoff!; Future 1/1997; S. 112-116
- Ewe, T.; Die rollende Revolution, bild der wissenschaft 8/1998, S. 40-44
- Feige, A.; Wandel in der Wertschöpfungskette, Automobil Produktion, 4/1999, S. 136-139
- Friedrich, J.; Noreikat, K. E.; State of the Art and Development Trends for Fuel Cells Vehicles; Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference, Stuttgart, June 1996, S. 1757-1766
- Brennstoffzellen-Studie, Forschungsvereinigung Verbrennungsmaschinen e.V. (FVV), Frankfurt am Main, Heft 657, 1998
- „Herstellung von CO-freiem Brenngas“, Forschungszentrum Jülich, [www.stp-news.de/archiv/archiv61n.html](http://www.stp-news.de/archiv/archiv61n.html)
- Große, J.; Waidhas, M.; Fortschritte bei der PEM-Brennstoffzellenentwicklung, S. 155-169 in: VDI Berichte 1378, Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybrid-Fahrzeuge, Tagung Dresden, 17. und 18. Februar, VDI Verlag 1998
- Hoehl, K.; Wüchner, E.; Die A-Klasse: Träger künftiger Antriebssysteme, 1999, S.14.1-14.25, Elektrofahrzeuge: Entwicklungserfolge und Perspektiven, Fachtagung in Karlsruhe, 29. und 30. April 1999, Deutsche Gesellschaft für elektrische Straßenfahrzeuge e.V., Berlin
- Höhlein, B. et. al; Hydrogen from methanol for fuel cells in mobile systems: development of a compact reformer, Journal of Power Sources, Band 61, Heft 1-2, 1996, S.143-147
- Das Ende des Platins in der PEM Zelle? Kobalt-Katalysator entwickelt; Hy-Web: Neuigkeiten – Wasserstoff-Gazette Archiv III/99, [www.hydrogen.org/neuigkeiten/archiv399.html](http://www.hydrogen.org/neuigkeiten/archiv399.html)
- Lehrstuhl für Strömungstechnik – Uni-Erlangen, [www.lstm.uni-erlangen.de/ber2/grundlag.html](http://www.lstm.uni-erlangen.de/ber2/grundlag.html)

- Kalhammer, F.R.; Prokopius, P.R.; Roan, V.P.; Voecks, G.E.; Status and Prospects of Fuel Cells as Automobile Engines, Report prepared for the California Air Resources Board, July 1998, [www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/fuelcell/fuelcell.htm](http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/fuelcell/fuelcell.htm)
- Maute, Nietfeld, Schumacher, Treusch, Weingärtner, Zentgraf, Lucas und Stolz: „Einsatz von hochintegrierten Ansaugsystemen bei Ottomotoren“, *Motortechnische Zeitschrift MTZ*, Band 59, 1998, S. 76 – 82
- “Necar III, mit Methanol in die Zukunft”, Daimler-Benz AG, Kommunikation, Stuttgart 1997
- “Necar IV - Die Alternative”, DaimlerChrysler Kommunikation, Stuttgart, 1999
- Schüßler, M.; Entwicklung eines kaltstartfähigen Reaktors für die autotherme Reformierung von Methanol, VDI Reihe 6 Nr. 401, Düsseldorf, VDI Verlag 1998
- Schubert, K. et. al; Realization and Testing of Microstructure Reactors, Micro Heat Exchangers and Micromixers for Industrial Applications in Chemical Engineering, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Microreaction Technology, New Orleans, USA, March 8-12, 1998
- Tillmetz, W.; Hornburg, G.; Dietrich, G.; Polymermembran-Brennstoffzellen-Systeme, in Ledjeff, K.; *Brennstoffzellen – Entwicklung, Technologie, Anwendung*; 1. Aufl., Müller Verlag, Heidelberg, 1995
- “Brennstoffzellen bald zum Niedrigpreis?”, VDI Nachrichten vom 20. Juni 1997, Nr. 25, S. 12
- Wurster, R.; Technologie und mögliche Anwendungen der Brennstoffzelle, Deutsche Kälte-Klima Tagung 1998, Würzburg 18.-20. November 1998, aus <http://www.hydrogen.org/wissen/dkv98.html>

## 8 Anhang

### A. Komponenten, die bei der Gegenüberstellung der Fertigungsverfahren berücksichtigt wurden

<b>Konventioneller Antrieb</b>	<b>Brennstoffzellen-Antrieb</b>
Buchse für Kolbenringe	MEA-Einheit
Flanschlagerschild Lichtmaschine	Endplatten
Gehäuse Lichtmaschine	Bipolarplatten
Katalysator	Verdampfer
Kipphebelachse	PROX-Reformer
Kolbenringe	Katalytischer Brenner
Kurbelwelle	Reluktanzmotor für Traktionsmotor
Lagergehäuse	Methanol-Wasserdampfreformer
Motorträger	POX-Reformer
Ölwanne	Kompressor/Expandereinheit
Pleuelbuchse	
Pleuellager	
Pleuel	
Steuergehäuse	
Ventilsitzringe	
Welle des Starters	
Blechkpaket Stator/Rotor Lichtmaschine, Starter	
Ein- und Auslassventile	
Flanschlagerschild Starter	
Gehäuse Starter	
Kipphebel	
Kolben	
Kühlwasserpumpe	
Kurbelwellenlagerdeckel	
Nockenwelle	
Ölpumpengehäuse	
Lagerschalen	
Pleuellager/Hauptlager	
Rotor Lichtmaschine	
Ventilführungen,	
Welle der Lichtmaschine	
Zylinderkopf	
Zylinderkopfhaube	
Zylinderkurbelgehäuse	
Zylinderlaufbuchsen	

**B. Fertigungsverfahren mit stark abnehmender Bedeutung<sup>70</sup>**

<b>Fertigungsverfahren</b>	<b>Konventioneller Antrieb</b>	<b>Brennstoffzellen-Antrieb</b>
1.1.4 Schleudergießen	Ventilsitzringe Zylinderlaufbuchsen Buchse für Kolbenringe	
2.1.2 Freiformen	Pleuelbuchse, Lagerschalen Ein- und Auslassventile	
2.1.3 Gesenkformen	Pleuel Kurbelwelle Nockenwelle Ein- und Auslassventile	
2.3.1 Längen	Ein- und Auslassventile	
3.1.6 Brechen	Pleuel	
3.2.5 Räumen	Kurbelwelle Lagerschalen	
3.2.6 Sägen	Zylinderlaufbuchse, Kipphebelachse	
3.3.1 Schleifen mit geometrisch rotierendem Werkzeug (Rundschleifen)	Ein- und Auslassventile Nockenwelle, Kurbelwelle Pleuel Zylinderkopf Ein- und Auslassventile Ventilführungen, Zylinderlaufbuchse Ventilsitzringe Kipphebelachse	Welle (Kompressor-Expander-Einheit)  Lagerbuchsen (Kompressor-Expander-Einheit)
3.3.4 Honen	Ventilführungen Zylinderkurbelgehäuse Kolbenringe Zylinderkopf Pleuel Pleuellager/Hauptlager Zylinderlaufbuchse Kolbenringe Pleuellager/Hauptlager	

<sup>70</sup> Betrachtet werden beim konventionellen Antrieb nur Fertigungsverfahren, die bei wegfallenden Komponenten eingesetzt werden.

<b>Fertigungsverfahren</b>	<b>Konventioneller Antrieb</b>	<b>Brennstoffzellen-Antrieb</b>
4.4.1 Ausgießen	Rotor Lichtmaschine Rotor Starter	
5.1.5 Beschichten durch Gießen	Pleuelbuchse Lagerschalen	
5.9.1 Galvanisches Beschichten	Lagerschalen Ein- und Auslassventile Kolben	
5.4.1 Wirbelsintern	Pleuelbuchse Lagerschalen	
6.2.1 Glühen	Kolben Ein- und Auslassventile	Wasserdampf-Reformer
6.2.2 Härten	Nockenwelle, Kurbelwelle Ventilsitzringe Kipphebelachse	

### C. Fertigungsverfahren mit abnehmender Bedeutung<sup>71</sup>

<b>Fertigungsverfahren</b>	<b>Konventioneller Antrieb</b>	<b>Brennstoffzellen-Antrieb</b>
1.1.1 Schwerkraftgießen	Kolben Kurbelwelle Zylinderkopf	Verdichter/Expander-Räder (Kompressor-Expander-Einheit)  Endplatten (BZ-Stack)  Lagergehäuse / Rückwand (Kompressor-Expander-Einheit)
1.1.2 Druckgießen	Lagergehäuse Zylinderkurbelgehäuse Kolben Ölwanne Steuergehäuse Ölpumpengehäuse Zylinderkopfhaube Motorträger Nockenwellen – Lager- gehäuse (Lagerleiste + Lagerdeckel) Kühlwasserpumpe Kurbelwellenlagerdeckel Kipphebel Gehäuse Lichtmaschine Gehäuse Starter Flanschlagerschild Lichtmaschine Flanschlagerschild Starter	Flanschlagerschild (Reluktanz- motoren) Gehäuse (Reluktanzmotoren) Gehäuse (Kompressor-Expander-Einheit)
1.1.5 Stranggießen	Ventilführungen Lagerklappen Pleuelbuchsen Pleuellager Zylinderlaufbuchsen Welle der Lichtmaschine Welle des Starters	Welle (Kompressor-Expander- Einheit)  Welle (Reluktanz-motoren)
1.4.1 Pressen (Sinterteile!)	Ventilführungen Ventilsitzringe	Katalysatorplatten (POX-Reformer)

<sup>71</sup> Betrachtet werden beim konventionellen Antrieb nur Fertigungsverfahren, die bei wegfallenden Komponenten eingesetzt werden.

<b>Fertigungsverfahren</b>	<b>Konventioneller Antrieb</b>	<b>Brennstoffzellen-Antrieb</b>
3.2.1 Drehen	Nockenwelle Kurbelwelle Pleuelbuchse Lagerschalen Ein- und Auslassventile Ventilführungen Zylinderlaufbuchse Kolben Welle der Lichtmaschine Welle des Starters Flanschlagerschild Lichtmaschine Flanschlagerschild Starter	Welle (Reluktanz-motoren) Welle (Kompressor-Expander-Einheit) Gehäuse (Kompressor-Expander-Einheit) Verdichter / Expander-Räder Flanschlagerschild (Reluktanz-motoren) Lagergehäuse / Rückwand (Kompressor-Expander-Einheit)
3.2.2 Bohren, Senken, Reiben	Lagergehäuse Kipphebel Kolben Zylinderkurbelgehäuse Steuergehäuse Zylinderkopf Kurbelwelle Nockenwelle Lagerschalen Kipphebelachse Ventilführungen	Gehäuse (Kompressor-Expander-Einheit) Verdichter / Expander-Räder (Kompressor-Expander-Einheit) Lagergehäuse / Rückwand (Kompressor-Expander-Einheit) Gehäuse (Reluktanz-motoren) Flanschlagerschild (Reluktanzmotoren) Endplatten (BZ-Stack) Spannplatten (POX-Reformer)
3.2.3 Fräsen	Kolben Kipphebelachse Kipphebel Lagergehäuse Nockenwelle Kurbelwelle Pleuel, Zylinderkurbelgehäuse Zylinderkopf Steuergehäuse Ölwanne Ölpumpengehäuse Zylinderkopfhäube Lagergehäuse	Lagergehäuse / Rückwand (Kompressor-Expander-Einheit) Endplatten (BZ-Stack)

<b>Fertigungsverfahren</b>	<b>Konventioneller Antrieb</b>	<b>Brennstoffzellen-Antrieb</b>
3.6 Reinigen (i.S.v.Waschen)	Kurbelwelle Nockenwelle Pleuel Zylinderkopf Zylinderkurbelgehäuse Kolben Kipphebelachse Kipphebel	Endplatten (BZ-Stack) Spannplatte (POX-Reformer)
6.4 Sintern, Brennen	Ventilführungen Ventilsitzringe	POX-Reformer

**C. Fertigungsverfahren mit zunehmender Bedeutung<sup>72</sup>**

<b>Fertigungsverfahren</b>	<b>Konventioneller Antrieb</b>	<b>Brennstoffzellen-Antrieb</b>
1.5.5 Herstellung von Faserplatten		MEA-Einheit
2.1.1 Walzen	Pleuelbuchse Ein- und Auslassventile Blechpakete Rotor/Stator (Lichtmaschine / Starter)	Bipolarplatten Blechpaket Stator/Rotor (Reluktanzmotoren und Traktionsmotor) Blechpaket Verdampfer Blechpaket Reformier
2.2.2 Tiefziehen		Bipolarplatten Verdampfer Wasserdampfreformer Deckel (katalytische Brenner) Deckel (POX-Reformer)
2.4 Biegeumformung		Behälter (katalytische Brenner) Behälter (POX-Reformer)
3.1.1 Scherschneiden	Pleuelbuchse Lagerschalen Bleche Stator/Rotor Lichtmaschine, Starter	Bleche Stator/Rotor (Reluktanzmotoren) MEA-Einheit Bipolarplatten Gehäuse (katalytische Brenner) Gehäuse (POX-Reformer) Bleche Verdampfer Bleche Wasserdampfreformer Welle (Kompressor / Expander-Einheit)
3.3.6 Strahlspanen		Bipolarplatten Bleche d. Verdampfers Metallfolien d. PROX-Reformers
3.6.5 Chemische Reinigung		Bipolarplatten Plattenpakete Verdampfer Plattenpakete Dampfreformer Plattenpakete PROX-Reformer

<sup>72</sup> Betrachtet werden beim konventionellen Antrieb nur Fertigungsverfahren, die bei wegfallenden Komponenten eingesetzt werden.

<b>Fertigungsverfahren</b>	<b>Konventioneller Antrieb</b>	<b>Brennstoffzellen-Antrieb</b>
4.1.1 Auflegen, Aufsetzen, Schichten (i.S.v. Stapeln)	Blechpaket Stator/Rotor Lichtmaschine, Starter	Blechpakete Stator/Rotor der Reluktanzmotoren BZ-Stack Plattenpakete Dampf-Reformer Plattenpakete POX-Reformer Plattenpakete PROX-Reformer Plattenpakete Verdampfer
4.6.2 Schmelzverbindungsschweißen		Wasserdampfreformer Behälter (katalytische Brenner) Behälter (POX-Reformer)
4.7.3 Verbindungshochtemperaturlöten		Verdampfer
4.8 Kleben		Dichtungen auf Bipolarplatten
5.1.2 Anstreichen, Lackieren		Bleche Rotor/Stator der Reluktanzmotoren MEA-Einheit Plattenpaket (Prox-Reformer) Porenkörper (katalytische Brenner)
5.1.6 Drucken, Bedrucken		MEA-Einheit
5.9.2 Chemisches Beschichten	Ein- und Auslassventile (Salzbadnitrieren)	Dampf-Reformer Bipolarplatten Endplatten Verdampfer
6.2.8 Aushärten	Katalysator	PROX-Reformer Porenkörper (katalytische Brenner)



## Auswirkungen des Innovationsprozesses auf die baden-württembergische Industrie

### **Kapitel 6**

Bearbeiter: Jürgen Wengel, ISI  
Elna Schirrmeister, ISI

### Inhalt

<b>1</b>	<b>Vorgehen</b>	<b>179</b>
<b>2</b>	<b>Wirkung der technologischen Veränderungen</b>	<b>181</b>
2.1	Veränderung der sektoralen Zulieferstruktur infolge neuer Komponenten	181
2.2	Regionale Wirkungen durch sektorale Verschiebungen und Entscheidungen über Eigen- oder Fremdfertigung	183
2.3	Branchenproduktivitäten und Economies-of-scale bei Brennstoffzellen-Komponenten	187
<b>3</b>	<b>Marktdurchdringung und Rahmenbedingung des Absatzmarktes</b>	<b>188</b>
<b>4</b>	<b>Modellrechnung für das Jahr 2010</b>	<b>190</b>
4.1	Veränderung der Umsätze mit einzelnen Komponenten	193
4.2	Regionale Inputstruktur	194
<b>5</b>	<b>Literatur</b>	<b>198</b>
<b>6</b>	<b>Anhang:</b> Basisannahmen für die Berechnung der unterschiedlichen Szenarien	<b>200</b>

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 3-1:	Angenommene Entwicklung in den nächsten zehn Jahren im Überblick	190
Tabelle 4-1:	Überblick über die Annahmen und Auswirkungen der Modellrechnung	191

## Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1-1:	Wirkungsweise des Innovationsprozesses der Brennstoffzelle auf die baden-württembergische Industrie	179
Abbildung 1-2:	Anteil des Antriebsstrangs an den Herstellkosten eines Mittelklassefahrzeugs	180
Abbildung 2-1:	Veränderung der Nachfrage zwischen den einzelnen Branchen	181
Abbildung 2-2:	Anteil Baden-Württembergs, Bayerns und Nordrhein-Westfalens an ausgewählten Branchen in Deutschland nach den Beschäftigtenzahlen (Quelle: Statistisches Bundesamt 1997)	184
Abbildung 4-1:	Entwicklungspfade der Produktion von Pkw mit Brennstoffzellen-Antrieb in Baden-Württemberg	193
Abbildung 4-2:	Veränderung der Umsatzvolumina für einzelne Komponenten des Antriebsstrangs	194
Abbildung 4-3:	Regionale Aufteilung der Zulieferstruktur (Wertschöpfung in DM) eines Brennstoffzellen-Antriebs für unterschiedliche Szenarien im Vergleich zum Verbrennungsmotor (Referenz)	195
Abbildung 4-4:	Anteil an den veränderten Wertschöpfungsvolumina einzelner Komponenten in Baden-Württemberg	196
Abbildung 4-5:	Veränderungen des Produktionswertes in Baden-Württemberg, Deutschland und dem Ausland (Wertschöpfung in Mio. DM) für unterschiedliche Szenarien im Vergleich zum Referenz-Szenario	197

# 1 Vorgehen

Art und Umfang der Auswirkungen des Innovationsprozesses auf die Industrie in Baden-Württemberg ergeben sich zum Einen aus den technologischen Veränderungen (siehe dazu Kapitel 5), die vermittelt über die Entscheidungen der Fahrzeughersteller über die Systemkomponenten und ihre Produktion zu einer veränderten Arbeitsteilung zwischen den Branchen führt, und zum Anderen aus der angenommenen Marktdurchdringung des Brennstoffzellen-Antriebs (siehe dazu Kapitel 3).

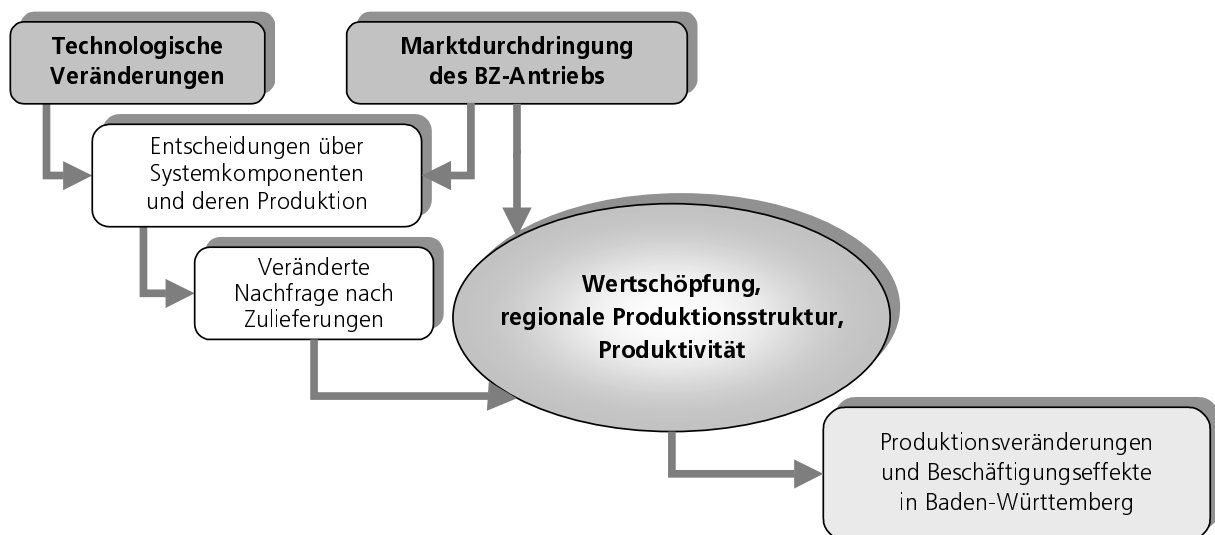


Abbildung 1-1: Wirkungsweise des Innovationsprozesses der Brennstoffzelle auf die baden-württembergische Industrie

Beide Aspekte werden im Folgenden untersucht. Dabei wird zunächst auf der Grundlage einer Gegenüberstellung der jeweiligen Komponenten der alternativen Antriebsstränge gezeigt, welche Branchen überwiegend betroffen sind und welchen Systemkomponenten die größte Bedeutung zukommen wird. Für die Analyse der Marktdurchdringung werden die vorgestellten Varianten der Marktdurchdringung (Szenarien: „Durchbruch Inland“, „Durchbruch Ausland“, „Konkurrenz“) durch Annahmen über Produktionszahlen für das Jahr 2010 veranschaulicht. Die angenommenen Branchenzuordnungen und die regionale Zulieferstruktur der unterschiedlichen Szenarien stellen die Grundlage einer Input-Output-Analyse (siehe dazu Kapitel 7) dar. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass die zu Grunde liegenden Annahmen über Wert-

schöpfungsanteile der Komponenten des Brennstoffzellen-Antriebs wie auch die Zuordnung zu Branchen oder Produktionsregionen mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Auch die Marktdurchdringung hängt von vielen noch ungeklärten Entwicklungen ab. Veränderungen konzentrieren sich auf den Antriebsstrang<sup>1</sup>. Im Folgenden wird daher nur dieser Teilbereich des Fahrzeugs betrachtet. Die Herstellkosten des herkömmlichen Antriebsstrangs wurden für einen Mittelklassewagen detaillierter untersucht und lagen bei 27 Prozent der gesamten Herstellkosten des Fahrzeugs. Beim Brennstoffzellen-Antriebsstrang wird angenommen, dass dieser Anteil analog zum Diesel-Fahrzeug auf ca. 35 Prozent ansteigt.

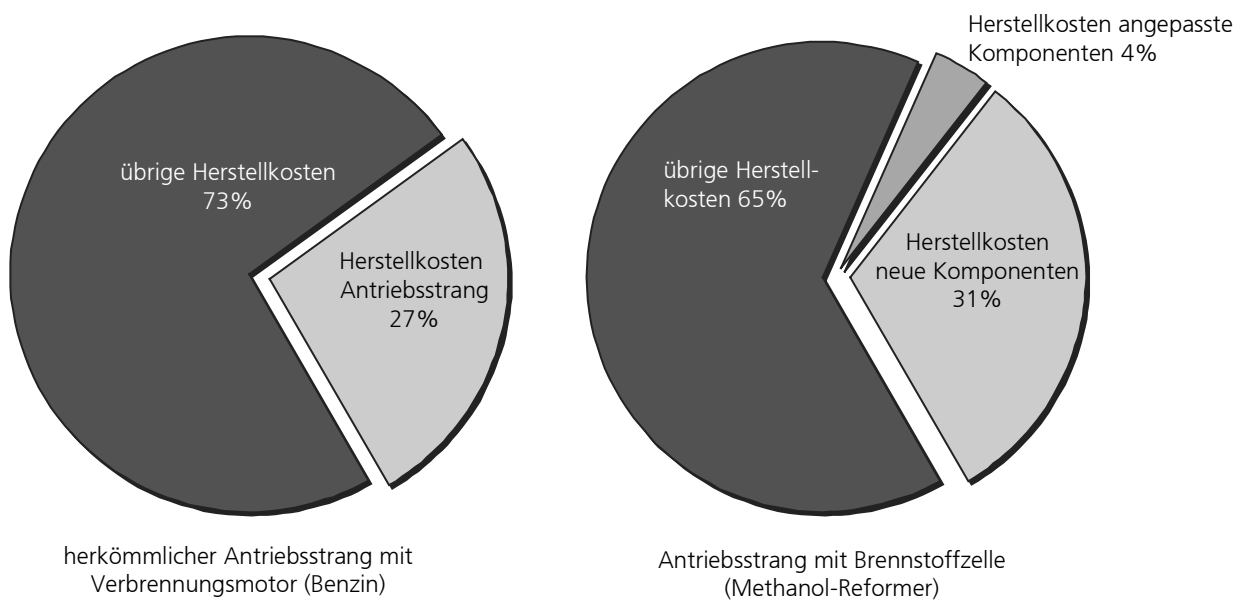


Abbildung 1-2: Anteil des Antriebsstrangs an den Herstellkosten eines Mittelklassefahrzeugs

<sup>1</sup> Zum Antriebsstrang zählen: Verbrennungsmotor, Motorelektronik, Motorelektrik, Getriebe, Abgasanlage, Kühlsystem, Tankanlage.

## 2 Wirkung der technologischen Veränderungen

### 2.1 Veränderung der sektoralen Zulieferstruktur infolge neuer Komponenten

Die über den Target-Costing-Ansatz (Kapitel 5) unter der Voraussetzung einer wirtschaftlichen Serienfertigung gewonnenen Ergebnisse zum Wertschöpfungsanteil der einzelnen Komponenten des Brennstoffzellenantriebs bedeuten eine Verschiebung der Nachfrage zwischen aber auch innerhalb der einzelnen Branchen (siehe Abbildung 2-1). Bei der Betrachtung der Zulieferstruktur wurden nicht alle Zulieferstufen sondern nur die Fertigung beim Automobilhersteller, die erste Zulieferstufe und bei einigen ausgewählten Komponenten auch die zweite Zulieferstufe berücksichtigt.

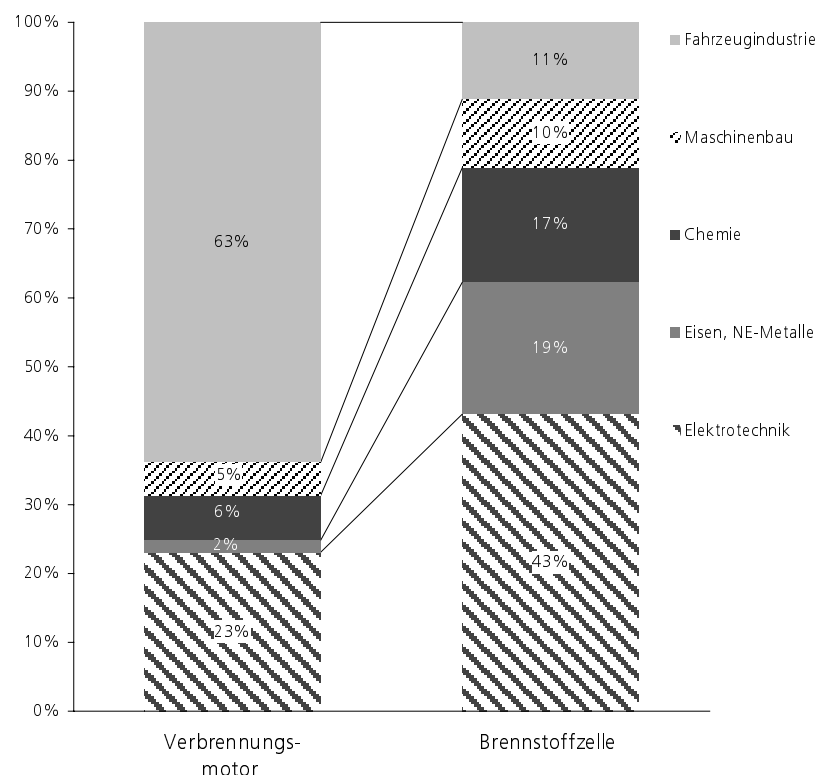


Abbildung 2-1: Verschiebung der Branchenstruktur bei vollständiger Ausschöpfung der Zulieferpotentiale

Die Zuordnung aller herkömmlichen Komponenten des Antriebsstrangs zu den Branchen konnte eindeutig durchgeführt werden. Bei Komponenten, die für den Brennstoffzellen-Antriebsstrang nur anzupassen sind, wurde eine reduzierte oder gestiegene Wertschöpfung in der bisherigen Branche angenommen. Die neuen Komponenten wurden nach voraussichtlichen Fertigungsverfahren und Ähnlichkeit mit existierenden Komponenten oder Produkten unterschiedlichen Branchen zugeordnet. Diese Zuordnung kann sich jedoch verändern in Abhängigkeit von den Eigen- oder Fremdfertigungsentscheidungen der Automobilindustrie und den Fertigungsverfahren, die zukünftig zum Einsatz kommen werden.

Beim herkömmlichen Antriebsstrang mit Verbrennungsmotor werden ca. 60 Prozent der Wertschöpfung von der Fahrzeugindustrie erbracht. Dieser Anteil kann sich bei einer vollständigen Ausnutzung der Zulieferpotentiale beim Antriebsstrang mit Brennstoffzelle auf nur 10 Prozent reduzieren. Die Verschiebung beruht darauf, dass die Komponenten des Brennstoffzellenantriebs nicht zu den heutigen Fertigungsstrukturen der Automobilindustrie passen und deshalb zunächst zu unterstellen ist, dass sie von anderen Branchen gefertigt werden. Es ist jedoch damit zu rechnen, dass bei einem Durchbruch der Brennstoffzelle die Automobilindustrie die Fertigung vieler Komponenten übernehmen wird, die gegenwärtig anderen Branchen zugeordnet werden müssen. Die Reduzierung des Anteils der Fahrzeugindustrie ergibt sich überwiegend durch den Wegfall des eigentlichen Motors. Wertschöpfungsintensive Komponenten des Motors wie zum Beispiel Kurbelwelle, Kolben, Zylinderkopf und Lager entfallen bei einem Brennstoffzellenantrieb.

Zugewinne ergeben sich insbesondere bei der Elektroindustrie (20 Prozent Zuwachs). Alleine der Elektromotor des Brennstoffzellenantriebs, inklusive der Steuerung, beansprucht voraussichtlich über 35 Prozent der gesamten Kosten des neuen Antriebsstrangs und bewirkt daher starke Zuwächse bei der Elektrotechnikbranche. Der Wegfall vieler kleinerer Komponenten des herkömmlichen Antriebsstrangs wie zum Beispiel des Ölstandsensors, des Pedalwertgebers, der Zündkerzen und des Zündmoduls wird überkompensiert durch den Elektromotor und die Steuerung. Es ergibt sich eine Verschiebung der Nachfrage innerhalb der Branche.

Auch bei der chemischen Industrie ergeben sich Zuwächse, obwohl der herkömmliche Katalysator entfällt. Diese gestiegene Nachfrage beruht auf der aufwendigen und teuren Beschichtung der Elektroden-Membran-Einheit (MEA) und der Katalysatoren, die für die Gasaufbereitung erforderlich sind. Um den Anteil der chemischen Industrie am Katalysator für den Verbrennungsmotor dagegen stellen zu können, müssen auch die Zulieferungen der chemischen Industrie für die Systemkomponente Abgasanlage des herkömmlichen Antriebsstrangs betrachtet werden, da die Zuwachsraten der chemischen Industrie ansonsten stark überschätzt werden würden.

Eine Verlagerung der Produktion zu den beiden Branchen „Stahl- und Leichtmetallbauerzeugnisse“ und „Erzeugnisse der Ziehereien, Kaltwalzwerke usw.“ wird vermutet, auch wenn diese Verlagerung noch mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Komponenten mit hohem Wertschöpfungsanteil dieser Branchen sind neben verschiedenen Behältern für die Gaserzeugung der Verdampfer und voraussichtlich die Bipolarplatten. Nicht ausgewiesen wurden die Zulieferungen dieser Branchen zum Elektromotor (Bleche im Kern des Elektromotors), da nur die erste Zulieferstufe betrachtet wurde und davon auszugehen ist, dass der Elektromotor als eine Systemkomponente von einem Zulieferer aus der Elektroindustrie bezogen wird. Die Fertigungstechnologie der Bipolarplatten ist noch unklar, da es sich um ein neues Produkt handelt, das bisher nur in kleinen Serien gefertigt wurde. Die Fertigungsverfahren für eine wirtschaftliche Großserienfertigung werden sich deutlich von den bisherigen Fertigungsverfahren für geringe Stückzahlen unterscheiden. Die Bipolarplatten sind mit 11 Prozent der Kosten für den gesamten Antriebsstrang für die Nachfrage aus diesem Sektor von großer Bedeutung.

Bei der Maschinenbau-Branche werden Verschiebungen zwischen den Branchen nur in geringem Umfang erwartet. Es kommt jedoch zu Veränderungen innerhalb der Branche. Das einfachere Getriebe des Brennstoffzellen-Antriebs im Vergleich zum herkömmlichen Antriebsstrang führt zu einer Reduzierung der Zulieferungen aus der Maschinenbau-Branche. Diese werden jedoch durch die Zulieferung neuer Komponenten wie der Kompressor/Expander-Einheit, dem Katalytischen Brenner und mehreren Pumpen weitgehend ausgeglichen. Die Fertigungsverfahren dieser neuen Komponenten werden sich voraussichtlich erheblich von den Fertigungsverfahren unterscheiden, die für die Produktion der Komponenten des Antriebsstrangs mit Verbrennungsmotor eingesetzt werden.

## **2.2 Regionale Wirkungen durch sektorale Verschiebungen und Entscheidungen über Eigen- oder Fremdfertigung**

Aus den Veränderungen der sektoralen Zulieferstruktur lassen sich Schlussfolgerungen für die regionale Herkunft der Zulieferteile und Ausrüstung ableiten. Grundsätzlich wird angenommen, dass sich eine Region aus dem zur Verfügung stehenden Kuchen branchenspezifischer Wertschöpfung für den Brennstoffzellen-Antriebsstrang entsprechend ihrem Anteil an der Branche ein Stück herauschneiden kann. Dies wird an Hand von Plausibilitätsüberlegungen auf der Basis einer spezifischeren Betrachtung der Teilbranche und der traditionellen Zulieferstrukturen ergänzt und gegebenenfalls korrigiert.

Die baden-württembergische Industrie zeichnet sich durch einen sehr hohen Anteil des Maschinen- und Fahrzeugbaus aus. In diesen Branchen sind zusammen ca. 60 Prozent der Beschäftigten des Verarbeitenden Gewerbes in Baden-Württemberg tätig. Wachsende Zulieferungen aus der Chemischen Industrie könnten zu einer Verlagerung von Wertschöpfung nach Nordrhein-Westfalen oder Hessen führen. In diesen Bundesländern ist die Chemieindustrie mit zusammen ca. 45 Prozent der Beschäftigten nicht nur besonders stark vertreten, sondern dort sind auch die Unternehmen und Produktionsstätten angesiedelt, die schon bisher als indirekte Automobilzulieferer operieren und über Know-how in der Brennstoffzellen-Technologie verfügen.

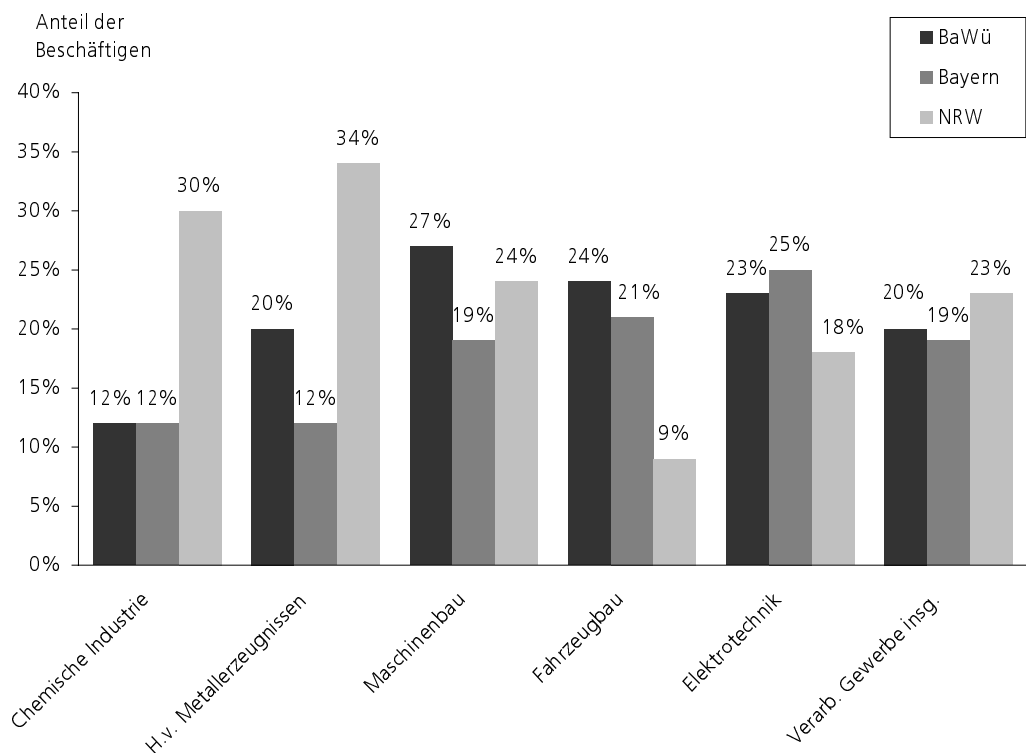


Abbildung 2-2: Anteil Baden-Württembergs, Bayerns und Nordrhein-Westfalens an ausgewählten Branchen in Deutschland nach den Beschäftigtenzahlen (Quelle: Statistisches Bundesamt 1997)

Für Baden-Württemberg bestehen gute Chancen, Zuwachsraten im Bereich der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik zu erzielen, denn dieser Bereich der Elektrotechnik ist mit fast 30 Prozent der Beschäftigten stärker in Baden-Württemberg vertreten als die Elektrotechnik-Branche insgesamt (23% der Beschäftigten). Gute Voraussetzungen finden sich jedoch auch in Bayern. Hier sind ebenfalls viele Unternehmen dieser Branche ansässig, und die Zahl der Beschäftigten im Bereich der Herstellung von Geräten der Elektrizitätser-

zeugung liegt mit fast 120.000 noch höher als in Baden-Württemberg (87.000). Für die elektrotechnischen Produkte ist eine Zulieferung aus dem Ausland ebenfalls in Betracht zu ziehen, da die elektrotechnischen Produkte bereits heute zu einem wesentlich größeren Anteil aus dem Ausland geliefert werden, als dies bei mechanischen Komponenten der Fall ist. Zulieferungen aus dem Ausland decken jedoch bei dem untersuchten Mittelklassewagen insgesamt nur einen Anteil von 11 Prozent des Antriebsstrangs ab (siehe Abbildung 4-3).

Zuwächse im Bereich der Elektroindustrie wirken sich auch auf die weiteren Stufen der Zulieferstruktur aus, da die Elektroindustrie eine andere Nachfrage an Vorleistungen aufweist als die Automobilindustrie und der Maschinenbau. Es werden einfachere Produkte als Vorleistungen nachgefragt, die weniger Zulieferstufen durchlaufen haben und in größerem Umfang von Großunternehmen hergestellt werden. Es ist mit einer Verlagerung der Wertschöpfung von eher mittelständischen Unternehmen zu Großunternehmen mit einer weniger arbeitsintensiven Fertigung zu rechnen.

Von Bedeutung für Baden-Württemberg ist jedoch nicht nur die Zulieferer-, sondern besonders auch die Ausrüsterindustrie, die ebenfalls von den Veränderungen der Zulieferstruktur betroffen ist. Insgesamt ergeben sich für die entsprechenden Branchen, vor allem natürlich für den Maschinenbau, Wachstumschancen, wenn es zu einem inländischen Durchbruch der Brennstoffzellen-Technologie kommt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass es innerhalb der Branche zu Verschiebungen der Wertschöpfung kommt. Auf Grund der sich noch im Aufbau befindenden Produktionstechnologie für die neuen Komponenten besteht für innovative Unternehmen die Möglichkeit, neue Produktionstechnologien zu entwickeln und neue Absatzmärkte zu gewinnen. Auch bei einem ausländischen Durchbruch oder dem Konkurrenz-Szenario können sich neue Absatzmärkte für deutsche Ausrüster ergeben, da eine Anlieferung von Produktionsmitteln aus dem Ausland unproblematischer ist als die Zulieferung von Komponenten. Entscheidend für die Entwicklung dieser Marktchancen wird neben der aktiven Rolle der Maschinenbauunternehmen die Beteiligung deutscher Automobilhersteller am Entwicklungsprozess sein, da zu diesen bereits gute Kontakte bestehen.

In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass sich der Wettbewerb zwischen dem Verbrennungsmotor und dem Brennstoffzellenantrieb auch auf die Produktionstechnik des Verbrennungsmotors auswirken kann. Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs und der Emissionen können zusätzliche Investitionen bei der Produktion von Verbrennungsmotoren bewirken. Diese Investitionen führen jedoch voraussichtlich nicht zu einer wesentlichen Veränderung der Ausrüsterstruktur.

Der Anteil für die Ausrüstungsinvestitionen variiert bei den Unternehmen in Abhängigkeit vom Produkt und der Fertigungstiefe stark. Dennoch erscheint

der Anteil der Investitionskosten oftmals gering. Die Auswirkungen auf Baden-Württemberg dürfen jedoch nicht unterschätzt werden, da eine starke Konzentration der Ausrüster für die traditionellen mechanischen Fertigungsverfahren des Antriebsstrangs vorliegt. Auf die Herstellung von Werkzeugmaschinen entfallen in Baden-Württemberg über 20 Prozent des Umsatzes und der Beschäftigten im Maschinenbau.

Innerhalb der Ausrüsterbranche kommt es zu Verschiebungen durch die technologischen Veränderungen (neuen Komponenten) des Antriebsstrangs. Die zu erwartenden Zuwächse bei den Ausrüstern der Elektrotechnik-Branche und der Chemie-Industrie werden voraussichtlich mit Rückgängen bei den Ausrüstern der Automobilbranche einhergehen. Im Bereich der Automatisierungs- und Montagetechnik werden keine so umfangreichen Anpassungen an die neue Produktionstechnologie erwartet, dass es zu wesentlichen Veränderungen für die Ausrüsterbetriebe kommt. Insgesamt ist die Ausrüster-Branche wesentlich unabhängiger vom Anteil der inländischen Wertschöpfung als die Zulieferindustrie. Vorreiter bei der Entwicklung der neuen Produktionstechnologie können eventuell durch Exporte auch dann Absatzmärkte dazu gewinnen, wenn sich der Wertschöpfungsanteil der bisher belieferten Branchen am Antriebsstrang reduziert.

Die hier unterstellte grundsätzliche Tendenz, dass die neuen Komponenten des Brennstoffzellenantriebs in den technologisch jeweils kompetenten Sub-Branchen gefertigt werden, kann durch die tatsächliche Entscheidung der Fahrzeughersteller wer, was, wo fertigt oder liefert kontakariert werden. In der Automobilindustrie hat sich über Jahrzehnte die industrielle Arbeitsteilung sukzessive entwickelt. In jüngster Zeit wird dabei verstärkt versucht, die zunehmende Komplexität durch die Etablierung von Systemlieferanten und in der Folge Pyramidisierung der Zulieferstruktur besser in den Griff zu bekommen. Bei der Innovation Brennstoffzelle besteht nun von vornherein, und vom Charakter der Technologie unterstützt, die Chance, ein Konzept mit wenigen Systemlieferanten aufzubauen.

Entscheidend für die Wahl des Systemlieferanten wird nicht nur das spezielle Produktions-Know-how sein, sondern auch das Vertrauen der Automobilhersteller in die Zuverlässigkeit der Zulieferbetriebe. Die Anforderungen der Automobilhersteller an die Zulieferindustrie sind hinsichtlich Qualität und Logistik wesentlich ausgeprägter als im allgemeinen Maschinenbau.

Während der Antriebsstrang des herkömmlichen Verbrennungsmotors eine Vielzahl an einzelnen, sehr unterschiedlichen Komponenten umfasst, reduziert sich diese Anzahl beim Brennstoffzellenantrieb. Deutlich wird dies insbesondere beim Verbrennungsmotor, der ca. 45 Prozent der Kosten des herkömmlichen Antriebsstrangs abdeckt und sich aus ca. 50 Komponenten zusammensetzt, von denen keine mehr als 8 Prozent beansprucht. Die Kosten des Brennstoffzellenantriebs verteilen sich auf wenige teure Komponenten,

die wiederum zu Systemkomponenten zusammengefasst werden können. Die Entscheidung über den Produktionsstandort der Systemkomponenten wird daher für die regionale Zulieferstruktur entscheidend sein. Nur wenn die Systemkomponenten überwiegend in Deutschland hergestellt werden, bestehen gute Möglichkeiten für die baden-württembergische Industrie, in erheblichem Umfang an der gesamten Wertschöpfung beteiligt zu sein. Wenn dagegen ganze Systemkomponenten aus dem Ausland angeliefert werden, kann auch beim Komponentenhersteller eine lokale Zulieferstruktur angenommen werden, die sich negativ auf Baden-Württemberg auswirken würde.

Entscheidend für die regionalen Auswirkungen wird daher sein, wo die drei wichtigsten Systemkomponenten (Brennstoffzellenstack, Gaserzeuger und Elektromotor) gefertigt werden. Die Bedeutung dieser Standortentscheidungen für die Industrieregion Baden-Württemberg wird durch den stark modularen Aufbau des Brennstoffzellenantriebs noch verstärkt, der zu einer Reduzierung des Aufwands bei der Endmontage und zu einem gestiegenen Anteil an der Wertschöpfung bei der Herstellung der Komponenten führt.

### **2.3 Branchenproduktivitäten und Economies-of-scale bei Brennstoffzellen-Komponenten**

Die Unternehmen, bei denen Zuwächse durch die veränderten Komponenten des Brennstoffzellen-Antriebs erwartet werden, können bereits hinsichtlich einiger Aspekte charakterisiert werden. Diese Charakteristika leiten sich nur teilweise aus der Branchenzugehörigkeit ab. Voraussetzung für eine relevante Marktdurchdringung der mobilen Brennstoffzelle ist eine wirtschaftliche Serienfertigung. Analog zum herkömmlichen Antriebsstrang scheint sich auch für den Brennstoffzellen-Antrieb abzuzeichnen, dass jährliche Stückzahlen von ca. 250.000 erforderlich sind, um eine wirtschaftliche, weitgehend automatisierte Fertigung zu ermöglichen. Unter diesen Voraussetzungen ist davon auszugehen, dass die Produktivität der Fertigung, unabhängig von den betroffenen Branchen, in etwa der Produktivität der Fahrzeugindustrie entsprechen wird.

Durch die Reduzierung der Komponentenzahl und die technologischen Voraussetzungen der neuen Komponenten können eventuell sogar Produktivitätssteigerungen im Vergleich zur heutigen Fahrzeugindustrie erzielt werden. Aufwendige und komplexe Fertigungsverfahren des heutigen Antriebsstrangs, die eine vielstufige, überwiegend mittelständische, eng verflochtene Zulieferstruktur begünstigt haben, werden voraussichtlich an Bedeutung verlieren. Werkstoffanforderungen, die sich durch die hohen Temperaturen im Motor ergeben, werden entfallen bzw. durch andere chemische Anforderungen ersetzt werden. Die Anzahl der Rotationsteile, die durch Fliehkräfte, mechanischen Abrieb und Schwingungen belastet werden, wird sich erheblich

reduzieren. Die Zulieferstruktur vieler mittelständischer Unternehmen des heutigen Antriebsstrangs mit Verbrennungsmotor wird sich daher voraussichtlich zu einem höheren Wertschöpfungsanteil weniger Großunternehmen verschieben.

### 3 Marktdurchdringung und Rahmenbedingung des Absatzmarktes

Unterschiedliche Möglichkeiten der Marktdurchdringung des Brennstoffzellen-Antriebs und die jeweiligen Voraussetzungen wurden bereits in Kapitel 2 skizziert. Die erläuterten Szenarien sollen an dieser Stelle erneut aufgegriffen werden und es soll abgeschätzt werden, welche Auswirkungen sich für die baden-württembergische Industrie ergeben. Unabhängig von den Szenarien sind einige Rahmenbedingungen zu beachten.

Eine wirtschaftliche Großserienfertigung erscheint nur realisierbar, wenn Stückzahlen von mehr als 100.000 Stück gefertigt werden. Die optimale Stückzahl dürfte bei vielen Komponenten bei ca. 250.000 Stück liegen. Es ist davon auszugehen, dass diese Stückzahlen nur erreicht werden, wenn

- es zu einer Bündelung der Nachfrage in der Nähe des größten Absatzmarktes kommt und dort Produktionskapazitäten aufgebaut werden; die Standortentscheidung orientiert sich dann ausschließlich an der Nachfrage und nicht am Forschungsstandort,
- kleinere Absatzmärkte alle Systemkomponenten aus dem Ausland beziehen und nur noch die Endmontage im Inland durchgeführt wird,
- Systemkomponenten eines Herstellers von mehreren Automobilherstellern nachgefragt werden, um wiederum eine Bündelung der Nachfrage zu ermöglichen.

Die Auswirkungen auf die Industrie in Deutschland und Baden-Württemberg müssen in Relation dazu beurteilt werden, wie sich die gesamte Pkw-Produktion entwickelt. Wächst die Pkw-Produktion, sind Veränderungen weniger problematisch als wenn in einem stagnierenden oder schrumpfenden Markt Segmente durch neue Brennstoffzellenkomponenten ganz oder teilweise substituiert werden. Die Prognosen für die Entwicklung des Automobilmarktes verschiedener Unternehmen und Institute weichen voneinander ab. Allgemein wird von einem steigenden Pkw-Bestand in Deutschland ausgegangen, dieser muss jedoch nicht mit steigenden Produktionszahlen in

Deutschland einhergehen. Während die erst kürzlich veröffentlichte Shell-Studie von steigenden Produktionszahlen ausgeht, prognostiziert das Unternehmen Marketing-Systems nach einem konjunkturellen Rückgang für das Jahr 2010 eine Produktion von ca. 5,35 Mio. Pkw, was der Produktion des Jahres 1998 entspricht. Das Unternehmen stützt diese Annahme auf die weitgehende Auslastung der Produktionsstandorte in Deutschland im Jahr 1998 und die Annahme, dass neue Produktionsstandorte überwiegend in der Nähe der größten Wachstumsmärkte außerhalb Deutschlands entstehen werden. Die Shell-Studie stützt sich dagegen auf Prognosen des IFEU-Instituts, die sich auf eine Extrapolation der Entwicklung der letzten Jahre stützen.

Annahmen über die Rahmenbedingungen der Entwicklung des Automobilmarktes stellen darüber hinaus die Grundlage für eine Plausibilitätsüberprüfung der Modellannahmen dar. Ausgehend von der heutigen Pkw-Produktion werden die folgenden Annahmen bezüglich des Absatzmarktes und der Produktion getroffen:

- Die Absatzmärkte in der Europäischen Union und den USA sind weitgehend gesättigt. Die Einführung des Brennstoffzellen-Antriebs führt daher auf diesen Märkten zu einer ausschließlichen Verdrängung des Verbrennungsmotors.
- Wachstumsmärkte für Pkw liegen in den nächsten Jahren in Osteuropa und Südamerika. Die gestiegene Nachfrage wird jedoch zunehmend auch durch die Produktion in diesen Ländern abgedeckt. Die Produktionsverlagerung konzentriert sich auf Pkw mit kleinerem Hubraum, da bei dem höherwertigen Segment Imageverluste befürchtet werden. Als Produktionsstandort für den Brennstoffzellen-Antrieb werden zunächst nur die traditionellen Industriestaaten in Betracht gezogen.
- Der Export von Pkw mit Brennstoffzellen-Antrieb nach Japan wird durch Einfuhrbeschränkungen behindert, da die Entwicklung vor Ort gefördert werden soll.
- In Deutschland werden keine neuen Produktionsstandorte aufgebaut, die Auslastung der bestehenden Standorte kann jedoch überwiegend auf einem hohen Niveau gehalten werden.
- Die Exportquote der deutschen Automobilindustrie bleibt insgesamt konstant. Rund 70 Prozent der Exporte gehen auch in den nächsten zehn Jahren in die EU. Zuwächse auf dem amerikanischen Markt sind nur durch Marktneuheiten zu erzielen.
- Die Nachfrage nach Pkw verschiebt sich in der EU zu höherwertigen Segmenten. Automobilhersteller in Baden-Württemberg können von diesem Trend profitieren und erzielen in den nächsten Jahren leichte Zuwachsraten von durchschnittlich 1 bis 2 Prozent.

Weiterhin wird angenommen, dass sich einige Länder in der EU der Entwicklung in Deutschland anpassen werden, wenn in Deutschland eine Infrastruktur für Methanol aufgebaut wird. Die überwiegende Zahl der EU-Mitgliedsstaaten wird jedoch in den nächsten Jahren keine Infrastruktur für Methanol aufbauen. Die Exportmöglichkeiten für Brennstoffzellen-Pkw sind daher innerhalb Europas geringer als bei einem herkömmlichen Antrieb.

Tabelle 3-1: Angenommene Entwicklung in den nächsten zehn Jahren im Überblick

Deutschland, EU, USA	keine Steigerung des Absatzmarktes
Deutschland	<p>Nur konjunkturelle Schwankungen der Produktion bei gleich bleibendem Niveau.</p> <p>Exportquote beim Verbrennungsmotor bleibt konstant</p> <p>Exportquote der Pkw mit Brennstoffzellen in Europa liegt niedriger als bei Verbrennungsmotor, da keine flächendeckende Infrastruktur vorliegt.</p> <p>Exportquote der Pkw mit Brennstoffzelle in die USA, Kanada und Mexiko liegt höher als beim Verbrennungsmotor, da eine umfangreiche politische Förderung angenommen wird.</p>
Baden-Württemberg	Produktion ist auf Grund einer Verschiebung hin zu höherwertigen Pkws leicht steigend. Diese werden aus Imagegründen zum großen Teil weiterhin in Deutschland gefertigt.

## 4 Modellrechnung für das Jahr 2010

Die bereits erläuterten Szenarien und ihre unterschiedlichen Auswirkungen auf die baden-württembergische Industrie werden anhand einer Modellrechnung veranschaulicht. Als Referenzjahr wurde das Jahr 2010 ausgewählt, da sich zu diesem Zeitpunkt erste relevante Unterschiede zwischen den Szenarien darstellen lassen. Die Modellrechnung wurde für eine Referenzstückzahl von 200.000 durchgeführt (Durchbruch 250.000, genaue Aufteilung der Stückzahlen für einzelne Szenarien siehe Anhang Tabelle A1), da erst bei dieser Stückzahl von einer wirtschaftlichen Großserienfertigung ausgegangen werden kann.

Tabelle 4-1: Überblick über die Annahmen und Auswirkungen der Modellrechnung

Durchbruch Inland	Durchbruch Ausland	Konkurrenz
<ul style="list-style-type: none"> <li>Wirtschaftliche Großserienfertigung fast aller Komponenten in Deutschland (Stack, Kompressor, Elektromotor).</li> <li>Überwiegend Mittelklassewagen mit Brennstoffzelle (BZ) .</li> <li>Mehrere Automobilhersteller bieten Pkws mit BZ an.</li> <li>50 % der Pkw mit BZ werden exportiert, 25 % in die EU-Staaten und 25 % in die NAFTA-Staaten.</li> <li>Während im Inland und innerhalb der EU ausschließlich Pkw mit Verbrennungsmotor verdrängt werden, kann der Marktanteil in den NAFTA-Staaten gesteigert werden (insgesamt Zuwächse gegenüber „Referenz“ und „Konkurrenz“ von 25 %).</li> <li>Alle Stacks, die in der BRD eingebaut werden, werden in Baden-Württemberg gefertigt, aber die Membran-Elektroden-Einheit wird aus einem anderen Bundesland geliefert.</li> <li>60 % der Pkw mit BZ werden in Baden-Württemberg produziert.</li> <li>Die Pkw-Produktion in Deutschland wächst gegenüber dem Referenz-Szenario um ca. 1 %.</li> <li>Pkw mit Brennstoffzellen-Antriebsstrang erreichen einen Produktionsanteil von 5 % (250.000 Pkw) in Deutschland und 15 % (150.000 Pkw) in Baden-Württemberg</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wirtschaftliche Großserienfertigung in Japan oder den USA.</li> <li>Importe aus dem Ausland verdrängen inländische Pkw mit Verbrennungsmotor.</li> <li>Die Produktion in Deutschland reduziert sich bei den Automobilherstellern in etwa entsprechend ihrem Anteil am Produktionsvolumen.</li> <li>Die Pkw-Produktion in Deutschland reduziert sich gegenüber dem „Referenz-Szenario“ um knapp 2 %.</li> <li>20 % der Importe verdrängen Pkw, die in Baden-Württemberg produziert worden wären.</li> <li>Die Pkw-Produktion in Baden-Württemberg reduziert sich gegenüber dem „Referenz-Szenario“ um ca. 2 %.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Es gibt keine wirtschaftliche Großserienfertigung in Deutschland für die wichtigsten Komponenten.</li> <li>Alle Systemkomponenten werden aus dem Ausland (z.B. USA) importiert (Stack, Gaserzeugung, Elektromotor) und in Deutschland eingebaut.</li> <li>Der Brennstoffzellen-Antrieb ist um den Faktor 1,5 teurer als beim „Durchbruch Inland“, da geringere Stückzahlen gefertigt werden und viele Komponenten importiert werden müssen.</li> <li>Brennstoffzellen-Antriebe werden in Pkw der gehobenen Klasse eingebaut (geringere Preiselastizität der Nachfrage, Flottenfahrzeuge, größerer Zusatznutzen durch Stromversorgung).</li> <li>Mehrere Automobilhersteller bieten Pkw mit BZ-Antrieb an.</li> <li>60 % der Produktion von Pkw mit BZ-Antrieb in Deutschland entfallen auf Baden-Württemberg.</li> <li>Es kommt zu keinen Produktionssteigerungen gegenüber dem Referenz-Szenario.</li> <li>Pkw mit Brennstoffzellen-Antrieb erreichen einen Anteil an der Produktion von 1 % in Deutschland und 3 % in Baden-Württemberg</li> </ul>

Unter der Annahme, dass die Automobilproduktion in Deutschland in den nächsten zehn Jahren insgesamt nicht wachsen wird, erreichen Pkw mit Brennstoffzellen-Antrieb im Jahr 2010 für das Szenario „Durchbruch Inland“ einen Produktionsanteil von fast 5 Prozent. In Baden-Württemberg werden leichte Produktionssteigerungen angenommen. Da der überwiegende Teil der Pkw mit Brennstoffzellen-Antrieb in Baden-Württemberg produziert wird, liegt der Anteil hier mit fast 15 Prozent wesentlich höher. Bei diesem Szenario wird angenommen, dass es zu Absatzsteigerungen kommt, die sich durch eine Erhöhung des Marktanteils in USA, Kanada und Mexiko ergeben. Da Baden-Württemberg als technischer Führer dieser Technologie eingestuft wird, wirken sich diese Absatzsteigerungen für Baden-Württemberg besonders positiv aus. Bei den dargestellten Ergebnissen ist zu berücksichtigen, dass nur der Antriebsstrang betrachtet wurde.

Bei einem ausländischen Durchbruch ist damit zu rechnen, dass es zu Importen von Brennstoffzellen-Pkw nach Europa kommen wird. Diese wirken sich negativ auf das Produktionsvolumen des Antriebsstrangs und allen weiteren Komponenten des Pkw in Deutschland aus. Baden-Württemberg ist jedoch nur proportional seinem Anteil am Produktionsvolumen von diesen Importen betroffen. Es ergibt sich ein Produktionsrückgang in Deutschland und Baden-Württemberg von ca. 2 Prozent. Hintergrund für dieses Szenario kann der alleinige Durchbruch eines ausländischen Anbieters sein oder der Aufbau einer Produktion im Ausland durch einen deutschen Automobilhersteller. Zu dieser Konstellation kann es kommen, wenn der Lead-Markt im Ausland liegt.

Beim Konkurrenz-Szenario wird eine geringere Marktdurchdringung der Brennstoffzelle angenommen, da der für eine wirtschaftliche Serienfertigung für den Massenmarkt notwendige technische Durchbruch und die erforderliche Käuferakzeptanz nicht erreicht wird. Die Brennstoffzelle wird dann hauptsächlich bei Flottenfahrzeugen der gehobenen Preisklasse eingebaut, wobei die Systemkomponenten aus dem Ausland zugekauft werden. Es kommt ausschließlich zu einer Verdrängung von Pkw mit Verbrennungsmotor. Pkw mit Brennstoffzellen-Antrieb erreichen nur einen Anteil an der Produktion von 3 Prozent in Baden-Württemberg und ca. 1 Prozent in Deutschland.

Die Ergebnisse dieser Modellrechnung stimmen ungefähr mit den Szenarien überein, die von Shell 1999 veröffentlicht wurden. Die Studie „Mehr Autos – weniger Emissionen“ geht in ihrem optimistischen Szenario „Neue Ordnung“ im Jahre 2010 von einem Bestand von 700.000 Pkw mit Brennstoffzellenantrieb in Deutschland aus. Dieses Szenario entspricht in seinen groben Zügen dem hier detailliert beschriebenen Szenario „Durchbruch Inland“. Bei einem angenommenen Exportanteil von ca. 50 Prozent ergibt sich für das Jahr 2010 für das Szenario Durchbruch Deutschland ein Bestand von ca. 400.000 Pkw mit Brennstoffzellenantrieb. Ein Bestand von 700.000 Pkw wird in diesem Szenario nur wenig später, im Jahr 2011 oder 2012 erwartet.

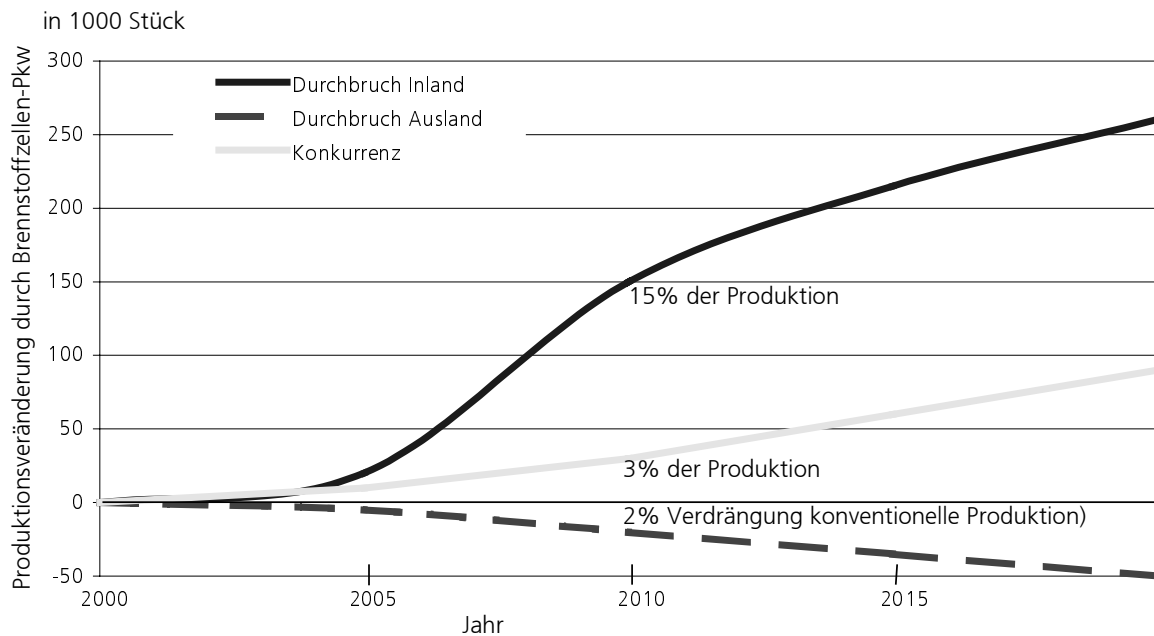


Abbildung 4-1: Entwicklungspfade der Produktion von Pkw mit Brennstoffzellen-Antrieb in Baden-Württemberg

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass eine detaillierte Untersuchung der regionalen und sektoralen Zulieferstruktur für den herkömmlichen Antriebsstrang nur am Beispiel eines Mittelklasse-Pkws von einem deutschen Hersteller durchgeführt wurde. Während bei der sektoralen Aufteilung eine Übertragung auf andere Fahrzeuge und Automobilhersteller vermutlich unproblematisch ist, gilt dies nur eingeschränkt für die regionale Verteilung. Es ist möglich, dass der Anteil der Zulieferungen aus dem Ausland bei anderen Automobilherstellern höher liegt als bei dem untersuchten Pkw.

Weiterhin ist zu beachten, dass ausschließlich der Antriebsstrang berücksichtigt wurde. Die regionale und sektorale Zulieferstruktur aller anderen Komponenten entspricht der derzeitigen Zulieferstruktur und bleibt daher unberücksichtigt.

#### 4.1 Veränderung der Umsätze mit einzelnen Komponenten

Unabhängig vom Produktionsstandort und der Eigen- oder Fremdfertigungsentscheidung der Automobilindustrie verändern sich für die skizzierten Szenarien die Produktionsvolumina der einzelnen Komponenten gegenüber dem Referenz-Szenario. Die angenommene Wertschöpfung der herkömmlichen

Komponenten orientiert sich erneut an der A-Klasse, während die Aufteilung der Wertschöpfung der neuen oder angepassten Komponenten des Brennstoffzellen-Antriebsstrangs auf dem in Kapitel 5 näher erläuterten Target-costing-Ansatz basiert. Die Darstellung veranschaulicht die erwarteten Rückgänge insbesondere beim Verbrennungsmotor, während sich bei den neuen Komponenten neue Umsätze ergeben.

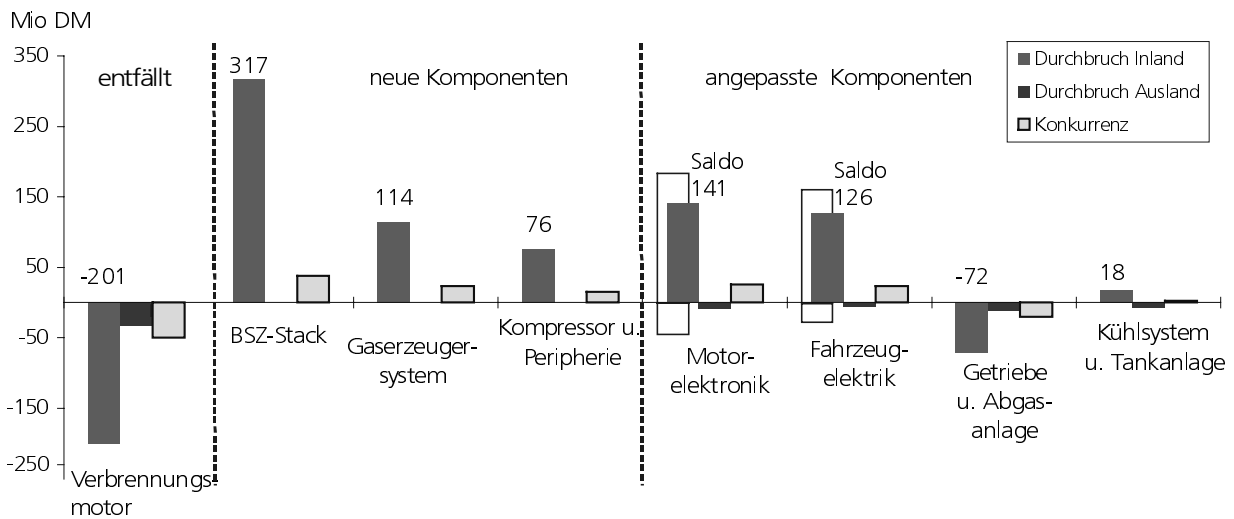


Abbildung 4-2: Veränderung der Wertschöpfungsvolumina für einzelne Komponenten des Antriebsstrangs (Bundesrepublik Deutschland)

## 4.2 Regionale Inputstruktur

Die Modellberechnungen zeigen deutliche Unterschiede hinsichtlich der regionalen Verteilung der Inputstruktur für die verschiedenen Szenarien auf. Vergleichsbasis der Szenarien ist das Referenz-Szenario, das die aktuelle Aufteilung für den Antriebsstrang des Verbrennungsmotors widerspiegelt. Beim herkömmlichen Antriebsstrang werden 43 Prozent des Inputs von Baden-Württemberg erbracht und der Anteil der BRD insgesamt liegt bei fast 90 Prozent. Bei einem „Durchbruch Inland“ sind zwei unterschiedliche Varianten untersucht worden, um zu verdeutlichen, wie sich die Standortentscheidung für die Produktion einer Systemkomponente, wie z.B. dem Gaserzeugungssystem, auf die regionale Verteilung auswirkt. Bei der Variante des Szenarios wurde angenommen, dass das Gaserzeugungssystem nicht in Deutschland hergestellt wird, sondern aus dem nahen europäischen Ausland zugekauft wird. Auf Grund des großen Wertanteils einiger weniger Komponenten wirkt sich eine solche Standortentscheidung in erheblichem Umfang auf die betroffenen Regionen aus.

Insgesamt wären leichte Zuwächse in Baden-Württemberg zu erwarten, wenn es zu einem Durchbruch im Inland kommt. Dabei besteht jedoch die Gefahr, dass Teilbereiche der Produktion ins europäische Ausland verlagert werden. Für das Szenario Konkurrenz zeigen sich gegenüber dem herkömmlichen Antriebsstrang Verschiebungen ins Ausland. Baden-Württemberg ist in besonderem Umfang von dieser Verschiebung betroffen. Der Anteil reduziert sich von über 40 Prozent auf unter 20 Prozent. Auch für alle anderen Bundesländer zeigen sich Verlagerungen ins Ausland, diese verteilen sich jedoch auf mehrere Länder.

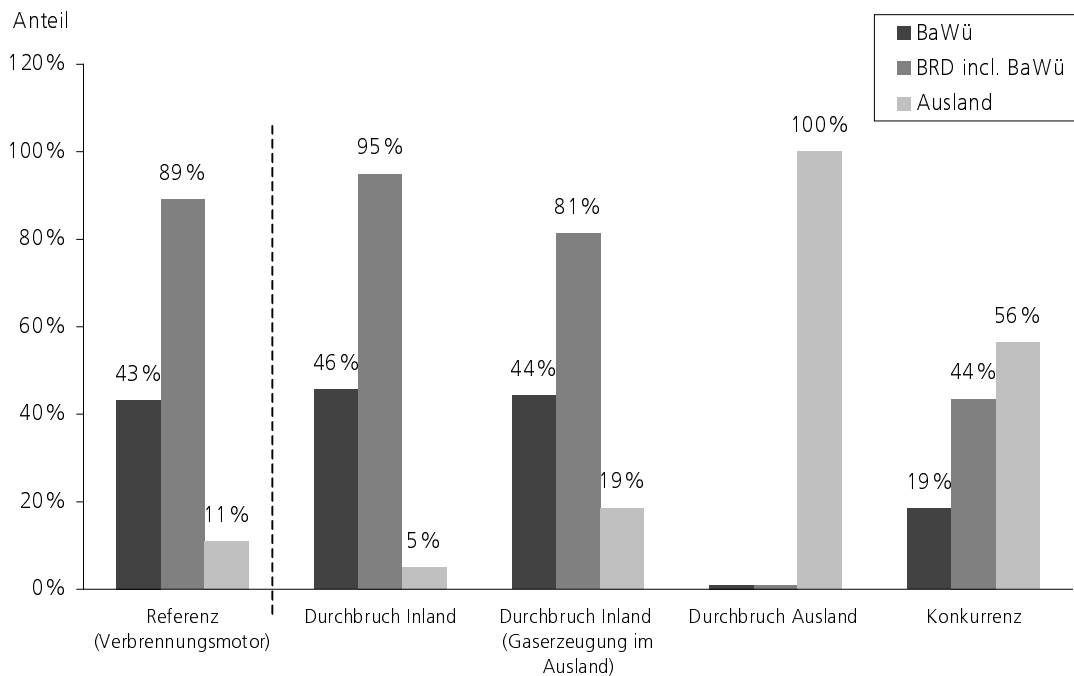


Abbildung 4-3: Regionale Aufteilung der Zulieferstruktur (Wertschöpfung in DM) eines Brennstoffzellen-Antriebs für unterschiedliche Szenarien im Vergleich zum Verbrennungsmotor (Referenz)<sup>2</sup>

Auf Grund der dargestellten regionalen Aufteilung der Zulieferstruktur (Abbildung 4-3) und den veränderten Umsatzvolumina für einzelne Komponenten des Antriebsstrangs (Abbildung 4-2) ergibt sich in Baden-Württemberg eine Veränderung der Wertschöpfungsvolumina für einzelne Komponenten (Abbildung 4-4). Es zeigt sich, dass es bei einem „Durchbruch Inland“ zu Produktionsverlusten beim Verbrennungsmotor kommen wird. Es

<sup>2</sup> Es wird nur die Pkw-Produktion in Baden-Württemberg berücksichtigt. Zulieferungen aus Baden-Württemberg an Automobilhersteller in anderen Bundesländern werden nicht berücksichtigt.

bestehen jedoch gute Chancen für zusätzliche Wertschöpfungsvolumina bei der Herstellung des Stacks, des Kompressors und der Fahrzeugelektrik.

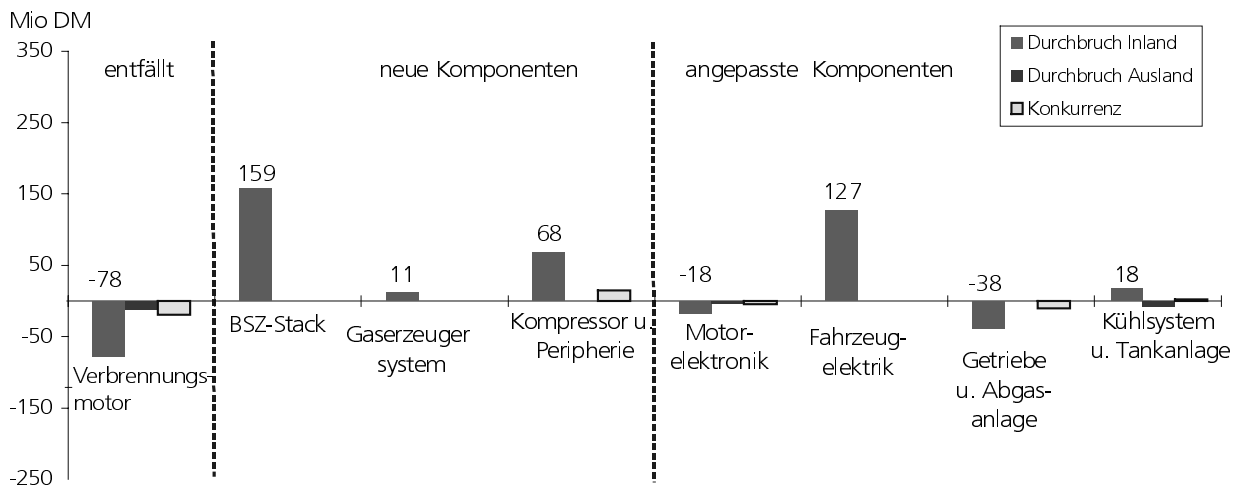


Abbildung 4-4: Anteil Baden-Württembergs an den veränderten Wertschöpfungsvolumina einzelner Komponenten des Antriebs-systems

Abbildung 4-3 stellt die regionale Zulieferstruktur für einen einzelnen Antriebsstrang dar. Bei der Darstellung der absoluten Werte (Abbildung 4-5) wird zusätzlich berücksichtigt, dass die Kosten eines Brennstoffzellen-Antriebs höher sind als die eines herkömmlichen Verbrennungsmotors und in Abhängigkeit vom technischen Fortschritt eine unterschiedliche Marktdurchdringung anzunehmen ist (Stückzahlen für die einzelnen Szenarien siehe Anhang). Es wurde jeweils berücksichtigt, welcher Anteil der Produktion von Pkw mit Verbrennungsmotor im Vergleich zum Referenz-Szenario verdrängt wird. Die Modellrechnung zeigt unabhängig vom absoluten Niveau der Pkw-Produktion in Deutschland, wie sich bei den angenommenen Produktionszahlen und Zulieferstrukturen für die unterschiedlichen Szenarien die Produktionswerte in den einzelnen Regionen verändern.

Bei einem „Durchbruch im Inland“ ist eine erhebliche Steigerung der Produktion in Baden-Württemberg zu erwarten. Die dargestellten Werte beziehen sich auf eine Produktion von 250.000 Pkw mit Brennstoffzellen-Antrieb (Durchbruch Inland gegenüber 200.000 Pkw Referenz) in Deutschland, die Zuwächse bzw. Verluste der einzelnen Regionen reduzieren sich bei geringeren Stückzahlen ungefähr proportional. Die dargestellten Effekte verstärken sich, wenn bei den Zuwächsen gegenüber dem Referenz-Szenario nicht nur der Antriebsstrang sondern auch alle weiteren Komponenten des Pkw berücksichtig

sichtigt werden. Insgesamt liegt der Wert dann um einen Faktor 1,4 höher als dargestellt. Wiederum wird anhand der dargestellten Variante deutlich, dass die Standortentscheidungen für die Produktion einzelner Systemkomponenten für die regionalen Auswirkungen von großer Bedeutung sind (siehe Durchbruch Variante „Gaserzeugungssystem aus dem Ausland“ im Vergleich zu Durchbruch).

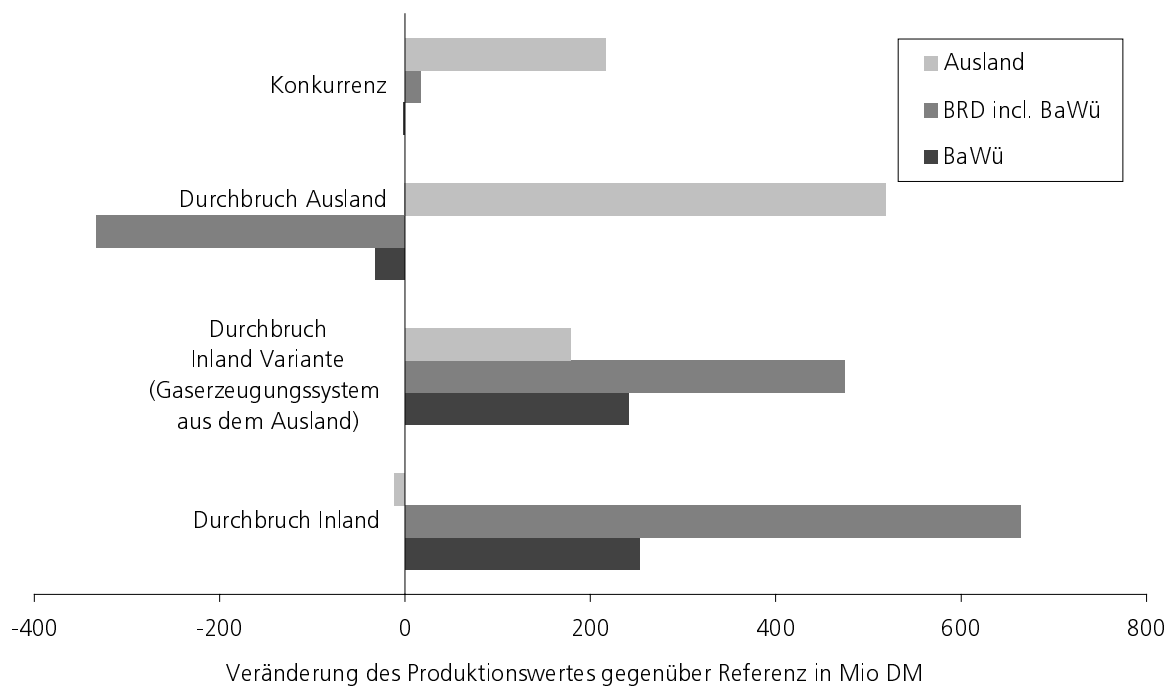


Abbildung 4-5: Veränderungen des Produktionswertes von Antriebssträngen in Baden-Württemberg, Deutschland und dem Ausland für unterschiedliche Szenarien der BZ-Verbreitung

Die angenommenen Produktionszahlen für Pkw mit Brennstoffzellen-Antrieb liegen bei den beiden Szenarien „Durchbruch Ausland“ und „Konkurrenz“ unterhalb von 100.000. Unter dieser Voraussetzung werden deutliche Zugewinne im Ausland erwartet. Die Produktion in Baden-Württemberg entwickelt sich bei den Szenarien unterschiedlich: Während sie bei einem Durchbruch im Ausland leicht zurückgeht, bleibt sie beim Szenario „Konkurrenz“ auf dem gleichen Niveau wie beim Referenz-Szenario. Die Zugewinne bei einem inländischen Durchbruch fallen zum großen Teil in Baden-Württemberg an. Dagegen verteilen sich die Produktionsrückgänge bei einem ausländischen Durchbruch gleichmäßiger auf alle Bundesländer. Die negativen Auswirkungen auf den Produktionswert in Deutschland und Baden-Württemberg bei einem „Durchbruch Ausland“ verstärken sich, wenn bei den

Importen dieses Szenarios nicht nur der Antriebsstrang, sondern auch alle weiteren Komponenten der verdrängten Automobilproduktion berücksichtigt werden (ca. Faktor drei).

Auch andere Bundesländer können von einem Durchbruch des Brennstoffzellen-Antriebs profitieren. Die Aufteilung der potentiellen Zugewinne auf die einzelnen Länder hängt in erster Linie von der Standortentscheidung für die Produktion der wichtigsten Systemkomponenten ab. Da sich die Produktion in Sektoren verlagert, die traditionell eher in anderen Ländern angesiedelt sind, kommt der Flexibilität der baden-württembergischen Industrie eine entscheidende Rolle zu. Voraussetzung für dieses Szenario sind neben einem technischen Durchbruch in Baden-Württemberg, der eine wirtschaftliche Serienproduktion ermöglicht, eine gesetzliche Begünstigung dieses Antriebsstrangs und der Aufbau der entsprechenden Infrastruktur zur Betankung.

Wenn es in Deutschland nicht zu einem Durchbruch kommt, ist es vorstellbar, dass dieser Durchbruch im Ausland erfolgt. Bedingt durch die Importe von Pkw mit Brennstoffzellen-Antrieb, die in Deutschland hergestellte Fahrzeuge ersetzen, werden für dieses Szenario Rückgänge der deutschen Produktion erwartet. Wenn es weder im Ausland noch in Deutschland zu einem Durchbruch des Brennstoffzellen-Antriebsstrangs kommt (Konkurrenz-Szenario), wird eine langsame Verbreitung dieses Antriebsstrangs angenommen, der sich hauptsächlich auf Fahrzeuge der gehobenen Klasse konzentriert (u.a. Flottenfahrzeuge). Produktionszuwächse werden bei diesem Szenario nur im Ausland erwartet, während die inländische Produktion gering beeinflusst wird. Dem Risiko des ausbleibenden Durchbruchs bei einem starken Engagement für diese Technologie steht das Risiko gegenüber, dass der Lead-Markt in einem anderen Land entstehen wird und damit auch die Massenproduktion langfristig außerhalb Deutschlands aufgebaut wird.

## 5 Literatur

- Boutellier, R.; Böttcher, S.: Technologien gemeinsam entwickeln. In: wissensmanagement 3, 1999
- Feige, A.; Goes, F.: Wandel in der Wertschöpfungskette, Automobilproduktion 4, 1999
- Gossen, F.; Grahl, M.: Vergleich von Brennstoffzellen- und weiteren zukünftigen Antrieben hinsichtlich Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motortechnik 1999

- Höhlein, B.; Nitsch, J.; Wagner, U.: Brennstoffzellen-Studie, Ganzheitliche Systemuntersuchung zur Energiewandlung durch Brennstoffzellen. Abschlussbericht, 1998
- Höhlein, B.; Stolten, D.: Pkw-Antrieb mit Verbrennungsmotor und Brennstoffzellen im Vergleich. 2. Euroforum-Fachtagung Brennstoffzellen, Stuttgart, 1998
- Kalkhammer, F.; Prokopius, P.; Roan, V.; Voecks, G.; Status and Prospects of fuel cells as automobile engines. A report of the fuel cell technical advisory panel. California, 1998
- Kolke, R.: Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastung – Brennstoffzellenfahrzeuge. Abschlussbericht Umweltbundesamt Luftreinhalte im Verkehr, Berlin, 1999
- KPMG: Estimated Economic Impacts and Markets of Fuel Cells in British Columbia, British Columbia, 1996
- Maruo, K.: Strategic Alliances for the Development of Fuel Cell Vehicles, Universität Göteborg, 1998
- Nitsch, J.; Dienhart, H.: Die Marktsituation von Brennstoffzellen. FVS-Jahrestagung 1999, Ulm, 1999
- Nitsch, J.; Dienhart, H.: Konkurrenzsituation und Marktchancen von Brennstoffzellen-Systemen. Sechstes OTTI-Fachforum „Einsatz von Brennstoffzellen“, Leipzig, 1999
- Shell: Mehr Autos – weniger Emissionen. Szenarien des Pkw-Bestands und der Neuzulassungen in Deutschland bis zum Jahre 2020. Hamburg, 1999
- Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland 1998, Wiesbaden 1998
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Statistische Berichte Baden-Württemberg. Reihe: Produzierendes Gewerbe. Verarbeitendes Gewerbe, Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden in Baden-Württemberg 1998, Stuttgart, 1999
- Verband der Automobilindustrie e.V.: Die Automobilindustrie in Zahlen. <http://www.vda.de/zahlen/1zahlen.htm>, 07.07.1999
- Verband der Automobilindustrie e.V.: Auto 1998, Jahresbericht des VDA, Frankfurt am Main 1998

## 6 Anhang: Basisannahmen für die Berechnung der unterschiedlichen Szenarien

Tabelle 1A: Übersicht über die angenommenen Stückzahlen für die Produktion bei unterschiedlichen Szenarien

(in 1.000 Stück)	Durchbruch Inland		Durchbruch Ausland		Konkurrenz	
	D	BaWü	D	BaWü	D	BaWü
Aufteilung auf Bundesländer						
Referenz	200	120	200	120	200	120
Produktion von VM verdrängt durch BZ	200	120	100	20	50	30
Absatzsteigerungen durch BZ	50	30	0	0	0	0
Absatzsteigerungen durch Stacks		100	0	0	0	0
Summe Stacks		250		20		30
Summe Rest BZ		150		20		30
Summe BZ komplett	250	150	100	20	50	30
Verbleibende VM	0	0	100	100	150	90

Tabelle 2A: Basisannahmen für die Berechnung des Produktionswerts in Deutschland für unterschiedliche Szenarien

	Referenz	Durchbruch Inland	Durchbruch Inland Vari.	Durchbruch Ausland	Konkurrenz gesamt
Inland /Ausland Anzahl BZ		250.000	250.000	100.000	50.000
Anzahl Inland VM	200.000			100.000	150.000
Kosten für VM pro Stück	3.740 DM	0 DM	0 DM	3.740 DM	3.740 DM
Kosten für BZ pro Stück	0 DM	5.600 DM	5.600 DM	5.600 DM	8.400 DM
Anzahl Ausland BZ				100.000	
Summe Kosten	748 Mio DM	1.400 Mio DM	1.400 Mio DM	934 Mio DM	981 Mio DM
Anteil BaWü	43%	46%	44%		
Anteil BRD ohne BaWü	46%	49%	37%		
BRD incl. BaWü	89%	95%	81%	36%	70%
Anteil Importe	11%	5%	19%	64%	30%
Produktionswert BRD	666 Mio DM	1.329 Mio DM	1.139 Mio DM	333 Mio DM	682 Mio DM

Tabelle 3A: Basisannahmen für die Berechnung des Produktionswerts in Baden-Württemberg für unterschiedliche Szenarien

	Referenz	Durchbruch Inland	Durchbruch Inland Vari.	Durchbruch Ausland	Konkurrenz
Anzahl BZ-Stacks		250.000	250.000	20.000	30.000
BZ-Rest		150.000	150.000	20.000	30.000
Anzahl VM	120.000	0	0	100.000	90.000
Kosten BZ-Stack pro Stück		634 DM	634 DM	634 DM	951 DM
Kosten BZ-Rest pro Stück		4.966 DM	4.966 DM	4.966 DM	7.449 DM
Kosten VM pro Stück	3.740 DM			3.740 DM	3.740 DM
Produktionswert gesamt	449 Mio DM	903 Mio DM	90 Mio DM	486 Mio DM	589 Mio DM
Anteil BaWü	43%	49%	48%	33%	33%
Anteil BRD ohne BaWü	46%	46%	34%	35%	37%
Anteil Importe	11%	5%	17%	32%	30%
Produktionswert BaWü	194 Mio DM	447 Mio DM	436 Mio DM	162 Mio DM	192 Mio DM

## Modellrechnungen zu Beschäftigungswirkungen mit Hilfe der Input- Output-Analyse

### Kapitel 7

Bearbeiter: Stefan Vögele, ZEW

### Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>205</b>
<b>2</b>	<b>Die Input-Output-Analyse</b>	<b>205</b>
2.1	Grundlagen der Input-Output-Analyse	205
2.2	Input-Output-Analyse und Beschäftigungseffekte	208
2.3	Beschreibung der verwendeten Daten	209
<b>3</b>	<b>Beschäftigungseffekte für die drei Verbreitungsszenarien</b>	<b>210</b>
3.1	Vorgehensweise und Kurzbeschreibung der Szenarien	210
3.2	Vergleich Referenzszenario und Szenario „Durchbruch Inland“	211
3.3	Vergleich Referenzszenario und Szenario „Durchbruch Ausland“	214
3.4	Vergleich Referenzszenario und Szenario „Konkurrenz“	216
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>219</b>
<b>5</b>	<b>Literatur</b>	<b>220</b>
<b>6</b>	<b>Anhang</b>	<b>221</b>
6.1	Formale Beschreibung des verwendeten Modells (A)	221
6.2	Ergebnisse im Detail (B)	224

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2-1:	Auszug aus der Input-Output-Tabelle für Baden-Württemberg 1990 (Statistisches Landesamt 1997)	207
--------------	---	-----

## Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 3-1:	Beschäftigungseffekte der Umstellung auf den Brennstoffzellen-Antrieb beim „Durchbruch Inland“ für Baden-Württemberg	213
Abbildung 3-2:	Produktionseffekte der Umstellung auf den Brennstoffzellen-Antrieb beim „Durchbruch Inland“ für Baden-Württemberg	213
Abbildung 3-3:	Vergleich Referenzszenario und Szenario „Durchbruch Ausland“	215
Abbildung 3-4:	Produktionseffekte der Umstellung auf den Brennstoffzellen-Antrieb beim „Durchbruch Ausland“ für Baden-Württemberg	216
Abbildung 3-5:	Vergleich Referenzszenario und Szenario „Konkurrenz“	217
Abbildung 3-6:	Produktionseffekte der Umstellung auf den Brennstoffzellen-Antrieb im Szenario „Konkurrenz“ für Baden-Württemberg	218

## 1 Einleitung

Auf Grund der Lieferverflechtung mit anderen Wirtschaftsbereichen hat die Produktion von Fahrzeugen bzw. von Fahrzeugkomponenten nicht nur direkt, sondern auch indirekt Auswirkungen auf die Beschäftigung. Ein Standardinstrument, um die durch ökonomische Aktivitäten insgesamt, das heißt auf allen Produktionsstufen, induzierten Beschäftigungseffekte erfassen zu können, ist die Input-Output-Analyse. Dieses Instrument soll auch innerhalb des Projektes „Innovationsprozess vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle – Chancen und Risiken für die baden-württembergische Industrie“ zur Abschätzung möglicher Beschäftigungseffekte eingesetzt werden.

Im Folgenden werden die Grundzüge der Input-Output-Analyse erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse der einzelnen Berechnungen dargestellt und erläutert.

## 2 Die Input-Output-Analyse

### 2.1 Grundlagen der Input-Output-Analyse

Um eine Input-Output-Analyse durchführen zu können, müssen Input-Output-Tabellen vorliegen. In diesen werden die zwischen den verschiedenen Wirtschaftsbereichen bzw. Wirtschaftssubjekten vorliegenden Lieferstrukturen erfasst. Ein Beispiel zeigt die Tabelle 2-1.

Aus den einzelnen Feldern einer Input-Output-Tabelle wird deutlich, welcher Wirtschaftsbereich welche Güter bzw. Gütergruppen erhält. Aus den Spalten ist ersichtlich, welche Güter in welchem Umfang zur Produktion eingesetzt werden. Die Spalten spiegeln entsprechend die Produktionsstrukturen der einzelnen Wirtschaftsbereiche wider.

So geht aus der Input Output Tabelle für Baden-Württemberg hervor, dass 1990 im Fahrzeugbau in Baden-Württemberg insgesamt Güter im Wert von ca. 49 Mrd. DM eingesetzt wurden. Vom Wirtschaftsbereich „Elektrotechnik“ bezog der Fahrzeugbau Güter im Wert von 1,6 Mrd. DM. Güter im Wert von 2,5 Mrd. DM lieferte der Wirtschaftsbereich „Eisen, NE-Metalle, Gießereien“. Der Fahrzeugbau selbst stellte für seine eigene Produktion in Baden-Württemberg Güter im Wert von 9,9 Mrd. DM her. Aus der heimischen Produktion stammten insgesamt Güter im Wert von 26 Mrd. DM. Der Rest wurde aus dem Ausland (ca. 9 Mrd. DM) bzw. aus den anderen Bundesländern (ca. 14 Mrd. DM) importiert. Die vom Fahrzeugbau produzierten Güter wurden zu 67 Prozent exportiert. Der Rest (24 Mrd. DM) verblieb in Baden-Württemberg.

Auch die Produktionsstruktur der anderen Wirtschaftsbereiche sowie die Verwendung der von ihnen produzierten Güter ist aus den Input-Output-Tabellen ersichtlich. So geht aus der Input-Output-Tabelle für Baden-Württemberg hervor, dass der Wirtschaftsbereich „Elektrotechnik“ 1990 vom Wirtschaftsbereich „Eisen, NE-Metalle, Gießereien“ Güter im Wert von 1,2 Mrd. DM bezog. Dieser wiederum setzte Güter im Wert von ca. 0,5 Mrd. DM vom Sektor „Energie, Bergbau“ für seine Produktion ein.

Durch die explizite Darstellung der Verwendung und Produktionsstrukturen stellen Input-Output-Tabellen eine statistische Grundlage dar, um Güterströme verfolgen zu können. Neben den Vorleistungen, die direkt zur Produktion eines bestimmten Gutes verwendet werden, liefern die Input-Output-Tabellen auch Informationen über vorgelagerte Produktionsstufen.

Aufbauend auf Input-Output-Tabellen entwickelt W. Leontief (1941) ein einfaches mathematisches Modell, mit dem berechnet werden kann, welche Güter direkt und indirekt für die Produktion eines bestimmten Gutes benötigt werden (siehe Anhang A). Das Modell beruht auf der Annahme, dass die Nachfrage nach Vorleistungen in einem konstanten Verhältnis zum produzierten Output steht. Im obigen Beispiel bedeutet dies, dass der Fahrzeugbau für die Produktion von Gütern im Wert von 1 Mio. DM stets Güter im Wert von ca. 22.000 DM vom Wirtschaftsbereich „Elektrotechnik“ benötigt. Dieser wiederum benötigt für die Erzeugung einer Mio. DM seines Output Güter im Wert von 23.000 DM vom Wirtschaftsbereich „Eisen, NE-Metalle, Gießereien“. Indirekt werden somit für den Fahrzeugbau Güter vom Wirtschaftsbereich „Eisen, NE-Metalle, Gießereien“ im Wert von 506 DM eingesetzt. Da auch der vom Wirtschaftsbereich „Eisen, NE-Metalle, Gießereien“ Güter von anderen Sektoren benötigt, gehen noch andere Produkte indirekt in die Produktion von Fahrzeugen ein.



Mittels des Verfahrens der Matrizenmultiplikation können die mit der Produktion eines Gutes verbundenen Güterströme aufsummiert werden. Durch die Vorgabe einer bestimmten Nachfrage können dadurch die durch die entsprechende Nachfrage induzierten direkten und indirekten ökonomischen Effekte erfasst werden.

## 2.2 Input-Output-Analyse und Beschäftigungseffekte

Wie beschrieben, liefert ein Input-Output-Modell Informationen, welche Güter in welcher Menge direkt bzw. indirekt in ein anderes Gut eingehen. Liegen Informationen vor, wie viele Beschäftigte in den einzelnen Wirtschaftsbereichen jeweils für die Produktion eines Gutes benötigt werden, so können mit der Input-Output-Analyse die direkt und indirekt durch die Nachfrage nach einem bestimmten Gut induzierten Beschäftigungseffekte erfasst werden.

Ein um Beschäftigungskoeffizienten erweitertes Input-Output-Modell kann insbesondere für

- die Analyse der durch technischen Wandel ausgelösten Betriebseffekte, d.h. von Effekten, die auf einer Veränderung der Vorleistungsstruktur beruhen,
- der Analyse von Investitionseffekten, d.h. für die Analyse der volkswirtschaftlichen Auswirkungen von Veränderungen in der Investitionsnachfrage,
- die Analyse von Budgeteffekten, d.h. für die Erfassung der durch Veränderungen in der Einkommens- bzw. Budgetstruktur induzierten Effekte,
- und für die Analyse von Außenhandelseffekten, d.h. für die Analyse der Auswirkungen von Veränderungen in der Import- bzw. Exportstrukturen

eingesetzt werden. Beim Einsatz eines Input-Output-Modells für diese Fragestellungen ist zu beachten, dass auf Grund des Fehlens von Preis- und Substitutionselastizitäten die neuen Vorleistungs-, Einkommens- bzw. Budget- und Außenhandelsstrukturen (zu mindestens im einfachen Standardmodell) vorgegeben werden müssen.

Bei der Interpretation der mit einem einfachen Input-Output-Modell ermittelten Beschäftigungseffekten ist zu beachten, dass es sich bei dem Modell zugrunde liegenden Beschäftigungs- bzw. Vorleistungskoeffizienten stets um Durchschnittswerte handelt (vgl. Hohmeyer et al. 1998:46).

Außerdem ist die Annahme des konstanten Verhältnisses zwischen Inputfaktoren und Output zu beachten. Skaleneffekte und Ähnliches können entsprechend nicht innerhalb des Modells berücksichtigt werden.

Trotz dieser Einschränkungen wurde der von Leontief (1941) entwickelte Ansatz zu einem Standardinstrument für die Erfassung der durch ökonomische Aktivitäten induzierten Beschäftigungseffekt. Auch in Baden-Württemberg hat der Einsatz der Input-Output-Analyse eine (relativ) lange Tradition. Zu nennen sind hierbei unter anderem die Arbeiten von Münzenmaier (1984, 1988, 1993) und Kaiser (1995), die einen solchen Ansatz unter anderem zur Analyse der Abhängigkeiten baden-württembergischer Arbeitsplätze vom Automobilbau verwendet haben.

### 2.3 Beschreibung der verwendeten Daten

Baden-Württemberg ist das einzige Bundesland, für das in regelmäßigen Abständen Input-Output-Tabellen erstellt werden (vgl. Vögele/Nelissen 1999:17). Die neueste Tabelle liegt für das Jahr 1990 vor. Wie Untersuchungen (beispielsweise Hohmeyer et al. 1998) zeigen, ändern sich die Produktionsstrukturen im Zeitablauf nur sehr langsam. Die Tabelle für 1990 kann daher als Anhaltspunkt für die Abschätzung der durch ökonomische Aktivitäten induzierten sektoralen Produktionswerte dienen.

Da sich im Zeitablauf der Einsatz von Arbeit in den einzelnen Wirtschaftsbereichen auf Grund des technischen Fortschritts deutlich geändert hat, sollten möglichst aktuelle Beschäftigungskoeffizienten verwendet werden. Eine Aktualisierung der Koeffizienten über 1994 hinaus ist für Baden-Württemberg auf Grund von Veränderungen in den amtlichen Statistiken (Umstellung auf die Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 1993) ohne die Hilfe des Statistischen Landesamtes bzw. ohne neu strukturierte Input-Output-Tabellen nicht möglich (vgl. Statistisches Landesamt 1999b:1). Für die Aktualisierung der Daten auf das Jahr 1994 wurde ausschließlich auf Veröffentlichungen des Statistischen Landesamtes mit Angaben über die Entwicklung des Umsatz und der Beschäftigung in den einzelnen Wirtschaftsbereichen zurückgegriffen (z.B. Statistisches Landesamt 1999a). Grundsätzlich sind die Input-Output-Tabellen von Baden-Württemberg nach folgenden 27 Produktionsbereichen gegliedert (siehe auch Tabelle 2-1).

Die Gliederung nach diesen Sektoren wurde auch in dem erstellten Input-Output-Modell beibehalten. Zu beachten ist, dass es sich bei allen Angaben aus den Input-Output-Tabellen um Durchschnittswerte handelt. Im Einzelfall können sich unternehmensspezifische Strukturen deutlich von diesen unterscheiden. Mit entsprechender Vorsicht sind die Ergebnisse zu interpretieren.

### 3 Beschäftigungseffekte für die drei Verbreitungsszenarien

Im Folgenden werden mittels eines um Beschäftigungskoeffizienten erweiterten Input-Output-Modell die Auswirkungen des Innovationsprozesses vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzellen-Antrieb auf Baden-Württemberg untersucht. Hierzu werden verschiedene Szenarien einem Referenzszenario gegenübergestellt. Eine ausführliche Beschreibung der Szenarien wurde oben bereits in den Kapiteln 2 und 6 gegeben.

Im Vordergrund der Berechnungen stehen die durch den Innovationsprozess ausgelösten Produktions- und Einkommenseffekte sowie die Auswirkungen von Standortverlagerungen der Produktionsstätten für Systemkomponenten. Die Einkommenseffekte werden hierbei auf Basis der Nachfragestrukturen der privaten Haushalten bzw. der Investitionsnachfrage von 1990 auf die einzelnen Wirtschaftsbereiche berechnet.

Nicht beachtet werden Investitionseffekte, da angenommen wird, dass entsprechende Investitionsmaßnahmen im Rahmen der herkömmlichen Ersatzmaßnahmen erfolgen.

#### 3.1 Vorgehensweise und Kurzbeschreibung der Szenarien

In der Bundesrepublik werden pro Jahr etwa 5 Mio. Pkw produziert, davon fast 20 Prozent in Baden-Württemberg. In den Szenarien wird unterstellt, dass maximal die Herstellung von 200.000 Pkw-Antriebsstränge mit Verbrennungsmotor in Deutschland (davon 120.000 in Baden-Württemberg) durch die neue Technik Brennstoffzelle ersetzt werden. Die Input-Output-Analyse wird deshalb nur für diesen Ausschnitt der Produktion durchgeführt. Sie gibt also letztlich die Veränderung der Beschäftigung in den drei Szenarien durch den Brennstoffzelleneinsatz an. Veränderungen des Produktionsvolumens, die durch andere Faktoren ausgelöst werden bleiben unberücksichtigt. Insbesondere muss der mögliche Mehr- oder Minderabsatz von vollständigen Fahrzeugen zusätzlich berücksichtigt werden.

Stellvertretend für die Inputstruktur des Antriebsstrangs mit Verbrennungsmotor, wurde die Inputstruktur für den Antriebsstrang eines A-Klasse-Fahrzeugs von DaimlerChrysler untersucht. Hinsichtlich der Sektorstruktur für den Antriebsstrang-Verbrennungsmotor können sich bei anderen Fahrzeugen und Herstellern geringe Abweichungen ergeben, da insbesondere die Entscheidung über Eigenfertigung und Fremdfertigung unterschiedlich ausfallen kann und die Zulieferungen aus dem Ausland von der Zulieferverflechtung

des Unternehmens abhängen. Die Entscheidung über Eigenfertigung oder Fremdfertigung kann zu einer Verschiebung zwischen Maschinenbau und Fahrzeugindustrie führen, diese wirkt sich jedoch nicht auf die Summe der Beschäftigungseffekte aus, da bei beiden Sektoren der gleiche Beschäftigungsfaktor angenommen wird. Der Zulieferanteil aus dem Ausland liegt bei dem untersuchten Fahrzeug des Referenzszenarios mit ca. 10 Prozent relativ niedrig. Das angenommene Beschäftigungsniveau des Referenzszenarios stellt daher eine maximale Annahme dar.

Dem Referenzszenario mit einer Produktion von 200.000 (BRD) bzw. 120.000 (Baden-Württemberg) Verbrennungsmotoren werden drei Alternativszenarien gegenübergestellt. Im Szenario „Durchbruch Inland“ wird unterstellt, dass der Brennstoffzellen Antrieb teilweise den Verbrennungsmotor verdrängt, wobei Baden-Württemberg der technischer Marktführer beim Brennstoffzellen-Antrieb wird.

Im Szenario „Durchbruch Ausland“, wird dagegen angenommen, dass nicht in Deutschland bzw. Baden-Württemberg die wirtschaftliche Großserienfertigung erfolgt sondern in Japan oder den USA. Dies hat zu Folge, dass ein Teil der inländischen Produktion von Pkw mit Verbrennungsmotoren durch importierte Pkw mit Brennstoffzellen verdrängt wird. Die detaillierten Untersuchungen beschränken sich auf die Veränderung der Produktionsvolumina beim Antriebsstrang, da bei einer Ausweitung der Betrachtungen auf das gesamte Fahrzeug die Veränderungen in der Vorleistungsstruktur bei einer Modifizierung des Antriebsstrangs überdeckt werden würden.

Im Szenario „Konkurrenz“ wird unterstellt, dass es in Deutschland zu keiner wirtschaftlichen Großserienfertigung der wichtigsten Komponenten des Brennstoffzellen-Antrieb kommt. Im Vergleich zu den anderen Szenarien liegen die Kosten eines Brennstoffzellen-Antriebs um den Faktor 1.5 höher.

### **3.2 Vergleich Referenzszenario und Szenario „Durchbruch Inland“**

Im Szenario „Durchbruch Inland“ wird unter anderem angenommen, dass in Baden-Württemberg 150.000 Brennstoffzellen-Antriebe anstelle von 120.000 Verbrennungsmotoren gebaut werden. Begründet wird die Absatzsteigerung mit der unterstellten technischen Vorreiterrolle von Baden-Württemberg, die unter anderem zu einer Steigerung des Marktanteils in den NAFTA-Staaten führen könnte. Diese Absatzsteigerungen wirken sich nicht nur auf den Antriebsstrang sondern auch auf alle weiteren Komponenten des Automobils aus. In der durchgeführten Input-Output-Analyse wird nur der Antriebsstrang berücksichtigt, da für alle weiteren Komponenten keine Sektorzuordnung für den Input vorliegt. Die gesamten Beschäftigungseffekte unter Berücksichtigung der aller Pkw-Komponenten wird in etwa um einen Faktor 1,4 höher geschätzt als die dargestellten Beschäftigungseffekte, die sich ausschließlich

durch den Antriebsstrang ergeben. Die Sektoraufteilung dieser zusätzlichen Beschäftigungseffekte entspricht der heutigen Sektorstruktur dieser Komponenten und wird daher nicht weiter untersucht.

Da gegenüber dem Referenzszenario weniger Teile des Antriebsstrangs vom Fahrzeugbau selbst produziert werden, sinkt in diesem Sektor die Beschäftigung (siehe Abbildung 3-1 bzw. Anhang B). Sektoren wie beispielsweise „Elektrotechnik“, „EBM Waren“, „Stahl und Maschinenbau“ und „Eisen, NEMetalle, Gießereien“ profitieren dagegen von der Umstellung. In diesen Sektoren steigt sowohl die Produktion als auch die Beschäftigung an (siehe Abbildung 3-2).

Auf Grund der unterstellten Lieferverflechtungen wirkt sich die Produktion von Brennstoffzellen anstelle von Verbrennungsmotoren auch positiv auf die Beschäftigung in den anderen Sektoren aus. Im Vergleich zu den direkten Effekten fallen die indirekten Beschäftigungseffekte, d.h. die Effekte, die durch eine veränderte Nachfrage nach Vorleistungen erfolgen relativ gering aus. Da sowohl der Fahrzeugbau als auch die anderen Sektoren in Baden-Württemberg sehr stark die Leistungen des Sektors „Sonstige marktbestimmte Dienstleistungen“<sup>1</sup> in Anspruch nehmen, werden in diesem Sektor auffällig hohe Beschäftigungseffekte induziert.

Beeinflusst wird die Beschäftigung ebenfalls durch die höheren Kosten des Brennstoffzellen-Antriebs. Die höheren Kosten führen dazu, dass die Käufer der entsprechend ausgerüsteten Fahrzeuge einen größeren Teil ihres Budget jetzt für den Kauf eines Fahrzeuges aufwenden müssen. Durch die Mehrkosten steht weniger Geld für andere Investitions- bzw. Konsumgüter zur Verfügung. Dies hat einen negativen Einfluss auf die Nachfrage nach den entsprechenden Gütern und dadurch auch auf die Beschäftigung in den betroffenen Sektoren.

Insgesamt steigt im Szenario „Durchbruch Inland“ die Beschäftigung in Baden-Württemberg gegenüber dem Referenzszenario um 1.549 Beschäftigte. Die Produktion nimmt hierbei in der Summe um 289 Mio. DM zu.

<sup>1</sup> Zu den „Sonstigen marktbestimmten Dienstleistungen“ zählen u.a. die Leistungen der unabhängigen Ingenieur- und Forschungsbüros, die Software-Entwicklung und -Betreuung sowie die Vermietung von Grundstücken und Anlagen (Münzenmaier 1988:517).

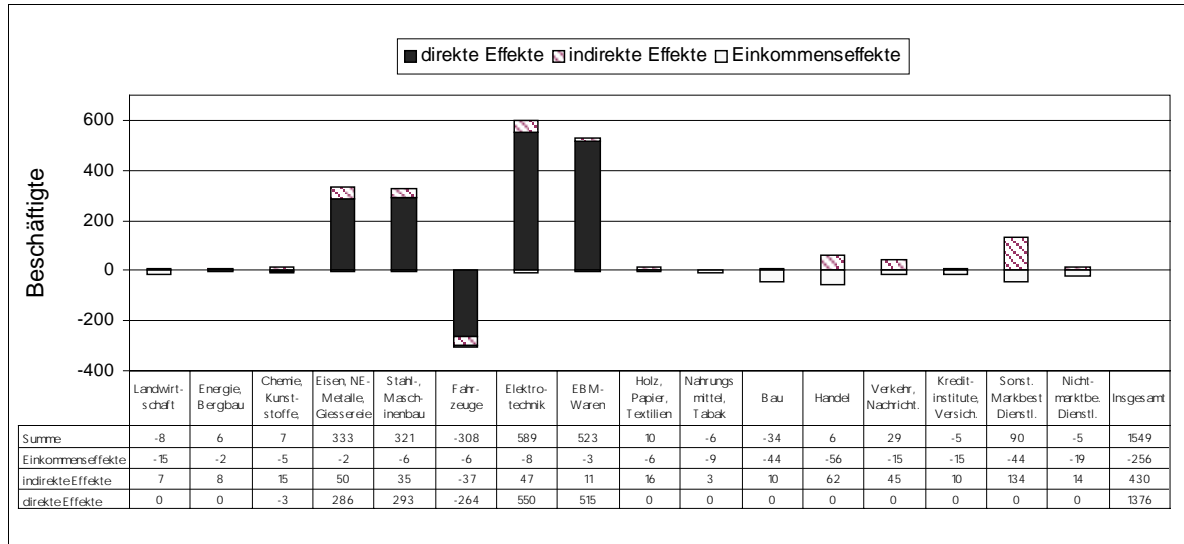


Abbildung 3-1: Beschäftigungseffekte der Umstellung auf den Brennstoffzellen-Antrieb beim „Durchbruch Inland“ für Baden-Württemberg

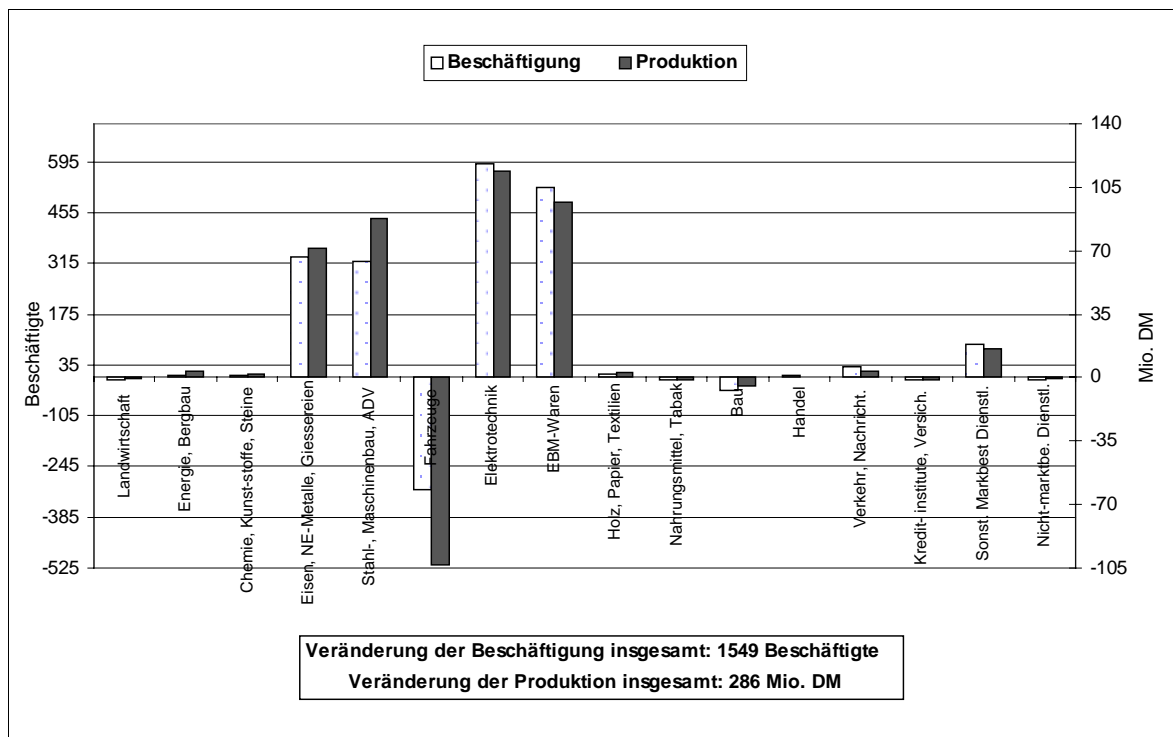


Abbildung 3-2: Produktionseffekte der Umstellung auf den Brennstoffzellen-Antrieb beim „Durchbruch Inland“ für Baden-Württemberg

Im gesamten Bundesgebiet kommt es im Szenario „Durchbruch Inland“ gegenüber dem Referenzszenario zu einem Anstieg der Beschäftigung um ca. 3.390 Beschäftigte<sup>2</sup>.

Direkt, d.h. durch Veränderungen in der Produktion des Antriebsstrangs, nimmt die Anzahl der Beschäftigten um 3.030 Beschäftigte zu. Weitere 1.860 Arbeitsplätze werden durch die Veränderungen in der Nachfrage nach den hierfür erforderlichen Vorleistungen induziert. Negativ wirken sich auf Bundesebene die höheren Preise aus: Die Veränderungen im Budget haben einen Rückgang der Beschäftigung um 1.500 Beschäftigte zur Folge.

Die Produktion liegt im Szenario „Durchbruch Inland“ in der Bundesrepublik insgesamt um ca. 580 Mio. DM über dem Referenzszenario: Direkt steigt die Produktion um 500 Mio. DM. Durch die Vorleistungsnachfrage werden Effekte in Umfang von ca. 370 Mio. DM induziert. Negativ wirkt sich wiederum der Einkommenseffekt aus (ca. 290 Mio. DM).

### 3.3 Vergleich Referenzszenario und Szenario „Durchbruch Ausland“

Das Szenario „Durchbruch Ausland“ unterstellt, dass das Ausland zum Marktführer im Bereich der Brennstoffzellen-Technologie wird. Die Brennstoffzellenproduktion findet entsprechend vorwiegend in der USA bzw. Japan statt. Die Importe der im Ausland produzierten Pkw mit Brennstoffzellen führen annahmegemäß zu einem Rückgang der inländischen Produktion von Pkw mit Verbrennungsmotoren. Hierdurch sinkt die Beschäftigung in den Sektoren, die Verbrennungsmotoren bzw. der Komponenten hergestellt haben.<sup>3</sup>

Grundsätzlich hat ein Rückgang der Produktion von Verbrennungsmotoren auch Auswirkungen auf andere Wirtschaftsbereiche. Am deutlichsten verringert sich hierbei die Beschäftigung im Fahrzeugbau. Vergleichsweise hoch fallen auch die negativen Beschäftigungseffekte in den Wirtschaftsbereichen „Chemie, Kunststoffe“, „Eisen, NE-Metalle, Gießereien“, „Elektrotechnik“ sowie dem Handel und den „Sonstigen marktbestimmten Dienstleistungen“ aus (siehe Abbildung 3-3 bzw. Anhang B).

Der negative Einfluss auf die Beschäftigung wird wiederum durch die höheren Kosten des Brennstoffzellen-Antriebs verstärkt.

2 Die Berechnung der Effekte für die Bundesrepublik erfolgt auf Basis der für das Jahr 1995 vorliegenden bundesdeutschen Input-Output-Tabellen.

3 Gleichzeitig sinkt auch die Beschäftigung in den Sektoren, die die übrigen Komponenten, d.h. alle Komponenten außer dem Antriebsstrang, der verdrängten Pkw herstellen. Diese werden jedoch in dieser Analyse nicht berücksichtigt.

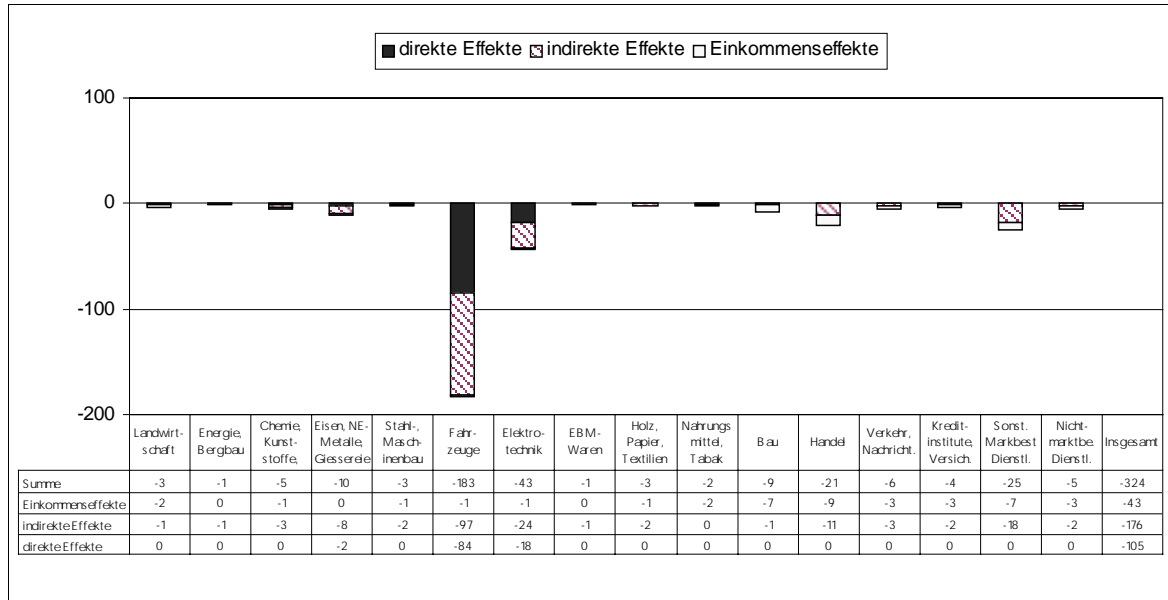


Abbildung 3-3: Vergleich Referenzszenario und Szenario „Durchbruch Ausland“

Im Vergleich zum Referenzszenario fallen im Szenario „Durchbruch Ausland“ in Baden-Württemberg insgesamt ca. 324 Arbeitsplätze weg. Bei einer Betrachtung des gesamten Produktionsvolumens über den Antriebsstrang hinaus, erhöht sich die Summe der negativen Beschäftigungseffekte etwa um den Faktor drei, wobei die Branchenzuordnung wesentlich von der dargestellten Zuordnung abweichen wird.

Die Umstellung auf den Brennstoffzellen-Antrieb führt im Fahrzeugbau zu einem Rückgang der produzierten Güter und Dienstleistungen um ca. 61 Mio. DM. In den anderen Sektoren sinkt die Produktion in der Summe um 25 Mio. DM (siehe Abbildung 3-4).

Die Markführerschaft des Auslands im Bereich der Brennstoffzellen-Technologie hat zur Folge, dass im gesamten Bundesgebiet die Anzahl der Beschäftigten um ca. 3.890 Beschäftigte sinkt. Die Anzahl der Beschäftigten, die für die Produktion des Antriebsstrangs eingesetzt werden, sinkt um ca. 1.140. Zu einem Verlust in Höhe von ca. 1.550 Arbeitsplätzen kommt es durch die Veränderungen in der Nachfrage nach den für die Produktion des Antriebsstrangs erforderlichen Vorleistungen. Hinzu kommen noch Einkommenseffekte, durch die die Beschäftigung um weitere 1.200 Beschäftigte sinkt.

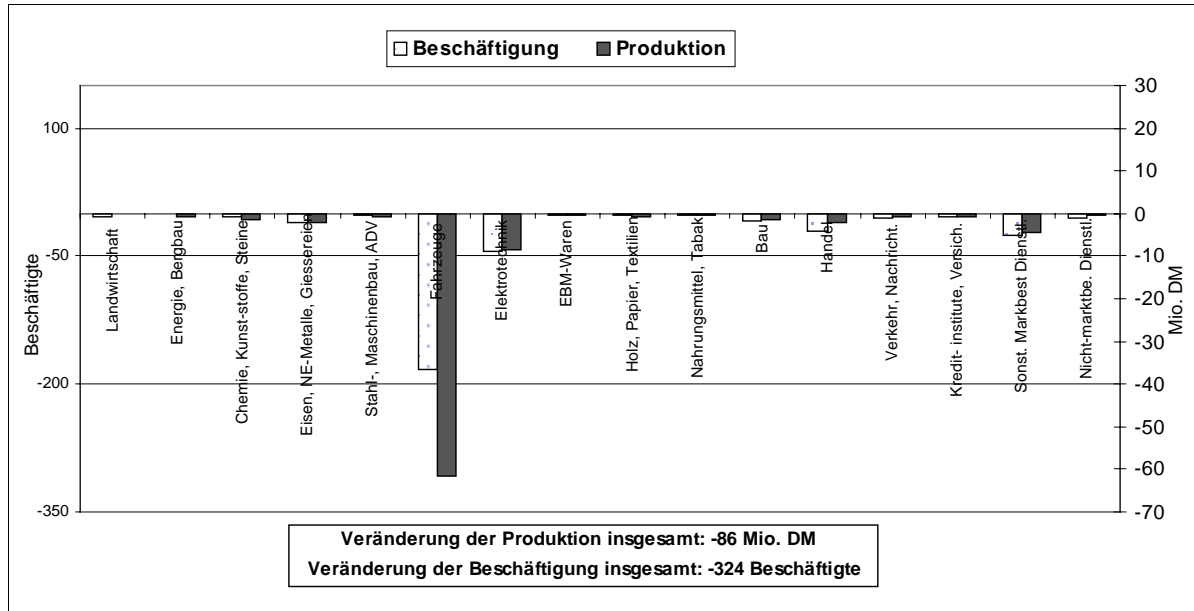


Abbildung 3-4: Produktionseffekte der Umstellung auf den Brennstoffzellen-Antrieb beim „Durchbruch Ausland“ für Baden-Württemberg

Gegenüber dem Referenzszenario verringert sich die Produktion im Szenario „Durchbruch Ausland“ in der Bundesrepublik insgesamt um ca. 890 Mio. DM. Zur einem Rückgang der Produktion um ca. 330 Mio. DM kommt es bei der Herstellung des Antriebsstrangs. Durch die geringere Nachfrage nach Vorleistung sinkt die Produktion in den anderen Wirtschaftsbereichen um weitere 330 Mio. DM.

Um weitere 230 Mio. DM sinkt die Produktion auf Grund von Veränderungen des zur Verfügung stehenden Budgets.

### 3.4 Vergleich Referenzszenario und Szenario „Konkurrenz“

Auch im Szenario „Konkurrenz“ fällt die Beschäftigung insgesamt niedriger aus als im Referenzszenario. Negativ auf die Beschäftigung wirkt sich vor allem der hohe Preis des Brennstoffzellen-Antriebs aus. Durch diesen verringert sich das für andere Konsum- bzw. Investitionszwecke zur Verfügung stehende Einkommen. Dies wiederum führt gegenüber dem Referenzszenario im Saldo zu einer Reduzierung der Beschäftigung um 174 Arbeitsplätze (siehe Abbildung 3-5 bzw. Anhang B).

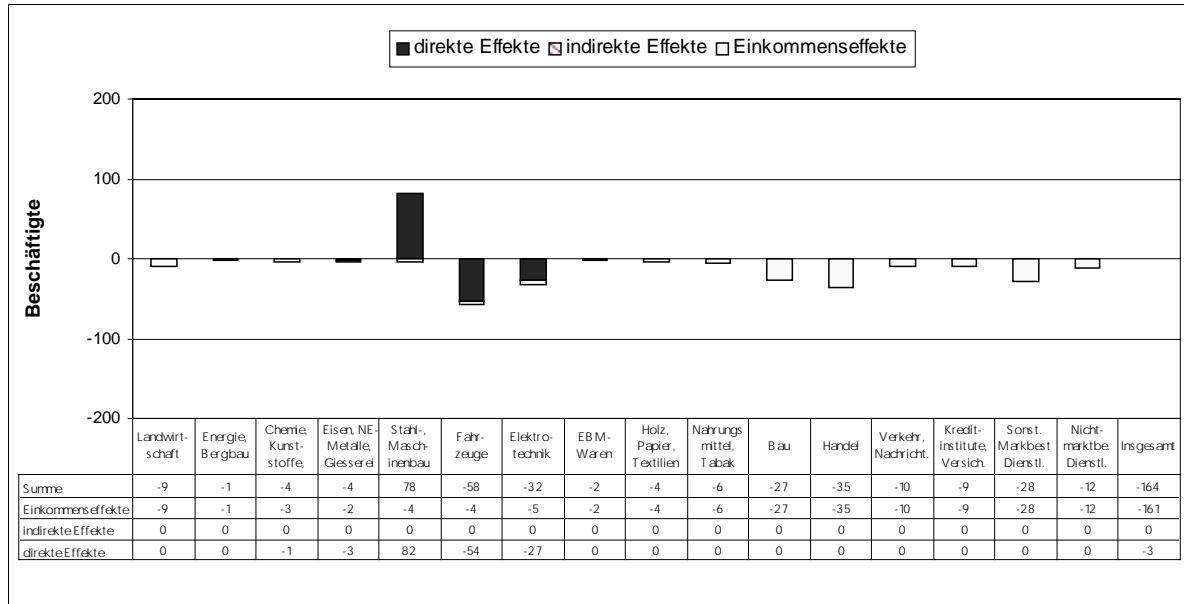


Abbildung 3-5: Vergleich Referenzszenario und Szenario „Konkurrenz“

Da im Konkurrenzszenario einige Systemkomponenten im Ausland produziert werden, kommt es zur Verlagerung von direkter und indirekter Beschäftigung ins Ausland und somit zu geringeren inländischen Beschäftigungszahlen als im Referenzszenario.

Zu positiven Beschäftigungseffekten kommt es lediglich im Sektor „Stahl-, Maschinenbau, ADV“. Vergleichsweise stark sinkt die Produktion und die Beschäftigung in den Wirtschaftsbereichen Fahrzeugbau und Elektrotechnik (siehe Abbildung 3-6). Die Effekte in den anderen Sektoren resultieren vorwiegend auf der Veränderung des Budgets der Unternehmen bzw. der privaten Haushalte.

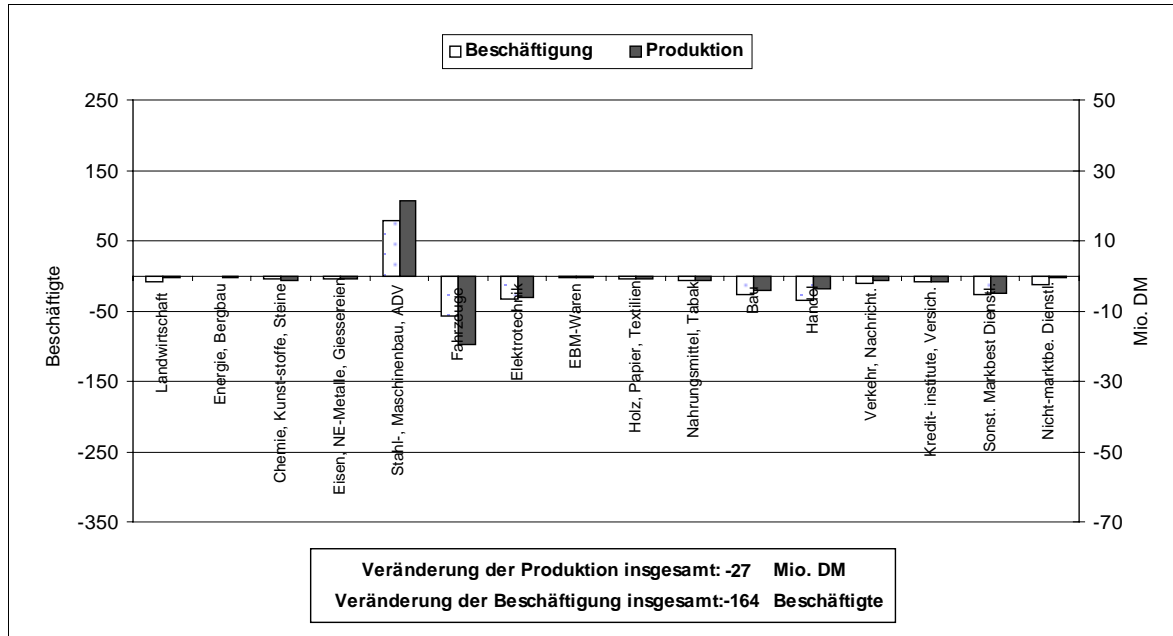


Abbildung 3-6: Produktionseffekte der Umstellung auf den Brennstoffzellen-Antrieb im Szenario „Konkurrenz“ für Baden-Württemberg

Im gesamten Bundesgebiet kommt es im KonkurrenzszENARIO gegenüber dem ReferenzszENARIO zu einem Rückgang der Beschäftigung um ca. 1.650 Beschäftigte. Der relativ hohe Rückgang beruht ausschließlich auf Budgetveränderungen. Ohne diese würde die Beschäftigung in der Produktion des Antriebsstranges und in den Wirtschaftsbereichen, die die Vorleistungen hierfür liefern, insgesamt um ca. 590 Beschäftigte steigen.

Die Produktion liegt im Szenario „Konkurrenz“ insgesamt um ca. 400 Mio. DM unter der Produktion im ReferenzszENARIO. Auch hier resultieren die negativen Effekte ausschließlich aus Budgeteffekten.

## 4 Zusammenfassung

Bei der Input-Output-Analyse handelt es sich um ein Instrument, mit dem außer den direkten Effekten auch die Effekte auf vorgelagerten Produktionsstufen erfasst werden können. Voraussetzung für den Einsatz einer Input-Output-Analyse ist das Vorliegen von Input-Output-Tabellen. Diese spiegeln die intersektorale Verflechtung einer Volkswirtschaft wider. Für Baden-Württemberg liegen nur relativ hoch aggregierte Input-Output-Tabellen vor. Da diese Tabellen die Grundlage zur Berechnung der Beschäftigungseffekte bilden, stellen die Ergebnisse der Berechnungen nur eine grobe Abschätzung nicht jedoch eine exakte Bestimmung der zukünftigen Beschäftigung dar. Hinzu kommen noch Probleme hinsichtlich der Aktualität der Datengrundlage, die unter anderem aus der derzeitigen Umstellung der Wirtschaftsstatistiken auf neue Systematiken beruhen. Des Weiteren ist zu beachten, dass bei der Input-Output-Analyse von konstanten Faktoreinsatzverhältnissen ausgegangen wird. Auch durch diese Annahme können die tatsächlich vorliegenden Produktionsstrukturen nur eingeschränkt widerspiegelt werden.

Der Vergleich verschiedener Szenarien mit einem Referenzszenario zeigt, dass lediglich im Szenario „Durchbruch Inland“, d.h. bei einer Großserienfertigung von Brennstoffzellen in Baden-Württemberg gegenüber dem Referenzszenario mit positiven Beschäftigungseffekten in Baden-Württemberg zu rechnen ist. In den anderen Szenarien kommt es im Vergleich zum Referenzszenario zu leichten Arbeitsplatzverlusten.

## 5 Literatur

- Hohmeyer, O., S. Vögele, R. Bräutigam und R. Finger (1998), EMI 2.0 - Erstellung eines disaggregierten Modells zur Analyse direkter und indirekter Wirkungen wirtschaftlicher Aktivitäten auf die Emissionen von Luftschadstoffen, Abwässern und Abfällen, Endbericht für das Umweltbundesamt, Mannheim.
- Kaiser, M. (1995): Zukunftschancen des Individualverkehrs und Rückwirkungen auf die wirtschaftliche Entwicklung des Landes. Baden-Württemberg in Wort und Zahl, Heft 12, S. 555-564.
- LEONTIEF, W. (1941): The Structure of American Economy 1919-1939. Cambridge.
- Münzenmaier, W. (1984): Zur Verflechtung des Automobilsektors mit andren Wirtschaftszweigen. Baden-Württemberg in Wort und Zahl, Heft 7, S. 211-215.
- Münzenmaier, W. (1988): Zur Abhängigkeit baden-württembergischer Arbeitsplätze vom Automobilbau. Baden-Württemberg in Wort und Zahl, Heft 12, S. 514-521.
- Münzenmaier, W. (1993): Zur Bedeutung des Automobilbaus für die Arbeitsplätze in Zulieferbereichen. Baden-Württemberg in Wort und Zahl, Heft 9, S. 334-337.
- Statistisches Landesamt (1997): Input-Output-Tabellen 1978-1990. Sonderdruck, Stuttgart
- Statistisches Landesamt (1999a): Lange Reihen zur demographischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklung 1950-1997. Diskettenpaket, Stuttgart.
- Statistisches Landesamt (1999b): Verarbeitendes Gewerbe, Bergbau und Gewinnung von Steine und Erden in Baden-Württemberg 1998. Stuttgart.
- Vögele, S und D. Nelissen (1999): Möglichkeiten und Grenzen der Erstellung regionaler Emittentenstrukturen in Deutschland - Das Beispiel Baden-Württemberg. ZEW-Dokumentation Nr. 99-03, Mannheim.

## 6 Anhang

### 6.1 Formale Beschreibung des verwendeten Modells (A)

Allgemein lässt sich somit folgende Identität aus den Input-Output-Tabellen ableiten:

$$X_i = \sum_{j=1} X_{ij} + Y_i \quad (1)$$

mit

$X_i$ : Brutton Produktionswerte des Sektors  $i$ ,

$X_{ij}$ : Güter, die Sektor  $j$  von Sektor  $i$  bezieht, um seinen Output produzieren zu können ,

$Y_i$ : Güter von Sektor  $i$ , die als Endnachfrage anfallen,

Als Endnachfrage wird hierbei der Teil des Outputs bezeichnet, der nicht als Vorleistung in einem Produktionssektor eingesetzt wird. Hierzu zählen unter anderem die Nachfrage der privaten Haushalte, die Nachfrage der Produktionssektoren nach Investitionsgütern, Exporte und die Nachfrage des Staates. Unterstellt man konstante Faktoreinsatzverhältnisse, so erhält man

$$X_i = \sum_{j=1} a_{ij} X_j + Y_i \quad (2)$$

mit

$a_{ij}$ : Inputs, die Sektor  $j$  für die Produktion einer Einheit von Sektor  $i$  benötigt, wobei  $a_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_j} = \text{konstant}$

bzw. in Matrixschreibweise

$$X = A X + Y \quad (3)$$

mit

$X$ :	Vektor der Bruttonproduktionswerte $X_i$ ,
$A$ :	Matrix der Inputkoeffizienten $a_{ij}$ ,
$Y$ :	Vektor der Endnachfrage $Y_i$ ,

Durch Umformen von Gleichung (3) erhält man

$$X = (I - A)^{-1} Y \quad (4)$$

mit

$I$ :	Einheitsmatrix mit der Dimension $n$ .
-------	--

Die Matrix  $(I - A)^{-1}$ , die so genannte Leontief-Inverse, gibt an, welche Güter in welcher Menge insgesamt zur Produktion einer Einheit Output für die Endnachfrage erforderlich sind. Die Leontief-Inverse lässt sich auch als Summe einzelner Matrizen zerlegen:

$$(I - A)^{-1} = I + A + A^2 + \dots \quad (5)$$

Multipliziert man diese Gleichung auf beiden Seiten mit dem Nachfragevektor  $Y$ , so ergibt sich:

$$X = (I - A)^{-1} \cdot Y = I Y + A Y + A^2 Y + \dots \quad (6)$$

Hierbei entspricht  $IY$  der Outputmenge, die direkt der Befriedigung der Endnachfrage dient,  $AY$  der Menge an Gütern, die als Vorleistungen direkt für die Produktion der an die Endnachfrage gelieferten Güter eingesetzt wird,  $A^2 Y$  der Menge an Vorleistungen, die für die Herstellung von  $AY$  benötigt wird, usw. Mit der Matrixinversion gelingt es so, die unendlichen Reihen aller angestoßenen Produktionseffekte abzubilden.

Durch die Erweiterung von Gleichung (6) um Angaben über den sektorspezifischen Einsatz von Beschäftigten pro Outputeinheit können die von einer bestimmten Nachfrage induzierten Beschäftigungseffekte erfasst werden. Man erhält in diesem Fall folgende Gleichung

$$BX = B(I-A)^{-1} Y \quad (7)$$

mit

*B*: Vektor mit den sektoralen Beschäftigungskoeffizienten

Mit Hilfe von Gleichung (7) können die direkt und indirekt durch eine bestimmte Endnachfrage induzierten Beschäftigungseffekte erfasst werden. Zu beachten ist, dass bei diesem Ansatz keine Preis- bzw. Substitutionselastizitäten berücksichtigt werden.

Entsprechend müssen die direkt durch Preisveränderungen induzierten Effekte vorgegeben werden. Aufbauend auf die modifizierten Parameter lassen sich die durch die Veränderungen induzierten Effekte untersuchen.

Die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen von Preisveränderungen im Bereich des "Straßenfahrzeugbaus" können abgeschätzt werden, indem man die Investitionsnachfrage bzw. die Nachfrage der privaten Haushalten an die veränderte Situation anpasst: Unter der Annahme, dass die einzelnen Wirtschaftsbereiche und die privaten Haushalte eine gegebene Menge an Produkten des Sektors "Straßenfahrzeugbau" nachfragen, führen Preisveränderungen dieser Produkte dazu, dass für andere Investitions- bzw. Konsumgüter weniger Kapital zur Verfügung steht. Hierdurch ergibt sich eine neue Endnachfrage  $Y$ .<sup>4</sup> Die durch die Preisveränderungen induzierten Beschäftigungseffekte erhält man, indem man die neue Endnachfrage in Gleichung (7) einsetzt und die Ergebnisse mit der Referenzsituation vergleicht.

<sup>4</sup> Zur Vereinfachung wird in den im Rahmen dieser Studie durchgeführten Analysen unterstellt, dass sich die Nachfrage nach den anderen Investitions- bzw. Konsumgüter gleichmäßig verändert.

## 6.2 Ergebnisse im Detail (B)

Tabelle B.-1: Vergleich Referenzszenario und Szenario „Durchbruch Inland“  
(Angaben in Beschäftigte/Jahr)

	direkte Effekte	indirekte Effekte	Einkommens- effekte	Summe
Landwirtschaft	0	7	-15	-8
Energie, Bergbau	0	8	-2	6
Chemie, Mineralöl	0	4	-2	3
Kunststoff, Gummi	-3	9	-1	5
Steine und Erden, Glas	0	2	-2	-1
Eisen, NE-Metalle, Gießereien	286	50	-2	333
Stahl- und Maschinenbau, ADV	293	35	-6	321
Fahrzeuge	-264	-37	-6	-308
Elektrotechnik	550	47	-8	589
EBM-Waren	515	11	-3	523
Holz	0	4	-3	2
Papier, Druck	0	10	-2	8
Leder, Textilien, Bekleidung	0	1	-1	0
Nahrungsmittel, Tabak	0	3	-9	-6
Bau	0	10	-44	-34
Handel	0	62	-56	6
Eisenbahnen, Schifffahrt	0	9	-2	7
Postdienstleistungen	0	18	-8	11
Übriger Verkehr	0	17	-5	12
Kreditinstitute, Versicherungen	0	10	-15	-5
Wohnungsvermietung	0	0	0	0
Gastgewerbe	0	33	-17	16
Wissenschaft, Verlage	0	4	-3	1
Gesundheits- und Veterinärwesen	0	2	-4	-2
Sonstige Dienstleistungen	0	95	-20	74
Staat	0	12	-8	5
Private Organisationen o.E.	0	2	-11	-9
Summe	1376	430	-256	1549

Tabelle B.-2: Vergleich Referenzszenario und Szenario „Durchbruch Ausland“  
(Angaben in Beschäftigt/Jahr)

	direkte Effekte	indirekte Effekte	Einkommens- effekte	Summe
Landwirtschaft	0	-1	-2	-3
Energie, Bergbau	0	-1	0	-1
Chemie, Mineralöl	0	0	0	-1
Kunststoff, Gummi	0	-3	0	-3
Steine und Erden, Glas	0	0	0	-1
Eisen, NE-Metalle, Gießereien	-2	-8	0	-10
Stahl- und Maschinenbau, ADV	0	-2	-1	-3
Fahrzeuge	-84	-97	-1	-183
Elektrotechnik	-18	-24	-1	-43
EBM-Waren	0	-1	0	-1
Holz	0	0	0	-1
Papier, Druck	0	-1	0	-1
Leder, Textilien, Bekleidung	0	0	0	-1
Nahrungsmittel, Tabak	0	0	-2	-2
Bau	0	-1	-7	-9
Handel	0	-11	-9	-21
Eisenbahnen, Schifffahrt	0	0	0	-1
Postdienstleistungen	0	-1	-1	-2
Übriger Verkehr	0	-1	-1	-2
Kreditinstitute, Versicherungen	0	-2	-3	-4
Wohnungsvermietung	0	0	0	0
Gastgewerbe	0	-3	-3	-5
Wissenschaft, Verlage	0	-1	-1	-1
Gesundheits- und Veterinärwesen	0	0	-1	-1
Sonstige Dienstleistungen	0	-14	-3	-17
Staat	0	-2	-1	-3
Private Organisationen o.E.	0	0	-2	-2
Summe	-105	-176	-43	-324

Tabelle B.-3: Vergleich Referenzszenario und Szenario „Konkurrenz“  
(Angaben in Beschäftigte/Jahr)

	direkte Effekte	indirekte Effekte	Einkommens- effekte	Summe
Landwirtschaft	0	0	-9	-9
Energie, Bergbau	0	0	-1	-1
Chemie, Mineralöl	0	0	-1	-1
Kunststoff, Gummi	-1	0	-1	-1
Steine und Erden, Glas	0	0	-1	-1
Eisen, NE-Metalle, Gießereien	-3	0	-2	-4
Stahl- und Maschinenbau, ADV	82	0	-4	78
Fahrzeuge	-54	0	-4	-58
Elektrotechnik	-27	0	-5	-32
EBM-Waren	0	0	-2	-2
Holz	0	0	-2	-2
Papier, Druck	0	0	-1	-1
Leder, Textilien, Bekleidung	0	0	-1	-1
Nahrungsmittel, Tabak	0	0	-6	-6
Bau	0	0	-27	-27
Handel	0	0	-35	-35
Eisenbahnen, Schifffahrt	0	0	-2	-2
Postdienstleistungen	0	0	-5	-5
Übriger Verkehr	0	0	-3	-3
Kreditinstitute, Versicherungen	0	0	-9	-9
Wohnungsvermietung	0	0	0	0
Gastgewerbe	0	0	-11	-11
Wissenschaft, Verlage	0	0	-2	-2
Gesundheits- und Veterinärwesen	0	0	-3	-3
Sonstige Dienstleistungen	0	0	-13	-13
Staat	0	0	-5	-5
Private Organisationen o.E.	0	0	-7	-7
Summe	-3	0	-161	-164



**Fraunhofer** Institut  
Systemtechnik und  
Innovationsforschung

## Zusammenfassung und Ausblick

### **Kapitel 8**

Bearbeiter: Jürgen Wengel, ISI

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>229</b>
1.1	Zusammenfassung	229
1.2	Ausblick	231



# 1 Zusammenfassung und Ausblick

## 1.1 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht diskutiert mit Blick auf die Ausrüster- und Zuliefer-Industrie die Perspektiven des Brennstoffzellen-Antriebs im Auto und die Auswirkungen des neuen Antriebskonzeptes auf diese Unternehmen. Es handelt sich um die Ergebnisse eines Projektes, das die Auswirkungen einer Ablösung des Verbrennungsmotors im Kraftfahrzeug auf die baden-württembergische Industrie untersuchte und im Rahmen der Zukunftsinitiative „Junge Generation“ vom Ministerium für Wissenschaft Kunst und Forschung gefördert wurde. Das Forscherteam aus fünf Instituten unter der Leitung des Fraunhofer-Instituts ISI fragte nach der künftigen Marktdurchdringung, den technologischen Unterschieden sowie sektoralen und regionalen Veränderungen der Zulieferstruktur. Die Analysen stützten sich auf Daten der A-Klasse, die DaimlerChrysler zur Verfügung gestellt hat, zahlreiche Interviews mit Experten aus Wissenschaft und Industrie sowie schriftliche Quellen.

Die Ergebnisse machen deutlich, dass betroffene Unternehmen die Entwicklung dieses Alternativantriebes genau verfolgen müssen, um sich Veränderungen ihrer Märkte schnell anpassen zu können. Die baden-württembergischen Ausrüster und Zulieferer starten dabei von einer traditionell starken Ausrichtung auf den konventionellen Antriebsstrang mit Verbrennungsmotor. Die Nähe zu einem Technologieführer wie DaimlerChrysler bietet jedoch Chancen, von der Entwicklung zu profitieren. Auch für die Bundesrepublik insgesamt könnte dieser Technologiewandel positive wirtschaftliche Konsequenzen haben.

Die technologische Entwicklung der Brennstoffzelle hat nach einer weit über hundertjährigen Geschichte in den letzten Jahren - nicht zuletzt auf Grund des Engagements einiger führender Automobilkonzerne - einen rasanten Sprung gemacht. Für die mobile Anwendung werden derzeit der Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle (PEFC) die größten Chancen eingeräumt. Eine direkte Versorgung mit Wasserstoff als Brennstoff im Fahrzeug scheint gegenwärtig vor allem wegen der Speicherungsproblematik noch Zukunftsmusik. Deshalb werden verschiedene Reformertechnologien entwickelt, die den Wasserstoff an Bord aus kohlenwasserstoffhaltigen Energieträgern gewinnen. Dies ist für Methanol inzwischen in Versuchsfahrzeugen realisiert. Je nach Energieträger stellen sich mehr oder weniger große Anforderungen an die Anpassung der Betankungsinfrastruktur.

Auf Komponenten des herkömmlichen Antriebsstrangs, die für den Brennstoffzellen-Antrieb vollständig ersetzt oder angepasst werden müssen, entfallen heute etwa 30 Prozent der Wertschöpfung eines Pkw. Komponenten wie der Verbrennungsmotor, die konventionelle Motorelektronik und Motorelektrik werden substituiert, das Getriebe, die Abgasanlage, das Kühlsystem und die Tankanlage verändert. Die Preise für die neuen Komponenten liegen, vor allem wegen der kleinen Produktionsserien aber auch auf Grund des Entwicklungsstandes, derzeit noch um ein Vielfaches über den für marktfähige Brennstoffzellen-Fahrzeuge angestrebten Kosten.

Die Veränderungen der Komponenten wirken sich darüber hinaus auf die eingesetzten Fertigungsverfahren und damit auf die Ausrüsterindustrie aus. Insbesondere Fertigungsverfahren, die aufgrund der hohen Belastungen durch Temperatur und Rotation im Verbrennungsmotor erforderlich sind (z. B. die Gesenkschmiede-, die Schleif- und Hon-Technologie), werden zur Herstellung eines Brennstoffzellen-Antriebsstrangs gar nicht oder in geringerem Umfang benötigt. Andere gewinnen an Bedeutung. Stanz- und Prägetechnologien könnten beispielsweise bei der Herstellung der sogenannten Stacks für die Brennstoffzelle und der Aggregate zur Gaserzeugung genutzt werden.

Neben technologischen Entwicklungen der Brennstoffzelle und konkurrierender Technologien wie dem Wasserstoff-Verbrennungsmotor oder weiter verbesserten Diesel- und Ottomotoren wirken gesellschaftliche Rahmenbedingungen entscheidend auf den Innovationsprozess zur mobilen Brennstoffzelle ein. Eine Schlüsselrolle spielen die zukünftige Umweltpolitik für Ballungszentren, die Entwicklung der Energiepreise, die Akzeptanz des letztendlichen Fahrzeugkonzeptes durch die Kunden und die Tankstellen-Infrastruktur. Die Entwicklung dieser Einflussfaktoren kann nicht eindeutig vorausgesagt werden. Daher zeigt die Studie mit einem Zeithorizont von 10 Jahren (2010) drei Szenarien auf:

- Ein optimistisches Szenario „Durchbruch Inland“ unterstellt entscheidende technische Fortschritte und positive Rahmenbedingungen für die Einführung der mobilen Brennstoffzelle Deutschland bzw. Europa, so dass die Serienfertigung in Deutschland im Jahr 2010 auf ca. 250.000 Brennstoffzellen-Pkw pro Jahr ansteigen könnte.
- Ein alternatives Szenario „Durchbruch Ausland“ geht von günstigen Produktionsbedingungen und Lead-Märkten im Ausland aus, so dass dort die erste Serienfertigung entstände und damit Fahrzeuge aus deutscher Produktion verdrängt würden.
- Ein drittes Szenarium „Konkurrenz“ sieht die Brennstoffzellentechnologie vorerst auf Marktnischen oder Flottenfahrzeuge begrenzt. Die Produktion der meisten Komponenten würde zur Erzielung wirtschaftlicher Seriengrößen

ßen weltweit im Ausland gebündelt. In Deutschland würden in ca. 50.000 Fahrzeuge Brennstoffzellen-Antriebe eingebaut.

Die Einführung der Brennstoffzelle als Fahrzeugantrieb wird erheblichen Einfluss auf die Zuliefer- und Ausrüsterindustrie in Baden-Württemberg haben, wenn auch die zeitliche Perspektive unsicher ist. Tendenziell verschiebt sich der Bedarf von mechanischen Teilen wie Kurbelwellen, Zylinder oder Kolben hin zu verfahrens- und elektrotechnischen Komponenten wie Elektromotoren oder Aggregaten zur Gaserzeugung. Die Stärke der baden-württembergischen Industrie liegt zwar gerade in der Herstellung der erstgenannten, für die Brennstoffzelle nicht oder seltener benötigten Komponenten, aber das bei den Mitarbeitern in den Unternehmen vorhandene Fachwissen in der Automobilproduktion ist eine gute Basis, die notwendigen Anpassungsleistungen zu bewältigen.

## 1.2 Ausblick

Die betroffenen Unternehmen können unterschiedliche Strategien verfolgen. Das Spektrum reicht von eigenständigen Forschungsaktivitäten zur mobilen Brennstoffzelle bis hin zur Diversifizierung der Produktpalette mit dem Ziel, Standbeine außerhalb der Automobilindustrie oder zumindest der Wertschöpfungskette des konventionellen Antriebs zu erschließen.

An Konzepten, wie Pkw mit Brennstoffzellen-Antrieb produziert werden sollen, wird bei DaimlerChrysler bereits intensiv gearbeitet. Für den Zulieferer ist entscheidend, ob der Fahrzeughersteller die Eigen- oder eine Fremdfertigung anstrebt. Im ersten Fall könnte sich ein FuE-Engagement unter Umständen lediglich in Lizenzverkäufen auszahlen.

Für viele Ausrüster spielt der Anteil des Brennstoffzellen-Antriebs an den Produktionszahlen eine untergeordnete Rolle, solange der technische Fortschritt im verbleibenden, noch auf lange Sicht größeren Segment der Verbrennungsmotoren nicht aufhört. Da vorrangig dieser Fortschritt die Nachfrage nach Ihren Fertigungsanlagen bestimmt. Unter Umständen lassen sich bisher für die Herstellung von Verbrennungsmotoren genutzte Fertigungstechnologien auch für neue Komponenten einsetzen.

Manches mittelständische Unternehmen könnte der Durchbruch der Brennstoffzelle vor ein ganz anderes Problem stellen, wie das Beispiel eines Pumpenherstellers zeigt. Bisher baut er hochwertige Spezialpumpen in Kleinserien – auch für die Necars von DaimlerChrysler. Eine Serienfertigung für die Automobilindustrie würde die aktuellen Fertigungsmöglichkeiten sprengen.

Für die betroffenen Ausrüster und Zulieferer kommt es also darauf an, eine ihren spezifischen Rahmenbedingungen und Kompetenzen entsprechende Strategie zu entwickeln. Dafür ist es zumindest notwendig, die Entwicklun-

gen systematisch zu verfolgen. Der Blick sollte dabei nicht zu eng auf die Automobilindustrie gerichtet werden. Es deutet vieles darauf hin, dass die Kostenschwelle für wirtschaftliche Anwendungen nicht beim derzeitigen Technologietreiber Automobileinsatz, sondern bei stationären Lösungen erreicht wird.

Im Vorangegangenen ist gezeigt worden, wie die Verbreitung von Brennstoffzellenfahrzeugen verlaufen könnte und welche Faktoren darauf maßgeblichen Einfluss haben. Mit dem Brennstoffzellensymposium im September 1999, an dem 160 Interessenten teilnahmen, ist auch ein erster Schritt unternommen worden, die Ausrüster und Zulieferer der Automobilindustrie für das Thema Brennstoffzelle zu mobilisieren oder zumindest zu sensibilisieren. In diesem Zusammenhang hat das Fraunhofer ISI einen Industriearbeitskreis gegründet, in dem interessierte Unternehmen nicht nur laufend aktuell und systematisch Informationen über Entwicklungen im Feld erhalten, sondern sich auch gegenseitig austauschen und gegebenenfalls gemeinsame Aktivitäten starten können. Die Auftaktsitzung fand im Januar 2000 statt.

Daneben scheint es aber auch sinnvoll, die verschiedenen, auf dem Gebiet der Brennstoffzellen und der damit verknüpften Themenfelder tätigen Forschungseinrichtungen in Baden-Württemberg untereinander und mit der Industrie stärker zu vernetzen. Ein solches baden-württembergisches Kompetenznetzwerk „Brennstoffzellentechnologie“ könnte helfen, landesweit Synergien zu schaffen, Stärken und Schwächen zu identifizieren, zu beheben oder zu nutzen sowie wünschenswerte Kooperationen zu initiieren. Der oben genannte Industriearbeitskreis könnte darin integriert werden und eine Beratungsfunktion übernehmen.