

**Ökonomische Systemanalyse  
zum Antrieb von Personenwagen  
mit Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen  
unter Verwendung neuer Kraftstoffe**

vorgelegt von  
Dipl. Masch.-Ing. ETH

**Marc Klaus Grahl**

aus Krefeld

Von der Fakultät III – Verfahrenswissenschaft –  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften  
– Dr.-Ing. –  
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuß:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Hein Auracher  
Berichter: Prof. Dr. rer. pol. Georg Erdmann  
Berichter: Prof. Dr.-Ing. Hermann-Josef Wagner

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 27.10.2000

Berlin 2000

D83

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

Dieses Vorhaben wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung,  
Forschung und Technologie gefördert.  
(BMBF-Förderkennzeichen 03 29 762)

Diese Arbeit ist auch als Adobe Acrobat pdf-Datei kostenlos im Internet  
verfügbar ([www.dissertation.de](http://www.dissertation.de)) und für den Ausdruck im DIN A5-Format  
auf HP-Laserdruckern optimiert. Alle Abbildungen sind dort farbig.

Abbildung Titelblatt: Funktionsskizze einer Brennstoffzelle  
Quelle: DaimlerChrysler  
(verwendet mit freundlicher Genehmigung von Karl E. Noreikat)

ISBN .....

Internet Verlag [www.dissertation.de](http://www.dissertation.de)  
Fritschestr. 68, D-10585 Berlin

Meinen Eltern



## VORWORT

Wesentlich beigetragen zu der vorliegenden Dissertation haben die Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojekts 'Vergleichende Systemanalyse der mobilen Anwendung von Brennstoffzellen', an welchem ich Gelegenheit hatte mitzuarbeiten. Das von Prof. Dr. Bernd Höhlein geleitete Vorhaben bestand aus zwei Teilprojekten. Der *technisch-ökologische* Teil wurde am Institut für Kraftfahrwesen (ika) an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, der *ökonomische* Teil am Fachgebiet Energiesysteme der Technischen Universität Berlin bearbeitet.

Beide Teilvorhaben wurden finanziell zur Hälfte vom Bundesminister für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF-Förderkennzeichen 03 29 769 und 03 29 762) und zur anderen Hälfte aus Drittmitteln gefördert [WAL 00].

Im Rahmen der Projektmitarbeit und der Abfassung dieser Arbeit konnte ich von vielen Personen Unterstützung erfahren, für die ich mich hier herzlich bedanken möchte. An erster Stelle steht mein Doktorvater, Herr Prof. Dr. Georg Erdmann. Er eröffnete mir die Gelegenheit, an dieser überaus aktuellen Thematik innerhalb eines Forschungsprojekts mit Industriebeteiligung mitzuarbeiten. Mit seinen zahlreichen Anregungen hat er mir den Übergang von meinem bis dahin technisch orientierten Studium zur konstruktiven Bearbeitung wirtschaftlicher Fragestellungen wesentlich ermöglicht. Ebenfalls von großer Hilfe war Herr Prof. Dr. Bernd Höhlein, der mit seinen fundierten Kenntnissen sowohl zur Brennstoffzellentechnologie als auch zu neuartigen Kraftstoffen ein idealer Ansprechpartner für mich war. Zu Dank verpflichtet bin ich darüber hinaus auch meinem Koreferenten, Herrn Prof. Dr. Hermann-Josef Wagner, der technische Aspekte sowie die Gesamtdarstellung der Arbeit konstruktiv-kritisch hinterfragt und so zu einer deutlicheren Darstellung beigetragen hat.

Der Verfasser dankt Herrn Dr. Piotr Malinowski vom Projektträger BEO des BMBF und allen Beteiligten auf Seite der Industriepartner – insbesondere Herrn Joachim Große (Siemens AG), Herrn Dr. Axel König (Volkswagen AG), Herrn Roland Matthé (Adam Opel AG), Herrn Karl Ernst Noreikat (DaimlerChrysler AG) und Herrn Peter Schmitz (Ford Forschungszentrum Aachen GmbH) – für die jederzeit fruchtbare und erfolgreiche Zusammenarbeit und zahlreiche Hinweise während der Abfassung dieser Arbeit.

Marc Klaus Grahl

## INHALT

<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Konzeption und Modellidee.....</b>	<b>8</b>
<b>3 Ingenieurwissenschaftliche Fundierung der Arbeit.....</b>	<b>12</b>
3.1 Brennstoffzelle im Fahrzeug.....	12
3.2 Auswertung energetischer Systemanalysen.....	21
3.2.1 Energetische Kraftstoffkettenanalyse .....	24
3.2.2 Energetische Fahrzeuganalyse.....	36
<b>4 Rahmenszenarium .....</b>	<b>43</b>
4.1 Szenarien für alternative Fahrzeuge .....	45
4.2 Einsatzmuster der Fahrzeuge .....	49
4.3 Bedarfsszenarien.....	52
4.4 Szenarium für Tankstellen .....	54
4.5 Kosten, Preise, Steuern .....	55
<b>5 Alternative Kraftstoffversorgung: Kostenanalyse (Top-down).....</b>	<b>60</b>
5.1 Annahmen zur Infrastruktur.....	63
5.1.1 Erdgas-CNG-Pfad.....	64
5.1.2 Erdgas-CGH-Pfad.....	66
5.1.3 Erdgas-Methanol-Pfad.....	67
5.1.4 Methanol-Import-Pfad .....	69
5.1.5 Erdgas-Mitteldestillat-Pfad.....	70
5.2 Kraftstoffkosten an der Tankstelle.....	72
5.3 Gesamtwirtschaftliche Einordnung.....	75
<b>6 Alternative Fahrzeuge: Kostenanalyse (Bottom-up) .....</b>	<b>81</b>
6.1 Kostenannahmen Brennstoffzellensystem.....	84
6.1.1 Stack.....	86
6.1.2 Reformer.....	87
6.1.3 Peripherie.....	91
6.2 Kostenannahmen Fahrzeuge .....	93
6.2.1 Energiespeicher .....	93
6.2.2 Basisfahrzeug .....	96
6.3 Zusammenfassung Antriebsstrang.....	100

<b>7 Einzelwirtschaftliche Systemkostenanalyse (TCO) .....</b>	<b>103</b>
7.1 Geschätzte Kosten des Antriebsstrangs.....	107
7.2 Zulässige Kosten des Antriebsstrangs.....	109
7.3 Markteintrittsschwellen.....	111
7.4 Variationsrechnungen des Basisfalls.....	115
7.4.1 Mineralölsteuer.....	115
7.4.2 Fahrzeugsteuer .....	116
7.4.3 Referenzfahrzeug .....	118
7.4.4 Fünf-Jahres-Diskontierung.....	120
7.5 Sensitivitätsanalyse .....	123
7.5.1 Kraftstoffkosten.....	123
7.5.2 Geschätzte Antriebsstrangkosten .....	124
7.5.3 Zulässige Antriebsstrangkosten.....	130
7.6 Zusammenfassung Fahrzeuge .....	132
<b>8 Gesamtwirtschaftliche Systemkostenanalyse (Input/Output).....</b>	<b>135</b>
8.1 Grundgleichungen des <i>Input-Output</i> -Modells.....	140
8.2 Anpassung und Umsetzung des Input-Output-Modells .....	145
8.2.1 Schnittstelle Fahrzeug/Kraftstoffpfad – <i>Input-Output</i> -Tabelle .....	145
8.2.2 Erfassung von gesamtwirtschaftlichen Effekten .....	149
8.2.3 Lösungsalgorithmus .....	155
8.3 Auswirkungen auf die Volkswirtschaft.....	158
8.4 Zusammenfassung Infrastruktur.....	168
<b>9 Analyse qualitativer Bewertungsaspekte .....</b>	<b>171</b>
9.1 Bewertungsinstrumente.....	172
9.1.1 Ökonomische Ansätze.....	174
9.1.2 Ökologische Ansätze.....	176
9.1.3 Fazit zu konventionellen Bewertungsansätzen.....	178
9.1.4 Ansatz über die Entscheidungstheorie .....	178
9.1.5 Gewählter Ansatz: The Analytic Hierarchy Process (AHP) .....	181
9.2 Konzeption und Modellidee .....	190
9.3 Expertenbefragung .....	196
9.4 Ergebnis der Experteneinschätzung .....	208
<b>10 Abschätzung des Marktpotentials (Plausibilitätsprüfung) .....</b>	<b>219</b>
10.1 Modell der proportionalen Allokation.....	221
10.2 Mögliche Jahresverkaufszahlen von Brennstoffzellenfahrzeugen .....	223
<b>11 Schlußfolgerungen.....</b>	<b>229</b>

<b>ANHANG .....</b>	<b>235</b>
ANHANG I: DATEN LITERATURAUSWERTUNG .....	237
ANHANG II: DATEN DER QUANTITATIVEN SYSTEMANALYSE .....	241
INFRACEST .....	243
VEHICEST .....	267
ISCA .....	297
MSIOM .....	319
ANHANG III: DATEN DER QUALITATIVEN SYSTEMANALYSE .....	339
<b>LITERATUR .....</b>	<b>347</b>
<b>ABBILDUNGEN .....</b>	<b>360</b>
<b>TABELLEN .....</b>	<b>363</b>
<b>ABKÜRZUNGEN .....</b>	<b>365</b>
<b>SOFTWARE .....</b>	<b>368</b>
<b>LEBENS LAUF .....</b>	<b>369</b>



## 1 Einleitung

Brennstoffzellen werden seit Anfang der 90er Jahre in der wissenschaftlichen Diskussion wieder intensiver untersucht und beschrieben [SCU 98]. Hauptsächlich dank neuer Materialien konnten Brennstoffzellen wesentliche Fortschritte hinsichtlich ihrer elektrischen Ausgangsleistung erzielen. Zeitgleich konnte ihre Baugröße verringert werden.

Seitdem werden Brennstoffzellen auch für die Verwendung im Antrieb von Personenwagen untersucht. Anfänglich von DaimlerChrysler vorgeschlagen und initiiert, die als erster Fahrzeughersteller bereits 1994 ein Brennstoffzellenfahrzeug zeigten, erforschen heute alle großen Automobilkonzerne Brennstoffzellen für den Antrieb (Abbildung 1-1) oder zumindest als sogenannte *auxiliary power units (APU)* zur Substitution herkömmlicher Fahrzeugbatterien und Erweiterung von deren Möglichkeiten.

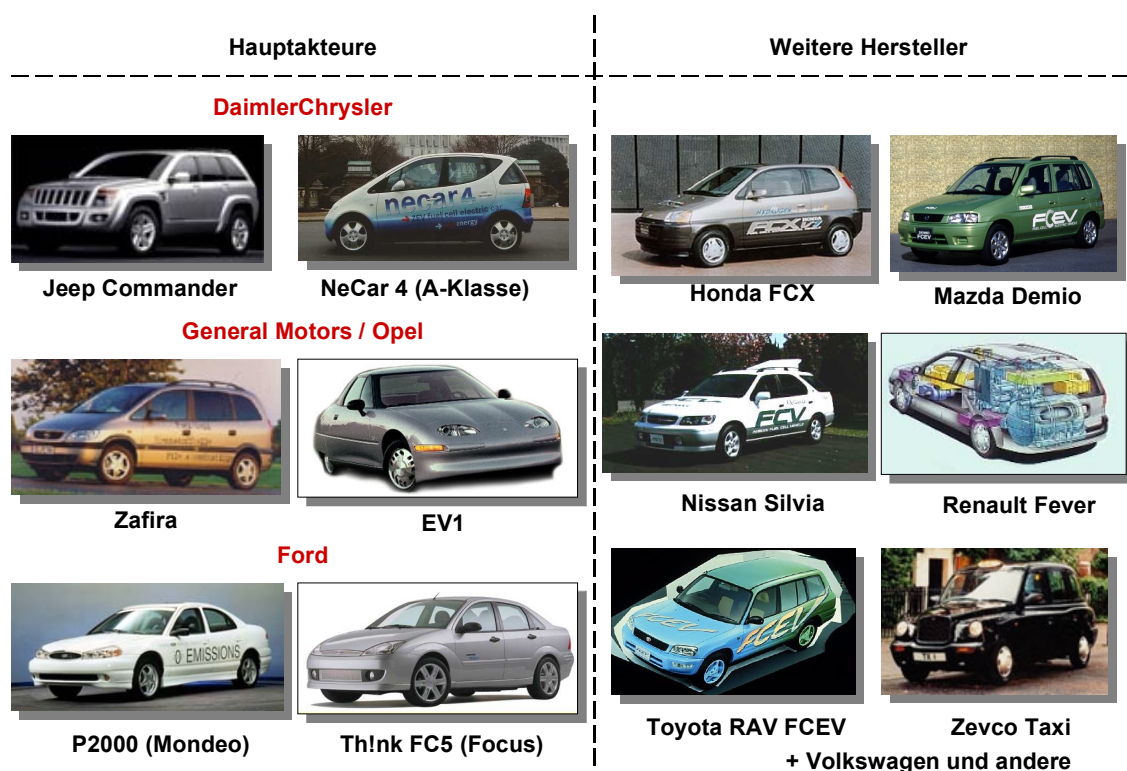


Abbildung 1-1: Pkw-Versuchsfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb einiger Hersteller

In der wissenschaftlichen Diskussion über die *mobile* Anwendung von Brennstoffzellen denkt man heute zumeist an den *automobilen* Einsatz. Das tatsächliche Einsatzfeld der Brennstoffzelle als Teil einer Antriebstechnologie geht jedoch darüber hinaus. Zwar findet die Diskussion über eine Anwendung in anderen landgebundenen Fahrzeugen (Eisenbahn [MIL 00])

[ROS 00) und Schiffen [SCB 96] (auch in [HÖH 00]) bislang nur vereinzelt statt; wenn sich aber die Brennstoffzelle als Pkw-Antrieb und so im Markt mit dem größten Absatzpotential durchsetzt und dabei Skaleneffekte (*economies of scale*) ihre Kosten senken, ist ihr Einsatz in solch anderen mobilen Anwendungsbereichen ohnehin anzunehmen.

Im Pioniermarkt Kalifornien, wo man wegen der Smogproblematik weit schärfere Landesemissionsgesetze als in den übrigen Staaten der USA erlassen durfte und gleichzeitig im Straßenverkehr das ehrgeizige *Zero Emission Vehicle (ZEV)* Programm verfolgt [ERD 98], wird Anfang 2000 bis Ende 2003 der bisher größte Feldversuch mit 50 Brennstoffzellenfahrzeugen im Rahmen des Programms *California Fuel Cell Partnership (CFCP)* gestartet [CAR 99]. Dabei werden ausschließlich Brennstoffzellen des Typs *PEFC (polymer electrolyte fuel cell, Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle)* in Pkw und Bussen verwendet. Der Einsatz anderer Typen ist prinzipiell denkbar, wird aber auch unter Experten kaum diskutiert und wegen der technischen Komplexität nur vereinzelt von Herstellern getestet, so etwa die *AFC (alkaline fuel cell, alkalische Brennstoffzelle)* [ZEV 97] (vgl. Abschnitt 1.1 S. 8ff.).

Andere Gebiete mit Potential zum Einsatz von Brennstoffzellen *außerhalb* des automobilen Markts sind

- der stationäre Markt, in dem Brennstoffzellen konventionelle Heizanlagen ersetzen könnten sowie
- der portable Markt, in dem tragbaren Geräten (*Notebooks, etc.*) mittels Brennstoffzellen ein Vielfaches der heute mit konventionellen Akku-Batterien möglichen Arbeitsdauer ermöglicht wird.

Alle drei Märkte haben eine gemeinsame Eigenschaft: Wenn die Kosten es Brennstoffzellen erlauben, wettbewerbsfähig zu werden, könnte die Brennstoffzellentechnologie jeden einzelnen dieser Märkte revolutionieren – wenn auch jeden auf andere Weise und in einem anderen Ausmaß:

- Brennstoffzellenfahrzeuge bevorzugen andere als die heute verwendeten Kraftstoffe; der notwendige Wechsel der Kraftstoffinfrastruktur betrifft auch die Frage *des* zukünftigen Primärenergieträgers (fossil oder erneuerbar), die aus gesellschaftlichen, geo-strategischen und verschiedenen ökonomischen Perspektiven beantwortet werden kann.

- Brennstoffzellen in Gebäuden machen den Kunden unabhängiger von Energieversorgern, weil er mit ihnen Elektrizität und Wärme produzieren kann; die Energieversorger sind sich den Gefahren bewußt, die aus einem vermehrten Einsatz von stationären Brennstoffzellen abgeleitet werden kann, und denken daher über gänzlich andere Marktstrukturen nach.
- Kleine Brennstoffzellen, die Strom in einem Maß und über eine Dauer bereitstellen, die über bisherige Verhältnisse hinausgehen, könnten Einzug in alle tragbaren Elektrogeräte im zivilen und militärischen Bereich halten. Das würde die vorhandenen Möglichkeiten solcher Geräte erweitern und neue hinzufügen, so daß die konventionelle Stromversorgung bald verschwinden könnte.

Gemessen an seiner wirtschaftlichen Potenz ist der Fahrzeug-Kraftstoffmarkt der bei weitem wichtigste dieser drei Märkte: Die deutschen Fahrzeughersteller repräsentieren ein Verkaufsvolumen von knapp 400 Mrd. DM/a mit einem Exportanteil von mehr als 50 %. Kraftstoffe im Wert von knapp 100 Mrd. DM werden jedes Jahr an rund 15'000 Tankstellen verkauft. Diese Kraftstoffe repräsentieren einen Importwert von 14 Mrd. DM/a und erzeugen ein Steuereinnahmen von 70 Mrd. DM/a für den Staat.

### ***Warum die Brennstoffzelle im Automobil?***

Aus Sicht der Automobilindustrie wird die Motivation für die Forschungstätigkeit an einer automobilen Brennstoffzelle im wesentlichen von drei Pfeilern getragen:

- Verminderung der lokalen Emissionen (v.a. Schadstoffe<sup>1</sup>, Lärm),

---

<sup>1</sup> Der Straßenverkehr verursachte 1997 in Deutschland 47 % aller Stickoxid-(NO<sub>x</sub>-), 52 % aller Kohlenmonoxid-(CO-)Emissionen und rd. 40 % aller flüchtigen Kohlenwasserstoffe (HC) [BWI 99] [UBA 97]. Dank Einführung des Abgaskatalysators in den 80er Jahren, ständiger Verschärfung der Emissionsgesetzgebung (EURO 3, 4) und erkennbarem Abwärtstrend der limitierten Schadstoffe (NO<sub>x</sub>, CO, HC, Partikel) hat sich die Situation bereits entschärft. Prinzipbedingt kann man aber den Verbrennungsmotor nicht mit 'Nullemission' betreiben, die Brennstoffzelle dagegen schon. Steigende Pkw-Zahlen und Kilometerleistungen ermöglichen weitere Reduktionen dieser Schadstoffe bei Verbrennungsmotoren nur durch den forcierten Einsatz von Technik und damit überproportional steigenden Kosten für den Kunden.

- Verminderung der einseitigen Ressourcenabhängigkeit des heutigen Verkehrs,
- Stärkung des Image der Automobilindustrie als Innovationsbranche.

Die Reduktion des Primärenergieverbrauchs ist demnach *zunächst* kein vorrangiges Ziel. Wie später gezeigt wird (Abschnitt 3.2.2), kann heute auch noch nicht entschieden werden, ob der Wirkungsgradvorteil der Brennstoffzelle gegenüber dem Verbrennungsmotor auch bei Betrachtung des gesamten Antriebssystems gilt und damit einen Verbrauchsvorteil für Brennstoffzellenfahrzeuge bedeutet. Und selbst wenn solch ein Verbrauchsvorteil gegeben sein sollte, muß untersucht werden, ob dieser bei einer Berücksichtigung der Verluste bei der Kraftstoffherstellung bestehen bleibt, was sich dann auch in einer Reduktion der globalen Kohlendioxid-(CO<sub>2</sub>-)Emissionen bemerkbar machen würde.

### ***Diese Arbeit***

Seitdem die Diskussion über Brennstoffzellenfahrzeuge begonnen hat, standen technische Aspekte oft im Vordergrund, nicht zuletzt aufgrund der angedeuteten Motivationsaspekte. Parallel zu den Entwicklungen und Fortschritten auf technischem Gebiet hat man in jüngster Zeit damit begonnen, den wirtschaftlichen Nutzen und die Kosten von Brennstoffzellenfahrzeugen aus Sicht des Kunden und der Gesellschaft zu evaluieren; ein Zeichen, daß man beginnt, über die Marktfähigkeit nachzudenken. Grund sind u.a. die weitreichenden makro- und mikroökonomischen Implikationen für heute typische Energie-Infrastrukturen, mit denen eine solche Umstellung im Angebot technischer Optionen zur Energiebereitstellung einherginge.

Die vorliegende Systemanalyse setzt an genau dieser Stelle an und untersucht demnach die Marktsituation bei der Einführung von Brennstoffzellenfahrzeugen *und* neuen Kraftstoffen aus verschiedenen ökonomischen Blickwinkeln.

Sie beschäftigt sich mit dem konkreten Fall der Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle (vgl. Abschnitt 3.1, S. 12ff.) zum Antrieb von Personenkraftwagen (Pkw).<sup>2</sup> Dabei werden Pkw aus Kompakt-, unterer und oberer Mittel-

---

<sup>2</sup> Zwar ist im gesamten automobilen Bereich der Pkw, Nutzfahrzeuge, Busse sowie Sonderfahrzeuge (z.B. Gabelstapler) eine Anwendung technisch gesehen möglich und ihre Machbarkeit wurde in Versuchsträgern bereits demonstriert. Der Pkw-Markt spielt aber als potentiell größter

klasse betrachtet und verschiedene Konzepte von Brennstoffzellenfahrzeugen und anderen alternativen Fahrzeugen den konventionellen Referenzfahrzeugen gegenübergestellt. Eingebettet in ein Rahmenszenarium wird die Marktsituation im Jahr 2010 mikro- und makroökonomisch untersucht (Idee und Konzeption werden detailliert in Abschnitt 2 (S. 8ff.) beschrieben). Damit lassen sich geeignete Markteintrittssegmente identifizieren sowie Auswirkungen auf die deutsche Volkswirtschaft ermitteln.

Letztlich wird über dieses Vorgehen eine Antwort auf folgende Zielfrage gesucht:

*Welche der betrachteten Alternativen verspricht die höchste Chance einer Durchsetzung am Markt, indem sie den relevanten Akteuren hinsichtlich technischer und infrastruktureller Realisierbarkeit, ökologischer Vorteilhaftigkeit sowie Wettbewerbsfähigkeit den höchsten Nutzen und/oder das höchste Nutzen-Kosten-Verhältnis bietet?*

Aus dieser Formulierung wird deutlich, daß eine *ganzheitliche* Systemanalyse die Untersuchung unterschiedlichster Bereiche mit ihren quantitativen und qualitativen Aspekten notwendig macht. Abbildung 1-2 stellt die wesentlichsten vor.

Die vorliegende Arbeit war Teil eines BMBF-Forschungsvorhaben [WAL 00], innerhalb dessen in einem zweiten Teilprojekt die Daten zur technisch-ökologischen Systemanalyse von Brennstoffzellenfahrzeugen ('ika-Simulation') am Institut für Kraftfahrwesen (ika) der RWTH Aachen erarbeitet wurden [GOS 00]. Die vorliegende Arbeit nimmt diese Ergebnisse auf, ergänzt sie um eine ökonomische Systemanalyse und bettet alle Ergebnisse entsprechend Abbildung 1-2 (S. 6) in einen Gesamtzusammenhang ein. Somit wird eine ganzheitliche Betrachtung des Umfeldes von Brennstoffzellenfahrzeugen und neuen Kraftstoffen möglich.

---

Absatzmarkt für automobiler Brennstoffzellen bei der Untersuchung der Wettbewerbsfähigkeit – verglichen mit den anderen genannten Einsatzgebieten im Straßenverkehr – eine vorrangige Rolle. Dahinter steht nicht nur der durch die kalifornische Gesetzgebung quasi garantierte Marktanteil im Neuwagengeschäft von 10 % ZEV in 2003 [CAR 00], sondern auch die Frage, in welchen Bereichen *first mover advantages* – also Wettbewerbsvorteile für Pionierunternehmen – für die beteiligte Industrie realisierbar sind.

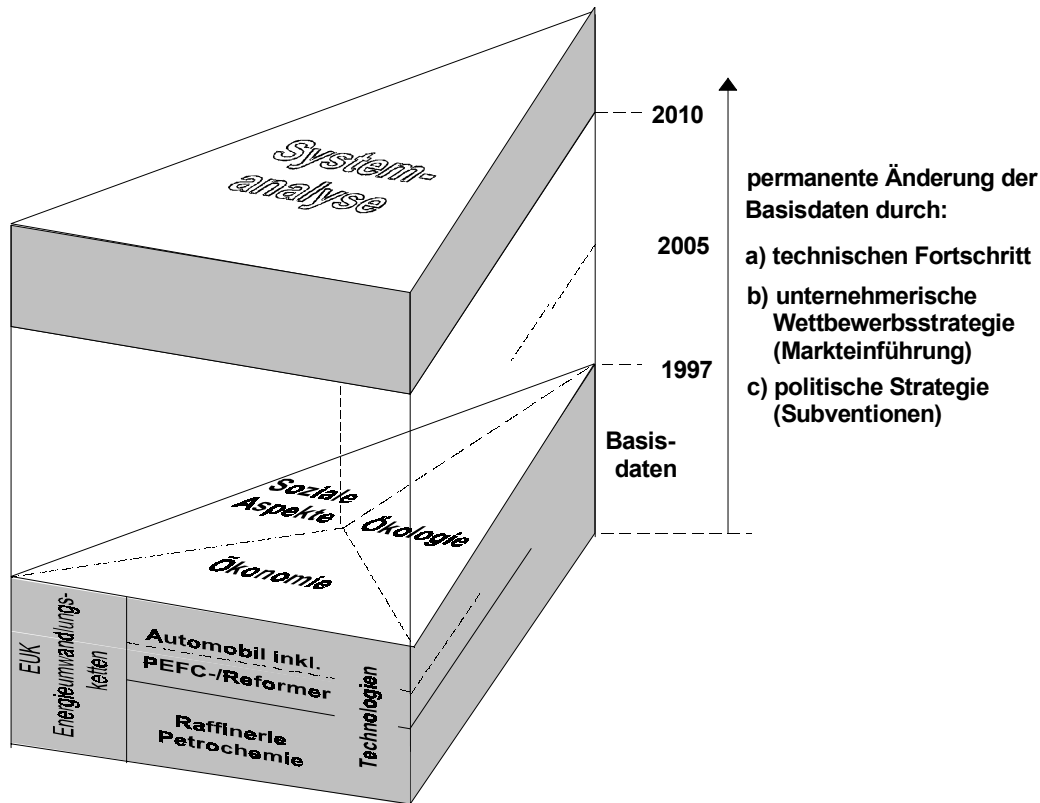


Abbildung 1-2: Wesen der Systemanalyse für die vorliegende Studie

### **Besondere Schwierigkeiten**

Die Güte der aus der Literatur und Expertenaussagen verfügbaren Informationen ist in jedem der in Abbildung 1-2 (S. 6) angesprochenen Gebiete unterschiedlich, insbesondere auch bei der Handhabung quantitativer und qualitativer Aussagen. Dies liegt in der unterschiedlich tiefen Kenntnis der Daten auf den relevanten Untersuchungsgebieten begründet.

Ein Beispiel dazu sind die Abgrenzungsprobleme bei den Energieketten: Während der fahrzeugseitige Teil solch einer Kette Hauptgegenstand der Untersuchung am ika ist und in den verschiedenen Variationen simuliert wurde (siehe Tabelle 3-3 auf S. 20 bzw. [GOS 00]), konnte für den vorgelagerten Teil der Energiekette auf keine ähnlich detaillierte Originäruntersuchung zurückgegriffen werden. Statt dessen wurden Ergebnisse des *IEA-Implementing Agreement 026 Annex X* [HÖH 00] [ERD 00] herangezogen, wo Daten aus den zahlreich zu diesem Thema existierenden Studien zusammengestellt worden sind (Abschnitt 3.2 S. 21ff.). Die Unsicherheit auf diesem Gebiet schlägt sich in einer breiten Varianz der Ergebnisse nieder, so daß die Datenlage im Bereich der Kraftstoffketten bei weitem nicht so detailliert ist wie bei der Simulation für das Fahrzeug.

Folglich fußt die vorliegende Studie zugunsten eines zu erstellenden Gesamtbildes auf unterschiedlich starken Fundamenten. Die hier unweigerlich zu treffenden Annahmen stehen immer unter der Prämisse, einen aus Sicht der beteiligten Experten objektiven Systemvergleich zu ermöglichen. Mit anderen Worten wurden hinsichtlich der zu evaluierenden Konzepte von Brennstoffzellenfahrzeugen eher konservative Annahmen getroffen.

### ***Gliederung der Arbeit***

Im folgenden Kapitel 2 (S. 8ff.) werden zunächst Konzeption und Modellidee der ökonomischen Systemanalyse vorgestellt. Dabei werden die Berechnungsstruktur sowie deren Umsetzung in den dann folgenden Hauptkapiteln der vorliegenden Arbeit detaillierter als hier an dieser Stelle erläutert.

Kapitel 3 (S. 12ff.) erklärt die ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen für die ökonomische Analyse.

Quantitative Betrachtungen nehmen üblicherweise und auch in dieser wirtschaftlichen Systemanalyse den größten Platz ein (Kapitel 4 bis 8 und 10). Kapitel 4 (S. 43 ff.) beschreibt die angenommenen Szenarien und bereitet die Daten für die Kostenanalyse des Fahrzeugs und der Infrastruktur auf, die in Kapitel 5 (S. 60ff.) und Kapitel 6 (S. 81ff.) folgen. Kapitel 7 (S. 103ff.) bestimmt die mikroökonomischen Kosten der Brennstoffzellenfahrzeuge und vergleicht diese mit denen konventioneller Fahrzeuge. Kapitel 8 (S. 135ff.) untersucht die makroökonomischen Auswirkungen einer Einführung von Brennstoffzellenfahrzeugen und neuen Kraftstoffen.

Qualitative bzw. noch nicht quantifizierbare Aspekte dieser Systemanalyse wurden nicht außer Acht gelassen. Im betreffenden Kapitel 9 (S. 171ff.) wird zunächst ein Gerüst zur Integration und Verdichtung aller Informationen erstellt und ein geeignetes 'technisches Werkzeug' vorgestellt.

Die Aussagen einer abschließenden Marktpotentialabschätzung (Kapitel 10, S. 219ff.), die ebenfalls zu einer Plausibilitätsprüfung der eingangs verwendeten Szenarien dient, und die Schlußfolgerungen (Kapitel 11, S. 229ff.) beschließen diese Arbeit.