

Automobilität und Innovation: Versuch einer interdisziplinären Systematisierung

Aigle, Thomas; Marz, Lutz

Veröffentlichungsversion / Published Version

Arbeitspapier / working paper

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit / provided in cooperation with:

SSG Sozialwissenschaften, USB Köln

Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

Aigle, T., & Marz, L. (2007). *Automobilität und Innovation: Versuch einer interdisziplinären Systematisierung*. (Discussion Papers / Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung, Forschungsschwerpunkt Organisationen und Wissen, Abteilung Innovation und Organisation, 2007-102). Berlin: Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung gGmbH. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-233803>

Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer Deposit-Lizenz (Keine Weiterverbreitung - keine Bearbeitung) zur Verfügung gestellt. Gewährt wird ein nicht exklusives, nicht übertragbares, persönliches und beschränktes Recht auf Nutzung dieses Dokuments. Dieses Dokument ist ausschließlich für den persönlichen, nicht-kommerziellen Gebrauch bestimmt. Auf sämtlichen Kopien dieses Dokuments müssen alle Urheberrechtshinweise und sonstigen Hinweise auf gesetzlichen Schutz beibehalten werden. Sie dürfen dieses Dokument nicht in irgendeiner Weise abändern, noch dürfen Sie dieses Dokument für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, aufführen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Mit der Verwendung dieses Dokuments erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Terms of use:

This document is made available under Deposit Licence (No Redistribution - no modifications). We grant a non-exclusive, non-transferable, individual and limited right to using this document. This document is solely intended for your personal, non-commercial use. All of the copies of this documents must retain all copyright information and other information regarding legal protection. You are not allowed to alter this document in any way, to copy it for public or commercial purposes, to exhibit the document in public, to perform, distribute or otherwise use the document in public.

By using this particular document, you accept the above-stated conditions of use.

Thomas Aigle und Lutz Marz

Automobilität und Innovation

Versuch einer interdisziplinären Systematisierung

SP III 2007-102

ZITIERWEISE/CITATION:

Thomas Aigle und Lutz Marz

Automobilität und Innovation

Versuch einer interdisziplinären Systematisierung

Discussion Paper SP III 2007-102

Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (2007)

Schwerpunkt:

Organisationen und
Wissen

Research Area:

Organizations and
Knowledge

Abteilung:

Innovation und
Organisation

Research Unit:

Innovation and
Organization

Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung gGmbH (WZB)

Reichpietschufer 50, D-10785 Berlin

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

www.wzb.eu/ow/inno

Zusammenfassung

Das Automobil ist nicht nur mit Abstand der Verkehrsträger Nummer 1, sondern es ist ein integraler Bestandteil moderner Gesellschaften und ein Symbol für Status, Wohlstand, Freiheit, Dynamik und Fortschritt. Der harte technische Kern des Autos besteht in einer über hundert Jahre alten Verbrennungsmotorik, bei der fossile Brennstoffe aus der Natur importiert und Treibhausgase in die Natur exportiert werden. Dieser harte technische Kern erweist sich zunehmend als problematisch, und zwar sowohl im Hinblick auf die Verfügbarkeit von fossilen Brennstoffen als auch in Bezug auf die Emissionen und deren Folgen. Im letzten Jahrzehnt wurde deshalb weltweit eine Vielzahl von Innovationen in Angriff genommen, um die fossile Verbrennungsmotorik zu optimieren und zu substituieren. In der vorliegenden Arbeit wird der Versuch unternommen, dieses breit gefächerte Feld antriebs- und kraftstoff-technologischer Innovationen aus einer interdisziplinären Perspektive zu systematisieren und zu analysieren. Im Zentrum stehen dabei die Entwicklung einer Innovations-Matrix sowie die Diskussion der daraus abgeleiteten Innovations-Cluster.

Abstract

Not only is the automobile the world's number one transportation vehicle, it is also a vital part of modern societies. It is as a status symbol representing prosperity, freedom, and progress. The main technical component of the automobile is the more than a century old internal combustion engine which, in order to function, requires fossil fuels. Despite this dependency on nature, however, the toxic gases it produces are responsible for an important part of the pollution to our environment. Thus the internal combustion engine is increasingly becoming a problem due to the limitation of the fossil fuels it requires, on the one hand, and to the toxic emissions and subsequent environmental pollution it produces on the other. For the past decade, a multitude of technical innovations have been presented and implemented worldwide in order to optimize or even provide a substitute for the internal combustion engine. It is the purpose of this paper to attempt to analyse this wide variety of innovations in the fields of alternative fuels and new engine types from an interdisciplinary perspective. This analysis is centred around the development of an innovation matrix and the discussion of the innovation-cluster derived from it.

Inhalt

1. Automobilitäts-Maschine	7
2. Innovations-Druck	8
3. Innovations-Theorien.....	19
4. Innovations-Matrix	31
5. Innovations-Cluster	39
5.1. Cluster-Übersicht.....	39
5.2. Cluster 1: Nicht-alternative Verbrennungsmotoren	41
5.3. Cluster 2: Wasserstoff-Verbrennungsmotoren («Kraftstoff-Brücke»).....	52
5.4. Cluster 3: Hybrid-Antriebe («Antriebs-Brücke»).....	60
5.5. Cluster 4: Batterie-Elektroantriebe («Insel-Brücke»).....	73
5.6. Cluster 5: Brennstoffzellen-Elektroantriebe.....	82
6. Bilanz und Agenda	97
7. Bibliographie.....	101

1. Automobilitäts-Maschine

Noch bevor das 19. Jahrhundert Abschied nahm, schrieb Egon Friedell 1931 in seiner »Kulturgeschichte der Neuzeit«, „erzeugt es die zwei größten Veränderer der äußeren Realität, die die neuen Zeiten erblickt haben: das Automobil und den Kinematographen“ (Friedell 2002, 1352). Inzwischen schreiben wir das »Das zweite Jahrhundert des Automobils« (Canzler/Schmidt 2003) und Friedells Einschätzung hat sich nicht nur bestätigt, sondern scheint aktueller denn je zu sein.

Das Automobil ist mit Abstand der Verkehrsträger Nummer 1: Ungefähr 90% aller Personenkilometer, die mit einem Verkehrsmittel zurückgelegt werden, entfallen auf das Auto (PGM 2004, 9). Doch damit nicht genug. Das Auto ist weit mehr als ein bloßes Fortbewegungsmittel. Es ist das paradigmatische Produkt der fossilen Mobilitätsgesellschaft (Altvater 2006, 175) und das Symbol der Moderne (Buhr et al. 1999, 11) schlechthin. Und genau als solches, als Paradigma und Symbol, wird es auch in den aufstrebenden Wachstumsgesellschaften wahrgenommen, wie etwa in China, wo das Automobil sowohl als individuelles Statussymbol als auch als Beweis für die Modernität der Gesellschaft gefeiert wird (SHISD 2005).

Alle Versuche, die Dominanz des Automobils zu brechen, sind bislang mehr oder weniger gescheitert. Dies betrifft nicht nur die akademisch-aufklärerischen Kritiken an der Auto-gesellschaft und ihren Folgen, sondern auch alltagspraktische Alternativangebote wie »Car Sharing«, »Cash Car« oder »BVGmetrocard«, die sich bisher nicht durchsetzen, sondern bestenfalls in Nischenmärkten etablieren konnten (Canzler/Knie 1998, 9; Knie 2003; PGM 2004).

Aus soziologischer Perspektive kann diese herausragende Rolle des Automobils als ein sozio-technisches Regime (Berkhout/Smith/Stirling 2004) verstanden werden, und zwar ein Regime, das sich durch drei Charakteristika auszeichnet:

- Das erste Charakteristikum betrifft den technischen Kern dieses Regimes, der sich im herrschenden Stand der Technik manifestiert (Knie 1991; Knie 1994, 29-70). Er besteht in einer Verbrennungsmotorik (Canzler 1996, 212-220), die zunächst fossile Brennstoffe, vor allem Öl, aus der Natur importiert und dann Treibhausgase wie Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Distickstoffoxid (N₂O) in die Natur exportiert.
- Das zweite Charakteristikum besteht in dem außergewöhnlich hohen Verflechtungsgrad von Automobilität und Gesellschaft. Das Auto ist zu einem integralen Bestandteil moderner Gesellschaften geworden, und zwar nicht nur technisch, wissenschaftlich, politisch und ökonomisch, sondern auch infrastrukturell, kulturell und habituell (Buhr et al. 1999; Rammler 2001; Canzler/Schmidt 2003).
- Das dritte Charakteristikum ist die Maschinenhaftigkeit des Automobilitätsregimes. Mit Blick auf die Stabilität, Regidität und Funktionalität dieses Regimes nimmt es selbst die Gestalt einer deterministischen Maschine an (Foerster 1985, 177-183). In Fortführung von Georg Simmels großstadtsoziologischen Analysen (Simmel 2001) wird das sozio-technische Automobilitätsregime in neueren verkehrssoziologischen Arbeiten deshalb auch als „soziale Maschine“ (Knie 1997),

große „Integrationsmaschine“ (Rammler 2001, 57) oder „Mobilitätsmaschine“ (PGM 2004) bezeichnet und untersucht.

Diese drei Charakteristika des sozio-technischen Automobilitäts-Regimes lassen sich wie folgt zusammenfassen und anschaulich auf den Begriff bringen:

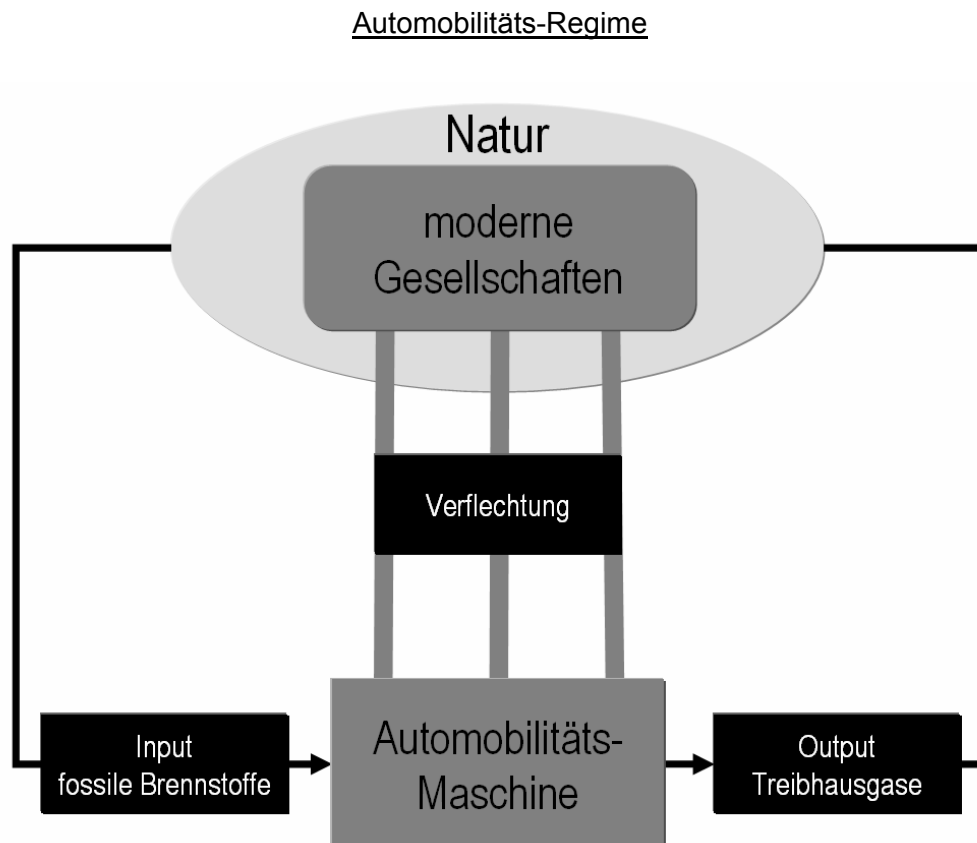


Abbildung 1, Quelle: eigene Darstellung

So gesehen wirkt die Automobilitäts-Maschine in zweierlei Hinsicht auf moderne Gesellschaften ein: Zum einen arbeitet sie sich über ihren harten technischen Kern und deren Input/Output-Kreislauf in die Umwelt und natürliche Basis dieser Gesellschaften hinein. Zum anderen ist sie nicht nur Teil, sondern Herzstück moderner Gesellschaften. Und genau aus dieser Doppelfunktion heraus gerät die Automobilitäts-Maschine in den letzten Jahren zunehmend unter Innovationsdruck.

2. Innovations-Druck

Der Innovations-Druck unter den die Automobilitäts-Maschine gerät, setzt sich aus drei Teil-Drücken zusammen: einem Input-, einem Output- und einem Verflechtungs-Druck. Diese drei Innovationsdrücke lassen sich stichpunktartig wie folgt skizzieren:

Input-Druck

Der Input-Druck resultiert aus der Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe, insbesondere aus der des Rohöls. Der Verkehr hängt zu etwa 90% vom Öl ab (Schindler/Weindorf 2003, 8). Häufig wird das Verfügbarkeitsproblem vor allem unter dem Gesichtspunkt der Ölreserven diskutiert. Im Mittelpunkt steht dann dabei die Frage, wie lange die Ölvorräte noch reichen. Diese Fokussierung ist nicht völlig falsch, verdeckt jedoch die beiden Kernprobleme der Verfügbarkeit, die Förderung und den Preis des Öls. Dies wird sehr anschaulich deutlich, wenn man beispielsweise folgende Statistik aus dem Esso-Bericht »Oeldorado 2005« betrachtet (Esso 2005):

Öl-Reserven, Öl-Förderung und Öl-Verbrauch Welt gesamt (in Mio. Tonnen)

	1990	1995	2000	2004
Öl-Reserven	135.734	136.890	139.626	173.338
Öl-Förderung	3.164,3	3.278,1	3.604,6	3.821,1
Öl-Verbrauch	3.130,2	3.233,7	3.539,2	3.780,1

In dieser Statistik ist kein Verfügbarkeits-Problem erkennbar: Öl-Förderung und Öl-Verbrauch steigen, die Förderung liegt immer über dem Verbrauch und die Öl-Reserven werden immer größer. Und selbst wenn sie nicht mehr wachsen würden und der jährliche Verbrauch auf 4.000 Mio. Tonnen stiege, wäre Öl für die nächsten 45 Jahre verfügbar. In der Tat ein »Oeldorado«.

Ein anderes Bild ergibt sich jedoch bei einer differenzierteren Analyse und vor allem Prognose der Öl-Förderung. Hier lassen sich zunächst drei Analytiker-Gruppen ausmachen, nämlich die Wachstums-Analytiker, die Plateau-Analytiker und die Gipfel-Analytiker.

- Die Wachstums-Analytiker gehen davon aus, dass sich die Öl-Förderung in den nächsten Jahrzehnten weiter steigern lässt. Zu dieser Gruppe gehören die Internationale Energie Agentur (IEA) in Frankreich und die Energy Information Administration (EIA) in den USA.
- Die Plateau-Analytiker halten eine Steigerung der Förderquoten zwar prinzipiell für möglich, allerdings lang- und nicht mittelfristig. Sie gehen davon aus, dass die Öl-Förderung zunächst stagniert und die Erschließung neuer Erdölvorkommen und die Entwicklung moderner Fördertechnologien erst in einem Jahrzehnt eine spürbare Erhöhung ermöglicht. Zu dieser Gruppe gehören Analysten der Investment Bank Goldman Sachs in den USA.
- Die Gipfel-Analytiker schließlich sind der Auffassung, dass der Peak der Öl-Förderung bereits erreicht ist beziehungsweise bis etwa 2010 erreicht wird und die Förderquote endgültig nicht weiter erhöht werden kann, sondern tendenziell

abnimmt. Zu dieser Gruppe gehören die L-B-Systemtechnik GmbH (LBST) in Deutschland und die Association for the Study of Peak Oil&Gas (ASPO) in Irland.

Ausgehend von den einschlägigen Studien der Wachstums-Analytiker (Biroi 2002; Wood/Long/Morehouse 2004), der Plateau-Analytiker (Goldman Sachs 2005) und der Gipfel-Analytiker (Zittel/Schindler 2003; ASPO 2006) lassen sich die unterschiedlichen Prognosen wie folgt idealtypisch darstellen:

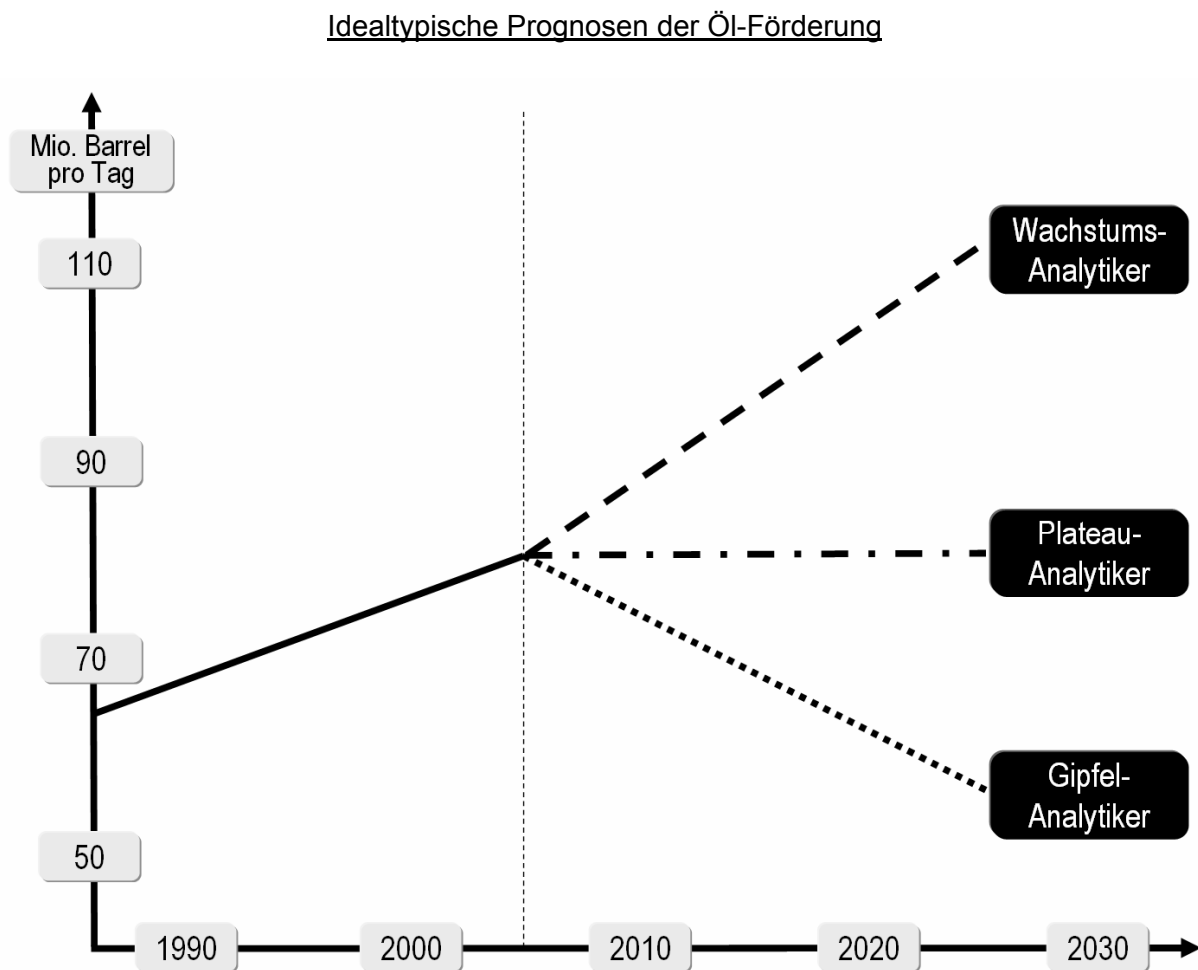


Abbildung 2, Quelle: eigene Darstellung

Noch bis vor wenigen Jahren dominierten unter Experten und in der breiten Öffentlichkeit die Szenarien der Wachstums-Analytiker. Inzwischen greift jedoch zunehmend Skepsis Raum. Differenzierte Analysen der Öl-Funde und Öl-Reserven, der Öl-Qualitäten und Öl-Felder sowie der prognostizierten und erreichten Förderquoten (Schindler/Weindorf 2003; Zittel/Schindler 2003; Zittel/Schindler 2004) lassen die optimistische Prognostik der Wachstums-Analytiker zunehmend ins Wanken geraten.

Hinzu kommt, dass die Szenarien der Wachstums-Analytiker implizit darauf basieren, dass die Öl-Förderung in Saudi-Arabien und im Irak in den kommenden Jahren exorbitant, nämlich auf bis zu 450 % gesteigert werden könnte (Schindler/Weindorf 2005). Dies erscheint nicht nur aus geologischer Sicht, sondern auch angesichts der politischen und ökonomischen Instabilitäten in beiden Ländern sowie den verschiedenen Langfrist-Krisen im

Nahen und Mittleren Osten mehr als fraglich. In diesen und anderen Spannungsgebieten ist realistischerweise eher mit diskontinuierlichen als mit stetig und steil steigenden Förderquoten zu rechnen.

Die Förderung ist jedoch nur die eine Seite der Öl-Verfügbarkeit, die andere ist der Preis. Und dieser wird bekanntlich wesentlich durch das Verhältnis von Angebot und Nachfrage bestimmt. Während die Einschätzungen im Hinblick auf die Öl-Förderung extrem divergieren, konvergieren sie in Bezug auf die zu erwartende Nachfrage. Hier gibt es, soweit wir sehen, keine Prognosen, die davon ausgehen, dass der Öl-Bedarf in den nächsten Jahren konstant bleibt oder gar sinkt. Unisono gehen die Experten hier von einer Erhöhung der Nachfrage aus (Biol 2002; Zittel/Schindler 2004). Fraglich ist nur, um wie viel sie steigt, nicht dass sie steigt. Dies kann auch nicht überraschen, denn allein China treibt beispielsweise die Nachfrage zunehmend in die Höhe (Trinh 2005, 24). Zum einen, weil dort der Öl-Verbrauch seit Mitte der 90er Jahre die Eigenproduktion übertrifft – Tendenz steigend (Zhu 2003; Canzler/Knie/Marz 2006). Zum anderen, weil das Land mit seinem 25-jährigen Hyperwachstum (Dierkes et al. 2006) eine immer gewichtigere Rolle auf den internationalen Ölmärkten spielt.

Setzt man nun den steigenden Öl-Bedarf mit den zuvor diskutierten gegensätzlichen Förderprognosen in Beziehung, dann ergibt sich – wieder idealtypisch – folgendes Bild:

Prognosen der Öl-Förderung und des Öl-Bedarfs

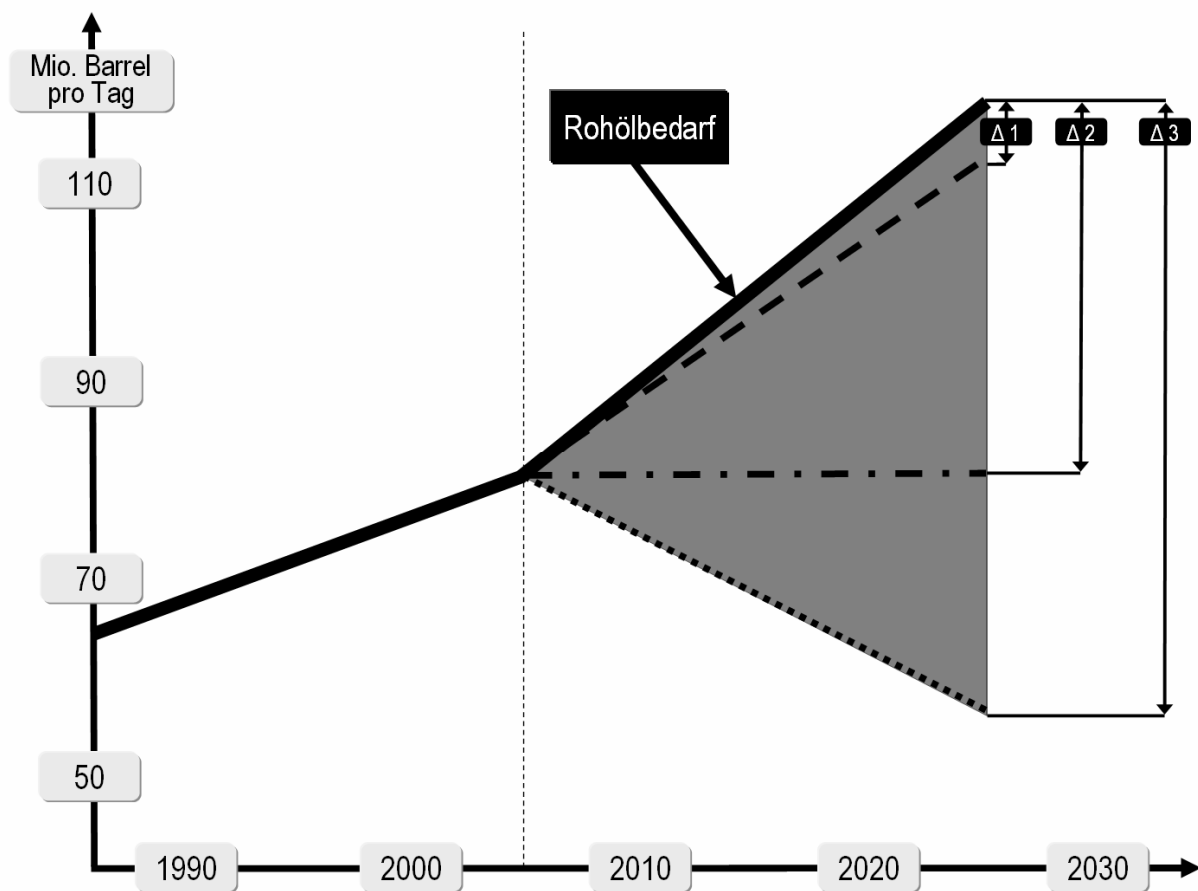


Abbildung 3, Quelle: eigene Darstellung

Dabei ist das Δ die Differenz zwischen dem voraussichtlichen Öl-Bedarf und den jeweiligen Förderprognosen der Wachstums-Analytiker ($\Delta 1$), der Plateau-Analytiker ($\Delta 2$) und der Gipfel-Analytiker ($\Delta 3$). Und es ist unschwer zu sehen, dass gilt:

$$\Delta 1 < \Delta 2 < \Delta 3$$

Diese unterschiedlichen Differenzen zwischen Nachfrage (Öl-Bedarf) und Angebot (Öl-Förderung) haben unterschiedliche Auswirkungen auf den Öl-Preis. Während $\Delta 1$ lediglich zu einem geringfügigen Anstieg der Preise führen würde, wäre die Preiserhöhung bei $\Delta 2$ schon gravierend. Und träte der Fall $\Delta 3$ ein, käme es zu einer Explosion der Öl-Preise. Angesichts der Prognosen der Plateau- und der Gipfel-Analytiker werden dann für die nächsten Jahre auch schon Preise von bis zu 250 Dollar pro Barrel prophezeit (Liebermann 2005). Aber selbst im Falle $\Delta 1$ besitzen Preise von 50 oder gar 30 Dollar pro Barrel, wie sie in neuesten McKinsey-Szenarien unterstellt werden (McKinsey 2006, 22), keinerlei Plausibilität.

Mit Blick auf die beiden Kernprobleme der Verfügbarkeit, die Förderung und den Preis des Öls, stellen lediglich die Szenarien der Wachstums-Analytiker für die nächsten Jahrzehnte eine Versorgungssicherheit auf bisherigem Niveau in Aussicht, während die Prognosen der Plateau- und der Gipfel-Analytiker eine solche Sicherheit in Frage stellen beziehungsweise gänzlich ausschließen. Dies wiederum bedeutet im Hinblick auf die Automobilitäts-Maschine, dass sie Input-seitig ins Stottern und im Extremfall immer häufiger auch zum Stillstand kommen kann.

Um dem zu begegnen, sind Innovationen nötig, die den Öl-Verbrauch und die Öl-Abhängigkeit der Automobilitäts-Maschine mittelfristig reduzieren und langfristig beseitigen. Dabei dürfte der Input-seitige Innovations-Druck direkt proportional der Öl-Preis-Entwicklung und indirekt proportional der Höhe der Öl-Förderung sein: Steigende Preise und sinkende Förderung, hoher Innovationsdruck; sinkende Preise und steigende Förderung, niedriger Innovationsdruck.

Output-Druck

Seit geraumer Zeit sind zwei Trends zu beobachten und unter Experten auch weitgehend unstrittig: Zum einen, dass seit 1861, dem Beginn systematischer meteorologischer Aufzeichnungen, sowohl die global gemittelte Temperatur als auch die Temperatur der nördlichen Hemisphäre ansteigen (UBA 2001; IPCC 2001, 49). Zum anderen, dass seit Beginn der Industrialisierung, also seit Ende des 18. Jahrhunderts, die Konzentration von Treibhausgasen, insbesondere von CO_2 , CH_4 und N_2O , in der Atmosphäre zunimmt, und zwar exponentiell (UBA 2001; IPCC 2001, 47).

Strittig war jedoch bis vor Kurzem, ob beide Trends etwas miteinander zu tun haben, insbesondere, ob und inwieweit die steigende Treibhausgas-Konzentration die Temperatur-Erhöhung verursacht. Hier gab es unter den Experten zwei gegensätzliche Auffassungen (HBS 2006): Die einen vertraten die Ansicht, dass die beobachtete Erwärmung weitgehend natürliche Ursachen habe und vor allem durch die Schwankungen der Solarstrahlung bedingt sei. Die anderen waren der Überzeugung, dass nicht natürliche, sondern anthropogene

Faktoren, vor allem eben die Treibhausgas-Emissionen, für den Temperaturanstieg verantwortlich zeichnen.

Lange waren die Experten der letztgenannten Gruppe in der Minderzahl und es war unklar, welches der beiden Lager recht behalten sollte. Selbst in renommierten naturwissenschaftlichen Journalen wurde noch Mitte der 90er Jahre die Meinung vertreten, dass die exponentiell wachsende CO₂-Konzentration „bisher nicht mit einer signifikanten Änderung der Atmosphärentemperatur verknüpft“ sei (Trömel/ Loose 1995, 165).

Inzwischen ist der anthropogene Charakter der Erderwärmung unter Experten weitgehend unbestritten (IPCC 2001, 50-51; UBA 2001; BMBF 2003, 8). Ausgehend davon ergibt sich folgendes Bild:

Treibhausgas-Konzentration und Temperaturerhöhung

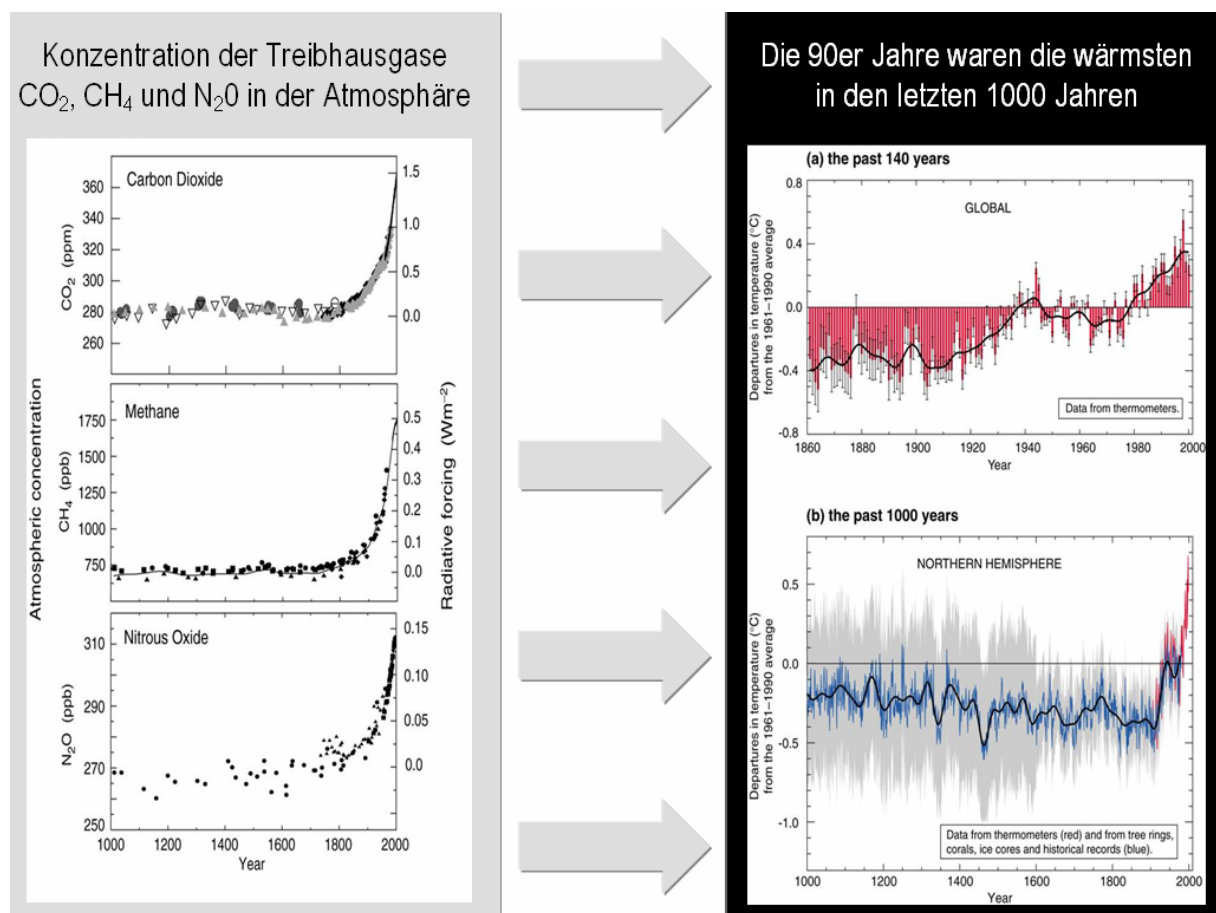


Abbildung 4, Quelle: eigene Darstellung und IPCC 2001, 47, 49

Beides, die Konzentration der drei Treibhausgase und die dadurch verursachte Erhöhung der Temperatur zeichnen sich seit Beginn des 20. Jahrhunderts durch ein exponentielles Wachstum aus. Und dieses Wachstum blieb nicht folgenlos. Experten beobachten eine Vielzahl von Phänomenen, die durch die Temperatur-Erhöhung verursacht wurden. Dazu gehören, beispielsweise folgende (UBA 2001):

- seit 1861 traten die vier wärmsten Jahre in den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts auf,

- der Meeresspiegel erhöhte sich im vergangenen Jahrhundert um 10 bis 20 Zentimeter,
- während der Niederschlag in den mittleren und höheren Breiten der nördlichen Hemisphäre im 20. Jahrhundert um 0,5 bis 1% pro Dekade zunahm, sank er in den subtropischen Gebieten, wodurch dort häufigere und intensivere Dürren auftraten,
- seit 1970 nehmen im Pazifik länger andauernde und intensivere Temperatur-Anomalien (El Niño-Ereignisse) zu,
- die Schneebedeckung in der nördlichen Hemisphäre sank seit 1960 um 10%
- klimatische Extremereignisse treten häufiger auf.

Für das 21. Jahrhundert wird erwartet, dass die durch die Treibhausgas-Emission verursachte Temperatur-Erhöhung weit stärkere und gravierendere Folgen hat. Einige davon sind in der folgend Tabelle zusammen gestellt (IPCC 2001, 82; UBA 2001; BMBF 2003, 48):

Phänomene, Wahrscheinlichkeit und Folgen der Temperaturerhöhung

Phänomen	Vertrauenswürdigkeit beobachteter Änderungen (1950-2000)	Vertrauenswürdigkeit projizierter Änderungen (2000-2100)	ausgewählte Folgen
Höhere Temperaturmaxima und mehr Hitzetage über nahezu allen Landmassen	wahrscheinlich	sehr wahrscheinlich	Hitzestress für Menschen und Tiere
Höhere Temperaturminima, weniger Kälte- und Frosttage über nahezu allen Landmassen	sehr wahrscheinlich	sehr wahrscheinlich	Zunahme von Schädlingen und Krankheitserregern
Geringerer täglicher Schwankungsbereich der Temperaturen über den meisten Landmassen	sehr wahrscheinlich	sehr wahrscheinlich	Veränderung der Ökosysteme
Ansteigen des Hitzeindex über Landmassen	wahrscheinlich über vielen Gebieten	sehr wahrscheinlich über vielen Gebieten	Veränderung der Ökosysteme
Häufigere intensive Niederschlagsereignisse	wahrscheinlich über vielen Landmassen	sehr wahrscheinlich über vielen Gebieten	Überflutungen, Erd- und Schlammrutsche, Bodenerosion
Ansteigen der kontinentalen Sommertrockenheit und der damit verbundenen Dürregefahr	wahrscheinlich in wenigen Gebieten	wahrscheinlich über den meisten innerkontinentalen Landmassen mittlerer Breiten	abnehmende Ernteerträge, abnehmende Quantität und Qualität der Wasserressourcen
Zunahme der Spitzengeschwindigkeiten in tropischen Zyklonen	wurde nicht beobachtet	wahrscheinlich über einigen Gebieten	Zerstörungen, Küstenerosion, Epidemien
Zunahme der mittleren und maximalen Niederschlagsintensitäten in tropischen Zyklonen	Datenlage für Beurteilung nicht ausreichend	wahrscheinlich über einigen Gebieten	Überflutungen

Abbildung 5, Quelle: eigene Darstellung und (IPCC 2001, 82; UBA 2001; BMBF 2003, 48)

Dies sind keine Horror-Szenarien, sondern sachliche Experteneinschätzungen. Horror-Szenarien sehen anders aus, beispielsweise so, wie die von dem renommierten amerikanischen Zukunftsforscher Peter Schwartz und Doug Randall im Auftrag des Pentagon erarbeitete Studie »Imagining the Unthinkable. An Abrupt Climate Change Scenario and Its Implications for United States National Security« (Schwartz/Randall 2003). Die Studie geht davon aus, dass die Erwärmung bis 2010 einen kritischen Wert erreicht, dessen Überschreitung zu einem globalen Klimakollaps und für Europa zu einem rapiden Temperatursturz führt. In den folgenden zwei Jahrzehnten käme es dann weltweit zu ebenso massiven wie dauerhaften kriegerischen Auseinandersetzungen um Nahrungsmittel, Ressourcen, Energie und Lebensräume.

Auch wenn man derartigen Extrem-Szenarien nicht folgt, steht heute zweifelsfrei fest, dass die durch die Treibhausgas-Emission verursachte Temperatur-Erhöhung weltweit zu erheblichen Klimaveränderungen führen wird. Und es ist auch weitgehend unstrittig, dass es zwingend notwendig ist, die Treibhausgas-Emissionen, insbesondere die CO₂-Emissionen zu senken. Dies betrifft alle Verursacher, auch den Straßenverkehr. Im Jahre 2000 hatte der Transportsektor in Deutschland einen Anteil von 21,9% an den gesamten CO₂-Emissionen, wovon wiederum 90% vom Straßenverkehr verursacht wurden (IFEU 2004, 4). Während es insgesamt von 1990 bis 2002 in Deutschland gelang, die CO₂-Emissionen um 18,6% zu reduzieren, erhöhten sich die Emissionen im Straßenverkehr um 10,5% (Schindler/Weindorf 2005, 5).

Damit steht die Automobilitäts-Maschine unter einem doppelten Druck: Zum einen hat sie einen überdurchschnittlich hohen Anteil an den gesamten CO₂-Emissionen (ebenda), zum anderen leistet sie einen unterdurchschnittlichen Beitrag zur Emissions-Reduzierung. Wenn bis Mitte dieses Jahrhunderts eine CO₂-Minderung in der Größenordnung von 80% erreicht werden soll (Enquete-Kommission 2002), dann muss der CO₂-Ausstoß des Verkehrssektors bis 2050 um 34 bis 55% gegenüber 2002 reduziert werden (SRU 2005, 2). Dies stellt einen hohen Innovationsdruck dar.

Verflechtungs-Druck

Die Automobilitäts-Maschine ist tief in den Kernstrukturen moderner Gesellschaften verankert und filigran mit den Alltagswelten der Menschen verwoben. Nahezu alle Bürger haben bis zu ihrem 30. Geburtstag einen Führerschein (Buhr et al. 1999, 11; PGM 2004, 9). Das Automobil ist eine Art „Universalgerät“ (ebenda), es ist nicht nur Verkehrsträger, sondern auch „Reizschutzpanzer“ (Rammler 2001, 56), der die Nutzer vor den ökologischen, sozialen und psychosomatischen Zumutungen der Verkehrsströme abschottet. Es ist ein polyvalentes Transportmittel, das Wohn-, Einkaufs-, Arbeits- und Freizeiträume miteinander verbindet (Canzler 1997, 101). Das Auto ist Symbol für Status, Wohlstand, (Bewegungs-)Freiheit, Dynamik, und Fortschritt (Canzler 1996, 48-57; Altvater 2006, 175). Es ist Cockpit und Konzertsaal, telematisches Wunder und Lebenstraum, Rennwagen und Flaniermobil, Objekt der Begierde und des Ärgers, Gebrauchsgegenstand und Prestigeemblem. Das Automobil hat sich nicht nur tief in den Habitus des modernen Menschen eingeschrieben, sondern auch in dessen Institutionen.

Vergegenwärtigt man sich diese vielfältigen Verbindungen und versucht sie zu systematisieren, dann lassen sich mindestens folgende sieben Ebenen ausmachen, über die die Automobilitäts-Maschine in moderne Gesellschaften verflochten ist:

Verflechtungs-Ebenen zwischen Automobilitäts-Maschine und moderner Gesellschaften

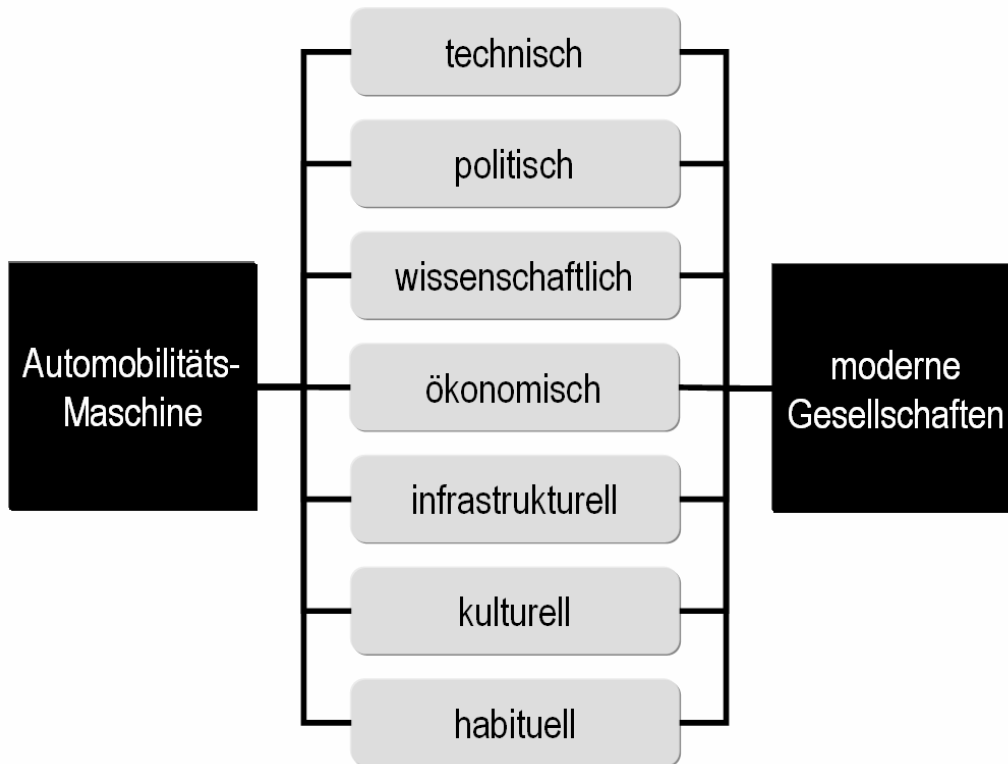


Abbildung 6, Quelle: eigene Darstellung

Nicht nur die Breite und Tiefe dieser sieben Verflechtungsebenen, sondern auch ihr diffiziles Zusammenspiel, machen die Automobilitäts-Maschine zu einem der Hauptstützpfiler moderner Gesellschaften – auch und gerade in Deutschland. Er ist ebenso in den Herzen und Hirnen der Menschen wie in der institutionellen Architektur der gesamten Gesellschaft verankert. Das tatsächliche Ausmaß dieser zuweilen unterschätzten Stützpfiler-Funktion der Automobilitäts-Maschine wird bereits sehr schnell deutlich, wenn man sich nur einige Daten und Fakten der infrastrukturellen und ökonomischen Verflechtungsebenen vor Augen führt.

In Deutschland gab es 2005 insgesamt 15.187 Tankstellen, davon 14.811 Straßen- und 376 Autobahn-Tankstellen (MWV 2006, 37). Im gleichen Jahr betrug die Kapazität der Entschwefelungsanlagen für Benzine 28,9 Mio. Tonnen (ebenda, 38). Im Jahre 2004 existierten Mineralöl-Tanklager mit einem Fassungsvermögen von über 71,5 Mio. m³ (ebenda, 36). Ende der 90er Jahre hatte das Pipeline-Netz für Rohöl eine Gesamtlänge von 2.370 km und ein Aufkommen von 89,3 Mio. Tonnen (MWV 2000, 23, 24). Hinzu kommt das große NATO-Netz (CEPS/NEPS), das in Deutschland eine Länge von 2.800 km besitzt (ebenda, 17).

Zur Mineralöl-Logistik der Automobilitäts-Maschine gehören jedoch nicht nur Tankstellen, Entschwefelungsanlagen, Tanklager und Pipelines, sondern auch Seetanker, Binnenschiffe, Eisenbahn-Ganzzüge und -Einzelwagen sowie Straßen-Tankwagen und Anhänger. 1998

gab es 38.500 Eisenbahn-Kesselwagen mit einer Ladekapazität von 2,6 Mio. m³ sowie 10.548 Straßen-Tankwagen und 8.794 Tankanhänger mit einer Ladekapazität von insgesamt 270.184 Tonnen (MWV 1999, 33).

Bereits diese wenigen Eckdaten lassen den materiellen und monetären Umfang der Infrastruktur erahnen, die der Betrieb der Automobilitäts-Maschine erfordert und die sich über mehr als ein Jahrhundert herausgebildet hat. Hinzu kommen das Straßen- und Autobahnnetz, die Vertriebs- und Service-Netze, die Versicherungs- und Rechtsschutz-Dienstleistungen etc.

Die ökonomische Bedeutung der Automobilitäts-Maschine für die deutsche Wirtschaft veranschaulicht folgende Abbildung:

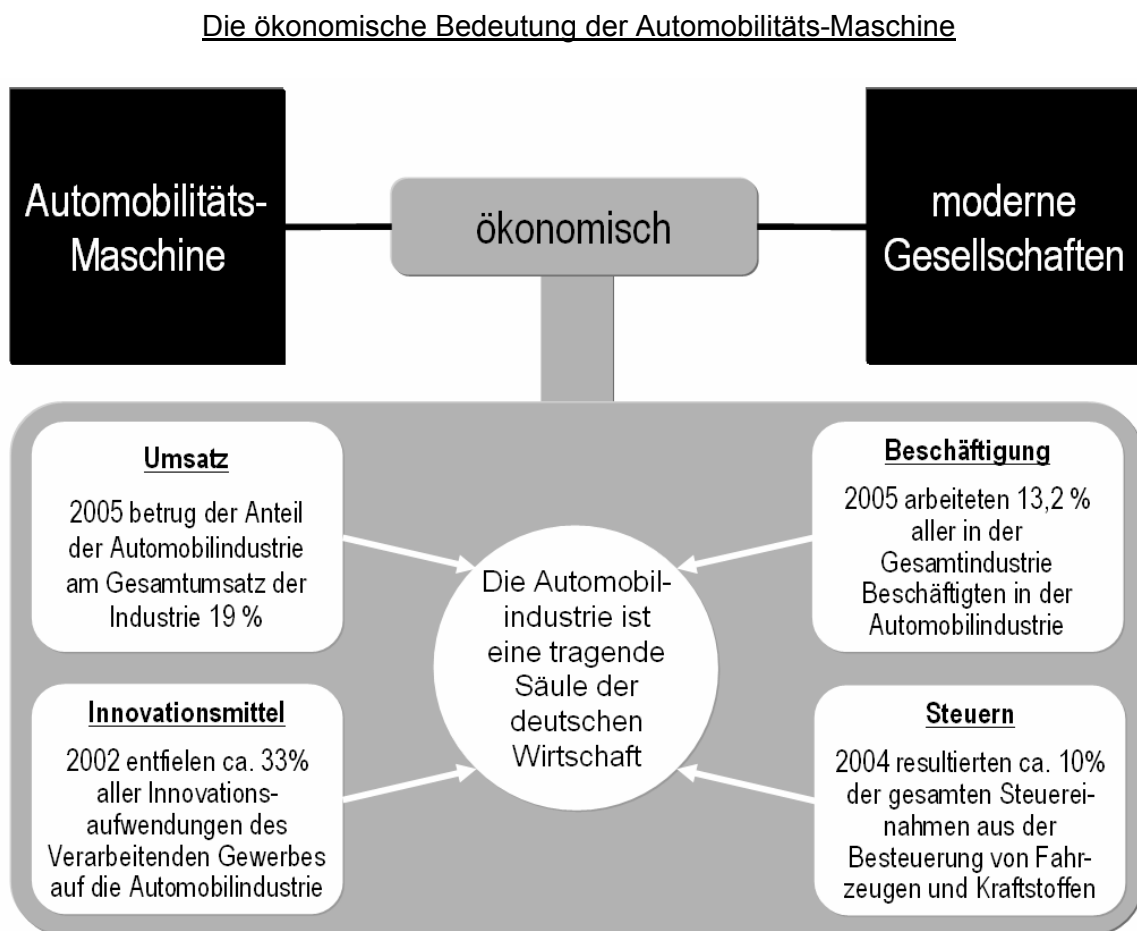


Abbildung 7, Quelle: eigene Darstellung, VDA 2006, 182, 183; Jürgens/Meißner 2005, 24; McKinsey 2006, 118)

Sieht man sich einmal allein den Indikator »Beschäftigung« etwas näher an, verschärft sich das Bild nochmals: Bei insgesamt steigender Arbeitslosigkeit und einer sinkender Zahl von Arbeitsplätzen, hat die Automobilindustrie in den letzten zehn Jahren in Deutschland 130.000 Arbeitsplätze geschaffen (VDA 2006, 183), soviel, wie keine andere Branche. Schätzungen zufolge waren 2005 direkt in der Automobilindustrie mehr als 766.000, in den vor- und nachgelagerten Bereichen ca. 1,4 Mio. und indirekt insgesamt 5,3 Mio. Menschen beschäftigt (ebenda; Roventa/Weber 2006; BDI 2006, 7).

Angesichts dieses Verflechtungs-Drucks ist klar, dass es bei der Bewältigung der eingangs skizzierten Input- und Output-Drücke nicht um eine schlichte „Abschaltung“ oder „Abschaffung“ der Automobilitäts-Maschine, sondern nur um deren Umbau gehen kann, genauer, um den Umbau des harten technischen Kerns der Automobilitäts-Maschine. Dies wiederum bedeutet, dass der klassische Verbrennungsmotor, also der fossile Brennstoffe, insbesondere Öl benötigende thermische Antrieb, substituiert werden muss. Und genau in dieser Richtung sind im letzten Jahrzehnt eine Vielzahl von Innovationen in Angriff genommen worden, und zwar sowohl im Hinblick auf die Substitution des Antriebs als auch in Bezug auf die Substitution des fossilen Kraftstoffs.

Was die Substitution des thermischen Antriebs betrifft, wurden zum Beispiel nicht nur unterschiedliche Brennstoffzellen- und Elektro-Fahrzeuge sowie verschiedene Hybrid-Systeme entwickelt, sondern auch bivalente Motoren, die sowohl mit fossilen Brennstoffen als auch mit Wasserstoff betrieben werden können. Und was die Kraftstoff-Substitution angeht, gibt es unterschiedliche Varianten von synthetischen Kraftstoffen, Bio-Ölen, Alkoholen, Bio-Gasen und Wasserstoffen.

Um dieses ebenso breit gefächerte wie tief gestaffelte Feld antriebs- und kraftstofftechnologischer Innovationen differenziert zu analysieren und festzustellen, ob und inwieweit die verschiedenen Innovationen eine hinreichende Antwort auf den zuvor skizzierten Innovations-Druck sind, ist es notwendig, dieses Feld aus einer innovationstheoretischen Perspektive zu systematisieren.

3. Innovations-Theorien

Das Ziel, die Innovationen zum Umbau der Automobilitäts-Maschine aus einer innovationstheoretischen Perspektive zu systematisieren, bestimmt den Fokus unserer Theorie-Rezeption: Es geht hier nicht darum, die einschlägigen Innovations-Theorien zu rekonstruieren, zu diskutieren oder ihr Für und Wider gegeneinander abzuwägen, sondern sie daraufhin zu sichten, ob und inwieweit sie es ermöglichen, die unterschiedlichen antriebs- und kraftstofftechnologischen Innovationen zur Neugestaltung der Automobilitäts-Maschine zu klassifizieren. Dies geschieht in drei Schritten, indem zunächst der Begriff, dann verschiedene Typen und schließlich eine Systematik der Innovationen entwickelt werden.

Begriff

Innovation ist ein „schillernder, ein modischer Begriff“ (Hauschildt 1993, 3). Er gehört zur Kategorie „der sowohl schlecht-definierten, wie schlecht-strukturierten Probleme“ (Marr 1980, 952). Dies meint nicht, dass es etwa an Definitions- und Strukturierungs-Versuchen fehlen würde. Ganz im Gegenteil, die Zahl derartiger Versuche ist unüberschaubar und wächst ständig weiter an (Hauschildt 1993; 4-6; Wartburg 2000, 37-213; Braun-Thürmann 2005). Der springende Punkt besteht vielmehr darin, dass es keinen allgemein verbindlichen Konsens über den Inhalt und die Verwendung des Terminus »Innovation« gibt (Debus 2002, 92). Der kleinste gemeinsame Nenner der divergierenden Ansätze besteht darin, dass es bei

Innovationen im Kern immer um »Neues« und »Neuartiges«, um »Neuerung« und »Erneuerung« geht, also um etwas, „das bisher in dieser Form nicht bestanden hat“ (Helm 2001, 47). Dass dieser kleinste gemeinsame Nenner nicht so simpel ist, wie es auf den ersten Blick scheint, zeigen grundlagentheoretische Reflexionen über das »Neue«, die von der Philosophie Hegels bis zur dreiwertigen Logik reichen (Günther 1971).

Etymologisch hat dieser Kern des Begriffs »Innovation« eine lange Geschichte (Müller 1997, 9, 54): Die Griechen hatten für diesen Sachverhalt Wörter wie »kainotomia« oder »neochmosis«, die Römer benutzten Begriffe wie »res nova« oder »novitas«. Das Wort »innovatio« taucht erst im Kirchenlatein um 200 n. Chr. auf und meint »Erneuerung« beziehungsweise »Veränderung«. In der Renaissance wurde das Wort ins Französische (Montaigne), Italienische (Dante, Machiavelli, Galilei) und Englische (Shakespeare), aber nicht ins Deutsche aufgenommen. Hier hieß dieser Sachverhalt seit 1500 (Brant, Luther, Sachs) bis Anfang der 60er Jahre des 20. Jahrhunderts »Neuerung«. Mit der deutschen Übersetzung von Schumpeters Werk »Business Cycles«, in dem es ein Kapitel über die »Theorie der Innovation« gibt, fand der Terminus „Innovation“ seit 1961 dann auch Eingang in die deutsche Wissenschafts- und Alltagssprache.

Vor diesem Hintergrund kann es nicht verwundern, dass es eine ganze Reihe von Analysen gibt, auf denen zwar nicht »Innovation« draufsteht, sehr wohl jedoch Innovationstheorie drinsteckt. Ein Beispiel dafür ist einer der (technik-)soziologischen Klassiker, nämlich Marx. Für ihn ist die permanente Erneuerung ein Wesensmerkmal moderner Gesellschaften. Er schreibt: „Die Bourgeoisie kann nicht existieren, ohne die Produktionsinstrumente, also die Produktionsverhältnisse, also sämtliche gesellschaftlichen Verhältnisse fortwährend zu revolutionieren. Unveränderte Beibehaltung der alten Produktionsweise war dagegen die erste Existenzbedingung aller früheren industriellen Klassen. Die fortwährende Umwälzung der Produktion, die ununterbrochene Erschütterung aller gesellschaftlichen Zustände, die ewige Unsicherheit und Bewegung zeichnet die Bourgeoisieepoche vor allen anderen aus. Alle festen eingerosteten Verhältnisse mit ihrem Gefolge von altehrwürdigen Vorstellungen und Anschauungen werden aufgelöst, alle neugebildeten veralten, ehe sie verknöchern können. Alles Ständische und Stehende verdampft ...“ (Marx 1974, 465). Diese Charakteristik wurde zu einem Leitmotiv der Modernisierung (Berman 1988). Mit dem Begriff der »Umwälzung« analysiert Marx in verschiedenen Arbeiten (Marx/Engels 2000), insbesondere im »Kapital« bei der Untersuchung der »Maschinerie und großen Industrie« (Marx 1979, 391-530), die Dynamik und das Zusammenspiel technischer und sozialer Innovationen (Braun-Thürmann 2005, 8). Aufbauend auf diesen Analysen wurden auch mathematische Modellierungen technischer Innovationsprozesse entwickelt (Jiménez-Montaño/Ebeling 1980; Ebeling/Feistel 1982, 160-165, 271, 299-301)

Zwischen Marx und dem gemeinhin als Gründungsvater der sozialwissenschaftlichen Innovations-Theorien geltenden Schumpeter (Braun-Thürmann 2005, 8) gibt es mindestens zwei Ähnlichkeiten: Zum einen entwickelt Schumpeter seinen klassischen innovationstheoretischen Ansatz zunächst ebenfalls, ohne das Wort »Innovation« in der Überschrift oder im Text zu benutzen (Becker 2004, 88; Wartburg 2000, 38, 41). Zum anderen ist auch für ihn, wie für Marx, die permanente Umwälzung und Erneuerung der Kern jeglicher Innovationsprozesse. Er prägt dafür den inzwischen legendären Terminus der „schöpferischen Zerstö-

rung“ (Schumpeter 1972, 136f.), der das obige Marx-Zitat auf einen einprägsamen Begriff bringt.

In seiner »Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung« (Schumpeter 1987) entwickelt Schumpeter eine inhaltliche Bestimmung des Innovationsbegriffs, die bis heute nicht nur den ökonomischen, sondern den gesamten Innovations-Diskurs entscheidend prägt (Borchert/Goos/Hagenhoff 2003, 14; Wartburg 2000, 42; Billing 2003, 10). Für ihn handelt es sich bei einer Innovation immer um die „Durchsetzung neuer Kombinationen“ (Schumpeter 1987, 100), wobei er dabei fünf Fälle unterscheidet (Schumpeter 1987, 100-101), nämlich die

1. Herstellung eines neuen Gutes,
2. Einführung einer neuen Produktionsmethode,
3. Erschließung eines neuen Absatzmarktes,
4. Eroberung einer neuen Bezugsquelle von Rohstoffen,
5. Durchführung einer Neuorganisation.

Ausgehend von dieser Innovations-Charakteristik wurden eine Vielzahl mathematischer Modelle zur Beschreibung von Innovationsdynamiken entwickelt (Kwasnicki 2003; Keklik 2003; Windrum 2004; Frenken 2005).

Schumpeters fünf Fälle der Neukombination verweisen bereits auf unterschiedliche Innovations-Typen, so etwa auf Produkt- (1), Prozess- (2), Marketing- (3), strategische (4) sowie organisationale und soziale (5) Innovationen. Diese Klassifizierung ist jedoch nur eine von vielen möglichen.

Typen

Wie bei den Begriffsbestimmungen, gibt es auch bei den Klassifizierungen der Innovationen ein sehr breites Spektrum unterschiedlicher konzeptioneller Ansätze, die sich teilweise berühren und überschneiden (Bellmann/Haritz 2001, 273; Dinges 2001; Billing 2003, 11-15). Dies veranschaulicht die folgende Abbildung exemplarisch:

Drei Beispiele für die Klassifizierung von Innovationen

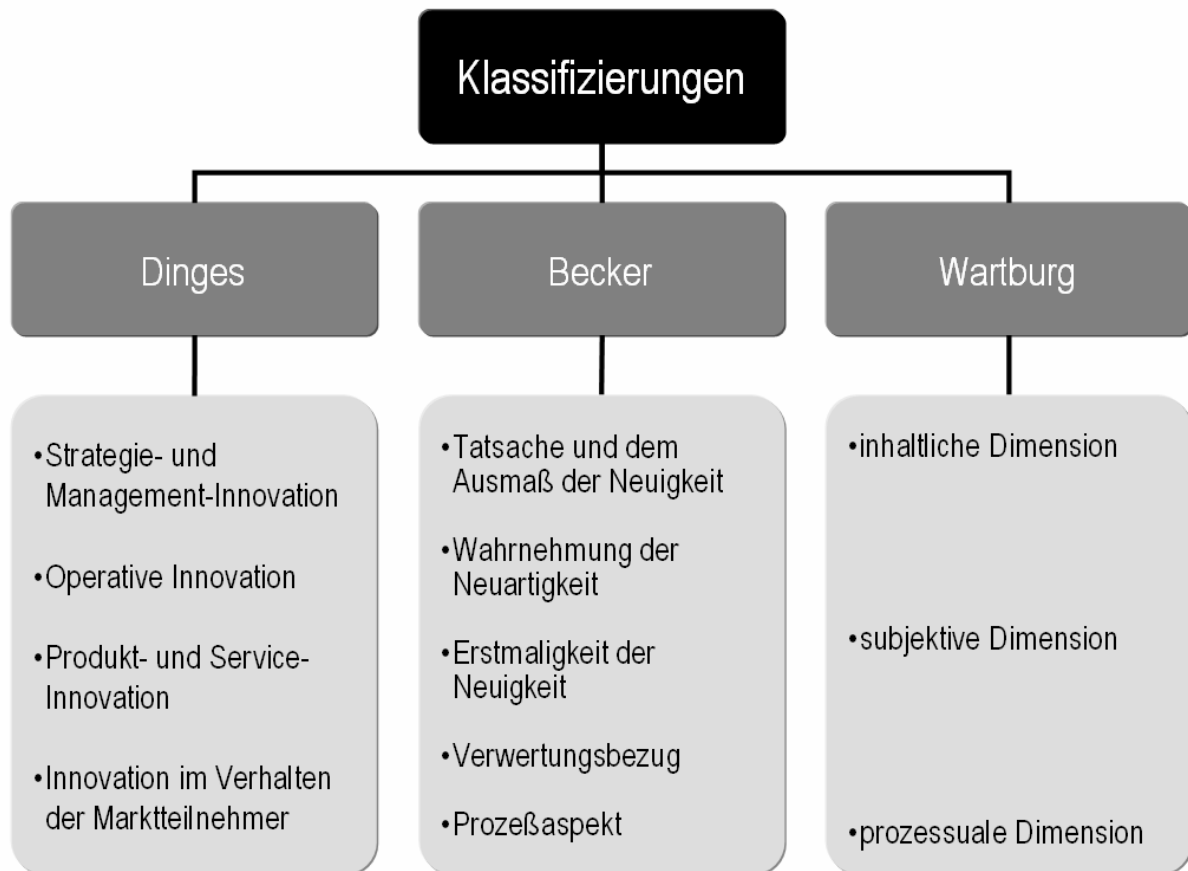


Abbildung 8, Quelle: eigene Darstellung; Dinges 2001; Becker 2004, 85-86; Wartburg 2000, 37-69

Derartige Grundklassifizierungen werden dann jeweils weiter ausdifferenziert. So unterscheidet etwa Dinges bei den operativen Innovationen zwischen Strukturorganisations-, Prozess- und Technologie-Innovationen sowie Innovationen im Mitarbeiterverhalten (Dinges 2001, 154). Und Wartburg differenziert bei der subjektiven Dimension von Innovationen beispielsweise zwischen der Wahrnehmung durch Individuen, Führungsinstanzen, Branchen-Akteuren und nationalen Innovationssystemen (Wartburg 2000, 56-58).

Angesichts dieses breiten und disparaten Klassifizierungsspektrums gibt es Bemühungen, die unterschiedlichen Klassifizierungen zu vereinheitlichen. Diese Bemühungen werden aus zwei unterschiedlichen Richtungen entwickelt, die sich vielleicht am besten als Alltags- und Meta-Klassifizierung bezeichnen ließen.

Die Alltags-Klassifizierung orientiert sich an vier elementaren Neuheits-Fragen und differenziert nach dem Innovationsobjekt (»Was ist neu?«), dem Neuigkeitsgrad (»Wie sehr neu?«), der Neuheitseigenschaft (»Für wen neu?«) und der Prozessdimension (»Wo beginnt, wo endet die Neuerung«) (Borchert/Goos/Hagenhoff 2003, 15). Diese Klassifizierung hat eine weite Verbreitung gefunden und findet sich in dieser oder jener Form in vielen Untersuchungen wieder (ebenda; Wartburg 2000, 43-69).

Die Meta-Klassifizierungen analysieren den akademischen Diskurs. Dabei konzentrieren sich die einfachen Meta-Klassifizierungen auf ein bestimmtes Klassifizierungsmerkmal, bei-

spielsweise den Innovationsgrad, untersuchen die theoretische und empirische Basis unterschiedlicher Konzeptualisierungen dieses Merkmals und setzen diese dann vergleichend miteinander in Beziehung (Schlaak 1999; Avlonitis/Papastathopoulou/Gaunaris 2001; Garcia/Clantone 2002). Derartige Meta-Klassifizierungen können dann wiederum selbst zum Gegenstand der Analyse werden, indem sie durch Meta-Meta-Klassifizierungen miteinander verglichen werden (Billing 2003, 18-30). Das Verfahren der Meta-Klassifizierungen ist nach oben hin offen, das heißt, jede Meta-Klassifizierung kann selbst wieder aus einer Meta-Perspektive analysiert und klassifiziert werden.

Unsere Typisierung ist vergleichsweise elementar. Sie erhebt nicht den Anspruch innovationstheoretischer Allgemeingültigkeit, sondern orientiert sich ausschließlich an dem Ziel, die unterschiedlichen antriebs- und kraftstofftechnologischen Innovationen zur Erneuerung der Automobilitäts-Maschine zu systematisieren. Dazu greifen wir auf eine grundlegende Unterscheidung und vier Leitdifferenzen zurück.

Die grundlegende Unterscheidung geht auf Schumpeter zurück und betrifft die Trennung von »Invention« und »Innovation«. Diese Unterscheidung wird schon sehr lange und eingehend aus unterschiedlichen Perspektiven diskutiert (Brozen 1951; Maclaurin 1953; Ruttan 1959). Eine Innovation ist nicht nur mehr, sondern auch etwas qualitativ anderes als eine Invention, also die bloße Erfindung oder Entdeckung. Inventionen sind nur dann Innovationen, wenn sie sich wirtschaftlich durchsetzen (Debus 2002, 95; Borchert/Goos/Hagenhoff 2003, 14; BMBF 2006). Oder, formelhaft verkürzt formuliert:

- innovation = „commercialization of invention“ (Kirchhoff/Walsh 2000, 328)
- „innovation = invention + exploitation“ (Roberts 1987, 3)

Im Hinblick auf den Umbau der Automobilitäts-Maschine lässt sich die Unterscheidung von Invention und Innovation sehr gut an zwei Beispielen illustrieren: Zum einen an einer antriebstechnologischen Innovation, nämlich der Entwicklung des Brennstoffzellen-Antriebes; zum anderen an einer kraftstofftechnologischen Innovation, und zwar der Entwicklung des Wasserstoff-Verbrennungsmotors. In den beiden folgenden Abbildungen sind jeweils Meilensteine dieser beiden Entwicklungen zusammengestellt, die den Unterschied von Invention und Innovation verdeutlichen:

Meilensteine der Entwicklung des Brennstoffzellen-Antriebes

1838
Christian Friedrich Schönbein
und Sir William Grove



1967
General Motors
Electrovan
Status: Funktionsmuster



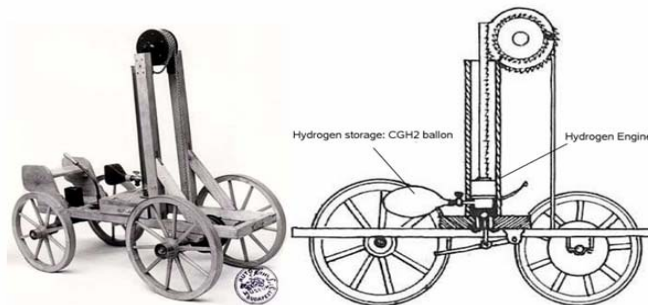
2002
DaimlerChrysler
Brennstoffzellen -Bus
Status: commercial



Abbildung 9, Quelle: eigene Darstellung; Wikipedia 2006a; H2Mobility 2006a

Meilensteine der Entwicklung des Wasserstoff-Verbrennungsmotors

1807
Isaac de Rivaz
Wasserstoff-
Verbrennungsmotor
Status:
experimentelles
Fahrzeug und
Patent



2003
BMW
bivalenter
Verbrennungsmotor
Status: Prototyp



Abbildung 10, Quelle: eigene Darstellung; H2Mobility 2006a

Das Prinzip der Brennstoffzelle wurde bereits 1838 von Christian Friedrich Schönbein entdeckt. Angeregt durch die Arbeiten von Schönbein erfand Sir William Grove 1839 das so genannte »Grovesche Element«, die erste Brennstoffzelle (Wikipedia 2006a). Beides, die Entdeckung von Schönbein als auch die Erfindung von Grove sind im Hinblick auf den Fahrzeugantrieb Inventionen, aber keine Innovationen. Dies gilt auch noch für das erste, 1967 von General Motors vorgestellte Funktionsmodell eines Brennstoffzellen-Vans. Erst Fahrzeuge wie der 2002 in Betrieb genommene Brennstoffzellen-Bus von DaimlerChrysler bilden den Beginn einer Innovation. Sie sind alltagstauglich und beginnen kommerziell genutzt zu werden.

Ähnlich verhält es sich mit der kraftstofftechnologischen Innovation des Wasserstoff-Verbrennungsmotors. Bereits 1807 entwickelte Isaac de Rivaz den ersten Wasserstoff-Verbrennungsmotor und erhielt dafür das Pariser Patent Nr. 731. Dies war zweifellos eine Invention, aber noch keine Innovation. Erst Fahrzeuge wie der 2003 vorgestellte Prototyp eines BMW 7er mit bivalenten Verbrennungsmotor, also einem Motor, der sowohl mit Benzin als auch mit Wasserstoff betrieben werden kann, stellen den Beginn einer Innovation dar. Das Fahrzeug hat seine Alltags-tauglichkeit bewiesen und befindet sich derzeit in der Serienentwicklung (CEP 2006).

Invention und Innovation können, müssen aber nicht zeitlich eng beieinander liegen. Wie die beiden Beispiele zeigen, ist es möglich, dass zwischen einer Entdeckung beziehungsweise Erfindung und deren alltagstauglicher kommerzieller Nutzung weit mehr als 100 Jahre liegen. Vor dem Hintergrund der Unterscheidung zwischen Invention und Innovation lassen sich nun vier Leitdifferenzen entwickeln, die es ermöglichen, die für den Umbau des harten technischen Kerns der Automobilitäts-Maschine relevanten Innovationstypen in den Blick zu bekommen.

Die erste Leitdifferenz betrifft den Innovations-Focus. Gestützt auf eine programmatische Skizze Foucaults (Foucault 1993) sowie davon geleitete eigene techniksoziologische Untersuchungen (Marz 1997a; Marz 1997b) unterscheiden wir zwischen *ding-technischen und nicht-ding-technischen Innovationen*. Zu den ding-technischen Innovationen gehören alle Innovationen, die unmittelbar darauf gerichtet sind, den harten technischen Kern der Automobilitäts-Maschine, also den klassischen Verbrennungsmotor antriebs- und/oder kraftstoffseitig zu substituieren. Zu den nicht-ding-technischen Innovationen gehören Innovationen, die den bedeutungs-, macht- und selbst-technischen (Foucault 1993, 26) Umbau der Automobilitäts-Maschine betreffen.

Wir konzentrieren uns im Folgenden ausschließlich auf die ding-technischen Innovationen, also jene Innovationen, die sowohl landläufig als auch systemsoziologisch (Luhmann 1991, 93-110; Luhmann 2000, 364; Barben 1996, 222-226) unter »technischen Neuerungen« verstanden werden. Diese Fokussierung bedeutet keinesfalls, dass wir den nicht-ding-technischen Innovationen nur eine geringe oder gar keine Bedeutung beimessen würden. Das genaue Gegenteil ist der Fall. Die Dynamik der ding-technischen Innovationen ist letztlich nur im Ensemble mit sozialen Innovationen (Zapf 1989), speziell den entsprechenden bedeutungs-, macht- und selbst-technischen Innovationen verständlich. In der vorliegenden Arbeit geht es jedoch nicht um eine Analyse der Dynamik des ding-technischen Umbaus der Automobilitäts-Maschine, sondern lediglich um eine Bestandsaufnahme und Systemati-

sierung der ding-technischen Innovationen, die den harten technischen Kern der Automobilitäts-Maschine betreffen.

Die zweite Leitdifferenz betrifft das Innovations-Paradigma. Ausgehend von Untersuchungen zum Charakter ding-technischer Innovationsprozesse in der Automobilindustrie und des dabei entwickelten Begriffs der „Stagnovation“ (Canzler/Marz 1997), unterscheiden wir zwischen *stagnovativen und nicht-stagnovativen Innovationen*. Zu den stagnovativen Innovationen gehören all jene Innovationen, die lediglich den technischen Kern der Automobilitäts-Maschine, also die konventionelle Verbrennungsmotorik optimieren. Nicht-stagnovative Innovationen sind jene, die das Paradigma des klassischen thermischen Antriebs nicht stabilisieren, sondern entweder kraftstoff- und/oder antriebsseitig auflösen.

Die Unterscheidung zwischen stagnovativen und nicht-stagnovativen Innovationen sagt nichts über das ding-technische Niveau der Innovationen aus. So können beispielsweise aus einer ingenieurtechnischen, wirtschaftlichen oder abstrakt-akademischen Perspektive stagnovative Innovationen durchaus komplexer, wertvoller oder höherrangiger sein als nicht-stagnovative. Dies wird sehr schnell deutlich, wenn man sich einmal das Feld der stagnovativen Innovationen vergegenwärtigt. Hierzu gehören nicht nur telematische und elektronische Innovationen, sondern auch motortechnologische Neuerungen wie die Direkteinspritzung in Verbindung mit Schichtladebetrieb, variablen Ventilsteuerzeiten, Zylinderabschaltung und Reduzierung der Leerlaufdrehzahl, sowie die Hubraumreduzierung, Turbolader oder automatisierte Schaltgetriebe mit großer Getriebespreizung (SRU 2005, 7-8). Im Vergleich dazu ist eine elementare kraftstoffseitige Innovation, nämlich der Bio-Diesel, ding-technisch vergleichsweise primitiv. Gegenüber den klassischen CO₂-emittierenden Kraftstoffen wie Diesel und Benzin, handelt es sich bei diesem CO₂-neutralen Kraftstoff um eine nicht-stagnovative Innovation, weil er eine Alternative zur konventionellen Verbrennungsmotorik darstellt, die auf fossilen Brennstoffen basiert.

Die dritte Leitdifferenz betrifft den Innovations-Grad. Hier unterscheiden wir zwischen *inkrementalen und radikalen Innovationen*. Diese Unterscheidung stützt sich auf drei theoretische Felder, zum einen auf natur- und sozialwissenschaftliche Analysen, zum anderen auf implizite Theorien. Bei den naturwissenschaftlichen Analysen handelt es sich um mathematisch-physikalische Modellierungen von Innovationsprozessen (Ebeling et al. 1999, 462, 464; Scharnhorst 2000). Zu den sozialwissenschaftlichen Untersuchungen gehört ein breites Spektrum innovationstheoretischer Arbeiten (Hauschildt 1993; Billing 2003; Boyer 2001). Die impliziten Theorien (Hofmann 1993) sind jene Theorien, die die Praktiker selbst in Innovationsprozessen über diese Prozesse entwickeln (Leifer et al. 2000, 4-5; Leifer 2005).

Während es sich bei inkrementalen Innovationen um kleine, kontinuierlich stattfindene Neuerungen handelt, stellen radikale Innovationen große, diskontinuierlich auftretende Innovationen dar (Hauschildt 1993, 12; Becker 2004, 94-97). Inkrementale Innovationen sind Verbesserungs-Innovationen, radikale Innovationen sind signifikante, richtungsändernde Basis-Innovationen (Konrad/Scheer 2003, 2; Debus 2002, 92-93; Kroy 1995; Deutsch 1949, 26;). Oder, zugespitzt formuliert: Inkrementale Innovationen sind „Innovatiönchen“ (Braun/Feige/Sommerlatte 2001), radikale Innovationen sind „Quantensprünge“ (Nill/Konrad 2001, 28; Weider/Marz 2005; Knie 2006, 55-58, 119-207.)

Ausgehend davon kann im Hinblick auf den Umbau des technischen Kerns der Automobilitätsmaschine dann von radikalen Innovationen gesprochen werden, wenn die klassische

Verbrennungsmotorik abgelöst wird, das heißt, wenn keine fossilen Brennstoffe benötigt und keine Treibhausgase emittiert werden. Oder, anders gesagt, wenn es sich um Innovationen handelt, die den thermischen Antrieb ersetzen und/oder auf kohlenstofffreien Kraftstoffen basieren. Innovationen, die den Verbrauch an fossilen Brennstoffen und/oder die Treibhausgas-Emission reduzieren, stellen demgegenüber inkrementale Innovationen dar.

Die vierte Leitdifferenz betrifft die Innovations-Reichweite. Hier greifen wir auf Arbeiten zu Innovations-Frameworks (Abernathy/Clark 1985; Henderson/Clark 1990) und Systeminnovationen (Konrad/Scheer 2003) zurück und unterscheiden zwischen *modularen und systemischen Innovationen*. Modulare Innovationen betreffen, antriebs- und/oder kraftstofftechnologisch, lediglich die Verbrennungsmotorik des einzelnen Kraftfahrzeugs. Systemische Innovationen reichen darüber hinaus in die Input- und/oder Output-Strukturen der Automobilitäts-Maschine. Dieser Unterschied lässt sich sehr anschaulich an zwei Beispielen illustrieren, nämlich am Wasserstoff-Verbrennungsmotor und am Brennstoffzellen-Antrieb.

Ein Wasserstoff-Verbrennungsmotor ist zunächst eine modulare Innovation. Diese modulare Innovation impliziert jedoch eine systemische Innovation, und zwar die Bereitstellung des zu seinem Betrieb erforderlichen Wasserstoffs. Ob und inwieweit sich die modulare Innovation durchsetzen kann, hängt vom Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur, also einer systemischen Innovation ab. Je nachdem, um welchen Typ von Wasserstoff-Verbrennungsmotor es sich handelt, ist der Aufbau einer LH₂-(Liquified Hydrogen) oder CGH₂-(Compressed Gas Hydrogen) Infrastruktur erforderlich. Ohne Wasserstoff kein Wasserstoff-Verbrennungsmotor, ohne systemische keine modulare Innovation – und umgekehrt.

Das gleiche gilt für den Brennstoffzellen-Antrieb. Sein Einbau in ein Kraftfahrzeug stellt eine modulare Innovation dar. Dieser Antrieb erfordert jedoch die Bereitstellung von Wasserstoff und/oder (Bio-)Methanol, also eine entsprechende Infrastruktur, mithin eine systemische Innovation. Wie beim Wasserstoff-Verbrennungsmotor bedingen auch hier modulare und systemische Innovation einander. Hinzu kommt bei der Brennstoffzelle, dass nicht nur ihr Betrieb, sondern auch ihre Herstellung eine systemische Innovation erfordert, weil sie ganz andere Zuliefer- und Produktionssysteme erfordert als der Verbrennungsmotor.

Vor diesem Hintergrund wird sehr schnell erkennbar, dass das Verhältnis von modularen und systemischen Innovationen eine zentrale Rolle beim Umbau der Automobilitäts-Maschine spielt (Canzler/Marz 2004; Höhle 2004). Dieses Verhältnis stellt sich gegenwärtig als eine Art »Henne-Ei-Problematik« dar, von deren Lösung in den nächsten Jahren wesentlich die antriebs- und kraftstofftechnologische Innovationsdynamik abhängen wird (Weider/Marz 2005, 23-28).

Systematik

Ausgehend von der zuvor getroffenen grundlegenden Unterscheidung zwischen Invention und Innovation sowie den im Anschluss daran entwickelten vier Leitdifferenzen, ist es nun möglich, die unterschiedlichen Innovations-Typen beim Umbau der Automobilitäts-Maschine zusammenzufassen und zu systematisieren. Dies soll im Folgenden in vier Schritten geschehen, indem

- eine Übersicht über die verschiedenen Innovations-Typen gegeben,
- Zusammenhänge zwischen diesen Typen herausgearbeitet,
- kraftstoff- und antriebstechnologische Innovationen aufeinander bezogen sowie
- charakteristische Innovationsfelder bestimmt und systematisiert

werden.

Die folgende Abbildung gibt zunächst einen zusammenfassenden Überblick über die zuvor entwickelten Leitdifferenzen und Innovations-Typen.

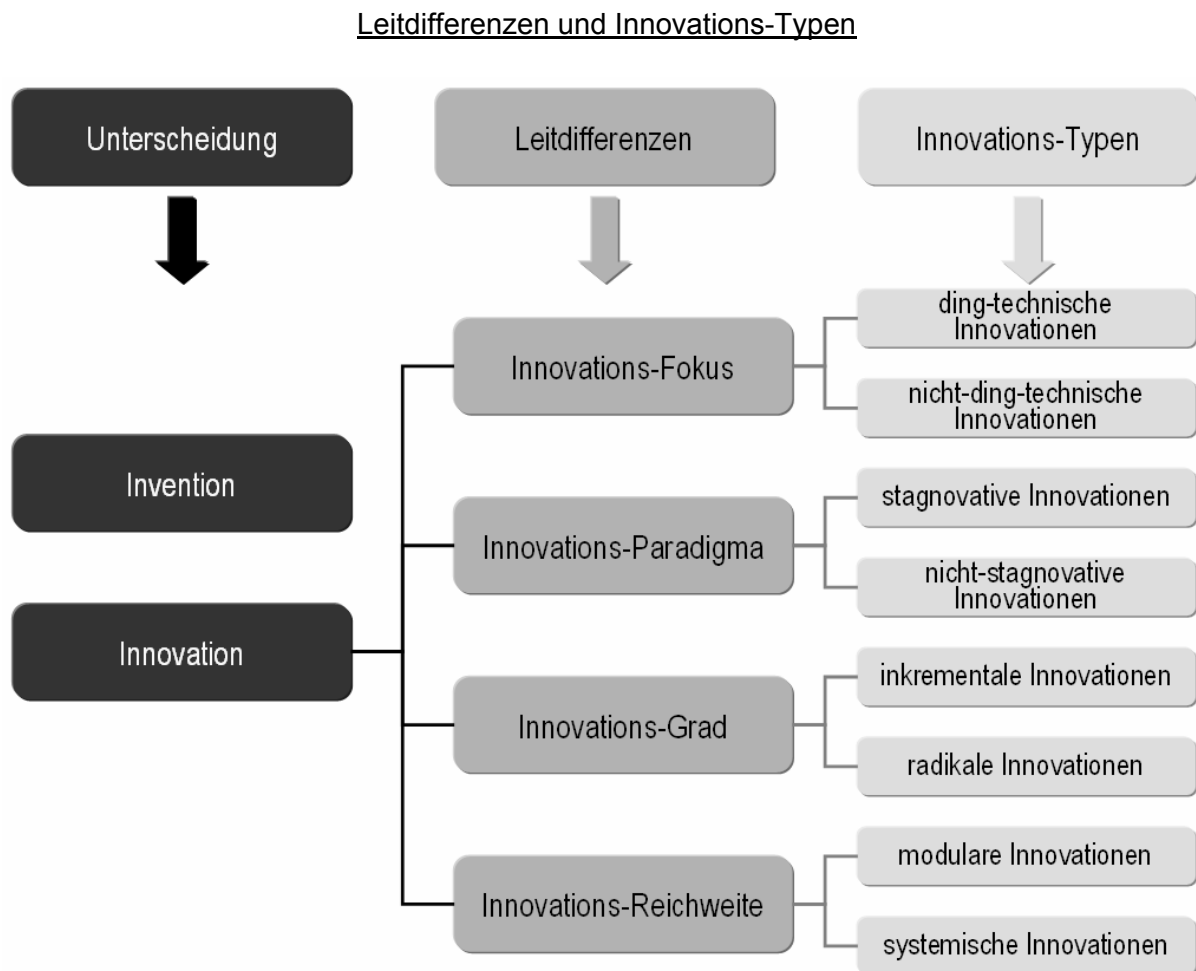


Abbildung 11, Quelle: eigene Darstellung

Da der Innovations-Fokus dieser Arbeit auf den ding-technischen Innovationen liegt, sind auch alle anderen Innovations-Typen auf diese Technik-Form bezogen. Das heißt, es geht um ding-technisch stagnovative oder nicht-stagnovative, um ding-technisch inkrementale oder radikale, um ding-technisch modulare oder systemische Innovationen.

Bei einer Analyse der für den Umbau der Automobilitäts-Maschine zwingend erforderlichen bedeutungs-, macht- und selbst-technischen Innovationen ist es möglich und auch Erfolg versprechend, diese Innovationen jeweils nach dem gleichen Schema zu differenzieren, also etwa selbst-technische Innovationen dahingehend zu untersuchen, ob und inwieweit sie selbst-technisch stagnovativ oder nicht-stagnovativ, selbst-technisch inkremental oder radikal, selbst-technisch modular oder systemisch sind. Dies kann hier jedoch selbstredend nur angeregt und nicht ausgeführt werden, ohne den Rahmen dieser Arbeit zu sprengen.

Die Innovations-Typen stehen nicht beziehungslos nebeneinander. In vielen innovationstheoretischen Arbeiten werden Zusammenhänge zwischen diesen Typen, insbesondere zwischen inkrementalen, radikalen, modularen und systemischen Innovationen herausgearbeitet. Dies geschieht aus verschiedenen konzeptionellen Perspektiven und auch mit unterschiedlichen Terminologien. Dabei werden diese Innovations-Typen vielfach über unterschiedliche Zwei-Felder- (Leifer 2005, 14), Vier-Felder-(Abernathy/Clark 1985, 8; Debus 2002, 97; Gambardella 2006, 14) oder Mehr-Felder-Matrizen (Kroy 1995, 9;) miteinander in Beziehung gesetzt. Ausgehend von diesen Überlegungen sind in der folgenden Abbildung vier Verbindungslinien zwischen diesen Innovations-Typen dargestellt, die eine weitere Differenzierung und Systematisierung der bisher entwickelten Innovations-Typologie gestatten:

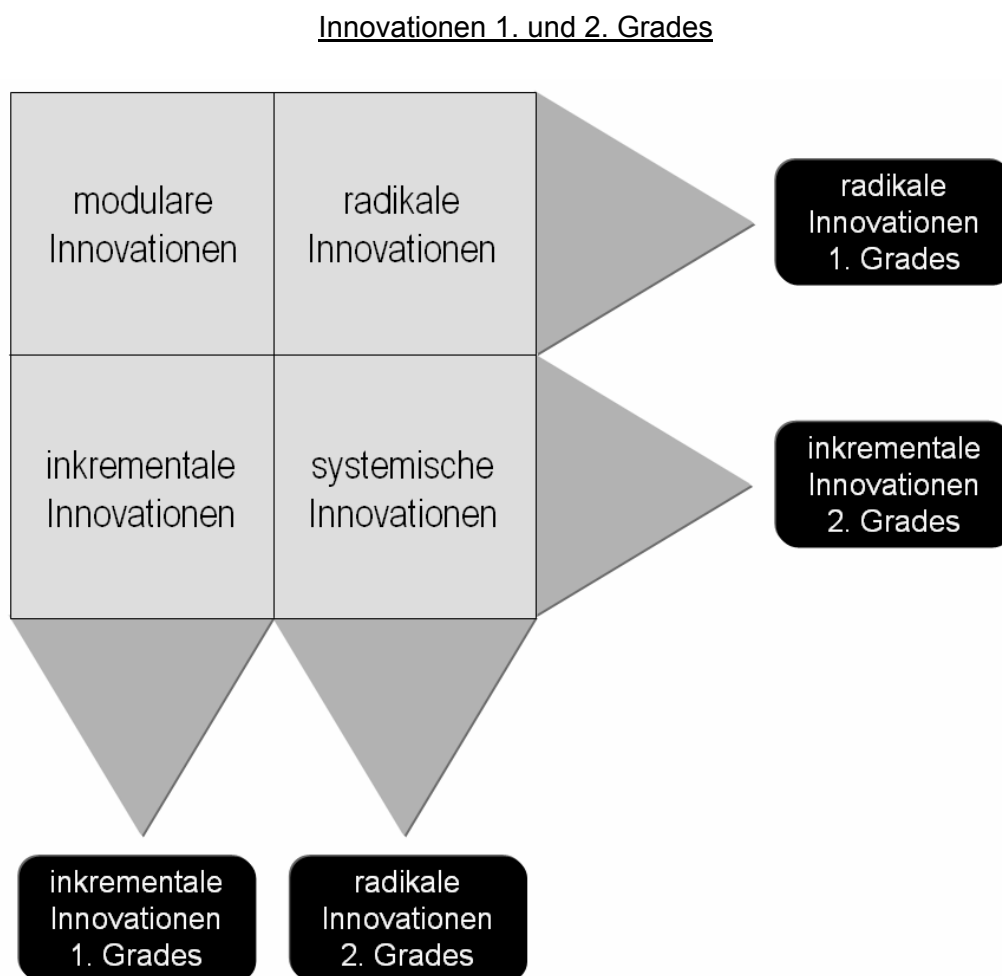


Abbildung 12, Quelle: eigene Darstellung

Diese vier Verbindungslinien zwischen inkrementalen, radikalen, modularen und systemischen Innovationen ermöglichen zweierlei:

Einerseits lassen sich so inkrementale und radikale Innovationen auch im Hinblick auf ihre jeweilige Reichweite unterscheiden. Inkrementale und radikale Innovationen 1. Grades besitzen nur eine begrenzte, nämlich modulare Reichweite. Sie betreffen lediglich die Technologie des einzelnen Fahrzeugs. Inkrementale und radikale Innovation 2. Grades besitzen demgegenüber eine größere, und zwar systemische Reichweite. Sie betreffen nicht nur das

einzelne Fahrzeug, sondern darüber hinaus auch die technologischen Input- und Output-Strukturen der gesamten Automobilitäts-Maschine.

Andererseits gestatten es diese vier Verbindungslinien umgekehrt auch, den Innovationsgrad von modularen und systemischen Innovationen zu bestimmen. Sowohl modulare (1. Grad) als auch systemische (2. Grad) Innovationen können jeweils inkremental oder radikal sein.

Vor dem Hintergrund der zuvor entwickelten Differenzierungen werden nun in der folgenden Abbildung die beiden Hauptinnovations-Achsen beim Umbau der Automobilitäts-Maschine, nämlich die antriebs- und die kraftstofftechnologische Innovations-Achse, wie folgt aufeinander bezogen:

Kraftstoff- und antriebstechnologische Innovationen

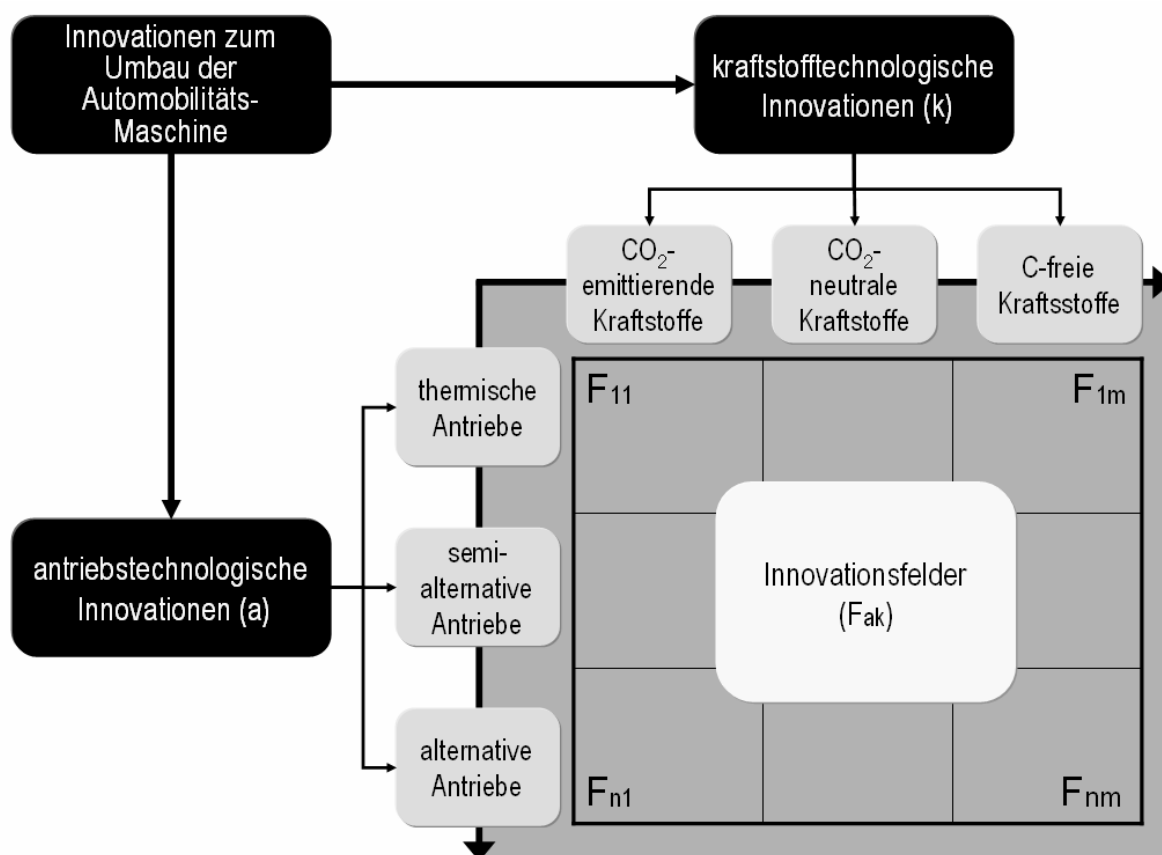


Abbildung 13, Quelle: eigene Darstellung

Durch die antriebstechnologische Achse a und die kraftstofftechnologische Achse k wird ein zweidimensionaler Innovationsraum mit unterschiedlichen Innovationsfeldern F_{ak} aufgespannt, wobei der Index a die Position der Innovation auf der antriebstechnologischen Achse und der Index k die Position der Innovation auf der kraftstofftechnologischen Achse angeben.

Wenn die Innovationen auf der antriebstechnologischen Achse von 1-n und die Innovationen auf der kraftstofftechnologischen Achse von 1-m skaliert sind, dann gilt:

$$1 \leq a \leq n$$

$$1 \leq k \leq m$$

Je kleiner also a, desto konventioneller der Antrieb, je größer a, desto alternativer der Antrieb. Und: Je kleiner k, desto konventioneller der Kraftstoff, je größer k, desto alternativer

der Kraftstoff. Das Innovationsfeld F_{11} (links oben) ist sowohl das antriebs- als auch das kraftstofftechnologisch konventionellste Feld. Das Innovationsfeld F_{nm} (rechts unten) ist das antriebs- und kraftstofftechnologisch alternativste Feld.

4. Innovations-Matrix

Die zuvor entwickelte Systematik der beim Umbau der Automobilitäts-Maschine zu analysierenden ding-technischen Innovations-Typen lässt sich nun in folgender Innovations-Matrix verdichten:

Kraftstoff (k) Antrieb (a)		CO ₂ -emittierende Kraftstoffe						CO ₂ -neutrale Kraftstoffe					C-freie Kraftstoffe					
		Konventionell		Nicht-konventionell				Semi-alternativ					Alternativ					
		Kohlenwasserstoffe			SynFuels			Öle		Alkohole		Gase	Strom (13)	Wasserstoff				
		Diesel (1)	Benzin (2)	Autogas LPG (3)	Erdgas LNG (4)	Erdgas CNG (5)	GTL (6)	BTL (7)	Bio- diesel (RME) (8)	Pflanzen- öle (9)	Bio- Ethanol (10)	Bio- Metha- nol (11)		Biogas (12)	Wasser- stoff LH ₂ (14)	Wasser- stoff CGH ₂ (15)		
Thermische Antriebe	Konventionell	4-Takt-Hubkolbenmotor (1)												X				
		2-Takt-Hubkolbenmotor (2)			/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	X	/	/	
	Nicht-konventionell	Wankelmotor (3)	/		/	/	/	/	/	/	/	/	/	X	/			
		Sonstige Verbrennungsprinzipien (4)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	X	/	/		
Hybrid-Antriebe	Semi-alternativ	Milde Hybride mit Batterie (one-mode) (5)			/	/				/	/	/	/	X	/	/		
		Vollhybride mit Batterie (two-mode) (6)			/	/				/	/	/	/	X		/	/	
Elektrische Antriebe	Alternativ	Batterie-Elektroantrieb (7)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	
		Brennstoffzellen-Elektroantrieb (8)	/	/	/	/	/	/	/	/	/		/	X				

Stagnovative Innovationen

Inkrementale Innovationen 1. Grades

Inkrementale Innovationen 2. Grades

Radikale Innovationen 1. Grades

Radikale Innovationen 2. Grades

X Technologisch ausgeschlossen

/ Innovationsräume

Abbildung 14: Innovations-Matrix, Quelle: eigene Darstellung

Diese Innovations-Matrix besitzt zwei Innovations-Dimensionen, eine Antriebs-Dimension a (Zeilen) und eine Kraftstoff-Dimension k (Spalten). Dabei gibt der Index a die Position einer Innovation auf der antriebstechnologischen Achse und der Index k die Position einer Innovation auf der kraftstofftechnologischen Achse an. Der Index a läuft von 1-8 (Zeile 1-8), der Index k von 1-15 (Spalte 1 bis 15). Beide Innovationsachsen sind jeweils so skaliert, dass das Innovationsniveau tendenziell mit steigender Index-Nummer zu- und mit sinkender Index-Nummer abnimmt. Auf der kraftstofftechnologischen Achse ist beispielsweise Diesel ($k=1$) konventioneller als CGH_2 ($k=15$) und auf der antriebstechnologischen Achse ist der 4-Takt-Hubkolbenmotor ($a=1$) konventioneller als der Brennstoffzellen-Elektroantrieb ($a=8$).

Durch die beiden Innovations-Dimensionen a und k wird eine Fahrzeug-Konfiguration $F_{a/k}$ (Feld) definiert. Dabei gibt der Index a die Position der Konfiguration auf der antriebstechnologischen Achse und der Index k die Position dieser Konfiguration auf der kraftstofftechnologischen Achse an. Die Felder $F_{a/k}$ laufen von $F_{1/1}$ (Zeile 1/Spalte 1) über $F_{1/15}$ (Zeile 1/Spalte 15) und $F_{8/1}$ (Zeile 8/Spalte 1) bis $F_{8/15}$ (Zeile 8/Spalte 15). Entsprechend den Achsenskalierungen nimmt das Innovationsniveau der Fahrzeug-Konfigurationen mit steigenden Index-Nummern zu und mit sinkenden Index-Nummern ab. So ist zum Beispiel die Konfiguration $F_{1/1}$ (4-Takt-Hubkolbenmotor/Diesel) konventioneller als die Konfiguration $F_{3/2}$ (Wankelmotor/Benzin) und diese wiederum weniger alternativ als die Konfiguration $F_{8/14}$ (Brennstoffzellen-Elektroantrieb/ LH_2).

Zunächst sollen nun die beiden Innovations-Dimensionen a und k sowie die dadurch jeweils definierten Fahrzeug-Konfigurationen $F_{a/k}$ schrittweise näher beschrieben und exemplarisch erläutert werden. Abschließend werden dann die sich aus der Innovations-Matrix ergebenden unterschiedlichen Clusterungs-Möglichkeiten skizziert.

Antriebs-Dimension a

Die antriebstechnologische Achse a ist zunächst in drei große Abschnitte gegliedert, und zwar die

- thermischen Antriebe ($a=1, 2, 3,4$),
- Hybrid-Antriebe ($a=5,6$)
- elektrischen Antriebe ($a=7,8$)

Die thermischen Antriebe sind Verbrennungsmotoren, die die chemische Energie des Kraftstoffs (Brennwert) in mechanische Nutzenergie zum Antrieb der Räder umwandeln. Diese Antriebe lassen sich in zwei Klassen unterteilen, nämlich die konventionellen und die nicht-konventionellen thermischen Antriebe. Zu den konventionellen thermischen Antrieben gehören die klassischen 4-Takt- und 2-Takt-Hubkolbenmotoren ($a=1$ und $a=2$). Zu den nicht-konventionellen Antrieben gehören der Wankelmotor ($a=3$) sowie die Gruppe sonstiger thermischer Antriebe ($a=4$). Vertreter dieser Gruppe sind beispielsweise der Stirlingmotor, der Stelzer-Motor oder der Kugelkolbenmotor (Wikipedia 2006b).

Die elektrischen Antriebe sind Motoren, die mit Hilfe von Magnetfeldern elektrische Energie in mechanische Energie zum Antrieb der Räder umwandeln. Diese Antriebe können in zwei große Gruppen unterteilt werden, und zwar die Batterie-Elektroantriebe ($a=7$) und die

Brennstoffzellen-Elektroantriebe ($a=8$). Bei den Batterie-Elektroantrieben wird die elektrische Energie von einer Batterie bereitgestellt, bei den Brennstoffzellen-Elektroantrieben geschieht dies durch die Brennstoffzelle.

Die Hybrid-Antriebe stellen eine Kombination von thermischen und elektrischen Antrieben dar. Diese Systeme können wahlweise mit einem Verbrennungs- oder einem Elektromotor betrieben werden. Zu diesen Antrieben gehören zwei große Gruppen, nämlich die milden Hybride ($a=5$) und die Vollhybride ($a=6$). Bei den milden Hybriden dient der Elektroantrieb lediglich zur Unterstützung des thermischen Antriebs. Bei den Vollhybriden bilden hingegen thermisches und elektrisches System zwei äquivalente autonome Einheiten, die beide zum Antrieb des Fahrzeugs genutzt werden können. Hybrid-Antriebe sind nicht mit bivalenten Antrieben zu verwechseln, bei denen die Möglichkeit besteht, zwei unterschiedliche Kraftstoffe zu tanken. Die »Zweiartigkeit« der Hybride bezieht sich ausschließlich auf die Antriebstechnologie, nicht auf das Tanksystem.

Die antriebstechnologische Achse a lässt sich bei Bedarf sowohl ausdifferenzieren als auch erweitern. So könnte beispielsweise die Gruppe der sonstigen thermischen Antriebe ($a=4$) nicht nur nach den bekannten und oben genannten Motortypen weiter untergliedert werden, sondern sie ließe sich auch jederzeit um neue Typen erweitern, etwa um den Druckzellenmotor, dessen erster Prototyp für 2008 angekündigt ist. (Wikipedia 2006b). Gleiches gilt für eine Feinunterteilung und Erweiterung der konventionellen thermischen Antriebe ($a=1, 2$), der Hybrid-Antriebe ($a=5, 6$) oder der elektrischen Antriebe ($a=7, 8$). Je nach Klassifizierungsverfahren lässt sich hier die Innovations-Matrix weiter ausbauen beziehungsweise verfeinern.

Auch eine Veränderung der Klassifizierung wäre möglich. So könnten etwa die klassischen Verbrennungsmotoren nicht nach dem Arbeitsverfahren (2- und 4-Takt-Motoren), sondern stattdessen nach dem Bewegungsablauf (Hubkolben-, Rotationskolben- und Freikolbenmotor), dem Gemischbildungsverfahren (äußere oder innere Gemischbildung), dem Zündverfahren (Fremdzündung, Selbstzündung, kontrollierte Selbstzündung), der Füllungsart (Saug- oder Lademotor), dem Kühlverfahren (Wasser-, Luft-, Öl- und kombinierte Kühlung) oder den Bauformen (Reihenmotor, V-Motor, Boxermotor, Sternmotor, V-, W-, H-, X-Motor usw.) eingeteilt werden (Wikipedia 2006b).

Und es ist schließlich natürlich auch möglich, die antriebstechnologische Achse a insgesamt um bislang nicht marktreife oder überhaupt denkbare mobile Antriebsformen, wie etwa dem Druckluftmotor (APTC 2006), von $a=8$ auf $a=n$ zu erweitern. Insofern ist die Innovations-Matrix im Hinblick auf die Antriebs-Dimension konzeptionell flexibel und diskursiv offen.

Kraftstoff-Dimension k

Der Begriff »Kraftstoff« wird von uns hier weiter gefasst, als im gängigen Sprachgebrauch. Wir bezeichnen damit jegliche Sekundärenergieträger, die in einem Antriebssystem in mechanische Nutzenergie umgewandelt werden können. In diesem Zusammenhang ist beispielsweise auch Strom für Elektro-Antriebe als Kraftstoff zu verstehen.

Die kraftstofftechnologischer Achse k ist zunächst in drei große Abschnitte gegliedert, und zwar die

- CO₂-emittierenden Kraftstoffe (k=1, 2, 3, 4, 5, 6),
- CO₂-neutralen Kraftstoffe (k=7, 8, 9, 10, 11, 12)
- C-freien Kraftstoffe (k=13, 14, 15)

Die CO₂-emittierenden Kraftstoffe sind fossile Kraftstoffe, die bei ihrer Verbrennung CO₂ freisetzen. Diese Kraftstoffe lassen sich in zwei große Klassen unterteilen, nämlich die konventionellen und die nicht-konventionellen CO₂-emittierenden Kraftstoffe. Zu den konventionellen CO₂-emittierenden Kraftstoffen gehören Diesel (k=1) und Benzin (k=2). Zu den nicht-konventionellen CO₂-emittierenden Kraftstoffen gehören Autogas/LPG (Liquefied Petroleum Gas) (k=3), Erdgas/LNG (Liquefied Natural Gas) (k=4), Erdgas/CNG (Compressed Natural Gas) (k=5) sowie der synthetische Kraftstoff GTL (Gas-to-Liquids) (k=6).

Die CO₂-neutralen Kraftstoffe sind Biokraftstoffe, also Treibstoffe für Verbrennungsmotoren, die aus Biomasse hergestellt werden. Sie sind deshalb CO₂-neutral, weil sie bei ihrer Verbrennung nur die Menge CO₂ emittieren, die sie zuvor über die Photosynthese biochemisch gebunden haben. Diese Kraftstoffe lassen sich in vier Gruppen einteilen, und zwar die synthetischen Kraftstoffe, die Öle, die Alkohole und die Gase. Zu den synthetischen Kraftstoffen gehört BTL (Biomass-to-Liquid) (k=7), zu den Ölen zählen Biodiesel/RME (Raps-Methyl-Ester) (k=8) und naturbelassene beziehungsweise nur gefilterte Pflanzenöle (k=9). Zu den Alkoholen gehören Bio-Ethanol (k=10) und Bio-Methanol (k=11) und zu den Gasen das Biogas (k=12).

Die C-freien Kraftstoffe sind Treibstoffe, die keinerlei Kohlenstoffverbindungen enthalten, die damit also auch kein CO₂ emittieren. Diese Kraftstoffe lassen sich in zwei große Gruppen unterteilen, nämlich in Strom und Wasserstoff. Der Strom auf der kraftstofftechnologischer Achse (k=13) ist hier ein Sekundärenergieträger, der, wie alle anderen Kraftstoffe auch, extern bereitgestellt wird. Er wird also nicht durch Brennstoffzellen oder Generatoren im Fahrzeug erzeugt, sondern über äußere Energiequellen, wie etwa dem Leitungsnetz, der Batterie zugefügt. Zum Wasserstoff gehören die bereits mehrfach erwähnten LH₂- und CGH₂-Kraftstoffe (k=14 und k=15).

Wie die antriebstechnologische Achse a lässt sich auch die kraftstoff-technologische Achse k im Bedarfsfall sowohl ausdifferenzieren als auch erweitern. So könnte beispielsweise die Klasse der nicht-konventionellen CO₂-emittierenden Kraftstoffe (k=3, 4, 5, 6) weiter untergliedert werden, indem etwa beim Autogas/LPG (k=3) unterschieden wird, welches Gas (Propan oder Butan) beziehungsweise welche ihrer Gemische jeweils verflüssigt werden. Und diese Klasse könnte auch jederzeit um neue Kraftstofftypen erweitert werden, beispielsweise um CTL (Coal-to-Liquid), der gegenwärtig zwar keine große Bedeutung besitzt, an dem aber sowohl in den USA als auch in China gearbeitet wird (Wikipedia 2006c). Gleiches gilt für eine Feinunterteilung und Erweiterung der konventionellen CO₂-emittierenden Kraftstoffe (k=1, 2), der CO₂-neutralen Kraftstoffe (k=7, 8, 9, 10, 11, 12) und der C-freien Kraftstoffe (k=13, 14, 15). Je nach Klassifizierungsverfahren lässt sich hier die Innovations-Matrix weiter ausbauen beziehungsweise verfeinern.

Und wie bei der Antriebs- ist auch bei der Kraftstoff-Dimension eine Veränderung der Klassifizierung möglich. So könnten zum Beispiel die CO₂-emittierenden Kraftstoffe nicht nach der Leitdifferenz konventionell/nicht-konventionell, sondern stattdessen nach dem Aggregatzustand (flüssig/gasförmig) eingeteilt werden.

Und es ist schließlich natürlich auch hier möglich, die kraftstofftechnologische Achse k insgesamt um bislang nicht marktreife oder überhaupt denkbare Sekundärenergieträger, wie etwa Druckluft (APTC 2006) oder Silizium-Sande (Auner 2004), von $k=15$ auf $k=m$ zu erweitern. Insofern ist die Innovations-Matrix auch im Hinblick auf die Kraftstoff-Dimension konzeptionell flexibel und diskursiv offen.

Fahrzeug-Konfigurationen $F_{a/k}$

Durch die beiden Dimensionen der Innovations-Matrix, die antriebstechnologische Achse a und die kraftstofftechnologische Achse k werden bestimmte Fahrzeug-Konfigurationen $F_{a/k}$ definiert, wobei der Index a die Position der Konfiguration auf der antriebstechnologischen und der Index k die Position dieser Konfiguration auf der kraftstofftechnologischen Achse angibt. So ist etwa

- $F_{1/1}$ ein Fahrzeug mit einem dieselbetriebenen 4-Takt-Hubkolbenmotor, wie zum Beispiel der VW Passat 3BG 1.9 TDI,
- $F_{2/2}$ ein Fahrzeug mit einem benzinbetriebenen Wankelmotor, wie etwa der Mazda RX-8
- $F_{1/14}$ ein Fahrzeug, dessen 4-Takt-Hubkolbenmotor mit flüssigem Wasserstoff betrieben wird, wie beispielsweise der BMW 7er mit bivalentem 6.0 Liter V12 Motor und
- $F_{6/2}$ ein Vollhybrid, dessen Verbrennungsmotor mit Benzin betrieben wird, wie zum Beispiel der Toyota Prius NHW20

Bei einem Blick auf die Innovations-Matrix fallen zunächst drei verschiedene Typen von Konfigurationsfeldern F_{ak} ins Auge, und zwar Konfigurationen

- F_{ak} , die technologisch ausgeschlossen sind, wie zum Beispiel ein mit Strom betriebener 4-Takt-Hubkolbenmotor ($F_{1/13}$) oder ein mit Diesel betriebener Batterie-Elektroantrieb ($F_{7/1}$). Diese Felder sind mit einem »X« gekennzeichnet.
- F_{ak} , die zwar technologisch prinzipiell denkbar sind, an denen jedoch bislang nicht gearbeitet wurde. Hierzu gehört beispielsweise ein GTL betriebener Wankelmotor ($F_{3/6}$) oder ein mit Biodiesel betriebener Stirlingmotor ($F_{4/8}$). Diese Felder sind mit »/« gekennzeichnet und werden als Inventionsräume bezeichnet.
- F_{ak} , die bereits das Innovationsstadium erreicht haben, wie etwa ein mit Biodiesel betriebener 4-Takt-Hubkolbenmotor ($F_{1/8}$) oder ein mit Bio-Methanol betriebener Brennstoffzellen-Elektroantrieb. Diese Felder sind durch unterschiedliche Grautöne gekennzeichnet, die auf verschiedene Innovationsniveaus verweisen.

Da im Rahmen dieser Arbeit nicht Inventionen, sondern Innovationen, speziell radikale und systemische Innovationen im Zentrum der Aufmerksamkeit stehen, ist der dritte Konfigurationstyp von besonderem Interesse. Ausgehend von der im Kapitel 3 entwickelten Innovations-Systematik lassen sich nun bei diesem Konfigurationstyp folgende fünf verschiedene Innovationsniveaus unterscheiden, und zwar

- Stagnovative Innovationen, also Innovationen, die sowohl antriebs- als auch kraftstoffseitig konventionelle Fahrzeugkonfigurationen nicht überwinden, sondern lediglich optimieren. Hierzu gehören beispielsweise die Felder $F_{1/1}$, $F_{1/2}$, $F_{2/1}$ und $F_{2/2}$.
- Inkrementale Innovationen 1. Grades, also Innovationen, die entweder antriebs- oder kraftstoffseitig konventionelle Fahrzeugkonfigurationen überwinden, die jedoch nur modular und nicht systemisch innovativ sind. Hierzu zählen zum Beispiel die Felder $F_{1/3}$, $F_{1/6}$, $F_{2/3}$ und $F_{2/6}$.
- Inkrementale Innovationen 2. Grades, also Innovationen, die entweder antriebs- oder kraftstoffseitig konventionelle Fahrzeugkonfigurationen überwinden und die darüber hinaus nicht nur modular, sondern auch systemisch innovativ sind. Hierzu gehören beispielsweise $F_{1/7}$, $F_{1/8}$, $F_{2/9}$ und $F_{2/11}$.
- Radikale Innovationen 1. Grades, also Innovationen, die sowohl antriebs- als auch kraftstoffseitig konventionelle Fahrzeugkonfigurationen überwinden, die jedoch nur modular und nicht systemisch innovativ sind. Hierzu zählt etwa $F_{7/13}$, nämlich dann, wenn der Strom nicht regenerativ erzeugt wurde, oder $F_{8/14}$ und $F_{8/15}$, und zwar dann, wenn es sich um nicht regenerativ produzierten Wasserstoff handelt.

Radikale Innovationen 2. Grades, also Innovationen, die nicht nur sowohl antriebs- als auch kraftstoffseitig konventionelle Fahrzeugkonfigurationen überwinden, sondern die darüber hinaus sowohl modular als auch systemisch innovativ sind. Hierzu gehören zum Beispiel $F_{8/1}$ aber auch $F_{8/14}$ oder $F_{8/15}$, und zwar genau dann, wenn es sich um regenerativ erzeugten Wasserstoff handelt.

Ausgehend von dieser Systematik ergeben sich bei jeder der Hybrid-Konfigurationen ($a=5,6$) nicht nur einfache oder zweifache, sondern mehrfache Innovationsniveaus, je nachdem ob man den verbrennungsmotorischen oder den elektrischen Teil des Antriebs betrachtet.

Und je nachdem, wie die Innovations-Matrix in ihrer antriebstechnologischen Dimension a und/oder ihrer kraftstofftechnologischen Dimension k differenziert oder erweitert wird, resultieren daraus weitere Fahrzeug-Konfigurationen $F_{a/k}$ mit ein-, zwei- oder mehrfachen Innovationsniveaus. Dies führt sehr schnell zu komplexen Innovationsmustern und wirft die Frage auf, ob und wie es möglich ist, diese Komplexität zu reduzieren. Eine Möglichkeit besteht in der Clusterung.

Clusterungs-Möglichkeiten

Die Clusterung ist ein spezielles Klassifikationsverfahren und findet unter anderem in Analysen mit unscharfen Verfahren Anwendung (Boklisch 1987, 53-72). Die Innovations-Matrix bietet diverse Clusterungs-Möglichkeiten, so etwa die

- Antriebstopologische oder Zeilen-Clusterung, bei der auf der antriebs-technologischen Achse a bestimmte Antriebe oder Antriebsgruppen zusammengefasst werden, also beispielsweise alle thermischen Antriebe.

- Kraftstofftypologische oder Spalten-Clusterung, bei der auf der kraftstoff-technologischen Achse k bestimmte Kraftstoffe oder Kraftstoffgruppen zusammengefasst werden, also zum Beispiel alle nicht-konventionellen CO₂-emittierenden Kraftstoffe.
- Konfigurationstypologische oder Felder-Clusterung, bei der bestimmte Fahrzeug-Konfigurationen F_{ak} zusammengefasst werden, also etwa alle Konfigurationen, die sowohl mit einem konventionellen Antrieb als auch mit einem konventionellen Kraftstoff arbeiten.
- Innovationstypologische oder Niveau-Clusterung, bei der bestimmte Innovationstypen zusammengefasst werden, also beispielsweise alle Innovationen 1. Grades oder alle inkrementalen Innovationen.

Bei einer Analyse, die ausschließlich auf bereits existierende Innovationen fokussiert ist, lässt sich die Matrix auch nach einem zweistufigen Verfahren clustern, das man vielleicht am besten als Ausschluss/Muster-Verfahren bezeichnen könnte.

In einer ersten Stufe werden zunächst aus der Innovationsmatrix alle Fahrzeugkonfigurationen F_{ak} ausgeschlossen, die bislang kein Innovationsniveau erreicht haben, also alle Konfigurationen, die entweder technologisch nicht realisierbar sind (gekennzeichnet mit »X«) oder die lediglich Inventionsräume darstellen (gekennzeichnet mit »/«). Diese Konfigurationen werden als weiße Leerfelder dargestellt. Damit sieht die Innovations-Matrix so aus:

Einstufig geclusterte Innovations-Matrix

Kraftstoff (k) Antrieb (a)		CO ₂ -emittierende Kraftstoffe						CO ₂ -neutrale Kraftstoffe					C-freie Kraftstoffe					
		Konventionell		Nicht-konventionell				Semi-alternativ					Alternativ					
		Kohlenwasserstoffe				SynFuels		Öle		Alkohole		Gase	Strom (13)	Wasserstoff				
		Diesel (1)	Benzin (2)	Autogas LPG (3)	Erdgas LNG (4)	Erdgas CNG (5)	GTL (6)	BTL (7)	Bio- diesel (RME) (8)	Pflanzen- öle (9)	Bio- Ethanol (10)	Bio- Methanol (11)		Biogas (12)	Wasser- stoff LH ₂ (14)	Wasser- stoff CGH ₂ (15)		
Thematische Antriebe	Konventionell	4-Takt-Hubkolbenmotor (1)																
		2-Takt-Hubkolbenmotor (2)																
	Nicht-konventionell	Wankelmotor (3)																
		Sonstige Verbrennungsprinzipien (4)																
Hybrid-Antriebe	Semi-alternativ	Milde Hybride mit Batterie (one-mode) (5) <small>thermisch elektrisch</small>																
		Vollhybride mit Batterie (two-mode) (6) <small>thermisch elektrisch</small>																
Elektrische Antriebe	Alternativ	Batterie-Elektroantrieb (7)																
		Brennstoffzellen-Elektroantrieb (8)																

Abbildung 15, Quelle: eigene Darstellung

Ausgehend davon werden nun in einer zweiten Stufe die unterschiedlichen Innovationsmuster der Fahrzeug-Konfigurationen F_{ak} entweder aus einer kraftstoff- oder aus einer antriebs-technologischen Perspektive zusammengefasst. Bei einer antriebs-technologischen Fokussierung würden sich dann beispielsweise folgende fünf Cluster ergeben:

- Cluster 1: Thermische Antriebe mit CO₂-emittierenden und CO₂-neutralen Kraftstoffen
- Cluster 2: Thermische Antriebe mit C-freien Kraftstoffen
- Cluster 3: Hybrid-Antriebe
- Cluster 4: Batterie-Elektroantriebe
- Cluster 5: Brennstoffzellen-Elektroantriebe

Damit sähe die zweistufig geclusterte Innovations-Matrix schließlich so aus:

Zweistufig geclusterte Innovations-Matrix

Antrieb (a) \ Kraftstoff (k)		CO ₂ -emittierende Kraftstoffe					CO ₂ -neutrale Kraftstoffe						C-freie Kraftstoffe				
		Konventionell		Nicht-konventionell			Semi-alternativ						Alternativ				
		Kohlenwasserstoffe			SynFuels		Ole		Alkohole		Gase		Strom	Wasserstoff			
		Diesel (1)	Benzin (2)	Autogas LPG (3)	Erdgas LNG (4)	Erdgas CNG (5)	GTL (6)	BTL (7)	Bio-diesel (RME) (8)	Pflanzen-öle (9)	Bio-Ethanol (10)	Bio-Methanol (11)	Biogas (12)	(13)	Wasserstoff LH ₂ (14)	Wasserstoff CGH ₂ (15)	
Thermische Antriebe	Konventionell	4-Takt- Hubkolbenmotor (1)															
		2-Takt- Hubkolbenmotor (2)															
	Nicht-konventionell	Wankelmotor (3)															
		Sonstige Verbrennungsprinzipien (4)															
Hybrid-Antriebe	Semi-alternativ	Milde Hybride mit Batterie (one-mode) (5)															
		Vollhybride mit Batterie (two-mode) (6)															
Elektrische Antriebe	Alternativ	Batterie-Elektroantrieb (7)															
		Brennstoffzellen-Elektroantrieb (8)															

Abbildung 16, Quelle: eigene Darstellung

Gestützt auf diese sehr unterschiedlichen Clusterungs-Möglichkeiten werden wir im folgenden eine Clusterung verwenden, die einerseits innovationszentriert ist, die es jedoch andererseits gestattet, dabei immer die dazugehörigen Inventionsräume im Blick zu behalten.

5. Innovations-Cluster

Ausgangspunkt und Grundlage der folgenden Innovations-Cluster bildet die in Abbildung 14 vorgestellte Innovations-Matrix. Nach einer zusammenfassenden Übersicht der aus dieser Matrix entwickelten Clusterung werden anschließend die einzelnen Cluster schrittweise diskutiert und an Hand ausgewählter Beispiele exemplarisch illustriert.

5.1. Cluster-Übersicht

Unsere Clusterung ist antriebstechnologisch fokussiert und besteht aus folgenden fünf Clustern:

- Cluster 1: Nicht-alternative Verbrennungsmotoren. Dieses Cluster wird durch die Eckpunkte $F_{1/1}$, $F_{1/12}$, $F_{4/1}$ und $F_{4/12}$ gebildet.
- Cluster 2: Wasserstoff-Verbrennungsmotoren. Dieses Cluster bestimmen die Eckpunkte $F_{1/14}$, $F_{1/15}$, $F_{4/14}$ und $F_{4/15}$.
- Cluster 3: Hybrid-Antriebe. Dieses Cluster ist durch die Eckpunkte $F_{5/1}$, $F_{5/15}$, $F_{6/1}$ und $F_{6/15}$ definiert.
- Cluster 4: Batterie-Elektroantriebe. Dieses Cluster besteht aus der Konfiguration $F_{7/13}$.
- Cluster 5: Brennstoffzellen-Elektroantriebe. Dieses Cluster setzt sich aus der Konfiguration $F_{8/11}$ sowie $F_{8/14}$ und $F_{8/15}$ zusammen.

In der folgenden Abbildung ist diese Clusterung noch einmal zusammenfassend dargestellt:

Cluster-Übersicht

Kraftstoff (k) Antrieb (a)		CO ₂ -emittierende Kraftstoffe					CO ₂ -neutrale Kraftstoffe						C-freie Kraftstoffe				
		Konventionell		Nicht-konventionell			Semi-alternativ			Alternativ							
		Kohlenwasserstoffe				SynFuels		Öle		Alkohole		Gase	Strom	Wasserstoff			
		Diesel (1)	Benzin (2)	Autogas LPG (3)	Erdgas LNG (4)	Erdgas CNG (5)	GTL (6)	BTL (7)	Bio-diesel (RME) (8)	Pflanzen-öle (9)	Bio-Ethanol (10)	Bio-Methanol (11)		Biogas (12)	(13)	Wasserstoff LH ₂ (14)	Wasserstoff CGH ₂ (15)
Thermische Antriebe	Konventionell	4-Takt-Hubkolbenmotor (1)	[Dotted Pattern]												X		
		2-Takt-Hubkolbenmotor (2)	[Dotted Pattern]												X		
	Nicht-konventionell	Wankelmotor (3)	[Dotted Pattern]												X		
		Sonstige Verbrennungsprinzipien (4)	[Dotted Pattern]												X		
Hybrid-Antriebe	Semi-alternativ	Milde Hybride mit Batterie (one-mode) (5)	[Cross-hatch Pattern]														
		Vollhybride mit Batterie (two-mode) (6)	[Cross-hatch Pattern]														
Elektrische Antriebe	Alternativ	Batterie-Elektroantrieb (7)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	[Checkered Pattern]	X	X
		Brennstoffzellen-Elektroantrieb (8)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	[Dotted Pattern]	X	[Dotted Pattern]

Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
Cluster 4	Cluster 5	

Abbildung 17, Quelle: eigene Darstellung

Jedes dieser Cluster wird mit Hilfe eines einheitlichen Untersuchungs- und Beschreibungs-Rasters skizziert, das aus folgenden fünf Stufen besteht:

- Clusterbeschreibung
- Funktionsprinzipien
- Innovationsmuster
- Beispiel-Modelle
- Marktchancen

Ausgehend von der obigen Cluster-Übersicht und diesem Untersuchungs- und Beschreibungs-Raster werden nun die fünf Innovations-Cluster schrittweise näher diskutiert.

5.2. Cluster 1: Nicht-alternative Verbrennungsmotoren

Clusterbeschreibung

Allen Fahrzeug-Konfigurationen des Clusters 1 der Abbildung 17 ist gemeinsam, dass sie antriebsseitig auf dem Einsatz von Verbrennungsmotoren beruhen und kraftstoffseitig mit kohlenwasserstoffbasierten Kraftstoffen betrieben werden. Damit umfasst das Cluster den 4- und 2-Takt Hubkolbenmotor sowie den Wankelmotor als Antriebe ($a=1, 2, 3$). Die kohlenwasserstoffbasierten Kraftstoffe ($k=1$ bis 12) können aufgeteilt werden in CO_2 -emittierende Kraftstoffe ($k=1, 2, 3, 4, 5, 6$) sowie die CO_2 -neutralen Kraftstoffe ($k=7, 8, 9, 10, 11, 12$).

Im Einzelnen zählen folgende Fahrzeug-Konfigurationen zu Cluster 1:

- Fahrzeug-Konfigurationen der Form $F_{1/k}$ basieren auf der Verbrennung kohlenstoffhaltiger Kraftstoffe ($k=1$ bis 12) in einem 4-Takt Hubkolbenmotor ($a=1$). Für diese zwölf zu Cluster 1 zählenden Kraftstoffsorten konnte nach unseren Recherchen zumindest der Einsatz in Prototypen und Konzeptfahrzeugen nachgewiesen werden. Damit sind die Innovations-Felder $F_{1/1}$ bis $F_{1/12}$ mit Fahrzeugkonfigurationen belegt.
- Fahrzeuge mit einem 2-Takt-Hubkolbenmotor ($a=2$) haben die Form $F_{2/k}$. Nachteile des 2-Takters im Vergleich zum 4-Takter sind höhere Verbrauchs- und schlechtere Abgaswerte sowie eine geringere Lebensdauer. Spätestens mit der Einstellung der Trabantproduktion Anfang der 90er Jahre spielt der 2-Takter in der heutigen Automobilindustrie keine nennenswerte Rolle mehr. Durch seine kompakte und kostengünstige Bauweise ist er höchstens noch für Kleinstfahrzeuge, Mofas und Motorräder mit geringem Hubraum interessant. Aber auch in diesem Segment wird er immer seltener eingesetzt. Der übliche Kraftstoff für den 2-Takter ist ein Benzin-Öl Gemisch ($k=2$). Als Dieselmotor ($k=1$) wird er zum Antrieb in der Schifffahrt verwendet. Aufgrund der geringen Bedeutung des Motors in Automobilen gibt es derzeit auch keine Bestrebungen mehr, neuartige Kraftstoffe für den Motor einzuführen. Damit sind nur die beiden Felder $F_{2/1}$ (Schiffsdiesel) und $F_{2/2}$ (Trabant) belegt.
- Bei dem Wankelmotor ($a=3$) handelt es sich um einen Drehkolbenmotor. Der Motortyp wird derzeit ausschließlich von Mazda in den Modellen RX-7 und RX-8 eingesetzt. Als Kraftstoff kommt bei den Sportwagen Benzin ($k=2$) zum Einsatz. Das Fahrzeug ist demnach in der Innovationsmatrix dem Feld $F_{3/2}$ zuzuordnen. Technische Daten zu den Fahrzeugen sind weiter unten im Abschnitt Beispielmotoren zu finden. Auch der Einsatz von Wasserstoff im RX-8 wurde durch Mazda erfolgreich praktiziert. Wasserstoff als kohlenstofffreier Kraftstoff fällt jedoch nicht in das Cluster 1, sondern liegt im Cluster 2 und wird deshalb dort näher diskutiert.
- Sonstige alternative thermische Antriebsvarianten ($a=4$) wie zum Beispiel der Einsatz von Gasturbinen und Stirling-Motoren in Pkws stellen Inventionsräume dar und sind als weiße Felder in der Matrix ersichtlich.

Funktionsprinzipien

Die große Bedeutung des 4-Takt Hubkolbenmotors für die Automobilindustrie spiegelt bereits die Vielzahl der Fahrzeug-Konfigurationen in der Clusterbeschreibung wider. Daher betrachten wir zunächst nur den Hubkolbenmotor und erst dann die nicht-konventionellen Antriebe.

Der 4-Takter wird seit seiner Erfindung im Jahr 1876 durch den Kaufmann Nikolaus Otto (1832-1891) ständig weiterentwickelt (Rödl 2006) und in letzter Zeit vor allem an die Anforderungen alternativer Kraftstoffe angepasst. Gottlieb Daimler und Carl Benz bauten 1886 das erste Kraftfahrzeug mit einem benzinbetriebenen Ottomotor (ebenda). Im Jahre 2000 befanden sich rund 800 Mio. Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren weltweit im Einsatz, bis 2030 werden sogar 1,6 Mrd. Fahrzeuge prognostiziert (Schubert 2003, 2).

Mit der Erfindung der Einspritzpumpe gelang es in den 30er Jahren des vergangenen Jahrhunderts auch den selbstzündenden Dieselmotor in Pkws einzusetzen. Über Dekaden führte der auf Rohölprodukten basierende Verbrennungsmotor eine Alleinherrschaft, so dass er heute „die“ Konvention in der Antriebstechnik darstellt.

Der erste 4-Takter: Ottos „neuer“ Motor“



Abbildung 18, Quelle: Rödl 2006

Verbrennungsmotoren können nach vielen Kriterien eingeteilt werden. Die häufigste und auch in der Innovations-Matrix (Zeilen a=1 und a=2) verwendete Unterscheidung erfolgt nach dem Arbeitsverfahren des Motors (4-Takt und 2-Takt-Verfahren). Beim 4-Takter findet eine Kolbenbewegung pro Arbeitsschritt statt. Diese sind das Ansaugen (Takt 1), Verdichten (Takt 2), Arbeiten (Takt 3) und Ausstoßen (Takt 4). Beim 2-Takter finden auch alle vier Arbeitsschritte statt, aber nur während zwei Kolbenhüben.

Als weiteres Einteilungskriterium wurde in der Matrix der Bewegungsablauf gewählt. Neben den Hubkolbenmotoren können auch Drehkolben eingesetzt, die nach ihrem Erfinder

Felix Wankel auch als Wankelmotoren (Zeile a=3) bekannt wurden. Eine dritte wesentliche Unterscheidungsmöglichkeit ist das Zündverfahren. Es werden fremdgezündete Ottomotoren und selbstzündende Dieselmotoren unterschieden. Die ständige Weiterentwicklung des Hubkolbenmotors hat zu verschiedensten Bauformen geführt.

Innovationsmuster

Die folgende Abbildung stellt einen Ausschnitt der Innovations-Matrix in Abbildung 14 dar.

Cluster 1 der Innovations-Matrix

Kraftstoff (k) Antrieb (a)		CO ₂ -emittierende Kraftstoffe						CO ₂ -neutrale Kraftstoffe				
		Konventionell			Nicht-konventionell			Semi-alternativ				
		Kohlenwasserstoffe			SynFuels			Ole		Alkohole		Gase
		Diesel (1)	Benzin (2)	Autogas LPG (3)	Erdgas LNG (4)	Erdgas CHG (5)	GTL (6)	BTL (7)	Bio-diesel (RME) (8)	Pflanzenöle (9)	Bio-Ethanol (10)	Bio-Methanol (11)
Thermische Antriebe	Konventionell	4-Takt-Hubkolbenmotor (1)	1		2					3		
		2-Takt-Hubkolbenmotor (2)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	Nicht-konventionell	Wankelmotor (3)	4	/	5	/	/	/	/	6	/	/
		Sonstige Verbrennungsprinzipien (4)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Abbildung 19, Quelle: eigene Darstellung

Der Ausschnitt zeigt, dass sich das Cluster 1 in sechs verschiedene Innovations-Bereiche aufteilen lässt. Jeder dieser Bereiche verfügt über unterschiedliche Innovations-Typen, welche sich entsprechend der Legende der Innovations-Matrix durch unterschiedliche Graustufungen voneinander unterscheiden. Die mit „/“ gekennzeichneten Felder stellen Inventionsräume dar. Die entsprechend ihrer Innovationszugehörigkeit ausgefüllten Felder sind die in der Clusterbeschreibung genannten Fahrzeug-Konfigurationen $F_{a/k}$.

Aus der Abbildung geht hervor, dass das Cluster 1 drei Innovations-Typen beinhaltet, welche im Weiteren näher erläutert werden, und zwar

- Stagnovative Innovationen (Bereich 1)
- Inkrementale Innovationen 1. Grades (Bereich 2 und 4)
- Inkrementale Innovationen 2. Grades (Bereich 3).

Die Inventionsräume sind vor allem in den Bereichen 4, 5 und 6 zu finden. Es wird schnell ersichtlich, dass der Bereich nicht-konventioneller thermischer Antriebstechniken über ein hohes Innovationspotenzial verfügt. Radikale Innovationen liegen im Cluster nicht vor.

Stagnovative Innovationen

Der erste Innovations-Typ sind die stagnovativen Innovationen. Diese beruhen auf konventioneller Antriebstechnik und konventionellen Kraftstoffen und führen zu den Antriebs-Konfigurationen: $F_{1/1}$, $F_{1/2}$, $F_{2/1}$ und $F_{2/2}$. Auch noch so moderne und optimierte Motorentechnologien, wie beispielsweise ein 12-Zylinder Ottomotor mit Direkteinspritzung, zählen zu den stagnovativen Innovationen, da sie die Konvention nicht überwinden. Um Missverständnissen vorzubeugen, sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Zuordnung einer Fahrzeug-Konfiguration zu einem Innovations-Typ grundsätzlich keine Wertung darstellt. Stagnovative Innovationen können ebenso wie inkrementale oder radikale Innovation zur Schonung von Ressourcen und zur Umweltentlastung beitragen, nur eben mit dem Unterschied, dass sie an konventionellen Technologien festhalten.

Der mit Diesel oder Benzin betriebene 4-Takt-Hubkolbenmotor ist immer noch eine Benchmark für alle alternativen Antriebstechnologien und Kraftstoffe. Daher wird dieser Motortyp im Folgenden vergleichsweise ausführlich betrachtet. Dabei wird deutlich, dass auch mit stagnovativen Innovationen noch beachtliche Effizienz-Verbesserungen möglich sind. In der folgenden Abbildung sind die beiden wesentlichen Entwicklungsbestrebungen der heutigen Motorentechnik zusammengefasst.

Entwicklungsbestrebungen in der Motorentechnik

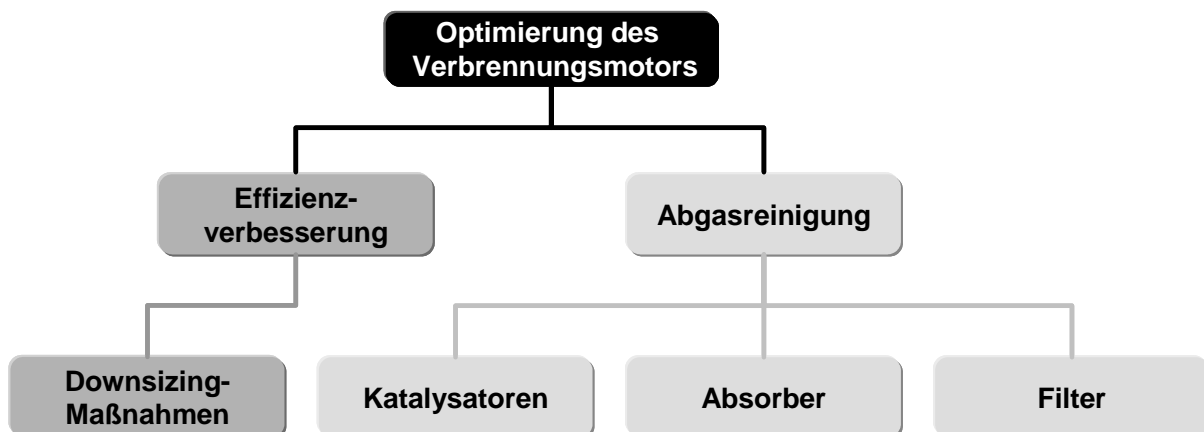


Abbildung 20, Quelle: eigene Darstellung

Die Herausforderung ist dabei eine doppelte: Die Verbrennung soll zum einen immer effizienter erfolgen (Erhöhung des Wirkungsgrades) und zum anderen auch immer sauberer werden. Durch die Erhöhung hubraumbezogener Leistungen, sogenannter Downsizing-Maßnahmen, sollen der Wirkungsgrad von Motoren erhöht und damit Ressourcen und Kohlendioxid eingespart werden.

Durch verschiedene Verfahren der Abgasnachbehandlung (Katalysatoren, Filter, Absorber) konnten in den letzten Jahren die Emissionswerte der Abgase immer weiter gesenkt, und damit die in der Euro-Abgasnorm vorgeschriebenen Grenzwerte eingehalten werden (vgl. auch Abbildung 22).

Etwas plakativ formuliert lautet damit das Credo der Motorenentwickler derzeit »Die-sOtto«, also die Entwicklung eines Motors, der so effizient wie der Diesel und so sauber wie der Otto-Motor arbeitet. Aber auch beim Dieselmotor selbst sind noch Effizienzsteigerungen

in der Einspritztechnik und Verbrennungsraumgestaltung möglich, wobei der Schwerpunkt hier eher bei der Reduktion der Emissionen liegen wird. VW versucht sich derzeit an einer Realisierung eines solchen, von VW als »combined combustion system« (CCS) bezeichneten, Motorkonzepts (Autoinsidernews 2007). Der Einsatz eines Prototyps mit CCS-Motor wurde im VW-Touran demonstriert. Als Kraftstoff für den neuen Motor ist BtL angedacht. Mit einer Verbreitung ist allerdings nicht vor 2010 zu rechnen.

Die folgende Abbildung stellt einen detaillierten Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten zur Optimierung eines Hubkolbenmotors dar.

Verbesserung konventioneller Funktionen (links) und der Prozessführung (rechts) am Kolbenmotor

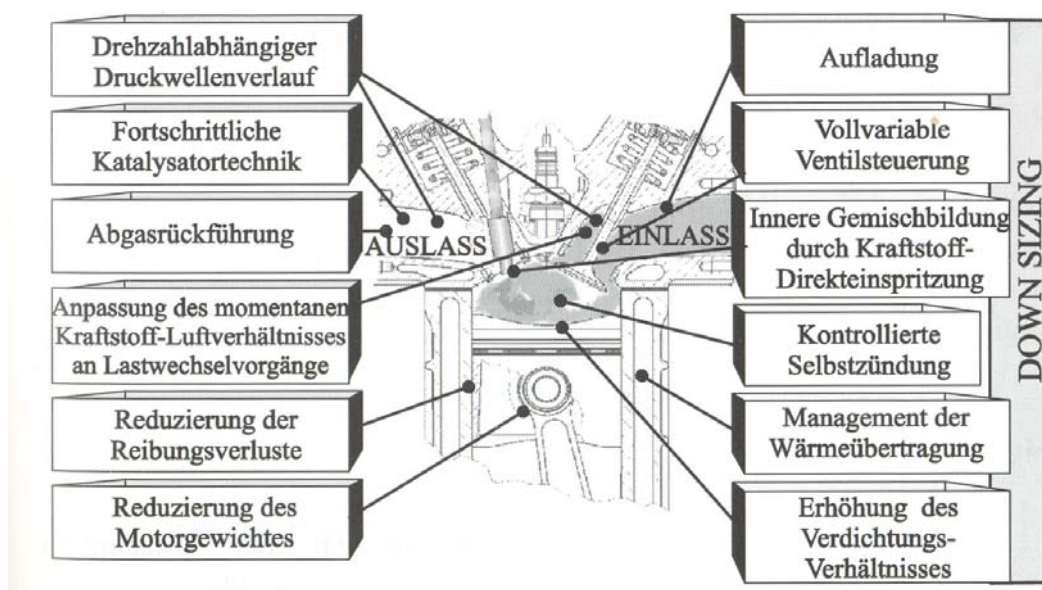


Abbildung 21, Quelle: Stan 2005, 47

In dieser Darstellung wird zwischen Maßnahmen zur Verbesserung konventioneller Funktionen (links) und Downsizing-Maßnahmen für eine verbesserte Prozessführung (rechts) unterschieden. Direkteinspritzung, elektronische Motorsteuerung, Vierventiltechnik, variable Ventilsteuerzeiten oder mechanische Aufladung sind übliche Downsizing-Maßnahmen zur Wirkungsgradsteigerung des Verbrennungs-Motors, vor allem des Benziners.

Das zukünftige Optimierungspotential des Benzinmotors wird auf 8 bis 15% (Pehnt 2001, 10; Bosch 2005) geschätzt. Zu den Maßnahmen der verbesserten Prozessführung zählen vor allem die verschiedenen Möglichkeiten der Abgasnachbehandlung.

In der Wirkungsgrad-Diskussion werden schnell Äpfel mit Birnen verglichen. Es ist jeweils genau zu klären, auf welchen Betriebspunkt (Bestpunkt, Nennbereich, Vollast, Teillast) sich die Aussagen beziehen und wie die Systemgrenze gelegt wurde. Aussagekräftiger als der Wirkungsgrad in einem bestimmten Betriebspunkt ist der Nutzungsgrad. Er gibt den durchschnittlichen Wirkungsgrad über einen definierten Fahrzyklus wieder, wie zum Beispiel dem EDC (European Drive Cycle).

Bei der Systemgrenze ist zu prüfen, ob es sich bei einer Angabe um den reinen Motorwirkungsgrad am Prüfstand oder den Wirkungsgrad des kompletten Antriebs, inklusive des

Getriebes und aller Reibungsverluste handelt. Dies erklärt die große Spanne an vermeintlichen Wirkungsgradangaben, welche von 15 bis 45% reichen. Folgende Aussagen verdeutlichen die verschiedenen Angaben:

- Der Wirkungsgrad eines typischen Kleinwagens mit Ottomotor liegt nach dem US-Stadt-Zyklus im Stadtverkehr bei „nur“ etwa 18% und bei einem Dieselmotor bei 21% (Bisio/Sharon 1995, 53).
- Ein direkteinspritzender Opel Zafira mit Dieselmotor hat im europäischen Fahrzyklus einen Wirkungsgrad von 22% (Winter/Mettlach/Matthe 2005, 10)
- Ein moderner Ottomotor besitzt einem Wirkungsgrad von rund 35%, wobei jedoch über 50% für möglich gehalten werden. (VDI 2006a)
- Im Bestpunkt kann durch Downsizing und Aufladung mit Direkteinspritzenden Dieselmotoren ein Wirkungsgrad von 43% erreicht werden (Gossen/Grahl 1999, 1255)
- „Normale“ Ottomotoren erreichen mit indirekter Einspritzung maximale Wirkungsgrade im Bereich von 25% bis 35%. (Kfz-tech 2006)

Die Aussagen machen deutlich: Entscheidend ist nicht der Wirkungsgrad im Bestpunkt, sondern der Wirkungsgrad im Fahrzyklus. Dieser kann vor allem durch eine Verbesserung des Teillastverhaltens (Stadtverkehr) erhöht werden. Elektromotoren haben im Gegensatz zum Verbrennungsmotor ein deutlich besseres Teillastverhalten, was zum Beispiel in Hybridfahrzeugen oder Brennstoffzellenfahrzeugen zum tragen kommt.

Bis zu welchem Umfang der Motor-Wirkungsgrad gesteigert und damit der Kraftstoffverbrauch reduziert werden kann, hängt nicht allein von der Weiterentwicklung des Motors ab. Durch die stetig steigenden Ansprüche an die Sicherheitstechnik und den Fahrkomfort in modernen Fahrzeugen werden Pkws immer schwerer und die Effizienzvorteile moderner Verbrennungstechnik gehen oftmals auf Kosten der Gewichtszunahme wieder verloren. Daher müssen Fahrzeuge ganzheitlich optimiert werden. So lässt sich beispielsweise die Karosserie durch leichtere Materialien und geringere Luftwiderstände spritoptimiert gestalten. Nach einem Szenario des Mineralölherstellers Shell (Shell 2001) liegt der Verbrauch von Neufahrzeugen in 20 Jahren im Durchschnitt zwischen 3,7 und 4,2 Litern, gegenüber 7,7 Litern im Jahr 2000.

Zur Verbesserung der Luftqualität in Ballungsräumen ist eine effektive Abgasreinigung notwendig. Die drei wesentlichen Komponenten der Abgasreinigung sind der Katalysator, der Partikelfilter und der Absorber. Der 3-Wege-Katalysator kommt beim nicht-direkteinspritzenden Ottomotor zum Einsatz. Er kann Kohlenmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe (HC) zu CO₂ plus Wasser oxidieren und gleichzeitig Stickoxide (NO_x) zu Stickstoff(N₂) reduzieren. Bei Dieselfahrzeugen sowie bei direkteinspritzenden Benzinern kann der 3-Wege Kat aufgrund der mageren Gemischbildung, das heißt dem hohen Sauerstoffanteil im Abgas, nicht verwendet werden. Daher kommen Diesel-Oxidationskatalysatoren (DOC) zum Einsatz. Zur Reduktion der NO_x-Emissionen werden bei diesen Fahrzeugen das SCR-Verfahren (Selective Catalytic Reaction) und DeNO_x-Katalysatoren angewandt. Partikelfilter kommen vor allem als Russfilter in Dieselfahrzeugen zum Einsatz.

Ziel der Abgasreinigung ist die Einhaltung der in der EU-Abgasnorm vorgeschriebenen Schadstoffgrenzwerte für Neuzulassungen. Die europäischen Vorschriften legen Grenzwerte

für Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NOx), Kohlenwasserstoffe (HC) und Partikel (PM) fest. Sie sind der folgenden Tabelle zu entnehmen, wobei seit dem 1. Januar 2005 die Euro 4-Norm gilt und voraussichtlich ab 2010 die Euro 5-Norm:

Entwicklung der vorgeschriebene Emissions-Grenzwerte für Pkw
in den Euro-Normen 1 bis 6

	Euro 1^(a)	Euro 2^(a)	Euro 3^(a)	Euro 4^(a)	Euro 5^(b)	Euro 6^(b)
	ab 1. Juli 1992	ab 1. Jan. 1996	ab 1. Jan. 2000	ab 1. Jan. 2005	ab 1. Sept. 2009	ab 1. Sept. 2014
Pkw mit Benzinmotor (g/km)						
CO	3,16	2,2	2,3	1,0	1,0	k.A.
(HC+NOx)	1,13	0,5				
Nox			0,15	0,08	0,06	0,06
HC			0,2	0,1	0,1	0,1**
Pkw mit Dieselmotor (g/km)						
CO	3,16	1,0	0,64	0,5	0,5	k.A.
(HC+NOx)	1,13	0,7 0,9 DI*	0,56	0,3	0,23	0,17
Nox			0,5	0,25	0,18	0,08
Partikel	0,18	0,08 0,1 DI* **	0,05	0,025	0,005	k.A.

*DI = Direktreinspritzer., **davon 0,068g NMHC

Abbildung 22, Quelle: eigene Darstellung, ^(a)KBA 2005, 9, ^(b)EP 2006

Wie die Tabelle zeigt, sind die Erfolge in der Abgasreinigung beachtlich. Viele Fahrzeughersteller bieten den Partikelfilter inzwischen serienmäßig an. Vermutlich ab dem Jahr 2009 sollen Russfilter für Motoren verbindlich vorgeschrieben werden. Ein entsprechender Vorschlag wird dem europäischen Parlament vorgelegt (Hartlieb 2006).

Heute besteht die Herausforderung vor allem darin, sich auf diejenigen Emissionen zu konzentrieren, die für die Luftqualität und die Gesundheit immer noch besonders kritisch sind, nämlich Partikel und NOx. Von besonderem Interesse sind dabei Partikel mit einem Durchmesser kleiner als 0,1 Mikrometer, die als Feinststaub bezeichnet werden. Diese kleinen Schwebteilchen wiegen zwar nur einen Bruchteil im Vergleich zu den „großen“ Partikeln, sind aber laut der aktuellen Diskussion besonders schädlich für die Atemwege. Ein Zusammenhang zwischen kleinen und extrem kleinen Partikeln und der steigenden Zahl vorzeitiger Todesfälle aufgrund von kardiovaskulären und Lungenerkrankungen konnte nachgewiesen werden (AECC 2006). Jährlich sterben in der EU schätzungsweise 300.000 Menschen an Krankheiten, die nachweislich durch Staubpartikelchen hervorgerufen wurden (Hartlieb 2006).

Inkrementale Innovationen 1. Grades

Den zweiten Innovations-Typ im Cluster 1 bilden die inkrementalen Innovationen 1. Grades. Der Einsatz nicht-konventioneller Kraftstoffe ($K=3, 4, 5, 6$) in konventionellen 4-Takt Hubkolbenmotoren ($a=1, 2$) führt zu inkrementalen Kraftstoff-Innovationen 1. Grades. Hierzu zählen die Fahrzeug-Konfigurationen $F_{1/3}$, $F_{1/4}$, $F_{1/5}$ und $F_{1/6}$. Bei dem benzinbetriebenen Wankelmotor ($F_{3/2}$) handelt es sich um einen nicht-konventionellen thermischen Antrieb mit einem konventionellen Kraftstoff und er stellt damit eine inkrementale Antriebs-Innovation ersten Grades dar.

Zunächst zu den Kraftstoffen: Zur Beurteilung der Umweltfreundlichkeit konventioneller und nicht-konventioneller CO_2 -emittierender Kraftstoffe ist das „Kohlenstoff zu Wasserstoff Verhältnis“, kurz C-H Verhältnis, maßgebend. Je geringer die C-Anteile in den Kohlenwasserstoffverbindungen der einzelnen Kraftstoffe sind, umso weniger wird Kohlendioxid gebildet.

Autogas ($k=3$) beispielsweise ist eine Mischung aus Propan und Butan, welches bereits bei 6 bis 8 bar verflüssigt und daher auch als „Flüssiggas“ bezeichnet wird. Aufgrund des höheren Wasserstoffanteils in Propan und Butan im Verhältnis zu Benzin, verbrennt Autogas sauberer und führt zu einer CO_2 -Minderung von 18% gegenüber Benzin (DVFG 2006a). Im Vergleich zu Diesel ist der CO_2 -Vorteil marginal. Die Abgasemissionen sind jedoch um 80% geringer (DVFG 2006b). In Polen, Italien und den Niederlanden hat Autogas einen deutlichen höheren Stellenwert als in Deutschland. Allein in Polen sind 2.000.000 Autogas-Fahrzeuge zugelassen, in Deutschland nur rund 65.000 (DVFG 2006c). Das C-H-Verhältnis bei Erdgas ($k=4$ und 5) ist noch besser als bei Autogas, so dass hier die CO_2 -Emissionen sogar um 25% niedriger sind als bei einem Benzinfahrzeug und die Smog-Bildung um bis zu 80% weniger beträgt (Mönch 2006).

Bei der Herstellung von synthetischen Kraftstoffen wird zwischen zwei Verfahren unterschieden, nämlich dem GTL- und dem BTL-Verfahren. Bei dem GTL-Verfahren ($k=6$) wird aus einem fossilen Primärenergieträger, z.B. aus Erdgas, synthetisches Benzin hergestellt, wodurch es zu den CO_2 -emittierenden Kraftstoffen zählt. Als erdgasbasierter Kraftstoff ist GTL nicht regenerativ und verfügt über ein eher geringeres CO_2 -Einsparungspotenzial. Steigende Bedeutung kann GTL allerdings erzielen, indem das heute noch ungenutzt abgefackelte Erdgas, welches als Nebenprodukt bei der Ölförderung entsteht, zur GTL-Herstellung verwendet wird. Vorteile des Kraftstoffs sind, dass er nahezu schwefelfrei ist und relativ schadstoffarm verbrennt. Außerdem ermöglichen synthetische Kraftstoffe die Nutzung einer Vielzahl unterschiedlicher Primärenergien zur Kraftstoffherstellung. Darüber hinaus können die bestehende Kraftfahrzeugflotte eingesetzt und die heutige Tankstellen-Infrastruktur genutzt werden.

Antriebsseitig wurde der Wankelmotor als inkrementale Antriebsinnovation identifiziert. Der vom deutschen Erfinder Felix Wankel entwickelte Kreiskolbenmotor bestand seinen ersten Testlauf 1954 auf dem Teststand und wurde von mehreren Lizenznehmern, vor allem von NSU und Mazda zur Serienreife weiterentwickelt. Als Audi-NSU den Ro80 1977 einstellte, endete in Deutschland die Serienfertigung des Wankelmotors. Als einziger Autohersteller bleibt Mazda dem Wankelmotor treu. (Knie 1994; Freund 2006). Vorteile des Wankelmotors im Vergleich zum Hubkolbenmotor sind seine kompakte Bauform, die wenig bewegten Teile, ein vibrationsarmer Lauf sowie eine bessere Eignung für den Einsatz von

Wasserstoff. Diesen mechanischen Vorteilen steht der Nachteil gegenüber, dass die Brennkammer des Wankels nicht thermodynamisch optimiert ist. Größere Kühlwärmeverluste und höhere Druckverluste, führen zu einem um bis zu 16% höheren Benzinverbrauch gegenüber einem 4-Takt Hubkolbenmotor führen (Wikipedia 2006d). Auf die Vorteile des Wankels beim Einsatz von Wasserstoff gehen wir im Cluster 2 unserer Innovationsbetrachtung näher ein. Seit 1961 hat Mazda über 1,8 Millionen Rotationskolbenmotoren gebaut, die meisten für den Sportwagen Mazda RX-7 (Fahrberichte 2006).

Inkrementale Innovationen 2. Grades

Den dritten Innovations-Typ in Cluster 1 bilden die inkrementalen Innovationen 2. Grades. Semi-alternative Kraftstoffe (k=7, 8, 9, 10, 11, 12) sind CO₂-neutrale Kraftstoffe und führen bei der Verbrennung in einem konventionellen 4-Takt Hubkolbenmotor (a=1) zu den Fahrzeug-Konfigurationen F_{1/7}, F_{1/8}, F_{1/9}, F_{1/10}, F_{1/11} und F_{1/12}, welche inkrementale Kraftstoff-Innovationen 2. Grades darstellen.

CO₂-neutrale Kraftstoffe werden oftmals auch als »Bio-Kraftstoffe« bezeichnet und basieren auf nachwachsenden Rohstoffen. Beispielsweise können Pflanzenöle (k=7) und Rapsmethylester (RME) – auch Biodiesel (k=8) genannt – aus Raps, Bio-Methanol (k=9) aus Biomasse und Bio-Ethanol aus Zuckerrüben gewonnen werden. Biogas (k=11) entsteht bei Gärungsprozessen verschiedener organischer Materialien. Im BTL-Verfahren wird Biomasse über eine Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) zu Benzin oder Diesel synthetisiert.

Abgesehen von Biodiesel haben Bio-Kraftstoffe in Deutschland noch eine sehr geringe Bedeutung. Biodiesel jedoch kann bereits an 1900 Tankstellen gezapft werden und hatte im Jahr 2005 einen Anteil von immerhin 3% (1.800.000 t) am gesamten Kraftstoff-Primärenergieverbrauch in Deutschland (FNR 2005). Pflanzenöle mit 0,33% und Bioethanol mit 0,27% rangierten im Jahre 2005 auf den Plätzen zwei und drei. Die Anpassung eines Dieselmotors auf reines Pflanzenöl ist mit relativ hohen Kosten im Bereich von 2.500 bis 3.500 EUR verbunden (Geitmann 2004, 61). Die Verwendung von Biodiesel ist hingegen unproblematisch. Biodiesel ist mit normalem Dieseldieselkraftstoff vergleichbar und zahlreiche Fahrzeughersteller haben ihre Modelle für den Betrieb von Biodiesel freigegeben oder bieten gesonderte Biodiesel-Pakete an. Zudem kann Biodiesel seit 2004 laut Diesel-Norm herkömmlichem Diesel bis zu 5 % beigemischt werden (FNR 2005). Aufgrund begrenzter Anbauflächen für Raps kann nach heutigem Ermessen Biodiesel allerdings nur einen Anteil von 5 bis 10% am gesamten Dieserverbrauch erreichen (Geitmann 2004, 56), so dass der Ausbau der anderen Bio-Kraftstoffe notwendig sein wird.

Auch Bioethanol ist als Treibstoff nutzbar. Laut Ottokraftstoffnorm (DIN EN 228) ist hier eine Beimischung von ebenfalls 5% zu herkömmlichem Ottokraftstoff möglich (FNR 2005).

Seit 2007 sind die Unternehmen der Mineralölwirtschaft sogar gesetzlich verpflichtet, Bio-Kraftstoffe Benzin und Diesel beizumischen. Für Diesel ist eine Beimischungsquote von 4,4% und für Benzin von 2% (3% ab 2010) vorgeschrieben. Die Gesamtquote (Diesel und Benzin zusammen) soll für 2009 mindestens 5,7% und für 2010 mindestens 6% betragen. (Bundesregierung 2006)

Vergegenwärtigt man sich noch einmal die sechs Innovations-Bereiche des Clusters 1 in Abbildung 19, dann wird ersichtlich, dass dieses Cluster nicht nur über ein beachtliches Innovations- sondern auch über ein großes Inventions-Potenzial verfügt. Ein Beispiel: Ange-

nommen der 2-Takter erlebt in einem Leichtbaufahrzeug eine Renaissance und wird auf einen Betrieb mit Biogas umgerüstet. Damit wäre die Fahrzeug-Konfiguration $F_{2/12}$ belegt und es würde sich dabei um eine inkrementale Kraftstoff-Innovation 2. Grades handeln. Oder: Ein Automobilhersteller baut den Pkw-Prototypen eines erdgasbetriebenen Stirling-Motors und belegt damit das Feld $F_{4/4}$. Dies wäre sowohl eine inkrementale Antriebs- als auch Kraftstoff-Innovation 1. Grades, da sowohl Antrieb als auch Kraftstoff »nicht-konventionell« sind.

Beispielmodelle

Exemplarisch werden nun drei Fahrzeug-Konfigurationen aus Cluster 1 näher vorgestellt. Dies sind:

- Der DaimlerChrysler „Bluetec“ als ein Beispiel für modernste Dieselmotor-Technologie. Bei dem Fahrzeug handelt es sich um eine stagnative Innovation und es ist in der Innovations-Matrix dem Feld $F_{1/1}$ zuzuordnen.
- Der benzinbetriebene RX-8 mit einem Wankelmotor. Das Fahrzeug wurde gewählt, um aufzuzeigen, dass auch der Drehkolbenmotor bis zur Serienreife entwickelt ist. Die Fahrzeug-Konfiguration findet sich im Feld $F_{3/2}$ wieder und stellt eine inkrementale Antriebs-Innovation dar.
- Der erdgasbetriebene Opel Zafira als Vertreter einer inkrementalen Kraftstoff-Innovation 1. Grades. Das Fahrzeug ist dem Feld $F_{1/4}$ zuzuordnen

Beispielmodelle Cluster 1

Kennwerte		Daimler	Mazda	Opel
				
Modell		Mercedes E320 Bluetec	Mazda RX-8 Renesis	Opel Zafira 1.6 CNG
Fahrzeug-Konfiguration		F 1/1	F 3/2	F 1/4
Motordaten	Typ	Dieselmotor V6	Kreiskolbenmotor	Ottomotor
	Hubraum [ccm]	2987 ^a	2x654 ^b	1598 ^c
	Nennleistung [kW]	154 ^a	141 ^b	69 ^c
	Nennndrehm. [Nm]	526 ^a	220 ^b	133 ^c
Verbrauch	[Liter bzw. kg pro 100 km]	7,0 Liter ^a	10,6 Liter ^b	5,0 kg CNG ^c
Reichweite	[km]	1200 ^a	460 ^b	380 ^d
Tankinhalt	[Liter]	k.A.	61 ^b	k.A.
Höchstgeschw.	[km/h]	250 ^a	223 ^b	165 ^c
Beschleunigung	0-100 km/h [sec]	6.6 ^a	7.4 ^b	17 ^c
Leergewicht	[kg]	k.A.	1350 ^b	1505 ^c
CO₂-Austoss	[g/km]	k.A.	267 ^b	138 ^c
Preis	[EUR]	39.780 ^{a,*}	28.100 ^b	23.825 ^d

* Daten umgerechnet von US\$ nach EUR (Kurs: 0.772 am 5.1.07, Werte gerundet)

Abbildung 23, Quelle: eigene Darstellung; ^a freenet 2006; ^b AutoBild 2006b; ^c Opel 2006, ^d AutoBild 2006a

Marktchancen

Die Zukunft des konventionellen, ölbasierten Diesel- und Ottomotors ist ungewiss geworden. Die absehbare Ölknappheit und die fortschreitende Entwicklung alternativer Antriebslösungen stellen seine Alleinherrschaft mehr und mehr in Frage. Die Alternativen zum Verbrennungsmotor sind der Elektroantrieb mit Batterien beziehungsweise Brennstoffzellen und der Hybridantrieb. Langfristig wird diejenige Antriebstechnologie das Rennen machen welche,

- mit regenerativen Kraftstoffen ausreichend versorgt werden kann (Infrastruktur),
- regenerative Kraftstoffe effizient wandeln kann,
- keine Schadstoffe produziert (zero-emission)
- und den Anforderungen der Gesellschaft an Mobilität gerecht wird.

Solange kraftstoffseitig regenerative Kraftstoffe im geforderten Umfang noch nicht zur Verfügung stehen, werden die Automobilhersteller stagnovative Innovationsmaßnahmen treffen, um konventionelle, ölbasierte Motoren möglichst lange absetzen zu können. Maßnahmen dieser Art sind:

- verbrauchsoptimierte Fahrzeuge (Stichwort 3-Liter-Auto)
- bivalente Fahrzeuge
- Fokussierung auf Luxusmärkte

Der Lupo 3L TDI von VW erschien 1999 und gilt mit einem Verbrauch von ca. drei Litern Dieselmotorkraftstoff auf 100 km als das erste vollwertig serienmäßig hergestellte 3-Liter-Auto der Welt. Außerdem war er das erste Dieselauto, das die Euro 4-Norm erfüllte (Wikipedia 2006e). Der Markterfolg der Baureihe blieb jedoch bescheiden. Nach anfänglich guten Verkaufszahlen brach der Markt letztlich merklich ein und Ende 2004 wurde die Produktion des Lupo eingestellt (Wikipedia 2006f). Hierfür verantwortlich waren mehrere Ursachen, sicherlich auch die Tatsache, dass der Lupo nicht dem allgemeinen Trend, hin zu immer größeren, komfortableren und schnelleren Autos, entsprach.

Bivalente Fahrzeuge bieten die Möglichkeit, mit konventionellen und alternativen Kraftstoffen gleichzeitig betrieben zu werden. Sie stellen prinzipiell eine Brücke von konventionellen zu alternativen Kraftstoffen dar. Allerdings bergen sie die Gefahr, dass sie den Umstieg auf alternative Kraftstoffe lähmen können. Denn solange die Infrastruktur für den neuen Kraftstoff nicht ausreichend aufgebaut ist und diese noch teurer sind als konventionelle Kraftstoffe, wird der Verbraucher lieber von der Möglichkeit Benzin bzw. Diesel zu zapfen Gebrauch machen, was wiederum die Konvention festigt.

Von steigenden Rohölpreisen unberührt bleiben bestimmte Segmente der Luxusklasse. Kunden dieser Fahrzeuge tolerieren hohe Spritpreise, um ihren gesellschaftlichen Status durch ihr Fahrzeug zu unterstreichen. Ab welchem Spritpreis für welche gesellschaftliche Schicht die Schwelle der Fühlbarkeit (threshold value) erreicht wird, ist schwer zu beurteilen. Über die heutigen Spritpreise wird durch den Verbraucher zwar viel geklagt, aber konsequente Sparmaßnahmen, wie beispielsweise der Kauf eines 3-Liter-Autos, werden bislang nicht eingeleitet.

Nicht zu vergessen ist auch das Potenzial, Fahrzeuge mit konventioneller Technologie im asiatischen Raum abzusetzen. Im Zuge des rasanten Wirtschaftswachstums in diesen Ländern wird sich auch der Fahrzeugbestand drastisch erhöhen. Allein für China wird für das Jahr 2020 ein Pkw-Bestand von mehr als 42 Mio. Fahrzeugen prognostiziert. (Marz et al. i. E.)

5.3. Cluster 2: Wasserstoff-Verbrennungsmotoren («Kraftstoff-Brücke»)

Clusterbeschreibung

Das Cluster 2 der Abbildung 17 umfasst konventionelle ($a=1, 2$) und nicht-konventionelle thermische Antriebe ($a=3, 4$). Kraftstoffseitig werden hier die kohlenstofffreien Kraftstoffe ($k=13, 14, 15$) betrachtet. Da der Einsatz von Strom ($k=12$) in thermischen Antrieben technologisch ausgeschlossen ist, reduzieren sich die kohlenstofffreien Kraftstoffe auf Wasserstoff. Dieser kann entweder flüssig (Liquid Hydrogen, kurz LH2, $k=14$) oder in hochverdichteter gasförmiger Form (Compressed Gaseous Hydrogen, kurz CHG, $k=13$) getankt werden. Aufgrund der geringen Bedeutung des 2-Takters ($a=2$) im modernen Automobilbau und den noch nicht absehbaren Entwicklungen bei den sonstigen Verbrennungsprinzipien ($a=4$) sind derzeit keine auf Wasserstoff basierenden Innovationen in diesen Bereichen in Sicht. Anders bei dem 4-Takter ($a=1$) und beim Wankelmotor ($a=2$). Bei beiden Antriebsvarianten wurde der Einsatz von Wasserstoff in Fahrzeugen mit Vorseriencharakter erfolgreich erprobt, so dass hier Innovationen vorliegen. Dies sind:

- Zum einen die Fahrzeug-Konfigurationen $F_{1/14}$ und $F_{1/15}$, also der Betrieb des 4-Takt-Hubkolbenmotors mit gasförmigem und flüssigem Wasserstoff. Hier gelten insbesondere die Entwicklungen von BMW als richtungweisend auf diesem Gebiet.
- Zum anderen die Konfiguration $F_{3/15}$, also den mit gasförmigem Wasserstoff betriebenen Wankelmotor. Ausgehend von dem Know-how in der Entwicklung des Benzin-Drehkolbenmotors bei Mazda, will der japanische Autobauer nun auch diesen nicht-konventionellen Antrieb mit gasförmigem Wasserstoff betreiben.

Funktionsprinzipien

Als kohlenstofffreier Kraftstoff bietet Wasserstoff den großen Vorteil, dass keinerlei CO und CO₂ bei der Verbrennung entsteht. Geringe Spuren der Gase sind auf die Verbrennung von Schmieröl zurückzuführen. Außerdem kann er unter dem Einsatz erneuerbarer Energien über den Elektrolyseprozess »sauber« aus Wasser gewonnen werden. Auch in den Vorprozessen entstehen somit keine CO₂-Emissionen. Wasserstoff verfügt damit über das Potenzial nachhaltig und umweltverträglich Mobilität zu sichern.

Dies wurde auch von der Automobilindustrie erkannt. Die meisten Automobilhersteller sind sich einig, dass Wasserstoff als sauberer Kraftstoff in Zukunft eine tragende Rolle spielen wird. Daher wird auch der Aufbau einer H₂-Infrastruktur durch die Automobilhersteller gepusht. Erst vor kurzem (September 2006) erklärten die Automobilhersteller DaimlerChrys-

ler, Opel, General Motors, BMW, MAN und VW sowie die beiden Mineralölkonzerne Shell und Total in einer Pressemitteilung ihre gemeinsame Absicht, Wasserstoff als Energieträger für den Verkehr in Europa voranzubringen (HyWeb 2006).

Verschiedene Auffassungen gibt es jedoch bei der Frage, mit welcher Antriebstechnologie der Wasserstoff gewandelt werden soll. Ein Großteil der Automobilhersteller arbeitet mit mehr oder weniger großem Engagement am Brennstoffzellenantrieb, so beispielsweise DaimlerChrysler, Ford, Opel oder Toyota. Die direkte Verbrennung des Wasserstoffs wird durch BMW (7er Reihe) und Mazda (RX-8) favorisiert. Dabei setzt BMW auf den konventionellen Ottomotor, Mazda auf den Wankelmotor. Ford fährt eine Doppelstrategie und entwickelt sowohl Wasserstoffmotoren als auch Brennstoffzellenantriebe.

Welches sind nun die wesentlichen Gemeinsamkeiten und Unterschiede bei der Verbrennung von Wasserstoff im Vergleich zur Benzin- und Diesel-Verbrennung? Zuerst zu den Gemeinsamkeiten: Ein Wasserstoff-Motor ist zunächst einmal ähnlich aufgebaut wie ein Otto-Motor, da beide über eine Fremdzündung verfügen. Durch die hohe Zündtemperatur von 560°C bei Wasserstoff ist eine Selbstentzündung wie beim Dieselmotor nicht möglich. Herkömmliche Techniken der Kraftstoff-Zufuhr sowie die Zylinderkopf-Konstruktion können somit vom Ottomotor übernommen werden und müssen lediglich an die Erfordernisse des Wasserstoffs angepasst werden.

Die Unterschiede bei der Verbrennung sind auf die verschiedenen physikalisch-chemischen Eigenschaften von Wasserstoff im Vergleich zu Benzin und Diesel zurückzuführen. Hauptunterschied ist der Aggregatzustand, im Normzustand ist Benzin eine Flüssigkeit, Wasserstoff ein Gas. Wasserstoff beginnt erst bei -253°C zu verflüssigen. Auch wenn Wasserstoff als Flüssigkeit in cryogenen Tanks gespeichert werden kann, wird er im gasförmigen Zustand in den Brennraum eingeblasen. Weitere, für den Verbrennungsprozess relevante Unterschiede von gasförmigem Wasserstoff im Vergleich zu Benzin ist sein großer Zündbereich (4-79 Vol%, Benzin: 1-8 Vol%), seine hohe Flammgeschwindigkeit (ca. 190 cm/s, Benzin: 40 cm/s) sowie seine niedrige Mindest-Zündenergie (0,02 mJ, Benzin: 0,24 mJ) (FH-Stralsund 2006, 7).

Dies bedeutet, dass ein Wasserstoff-Luft-Gemisch in einem relativ großen Bereich leicht entzündlich ist und seine Flammen sich schnell ausbreiten. Diese Eigenschaften des Wasserstoffs erleichtern die Gefahr von Fehlzündungen beim Verbrennungsprozess, wodurch entsprechende Abhilfemaßnahmen zu treffen sind. Neben der Gefahr von Fehlzündungen sind auch Stickoxidemissionen, nicht ausreichende Schmiereigenschaften des Wasserstoffs, sowie die Gefahr von Materialversprödung beim Einsatz von Wasserstoff in Verbrennungsmotoren zu berücksichtigen. Die folgende Abbildung zeigt einen Überblick über die mit der Wasserstoffverbrennung verbundenen Probleme, deren Hauptursache, sowie mögliche Abhilfemaßnahmen.

Wasserstoff-Motoren: Probleme, Hauptursachen und Abhilfemaßnahmen

Probleme	Hauptursache	Abhilfemaßnahmen
Rückzündungen während des Ansaugtakts	Niedrige Mindest-Zündenergie, hohe Verbrennungstemperatur, hohe Flamm-Geschwindigkeit	Kühlung von heißen Punkten im Brennraum durch Abgasrückführung (Ballastgas)
Glühzündungen während des Kompressiontakts	Niedrige Mindest-Zündenergie, hohe Verbrennungstemperatur,	konstruktive Maßnahmen zur Vermeidung von Spitzen und Kanten Kühlungsrippen Einspritzen von Wasser Magerbetrieb
Frühzündungen im Verdichtungstakt (klopfen)	Niedrige Mindest-Zündenergie von H ₂ Wasserstoff-radikale	Verringerung Verdichtungsverhältnis Magerbetrieb Einspritzen von Wasser
Stickoxidemissionen	Stickstoffanteil der Verbrennungsluft.	Magerbetrieb Ladeluftkühler
Geringe Motorleistung	Liefergradverluste durch geringe Dichte des H ₂	fetter Kraftstoff
Schlechte Schmiereigenschaften	Wasserstoff hat keine Kohlenstoffanteile	Verschleißfeste Kolbenringe Graphitierung der Ventilschächte
Materialversprödung, v.a. bei L H ₂	Tiefkalte Temperaturen für LH ₂ -Betankung	geeignete Materialwahl

Abbildung 24, Quelle: eigene Darstellung

Zur Vermeidung der Rückzündungen müssen beim Ansaugtakt spezielle Einblasventile vorhanden sein. Diese verhindern, dass sich das gasförmige Gemisch in der Ansaugphase, noch bevor es in der Brennkammer angekommen ist, entzündet.

Die zu frühe Entzündung des Knallgasgemisches an zu heißen Stellen in der Brennkammer wird als Glühzündung bezeichnet. Neben der zu heißen Zylinderwand können auch Spitzen und Kanten, Ölpartikel und Restgas die Rolle einer Zündkerze übernehmen. Zur Vermeidung solcher unerwünschten Glühzündungen sind entsprechende konstruktive Maßnahmen vorzusehen. Für eine ausreichende Kühlung der Brennkammer ist ebenfalls zu sorgen. Einen Kühleffekt bewirkt auch das Einspritzen von Wasser. Dies hat zusätzlich den Vorteil, dass die Stickoxidemissionen abnehmen.

Unter dem »Klopfen« eines Kraftstoffs sind Frühzündungen im Verdichtungstakt zu verstehen. Um das Klopfen zu verhindern, darf das H₂-Luft-Gemisch, dessen Oktanzahl deutlich unter der von Benzin liegt, nicht so stark verdichtet werden. Eine generelle Abhilfemaßnahme zur Vermeidung von Fehlzündungen jeglicher Art ist ein Magerbetrieb des Motors. Je mehr Luft zugeführt wird, desto mehr wird das Gemisch abgemagert. Dadurch steigt die nötige Zündenergie des Kraftstoffgemisches an und die Verbrennungstemperatur wird gesenkt.

Im Gegensatz zu Brennstoffzellen entstehen bei der Wasserstoffverbrennung Stickoxide. Grund hierfür sind die Stickstoffanteile der notwendigen Verbrennungsluft. Je nachdem, ob

ein Kraftstoff mit Luftüberschuss oder mit Luftmangel verbrannt wird, entstehen mehr oder weniger Stickoxide. Ein Gemisch mit Luftüberschuss wird in der Motorentechnik als »mager« bezeichnet und hat einen Lambda-Wert größer als eins ($\lambda > 1$). Bei Luftmangel spricht man von einem »fetten« Kraftstoffgemisch und der Lambda-Wert ist kleiner als eins ($\lambda < 1$). Der Lambda-Wert gibt Auskunft über das tatsächliche Luft-Kraftstoff-Verhältnis in Bezug zum stöchiometrisch notwendigen Luft-Kraftstoff-Verhältnis. Je fetter das Gemisch ist, desto höher die Leistung, aber leider auch der Kraftstoffverbrauch und die Stickoxid-Emissionen. Durch die Abmagerung des Kraftstoffgemisches können demnach Kraftstoff eingespart und Schadstoffe reduziert werden, allerdings auf Kosten der Leistungsdichte. Es ist nicht möglich, Kraftstoffe beliebig abzumagern, da es sonst zu einer unregelmäßigen Verbrennung kommen würde. Benzin-Motoren können bis $\lambda = 1,4$ abgemagert werden, Wasserstoff-Motoren sogar bis $\lambda = 5,5$ (Geitmann 2004, 224). Ab einem λ -Wert von 2,6 sind die Stickoxid-Emissionen des H₂-Motors vernachlässigbar. Wird der Motor allerdings in einem Bereich von 1 bis 1,5 betrieben, so sind sie um das dreifache höher. Man muss also die NO_x-Emissionen immer in Verbindung mit der Luftanreicherung des Kraftstoffs diskutieren.

Eine wesentliche Ursache für die Leistungsminderung des H₂-Motors liegt in der geringen Dichte des Wasserstoffs, wodurch sich ein schlechtes Kraft-Volumen-Verhältnis ergibt. Hinzu kommt, dass aufgrund der noch nicht vorhandenen Wasserstoffinfrastruktur die H₂-Verbrennungsmotoren bivalent ausgelegt sind. Dies bedeutet, dass der Motor sowohl mit Wasserstoff als auch mit Benzin betrieben werden kann. Durch diese Bivalenz kann der Motor nicht 100%ig für den Wasserstoffbetrieb optimiert werden und Leistungseinbußen sind in Kauf zu nehmen. Ein bivalenter Motor verfügt im Wasserstoffbetrieb lediglich über 75% der ursprünglichen Leistung (ebenda, 227f.). Die H₂-Leistungswerte der in Abbildung 27 aufgeführten Beispielmodelle liegen sogar um knapp 50% unter den Benzinwerten. Durch einen monovalenten, wasserstoffoptimierten Betrieb kann die Leistungsfähigkeit der Motoren erhöht werden.

Trotz dieser Einschränkungen bei der Motorleistung ist der Motorwirkungsgrad im Wasserstoffbetrieb höher als im Benzinbetrieb. Dies ist möglich, da der Verbrennungsprozess im Wasserstoffmotor aufgrund der hohen Brenngeschwindigkeit des H₂-Luft-Gemisches dem thermodynamischen Gleichraumprozess (Otto-Prozess) näher kommt als der Verbrennungsprozess im benzinbetriebenen Motor. Auf diese Weise ist ein Motor-Wirkungsgrad von über 40% möglich (ebenda, 224) und der wasserstoffbetriebene Ottomotor liegt damit im Bereich des Dieselmotors.

Wie bereits in Kapitel 5.2 besprochen, sind die Nutzungsgrade entscheidend für den Kraftstoffverbrauch und nicht der Nenn-Wirkungsgrad. Ein wasserstoffbetriebener Ottomotor bringt es im europäischen Fahrzyklus auf einen Wirkungsgrad von 25%, normale (nicht-direkteinspritzende) Benzin-Ottomotoren liegen bei ca. 21% und moderne Dieselmotoren erreichen 26% (Carle 2002, 15). Mit einem wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenauto können vergleichsweise neue Wirkungsgrad-Dimensionen mit Werten über 40% erzielt werden. Dies entspricht einem Verbrauch von nur 3,1 Liter Benzinäquivalent auf 100 Kilometer (ebenda). Dabei handelt es sich wie gesagt nicht um den Motor- beziehungsweise hier den Brennstoffzellenwirkungsgrad, sondern um den Nutzungsgrad des Brennstoffzellenfahrzeugs im Fahrzyklus.

Ein weiterer Nachteil des H₂-Motors sind die schlechten Schmiereigenschaften von Wasserstoff. Um vorzeitigen Verschleiß vorzubeugen, sind kolbenkonstruktive und werkstoffsei-

tige Maßnahmen erforderlich, wie zum Beispiel verschleißfeste Kolbenringe oder eine Graphitisierung der Ventilschäfte.

Last but not least ist die Gefahr der Materialversprödung zu beachten. Die für die Speicherung von flüssigem Wasserstoff erforderlichen tiefen Temperaturen von -253°C machen für Zuleitungen und Teile des Motors den Einsatz besonderer Werkstoffe notwendig, die auch im Verlauf von vielen extremen Temperaturwechseln nicht verspröden.

Die aufgeführten Probleme der Wasserstoffverbrennung beruhen prinzipiell auf den physikalisch-chemischen Eigenschaften des Wasserstoffs und treten zunächst bei jeglichen Verbrennungsprozessen auf. Das Kreiskolbenprinzip im Wankelmotor ist jedoch für die Nutzung von Wasserstoff besser geeignet als der Hubkolbenmotor, was folgend verdeutlicht werden soll. Hierfür ist ein kurzer Exkurs in die Funktionsweise des Wankelmotors notwendig.

Abbildung 25 zeigt den Aufbau des von Mazda entwickelten bivalenten Kreiskolbenmotors RENESIS Hydrogen mit Wasserstoff-Direkteinspritzung, welcher im Mazda RX-8 Hydrogen RE zum Einsatz kommt.

Schematischer Aufbau des wasserstoffbetriebenen Drehkolbenmotors „RENESIS Hydrogen“ von Mazda

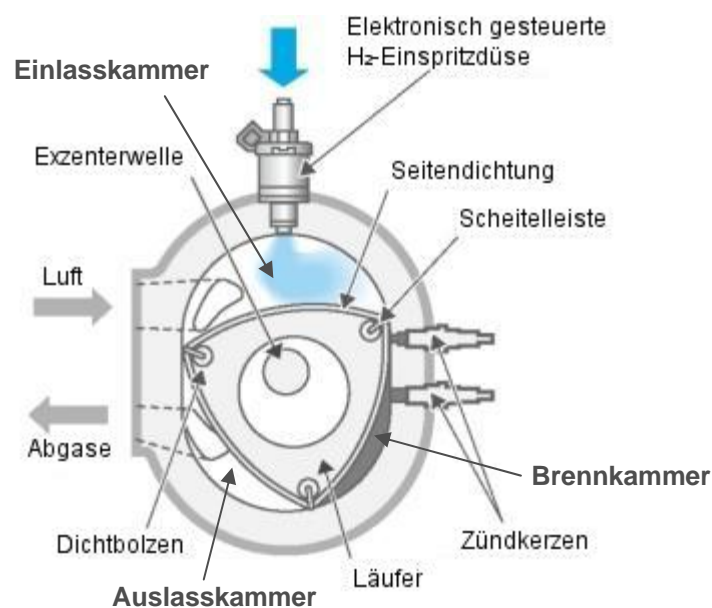


Abbildung 25, Quellen: HyCar 2006, eigene Ergänzungen

Auch der Wankelmotor arbeitete nach dem Viertaktprinzip und der Kraftstoff durchläuft die vier Arbeitstakte »Ansaugen«, »Verdichten«, »Verbrennen« und »Ausstoßen«. Allerdings erfolgt die Taktung nicht durch die lineare Bewegung eines Hubkolbens in einem Zylinder, sondern durch die Rotation des in Abbildung 25 zu erkennenden Läufers in einem epitrochoiden Gehäuse. Die Einlasskammer, der Verbrennungsraum sowie die Auslasskammer werden durch die Läuferflanken und dem entsprechenden Teilstück der jeweiligen Kammer gebildet. Im Ansaugtakt strömt über das Einlassventil die Verbrennungsluft und über die Einspritzdüse der Wasserstoff in die Einlasskammer. Durch den bei der weiteren Drehung des Kreiskolbens immer kleiner werdenden Arbeitsraum wird das Kraftstoff-Luft-Gemisch im zweiten Arbeitstakt verdichtet. Wenn das Kraftstoff-Luft-Gemisch seine höchste Dichte

erreicht, erfolgt die Zündung im dritten Takt in der Brennkammer und die freiwerdende Wärme kann am Kreiskolben nutzbare Arbeit verrichten. Durch den Auslass wird im 4-Takt das Abgas durch den Auslassschlitz ausgestoßen. Dieser dargestellte Zyklus wird von jeder der drei Läuferflanken durchlaufen, was bedeutet, dass bei einer Läuferumdrehung drei Zündungen stattfinden.

Aufgrund dieser konstruktiven Eigenschaften des Wankels ergeben sich im Vergleich zum Hubkolbenmotor verschiedene Vorteile bei der Anwendung von Wasserstoff. Zunächst können durch die räumliche Trennung der Einlass-, Brenn- und Auslasskammer ungewollte Zündungen vermieden werden. In der Einlasskammer herrschen immer vergleichsweise niedrigere Temperaturen und ein Kontakt des Gemisches mit der heißen Brennkammer kommt erst im berechneten Moment zustande. Weiter ist eine Direkteinspritzung von Wasserstoff beim Wankelmotor einfacher zu realisieren als bei einem Hubkolbenmotor. Aus räumlichen Gründen ist es leichter, die H₂-Einspritzdüse an der Einlasskammer des Wankelmotors anzubringen als an den vergleichsweise engen Zylinderköpfen eines Hubkolbens. Außerdem entsteht durch den längeren zeitlichen Ablauf bei der Bildung des Wasserstoff-Luft-Gemisches im Wankel eine gründlichere Durchmischung und eine gleichmäßigere Verbrennung mit besserem Wirkungsgrad als im Hubkolbenmotor (Mazda 2006a). Probleme bereiten beim Wankelmotor die Abdichtleisten und die Schmierung.

Innovationsmuster

Betrachten wir nun nach derselben Methodik wie im Kapitel 5.2, die in Cluster 2 vorhandenen Innovations-Typen. Zunächst fällt auf, dass jedes mit einer Innovation belegte Feld zweigeteilt ist und entweder eine inkrementale Innovation 1. Grades oder eine inkrementale Innovation 2. Grades darstellt. Der Grad der Innovation hängt von der Erzeugung des Wasserstoffs ab. Basiert die Erzeugung auf regenerativen Energieträgern, handelt es sich um eine Innovation 2. Grades. Erfolgt die Erzeugung unter Einsatz von Kohlenwasserstoffen, liegt eine Innovation 1. Grades vor. Innovationen 2. Grades sind systematisch, Innovationen 1. Grades modular.

Weiter sind in Cluster 2 die beiden mit 1 und 2 gekennzeichneten Innovationsbereiche zu erkennen. Im Bereich 1 trifft Wasserstoff als alternativer Kraftstoff auf konventionelle Motorenteknik, so dass die Fahrzeug-Konfigurationen F_{1/14} und F_{1/15} inkrementale Innovationen 1. oder 2. Grades darstellen. Der mit CGH₂ betriebene Wankelmotor liegt im Innovationsbereich 2 und besetzt das Feld F_{3/15}. Er wurde den inkrementalen Innovationen zugeordnet, obwohl er streng genommen eine „innovativere“ inkrementale Innovation als die H₂-Verbrennung im 4-Takter darstellt. Die Zunahme der Innovativität rührt daher, da er sowohl antriebsseitig als auch kraftstoffseitig von der Konvention abweicht. Die antriebsseitige Abweichung kommt bei der Zuordnung zu den „nicht-konventionellen Antrieben“ zum Ausdruck. Er wurde deswegen nicht den alternativen Antrieben zugeordnet, da nach unserem Verständnis erst dann von einer Alternative die Rede sein kann, wenn von dem Paradigma der thermischen Verbrennung losgelassen wird. Einen Paradigmenwechsel stellt derzeit vor allem die elektrische Antriebstechnik dar.

Der Einsatz eines Druckluftmotors im Automobil wäre ebenso ein Beispiel für eine Alternative zum Verbrennungsmotor. Allerdings befinden sich die Entwicklungen noch im Inventi-

onsstadium und es ist fraglich, ob die Druckluftspeicherung ökonomisch und ökologisch darstellbar ist.

Es bleibt also festzuhalten, dass die Kombination eines nicht-konventionellen Antriebs mit einem alternativen Kraftstoff noch keine radikale Innovation darstellt, sondern eine inkrementale.

Cluster 2 der Innovations-Matrix

Antrieb (a)		Kraftstoff (k)		C-freie Kraftstoffe		
				Alternativ		
				Strom (13)	Wasserstoff	
					Wasserstoff LH ₂ (14)	Wasserstoff CGH ₂ (15)
Thermische Antriebe	Konventionell	4-Takt-Hubkolbenmotor (1)	X	1		
		2-Takt-Hubkolbenmotor (2)	X	/	/	
	Nicht-konventionell	Wankelmotor (3)	X	/		
		Sonstige Verbrennungsprinzipien (4)	X	2	/	

Abbildung 26, Quelle: eigene Darstellung

Beispielmodelle

Die drei Innovationsfelder in Abbildung 26 ($F_{1/14}$, $F_{1/15}$, $F_{3/15}$) werden nun durch exemplarische Beispielmodelle in Abbildung 27 illustriert. Diese sind:

- Der 750hl vom BMW als Vertreter für einen mit Flüssigwasserstoff betriebenen Verbrennungsmotor. Das Fahrzeug ist dem Feld $F_{1/14}$ zuzuordnen
- Der Ford Focus „c-Max“ wird mit gasförmigem Wasserstoff betrieben und ist damit dem Feld $F_{1/15}$ zuzuordnen.
- Der RX-8 Hydrogen von Mazda wurde gewählt um aufzuzeigen, dass auch eine Wasserstoffverbrennung im Wankelmotor möglich ist. Der RX-8 Hydrogen belegt das Feld $F_{3/15}$ in der Innovations-Matrix.

Beispielmodelle zu Cluster 2




Kennwerte		BMW	Ford	Mazda
				
Modell		Hydrogen7 7er-Reihe (760i)	Focus 'C-MAX'	RX-8 Hydrogen RE
Fahrzeug-Konfiguration		F 1/14	F 1/15	F 3/15
Motordaten	Typ	Bivalenter 12-Zyl.-Ottomotor	Monovalenter 4-Zyl.-Ottomotor	Bivalenter 2- Kreiskolbenmotor
	Hubraum [ccm]	5972 ^a	2300 ^c	2x654 (1.308) ^d
	P-Nenn Benzin [kW]	191 ^a	--	154 ^d
	Nennrehm. Benzin [Nm]	390 ^a	--	222 ^d
	P-Nenn H ₂ [kW]	k.A.	82 ^c	80 ^d
Nennrehm. H ₂ [Nm]	k.A.	k.A.	140 ^d	
Kraftstoff	Kraftstoff 1	LH ₂	CGH ₂ (350 bar) ^c	CGH ₂ (350 bar) ^d
	Inhalt [l] [kg]	7,8 kg ^a	2,75kg (119 Liter) ^c	110 Liter ^d
	Kraftstoff 2	Benzin	--	Benzin
	Inhalt [l]	74 ^a	--	61 ^d
Verbrauch	[Liter bzw. kg pro 100km]	13,9 l (Benzin) ^a 3,6 kg (H ₂) ^a	k.A.	k.A.
Reichweite	[km]	200 ^b (+500 mit Benzin) ^b	200 ^c	100 ^e (+549 mit Benzin) ^e
Höchstgeschw.	[km/h]	230 ^a	k.A.	170 ^d (im H ₂ -Betrieb)
Beschleunigung	0-100 km/h [sec]	9,5 ^a	k.A.	k.A.
Leergewicht	[kg]	2460 ^a	k.A.	1460 ^d
CO₂-Ausstoß	[g/km]	332 (Benzin), 5 (H ₂) ^a	k.A.	k.A.
Preis	[EUR]	k.A.	k.A.	2.800 EUR/Monat (Leasingpreis) ^d

Abbildung 27, Quellen: eigene Darstellung, ^a BMW 2006b, 71; ^b BMW 2006a; ^c H₂Mobility 2006b; ^d Mazda 2006b; ^e Spiegel-Online 2006b

Marktchancen

Die meisten Autobauer sind sich einig, dass Wasserstoff als postfossiler Kraftstoff langfristig eine tragende Rolle spielen wird. Die Diskussion dreht sich derzeit vor allem um die Frage, ob die Brennstoffzelle oder der Verbrennungsmotor der derzeit sinnvollere Wasserstoffwandler ist.

Die Vorteile der elektrochemischen Wandlung in Brennstoffzellen (vgl. auch Kap. 5.6) sind nicht von der Hand zu weisen: Keine NO_x-Emissionen, keine rotierenden Teile und damit kein Schmierbedarf, niedrige Prozesstemperaturen und vor allem das ausgezeichnete Teillastverhalten der Brennstoffzelle. Bis zur Serienreife der Brennstoffzelle und zum Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur kann der bivalente Wasserstoff-Motor als eine Kraftstoff-Brücke zur Brennstoffzelle angesehen werden.

Der innovationshemmende Charakter bivalenter Lösungen wurde bereits bei den Marktchancen in Kapitel 5.2. diskutiert und trifft auch auf für den bivalenten H₂-Verbrennungsmotor zu. Brückentechnologien haben die Eigenschaft, dass sie ein Bindeglied zwischen der Kon-

vention und der Alternative darstellen und zu einem schrittweisen Übergang zur Alternative führen können. Andererseits können diese Technologien aber auch die Markteinführung der Alternative verschleppen. Die Brückentechnologie kann nämlich sehr schnell auch zu einem »Schlupfloch« werden, um an der Konvention so lange es geht festzuhalten, obwohl ein frühzeitiger Umstieg auf die Alternative sinnvoller wäre. Diese Gefahr besteht auch bei bivalenten Wasserstoffmotoren: Einerseits stellt die Möglichkeit des Wasserstoffbetriebs eine Brücke zur radikalen Innovation Brennstoffzelle dar, andererseits hemmen die Fahrzeuge die Markteinführung der Brennstoffzelle, da sie auf dem Prinzip der Verbrennungsmotorik beharren.

BMW gilt als Hauptvertreter bivalenter Wasserstoff-Motorentechnik. Der bayerische Automobilkonzern plant für das Jahr 2008 eine erste Kleinserie von 100 wasserstoffbetriebenen Pkws aus der 7er Reihe vom Typ 760 Li in Kundenhand zu geben (Spiegel-Online 2006a). BMW konzentriert sich derzeit als einziger Automobilhersteller ausschließlich auf die Entwicklung des H₂-Ottos mit Flüssigwasserstoffspeicherung. Brennstoffzellen kommen auch bei BMW zum Einsatz, allerdings nicht als Antriebsaggregat, sondern als Batterieersatz zur Bordstromversorgung.

Ford präsentierte Ende 2001 mit dem P2000 H2ICE ein auf Druckwasserstoff basierendes Fahrzeug mit einem 2-l Ottomotor. Der in Abbildung 27 aufgeführte Ford Focus C-Max wurde im Sommer 2004 vorgestellt – allerdings vorerst nur als Versuchsfahrzeug (Geitmann 2004). Parallel zu diesen Entwicklungen arbeitet Ford auch am Brennstoffzellenantrieb. Die Geschäftsführung von Ford geht davon aus, dass Brennstoffzellen langfristig am besten für den Fahrzeugantrieb geeignet sind. Zunächst sei ein Wechsel des Kraftstoffs und erst anschließend ein Wechsel des Energiewandlers ratsam. Eine Kommerzialisierung von Brennstoffzellenfahrzeugen wird in der nächsten Dekade angestrebt (Geitmann 2006, 71). Die doppelgleisigen Entwicklungsaktivitäten bei Ford machen deutlich, dass der Hersteller den Wasserstoffmotor als logischen Zwischenschritt zur Brennstoffzellentechnologie ansieht und ihm damit einen eher mittelfristigen Übergangscharakter beimisst.

Auch der Wasserstoff-Wankel von Mazda feiert in Europa Premiere. Im August 2006 wurde er in Norwegen der Öffentlichkeit präsentiert und soll nun auch außerhalb Japans seine Straßentauglichkeit unter Beweis stellen. In Japan sind bereits seit März 2006 mehrere Exemplare als Firmenleasingfahrzeuge unterwegs (Auto-Reporter 2006).

5.4. Cluster 3: Hybrid-Antriebe (»Antriebs-Brücke«)

Clusterbeschreibung

Hybrid-Antriebe bilden den Cluster 3 der Innovations-Matrix. Die UNO definierte 2003 den Begriff »Hybridfahrzeug« wie folgt: „Ein Hybridfahrzeug bezeichnet ein Fahrzeug, in dem mindestens zwei Energieumwandler und zwei Energiespeichersysteme vorhanden sind, um das Fahrzeug anzutreiben“ (Toyota 2006a). Diese Definition ist sehr allgemein gehalten und lässt Raum für viele mögliche Hybridvarianten. Im Normalfall wird unter einem Hybriden ein Fahrzeug mit einem 4-Takt-Verbrennungsmotor und einem Elektromotor als Energieumwandler, sowie dem Kraftstofftank und der Batterie als Energiespeicher verstanden. Still-schweigend wird in der Hybrid-Diskussion meist dieser Normalfall angenommen.

Gemäß der UNO-Definition sind jedoch auch andere Hybridvarianten möglich. So können etwa als Energiewandler auch Stirlingmotoren oder Gasturbinen eingesetzt werden. Und Hochleistungskondensatoren oder Schwungräder stellen beispielsweise Alternativen zu Batterien dar. Auch batteriegepufferte Brennstoffzellenfahrzeuge können als Hybride angesehen werden. Die Batterie und der Wasserstofftank würden dabei als Energiespeicher fungieren und die Umwandler wären die Brennstoffzelle und der Elektromotor. Im Folgenden wird unter einem Hybrid-Antrieb der zuvor beschriebene Normalfall verstanden.

Hybrid-Antriebe zählen zu den semi-alternativen Antrieben, da sie sowohl über einen konventionellen Verbrennungsmotor als auch einen alternativen Elektromotor verfügen. In der Innovationsmatrix wird zwischen Mildhybriden ($a=5$) und Vollhybriden ($a=6$) unterschieden.

Ein Vollhybrid ist ein Fahrzeug, das über die Möglichkeit eines reinen Elektroantriebs verfügt. Hierfür ist ein ausgeklügeltes elektrisches Energiemanagement notwendig um die Batterie immer wieder nachladen zu können. Die für einen Vollhybrid charakteristischen Funktionalitäten zur elektrischen Antriebsunterstützung werden im Abschnitt Funktionsprinzipien näher erläutert. Mildhybride können hingegen nicht im reinen Elektrobetrieb fahren. Der Elektromotor arbeitet nur zur Unterstützung des Verbrennungsmotors und die Hybridisierung ist damit weniger ausgeprägt.

Die Einteilung der Hybride ist nicht strikt festgelegt und die Übergänge von Mild- zu Vollhybriden sind fließend. In der Innovations-Matrix sind die Vollhybride auf der Antriebsachse bewusst unter den milden Hybriden angeordnet. Dadurch soll zum Ausdruck kommen, dass die Vollhybride als »innovativer« einzustufen sind, da die elektrische Antriebsmotorik vergleichsweise ausgeprägter ist als bei den milden Hybriden.

Kraftstoffseitig verfügen Hybride über einen Tank für den Treibstoff des Verbrennungsmotors und eine Batterie zur Speicherung der elektrischen Energie für den Elektromotor. Mit den entsprechenden Anpassungen des Tank- und Antriebssystems an die spezifischen Eigenschaften des jeweiligen Kraftstoffes kann der Verbrennungsmotor in allen Hybriden prinzipiell mit allen technologisch möglichen Kraftstoffen betrieben werden ($k=1$ bis 12, 14 und 15). Damit umfasst der Cluster 3 die folgende Fahrzeug-Konfigurationen:

- Die Konfigurationen $F_{5/k}$ mit $k=1-12, 14$ und 15 stellen die Mildhybride dar.
- Die Konfigurationen $F_{6/k}$ mit $k=1-12, 14$ und 15 repräsentieren die Vollhybride.

Aus ökonomischer Sicht ist die Markteinführung von Hybriden mit alternativen Kraftstoffen sehr aufwendig, denn neben den Mehrkosten für die Hybridisierung kommen noch Kosten für eine eventuelle Kraftstoffanpassung hinzu. Aus diesem Grund haben es auch Diesel-Hybride schwer. Der Dieselmotor ist in der Anschaffung teurer als der Ottomotor. Daher verwundert es auch nicht, dass die derzeit auf dem Markt erhältlichen Fahrzeuge Otto-Hybride sind. Führend in der Hybridantriebstechnik sind die beiden japanischen Autobauer Toyota und Honda. Mit dem Toyota Prius und dem Honda Civic bieten die Japaner jeweils Hybride mit Ottomotoren an. Die Mehrkosten für die Hybridisierung liegen je nach Antriebsdimensionierung bei mehreren tausend EUR. So ist zum Beispiel ist der Honda Civic in der Hybridausführung 2.000 EUR teurer als die ottomotorische Variante (FAZ 2006).

Hybride mit Dieselmotoren befinden sich noch nicht auf dem Markt, denn zum Mehrpreis für den Elektroantrieb würde sich noch der im Vergleich zum Ottomotor höhere Preis für Die-

selmotoren hinzu addieren. Insgesamt sind daher Dieselhybride im Pkw-Bereich noch zu teuer. Bei Lieferfahrzeugen und Citybussen sieht jedoch die Lage anders aus, hier amortisiert sich der Dieselhybrid aufgrund hoher Fahrleistungen im Stadtverkehr schneller. Toyota setzt in diesem Fahrzeugsegment bereits Dieselhybride ein (VDI 2004). DaimlerChrysler entwickelt auch im Pkw-Bereich Diesel-Hybride. Für den Antrieb in der Mercedes Benz S-Klasse wurde beispielsweise ein 8-Zylinder-CDI-Dieselmotor mit zwei Elektromotoren kombiniert (Stan 2005, 269). Näheres zu dieser Entwicklung ist im Abschnitt Beispielmodelle zu finden.

Für den Einsatz alternativer Kraftstoffe sind je nach Kraftstoff mehr oder weniger große Anpassungen im Tanksystem und/oder am Verbrennungsmotor notwendig. Diese Anpassungen führen zu Mehrkosten, welche die Markteinführung von jeglichen Fahrzeugen mit alternativen Kraftstoffen hemmen, dies insbesondere bei den ohnehin schon teureren Hybridfahrzeugen. Daher wird die Verwendung alternativer Kraftstoffe vornehmlich beim konventionellen, nicht-hybridisierten 4-Takter erprobt. Der Einsatz alternativer Kraftstoffe in Hybriden befindet sich deshalb derzeit eher im Inventionsstadium. Dies hat jedoch keine technischen, sondern ausschließlich ökonomische Gründe. Prinzipiell ist der Einsatz aller in der Innovationsmatrix genannten Kraftstoffe im normalen 4-Takt Hubkolbenmotor möglich. Damit ist die Umstellung eines Hybriden auf alternative Kraftstoffe technologisch gesehen nur ein kleiner Schritt, sozusagen eine nachfolgende Mini-Innovation.

Ein weiterer Grund, warum die Verwendung alternativer Kraftstoffe im Hybridauto schwieriger ist als im Nicht-Hybriden, sind die Probleme bei der Realisierung bivalenter Kraftstofflösungen. Bei dem ohnehin schon mit zwei Antrieben dicht gepackten Hybriden ist wenig Platz für ein zweites Betankungssystem. Aufgrund der zunehmenden Bedeutung von Erdgas als Treibstoff hat allerdings Toyota trotz dieser Schwierigkeiten den Prototypen eines bivalenten Erdgas-Hybriden mit Druckgasspeicherung ($k=4$) entwickelt. Der Richtpreis für dieses Modell liegt bei ca. 28.000 EUR (eMobile 2006a) und ist damit rund 4.000 EUR teurer als der normale Prius mit Hybrid.

Ausgehend von den bisherigen Überlegungen werden deshalb zunächst die Diesel-Hybride, mit den Fahrzeug-Konfigurationen $F_{5/1}$ und $F_{6/1}$, die Otto-Hybride mit den Konfigurationen $F_{5/2}$ und $F_{6/2}$ sowie die Erdgas-Hybride mit Druckspeicher mit den Konfigurationen $F_{5/5}$ und $F_{6/5}$ als Innovationen betrachtet. Aufgrund der problemlosen Verwendung von Biodiesel im Diesel-Hybrid stellen ferner die Konfigurationen $F_{5/8}$ und $F_{6/8}$ ebenfalls eine Innovation dar. SynFuels sind per se problemlos und ohne jegliche Umbaumaßnahmen im Otto-Hybriden einsetzbar. Daher handelt es sich bei den entsprechenden Konfigurationen $F_{4/6}$ und $F_{4/7}$ für GTL sowie $F_{5/6}$ und $F_{5/7}$ für BTL auch um Innovationen. Allerdings werden aufgrund ihrer hohen Herstellungskosten synthetische Kraftstoffe sicherlich zuerst in Nicht-Hybrid-Fahrzeugen Einsatz finden.

Der Betrieb des Verbrennungsmotors mit Alkoholen ($k=10$ und 11) gestaltet sich gegenüber den bisher diskutierten Kraftstoffvarianten schon etwas komplizierter und erfordert bestimmte Umbaumaßnahmen am Kraftstoffsystem. Deshalb befindet sich der Alkohol-Einsatz in Hybriden eher im Inventionsstadium. Eine Ausnahme bilden Ethanol-Beimischungen, denn diese können im Bereich von 5 bis 10% Ethanolanteil (z.B. E10) in konventionellen Kfz-Motoren ohne Umstellung oder Einschränkung eingesetzt werden. Dies wird derzeit bereits

in einigen amerikanischen Bundesstaaten praktiziert. (ReFuelNet 2006). Höhere Beimischungen erfordern jedoch größere Umrüstmaßnahmen.

Eine Besonderheit stellt die Fahrzeug-Konfiguration $F_{6/13}$ dar. Sie repräsentiert die so genannten Plug-In-Hybride, im englischen als Plug-In Hybrid Vehicles, kurz PHEV, bezeichnet. Während beim »normalen« Hybrid die Batterie über Energierückgewinnung und über den vom Verbrennungsmotor betriebenen Generator geladen wird, kann eine Zusatzbatterie im Plug-In-Hybrid auch direkt mit Netzstrom aufgeladen werden. Etwas salopp formuliert kann der Plug-In-Hybrid also Strom »tanken«.

Der Einsatz aller anderen bisher nicht diskutierten Kraftstoffe stellt derzeit noch einen Inventionsraum dar. Sobald sich jedoch die Kostenverhältnisse zugunsten des Hybrid verschieben, kann sich dies allerdings schnell ändern, so etwa durch sinkende Produktionskosten für Hybrid-Fahrzeuge bei weiter steigenden Benzinpreisen.

Funktionsprinzip

Wie schon häufig kommt die Idee Elektro- –und Verbrennungsmotorik zu kombinieren aus Deutschland. Bereits 1902 konstruierte der Autopionier Ferdinand Porsche in der Nähe von Stuttgart ein Gefährt, das sowohl über einen Ottomotor als auch über einen Elektroantrieb verfügte (SWR 2007). Sein Auto kann im weiteren Sinne als das erste Hybridfahrzeug der Welt angesehen werden. Seit dem Beginn der 70er Jahre des 20. Jahrhunderts ist der Hybridantrieb Gegenstand vielfältiger Forschungsarbeiten. In Deutschland wurden verschiedene Prototypen am Institut für Kraftfahrtwesen in Aachen entwickelt (IKA 2004). Der auf dem Audi A4 Avant basierende Audi Duo war das erste in Europa serienmäßig angebotene Hybridfahrzeug, welches ab 1997 zu einem Preis von 60.000 DM verkauft wurde. Aufgrund der geringen Nachfrage wurde die Produktion allerdings 1998 gestoppt (Hybrid-Autos 1997). Abgesehen von den Audi-Aktivitäten blieben die Hybridentwicklungen der deutschen Autobauer im Prototypenstadium stecken und die konsequente Entwicklung der Hybridtechnologie bis zur Marktreife wurde versäumt. Der Schwerpunkt der deutschen Automobilhersteller lag vor allem auf der Optimierung des Dieselmotors.

In Japan und den USA sieht die Lage anders aus, dort erfreuen sich Hybridantriebe großer Beliebtheit. Mit dem Toyota Prius und dem Honda CIVIC haben die japanischen Autohersteller das Hybridauto bis zur Serienreife entwickelt, während die Europäer noch immer in der Entwicklung stecken.

Viel Hohn und Spott schlug Toyota in Fachkreisen entgegen, als die Japaner 1997 mit dem Prius das erste Hybridauto der Welt in Serie auf den Markt brachten. VW-Chef Pietschesrieder nannte Hybridautos „eine einzige Katastrophe“ und der frühere Opel-Motorenentwickler Fritz Indra sprach von „einer Vergewaltigung der Physik“ (Handelsblatt 2006). Die Europäer konzentrierten sich lieber mit viel Geld und Know-how auf die Optimierung des Dieselmotors. (ebenda). Hybridfeindliche Aussagen deutscher Automobil-Manager sind heute nicht mehr zu hören. Die technische und ökonomische Machbarkeit von Hybrid-Fahrzeugen sowie deren ökologische Vorteile im Stadtverkehr sind weitgehend unbestritten. Die Japaner führen mit den beiden Hybriden Prius von Toyota und CIVIC von Honda die TOP10 der VCD Auto-Umweltliste 2006 an (VCD 2006). Angesichts dieses Siegeszuges der Hybrid-Technologie versuchen nun die Deutschen Autobauer aufzuholen und entwickeln in ver-

schiedenen strategischen Allianzen ebenfalls Hybridantriebe. Im Abschnitt Beispielmotive dieses Kapitels werden die marktverfügbaren Fahrzeuge aus Japan sowie die europäischen Entwicklungen im Detail vorgestellt.

Allerdings gibt es auch hybridfeindliche Stimmen, die die ökologische Vorteilhaftigkeit der Fahrzeuge in Frage stellen. An der TU-Darmstadt wurde durch die Professoren Indra und Hohenberg eine wissenschaftliche Studie mit dem Lexus RX 400 durchgeführt (VDI 2006b, 15). Ergebnis dieser Studie ist, dass beim Lexus durch die Energierückgewinnung in der Betriebsphase nur rund 4% Kraftstoff eingespart werden können. Indra hatte bereits Untersuchungen am Toyota Prius durchgeführt und festgestellt, dass dessen hervorragenden Verbrauchswerte nicht alleine durch die Hybridisierung zu erklären sind, sondern vor allem auf die extrem geringe Reibung im Antriebsstrang und den geringen Luftwiderstand des Fahrzeugs. Dies gilt auch für den Lexus RX 400h, der bei Ausrollversuchen im Vergleich zu anderen Fahrzeugen konkurrenzlos gute Werte erzielte.

Die choice mobilitätsproviding GmbH (Choice 2002) führte zwischen dem 1. Mai und dem 30. September 2002 einen Feldversuch mit zehn Toyota PRIUS bei der Berliner Autovermietung »Stattauto CarSharing« durch. In dem Zeitraum wurde ein PRIUS 684 mal gemietet und eine Nutzerbefragung durchgeführt. Die Befragung kommt zu dem Ergebnis, dass der PRIUS ein Auto für die Stadt ist. Hier kann er seine Trumpfkarten Ruhe, Komfort und niedriger Verbrauch durch innovative Technik ausspielen. Hingegen ist er kein Auto für deutsche Autobahnen, da sein Komfort bei hohen Geschwindigkeiten spürbar nachlässt. (Choice 2002, 3).

Die Frage, ob nun ein Hybrid oder ein modernes Dieselfahrzeug ökologischer ist, lässt sich nicht pauschal beantworten. Zur Beurteilung ist vor allem die Fahrzeugnutzung entscheidend. Im Stadtverkehr bis 60 km/h hat der Hybrid sicherlich Verbrauchsvorteile und die Effizienz des Elektroantriebs bei Teillast kommt zum Tragen. Auf der Autobahn bei Volllast und Geschwindigkeiten von über 130 km/h arbeitet ein Dieselmotor optimal. Letztendlich weiß der Käufer am besten, wie er das Auto nutzen will und muss sich für die zu seinem Fahrverhalten passende Technologie entscheiden. Zur Entscheidungsfindung sind objektive und herstellerunabhängige Aussagen entscheidend.

Um die innovative Spezifik eines Hybriden zu verstehen, ist es notwendig, die unterschiedlichen Ausführungen eines Hybrid-Antriebes und deren Funktionsprinzipien zu kennen. Die folgende Abbildung 28 stellt zunächst eine Übersicht über die verschiedenen Ausführungsvarianten von Hybridfahrzeugen dar, die im Anschluss näher betrachtet werden.

Ausführungsvarianten von Hybridfahrzeugen

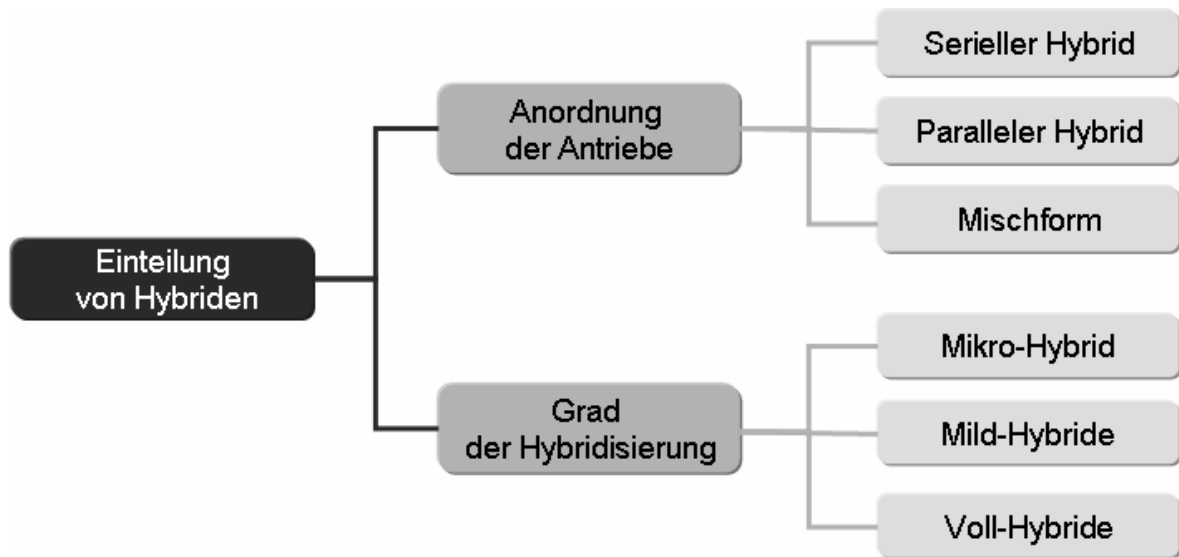


Abbildung 28, eigene Darstellung

Anordnung der Antriebe

Hybride können entweder nach der Anordnung der beiden Antriebssysteme oder nach dem Grad der Hybridisierung klassifiziert werden. Auch eine Kombination beider Klassifikationen ist möglich. Dies bedeutet beispielsweise, dass ein paralleler Hybrid als Mildhybrid oder auch als Vollhybrid ausgeführt werden kann.

Wie Abbildung 28 zeigt, gibt es drei Möglichkeiten der Antriebsanordnung. Je nach Schaltung der beiden Antriebe wird zwischen parallelen, seriellen und leistungsverzweigenden Hybriden unterschieden. Letztere sind Mischformen der beiden Grundkonzepte, die in der folgenden Abbildung 29 schematisch dargestellt sind.

Grundkonzepte zur Anordnung der Antriebe in einem Hybriden

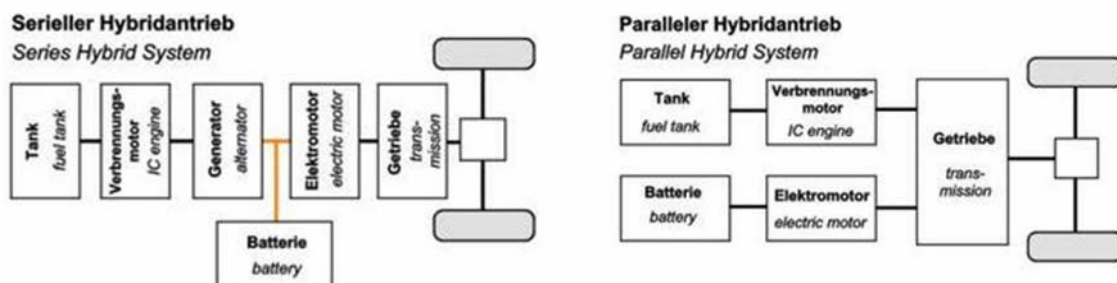


Abbildung 29, Quelle: Bady, 2000

Kennzeichnend für die seriellen Hybridantriebe ist die Reihenschaltung der Energiewandler ohne mechanische Anbindung des Verbrennungsmotors an die Antriebsräder. Der Verbrennungsmotor treibt hierbei einen Generator an, der seinerseits den elektrischen Fahrentrieb sowie einen im elektrischen Zwischenkreis angeordneten Speicher, in der Regel eine Batte-

rie, mit Energie versorgt. Dabei wird sämtliche mechanische Leistung des Verbrennungsmotors in elektrische Leistung umgewandelt. Ein wesentlicher Vorteil des seriellen Konzepts besteht darin, dass der Verbrennungsmotor ständig und drehzahlunabhängig im Bereich optimaler Wirkungsgrade arbeiten kann. Auch wenn wenig Antriebsleistung benötigt wird, wie zum Beispiel in Stillstandszeiten oder im Stadtverkehr, kann der Verbrennungsmotor durchlaufen und in diesen Zeiten die Batterie aufladen. Da nur der Elektromotor als Antrieb arbeiten kann das Fahrgetriebe beim seriellen Hybriden entfallen und damit Platz und Gewicht eingespart werden. Der Nachteil dieses Konzepts besteht in der mehrmaligen Wandlung der Energie, die den Gesamtwirkungsgrad mindert. Außerdem bedingt die Reihenschaltung, dass der Verbrennungsmotor und die Elektromaschine auf die gesamte Fahrzeugleistung ausgelegt werden, was zu einem größeren Platzbedarf gegenüber einer parallelen Anordnung führt.

Beim parallelen Hybrid sind Verbrennungsmotor und Elektromotor mechanisch mit den Antriebsrädern gekoppelt. Die beiden Antriebssysteme können sowohl einzeln als auch gleichzeitig zum Vortrieb des Fahrzeugs genutzt werden. Aufgrund der Leistungsaddition können beide Motoren daher relativ klein ausgelegt werden, ohne dass Einbußen beim Beschleunigen oder an Steigungen vorhanden sind. Üblicherweise wird der elektrische Antriebszweig für den Stadtverkehr ausgelegt, während der leistungsstärkere Verbrennungsmotor für Überlandverkehr und auf Autobahnen genutzt wird. Zur Addition der Leistungen der Motoren und Übertragung auf die Antriebsachse werden die Momenten-, Zugkraft- und Drehzahladdition unterschieden.

Die Grundherausforderung beim Bau von Hybridfahrzeugen ist eine doppelte: Einerseits sollte die mechanische Energie des Verbrennungsmotors möglichst ohne Umwege direkt auf die Antriebsachse gelenkt werden, was für den Einsatz eines Parallel-Hybriden spricht. Gleichzeitig sollte aber auch der Verbrennungsmotor im Bereich optimaler Wirkungsgrade betrieben werden, was vor allem durch eine serielle Antriebsschaltung erreicht wird.

Um möglichst beide Optimierungsziele zu erreichen, wird nun in Mischformen versucht, diese sich zunächst ausschließenden Eigenschaften über Kupplungsmechanismen miteinander in Einklang zu bringen. Die folgende Abbildung 30 verdeutlicht exemplarisch am Beispiel des Toyota Prius dieses Mischform-Prinzip. Hier kommt ein Planetengetriebe als Kraftweiche zum Einsatz, welche einen Teil der Energie des Benzinmotors direkt auf die Antriebsachse weiterleitet und gleichzeitig über einen Generator die Batterie laden kann.

Toyota Prius als Beispiel für ein seriell-paralleles Antriebssystem

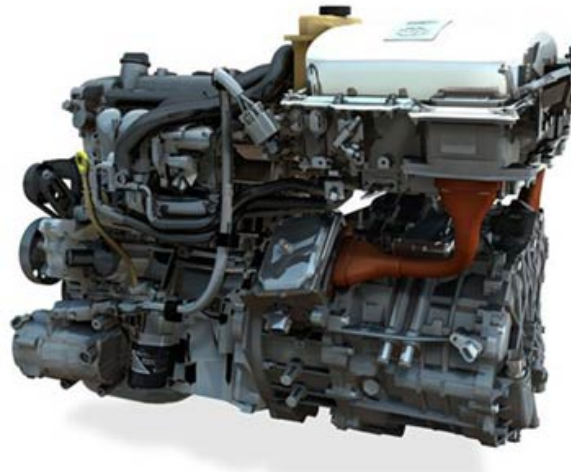
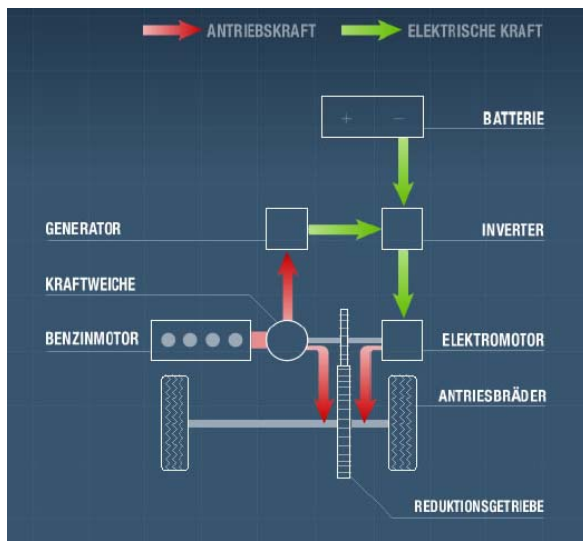


Abbildung 30, Quelle: Toyota 2006b (links), Michelin 2006 (rechts)

Der Wirkungsgrad solcher Mischformen ist wegen der teilweise direkten mechanischen Leistungsübertragung höher als bei rein seriellen Hybriden. Dem höheren Wirkungsgrad und dem auf Grund des stufenlosen Getriebes größeren Fahrkomfort stehen ein erhöhter konstruktiver Aufwand und eine kompliziertere Betriebsstrategie gegenüber.

Generell gilt für alle Hybridvarianten: Der hohe Wirkungsgrad und das Drehmoment des Elektromotors kommen bei Teillast zum Tragen. Wenn es um Geschwindigkeit geht, arbeitet der Verbrennungsmotor effizienter und der Elektromotor muss mittransportiert werden.

Es sei noch erwähnt, dass in Hybrid-Fahrzeugen auch mehrere Elektromotoren eingesetzt werden können, beispielsweise zwei Elektromotoren auf der Antriebsachse oder auch vier Radnabenmotoren.

Grad der Hybridisierung

Der Grad der Hybridisierung stellt die zweite Möglichkeit zur Klassifizierung von Hybriden dar. Er ist ein wichtiges Maß für die Innovativität des Hybrid-Antriebes. In Anlehnung an Stan (Stan 2005, 271) kann der Grad der Hybridisierung über die Hybridization, kurz Hr, quantifiziert werden. Sie stellt die elektrische Antriebsleistung des Elektromotors im Verhältnis zur gesamten Antriebsleistung des Hybriden dar.

$$Hr = \frac{\text{Elektrische Leistung E - Motor}}{\text{Elektrische Leistung E - Motor} + \text{thermische Leistung V - Motor}}$$

Je nach der Größe der Hybridization wird zwischen Voll-, Milden- und Mikrohybriden unterschieden. Die Übergänge, ab welchem Hybridisierungsgrad ein Fahrzeug welcher Hybrid-Kategorie zuzuordnen ist, sind fließend. Daher gibt es keine normativen Werte. Die in der folgenden Abbildung 31 aufgeführten elektrischen Leistungsangaben ergeben sich aus den Hybridisierungsgraden und beziehen sich auf ein Mittelklasse-Fahrzeug mit einem Verbrennungsmotor von 60 kW Leistung

Mitentscheidend für die Kategorisierung der Hybride sind auch die möglichen Funktionalitäten des Hybridfahrzeugs. Natürlich sind bestimmte Funktionen, wie beispielsweise der reine Elektroantrieb in einem Vollhybriden auch nur ab einem bestimmten Hybridisierungsgrad zu erreichen.

Einteilung von Hybriden nach den Funktionen und der elektrischen Antriebsdimensionierung

	Voll- hybrid	Mild- hybrid	Mikro- hybrid
Funktionen			
Starten/Ausschalten	X	X	X
Energierückgewinnung (Rekuperatoren)	X	X	
elektrische Antriebs-Verstärkung (Boosten)	X	X	
reiner Elektroantrieb	X		
Dimensionierung			
Leistung Elektromotor	> 20 kW	3-20 kW	<3 KW
Hybridisierungsgrad (Basis: 60 kW 4-Takter)	> 25%	5-25%	< 5%

Abbildung 31, Quelle: eigene Darstellung; Elektroauto-Tipp 2006a

Mikro Hybride verfügen über eine Start-Stopp-Automatik, die dafür sorgt, dass der Verbrennungsmotor bei einem Halt an der Ampel, im Stau oder im Leerlauf die Arbeit einstellt und beim Betätigen des Gaspedals automatisch wieder anspringt. Diese denkbar einfachste Hybridvariante wird beispielsweise im Citroen C3 eingesetzt. Citroen verspricht 10% Kraftstoffeinsparung bei einem Mehrpreis von 400 EUR (Autobild 2005). Entwickelt und angeboten wird die Start-Stopp-Automatik vom Automobilzulieferer Valeo. Im Frühjahr 2007 soll auch in der 3er-Baureihe und im Geländewagen X5 von BMW ein Mikro-Hybrid zum Einsatz kommen (Handelsblatt 2006, 4).

Eine Stufe über der Mikro-Lösung rangieren die so genannten Mildhybride. Der Verbrennungsmotor wird hier beim Beschleunigen von einem kleinen Elektromotor unterstützt. Über einen Generator wird zudem die eingesetzte Bremsenergie zurück gewonnen und in einer leistungsfähigen Batterie gespeichert – um sie beispielsweise später für eine kurze Beschleunigung (Boost) zu nutzen. Der bereits seit 1998 am Markt verfügbare Honda Civic ist zu den milden Hybriden zu zählen. Der Verbrennungsmotor wird durch einen 15 kW starken Elektromotor unterstützt.

Charakteristisch für einen Vollhybriden ist die Möglichkeit des reinen Elektroantriebs. Die Toyota-Marken Prius und Lexus zählen beide zu den Vollhybriden. Allerdings sind die Reichweiten im reinen Elektrobetrieb sehr begrenzt. Mit Nickelmetallhydrid-Batterien, wie sie aktuell im Toyota Prius oder im Lexus GS eingesetzt werden, reicht die gespeicherte Energie für eine Strecke von maximal zwei Kilometern bei 50 km/h aus (Handelsblatt 2006, 4). Daher muss die Batterie stetig über die Rekuperationsmöglichkeiten nachgeladen werden.

Auch die Plug-In-Hybride sind zu den Vollhybriden zu zählen, da mit Ihnen ein reiner Elektrobetrieb möglich ist. Toyota beispielsweise entwickelt einen Batterie-Bausatz, um den Prius zu einem Plug-In Prius aufzurüsten. Zwei Modelle sind vorgesehen: Der Prius-15 und der Prius-30 (HybridsPlus 2006a, HybridsPlus 2006b). Die Zahlen bei den Modellnamen geben dabei die Reichweite im Elektrobetrieb in Meilen an. Die Plug-In-Varianten haben durch eine zweite Batterie ein Mehrgewicht von 21 kg für den Prius-15 bzw. 81 kg für den Prius-30. Dabei handelt es sich um moderne Li-Ionen-Batterien, welche eine Energie von 4,5 kWh (Prius-15) bzw. 9 kWh (Prius-30) speichern können. Ab Mitte 2007 soll der Plug-In-Bausatz zur Aufrüstung der bisherigen Modelle zur Verfügung stehen (HybridsPlus 2006c).

Innovationsmuster

In der folgenden Abbildung 32 ist der für Hybride relevante Ausschnitt aus der Innovations-Matrix dargestellt.

Cluster 3 der Innovations-Matrix

Kraftstoff (k) Antrieb (a)		CO ₂ -emittierende Kraftstoffe						CO ₂ -neutrale Kraftstoffe					C-freie Kraftstoffe		
		Konventionell		Nicht-konventionell				Semi-alternativ			Alternativ				
		Kohlenwasserstoffe				SynFuels		Ole	Alkohole		Gase	Strom (13)	Wasserstoff		
		Diesel (1)	Benzin (2)	Autogas LPG (3)	Erdgas LNG (4)	Erdgas CNG (5)	GTL (6)	BTL (7)	Bio- Diesel (RME) (8)	Pflanzen- öle (9)	Bio- Ethanol (10)		Bio- Metha- nol (11)	Biogas (12)	Wasser- stoff LH ₂ (14)
Hybrid-Antriebe Semi-alternativ	Milde Hybride mit Batterie (one-mode) (5)	ther- misch		/	/				/	/	/	/	X	/	/
	Vollhybride mit Batterie (two-mode) (6)	elek- trisch	1			2			3				X	4	
		ther- misch		/	/				/	/	/	/	X	/	/
		elek- trisch		/	/				/	/	/	/		/	/

Abbildung 32, Quelle: eigene Darstellung

Cluster 3 zerfällt in die Innovationsbereiche 1 bis 4. Jedes Innovations-Feld ist »polyinnovativ«, was bedeutet, dass mehrere Innovationstypen einer Fahrzeug-Konfiguration zuzuordnen sind. Dies kann auch nicht verwundern, denn schließlich finden sich im Hybriden sowohl thermische als auch elektrische Antriebstechnik wieder. Entsprechend sind auch die beiden zum Hybrid-Cluster gehörigen Zeilen aufgeteilt: Der obere, mit »thermisch« gekennzeichnete Zeilenanteil, spiegelt den Hubkolbenmotor als die konventionelle Seite des Hybriden wider. Die untere, mit »elektrisch« gekennzeichnete Zeilenhälfte, stellt mit dem batteriebetriebenen Elektromotor die alternative Seite des Antriebs dar.

Da die Innovativität des Elektromotors ausschließlich von der Qualität des Stroms abhängt, ist diese über alle vier Innovationsbereiche unverändert. In der elektrischen Zeilenhälfte der Hybridantriebe liegen damit entweder radikale Innovationen 1. Grades oder 2. Grades vor, je nachdem, ob fossile oder regenerative Primärenergieträger zur Stromerzeugung eingesetzt wurden. Die Fahrzeug-Konfiguration $F_{6/13}$ im Bereich 4 stellt die Plug-In-Hybride dar. Da die Fahrzeuge Strom direkt »tanken« können, sind sie dem »Kraftstoff« Strom (k=13) zugeordnet. Das »X« in dem thermischen Feldanteil der Plug-In-Hybrid-

Konfigurationen bedeutet, dass dieser »getankte« Strom nicht den Verbrennungsmotor antreiben kann.

Anders jedoch bei der thermischen Antriebskomponente. Dort ist die Innovativität von der Wahl des Kraftstoffs abhängig und in jedem Innovationsbereich verschieden. Analog zu den Überlegungen beim den Verbrennungsmotoren in Kapitel 5.2 liegen in den vier Innovationsbereichen für den thermischen Antriebsanteil des Hybriden folgende Innovations-Typen vor:

- Bereich 1: Stagnationen. Hier liegt die Innovativität ausschließlich in der Hybridisierung
- Bereich 2: Inkrementale Kraftstoff-Innovationen 1. Grades
- Bereich 3: Inkrementale Kraftstoff-Innovationen 2. Grades
- Bereich 4: Inkrementale Kraftstoff-Innovationen 1. und 2. Grades.




Im Unterschied zum nicht-hybridisierten Verbrennungsmotor ($a=1$) gibt es in den Bereichen 2 bis 4 im Hybrid-Cluster mehrere Inventionsräume. In der Clusterbeschreibung wurde bereits auf die ökonomischen Schwierigkeiten beim Einsatz alternativer Kraftstoffe in Hybridsystemen hingewiesen.

Beispielmodelle

Der Abschnitt stellt die wichtigsten am Markt verfügbaren Hybrid-Fahrzeuge und deren technische Charakteristika vor. Ergänzend dazu werden anschließend die Entwicklungsaktivitäten von DaimlerChrysler und VW als Vertreter der beiden großen Entwicklungsallianzen dargestellt. Die folgende Abbildung 33 zeigt zunächst die drei am Markt verfügbaren Hybridmodelle. Dies sind:

- Der Honda Civic als Vertreter für einen Mildhybriden und ein Repräsentant für die Fahrzeug-Konfiguration $F_{5/2}$.
- Der Toyota Prius, der einen Vollhybriden aus der Mittelklasse darstellt. Der Prius ist der Fahrzeug-Konfiguration $F_{6/2}$ zuzuordnen.
- Der Lexus HS 450h, die Nobelmarke von Toyota, ist ein Vollhybrid und gehört, wie der Prius, zum Feld $F_{6/2}$.

Beispielmodelle zu Cluster 3

Kennwerte	Honda	Toyota	Lexus	
				
Modell	Civic 1,3 i-DSI Hybrid	Prius	GS 450h	
Fahrzeug-Konfiguration	F 5/2	F 6/2	F 6/2	
Hybrid-Klassifikation	Mildhybrid	Vollhybrid	Vollhybrid	
Daten Verbrennungsmotor	Typ	4 Zyl. Ottomotor	4 Zyl. Ottomotor	6 Zyl. Ottomotor
	Hubraum [ccm]	1339	1497	3456
	Nennleistung [kW]	70	57	218
	Nenn Drehm. [Nm]	123 (bei 4.600 U/min)	115 (bei 4000 U/min)	368 (bei 4.800 U/min)
Daten Elektromotor	Typ	Bürstenloser Gleichstrommotor	Synchroner Wechselstrommotor	Synchroner Wechselstrommotor
	Nennleistung [kW]	15	50	147
	Max. Drehm. [Nm]	103 (bei 1.160 U/min)	400 (bis 1200 U/min)	275 (bis 3.840 U/min)
Batterie	Typ	Ni-MH	Ni-MH	Ni-MH
Verbrauch Benzin	[Liter/100km]	4,6	4,3	7,9
Reichweite	[km]	1090	1050	820
Tankinhalt	[Liter]	50	45	65
Höchstgeschwindigkeit.	[km/h]	185	170	250
Beschleunigung	0-100 km/h [sec]	12,1	10,9	5,9
Leergewicht	[kg]	1368	1400	1940
CO₂-Ausstoß	[g/km]	109	104	186
Preis	[EUR]	22.190*	24.070*	59.890*

* Daten umgerechnet von SFR nach EUR (Kurs: 0.618 am 2.1.07, Werte gerundet)

Abbildung 33, Quellen: eigene Darstellung; e-Mobile 2006b; e-Mobile 2006c; e-Mobile 2006d

Angesichts der Erfolge bei der Markteinführung der japanischen Hybridfahrzeuge ist den Europäern der anfängliche Spott längst vergangen. Fast kein Automobilhersteller in Europa hat sich derzeit nicht dieser Antriebstechnologie angenommen. Um den Japanern Paroli bieten zu können, sind verschiedene Entwicklungsallianzen entstanden.

DaimlerChrysler, GM und seit kurzem auch BMW entwickeln gemeinsam an einem Vollhybriden mit einem so genannten »two-mode-System«. Der technische Grundgedanke dieses Systems besteht in der eindeutigen Trennung der Antriebsvarianten: Elektroantrieb über zwei Elektromotoren im Stadtverkehr, Antrieb über den Verbrennungsmotor bei Überlandfahrten und die Addition beider Antriebe für Höchstleistungen, zum Beispiel bei Überholvorgängen. Alle drei Unternehmen der Hybrid-Allianz greifen auf die technologische Basis des »two-mode-Hybridantriebes« zurück um diesen dann den jeweiligen markenspezifischen Anforderungen anzupassen (DaimlerChrysler 2005). Die Umsetzung bei DaimlerChrysler erfolgt beispielsweise in der S-Klasse. Basierend auf dem Two-mode-System präsentierte DC Anfang 2005 eine mild-hybridisierte S-Klasse. Der Hybrid verfügt über einen 8-Zylinder CDI-Dieselmotor mit 241 kW Leistung und zwei Elektromotoren mit zusammen 50 kW Leistung. Der Spritverbrauch beläuft sich auf knapp 7 Liter (Energieportal24 2005). Das Fahrzeug verfügt über die Features eines vollen Hybriden, auch wenn der Hybridisierungsgrad im

Bereich eines milden Hybriden liegt. Die S-Klasse, als Luxusklasse bei Daimler, bietet den Vorteil, dass die Mehrkosten für die Hybridausführung weniger ins Gewicht fallen als bei Fahrzeugen der Kompaktklasse.

Ein zweites Konsortium, bestehend aus Volkswagen, Audi und Porsche, arbeitet gemeinsam an einem Einstieg in die Hybridtechnologie über das Marktsegment der Geländewagen. VW arbeitet an einer Hybridisierung des Touareg, Audi am Q7 und Porsche am Cayenne. Die Allianz setzte dabei auf eine neue Batteriegeneration von Lithium-Ionen-Zellen von Sanyo, anstatt der bisher in Hybriden verwendeten Nickelmetallhydrid-Batterien. (Handelsblatt 2006, 5)

Neben der Gemeinschaftsentwicklung mit Audi und Porsche entwickelt VW zusammen mit der Volkswagen Group China und der Universität in Shanghai einen Touran mit Hybridantrieb. Angetrieben wird das Fahrzeug über einen 110 kW Benziner und einen 20 kW starken Elektromotor. VW will den Kompaktvan bei den Olympischen Spielen 2008 in Peking präsentieren und auf dem chinesischen Markt einführen. Für die USA plant der Wolfsburger Konzern den VW Jetta bis 2008 auf den Markt zu bringen. Welche Pläne VW in Europa hat, ist offen. (Spiegel-Online 2005).

Marktchancen

Während in Europa in den letzten Jahren durch Turboaufladung, Hochdruck-Direkteinspritzung und andere Technologien stetig an der Optimierung des sparsamen Diesel-Motors gearbeitet wurde, hat Diesel in den USA und Japan vor allem aufgrund der Partikelemissionen ein negatives Image, was mit dazu führt, dass dort die Hybridfahrzeuge besonders beliebt sind. Treibend in diesen Ländern ist vor allem die Möglichkeit des emissionsfreien Elektrobetriebs der Hybride in den Metropolen.

Mit Honda und Toyota sind die japanischen Autobauer weltweit führend in der Hybrid-Entwicklung. Der Toyota-Prius wurde zum Erfolg und verkaufte sich weltweit bereits 600.000 Mal, davon allein 200.000 Fahrzeuge im Jahre 2005. Für 2006 sind weitere 350.000 Wagen fest eingeplant. (Handelsblatt 2006, 2). Toyotas Vorstandschef Katsuaki Watanabe will bis 2010 die Zahl der Hybridmodelle auf 14 erhöhen und über eine Million Fahrzeuge absetzen (ebenda, 6). Mit der Toyota-Edelmarke „Lexus“ fand die Hybridtechnologie auch Einsatz in leistungsstarken Fahrzeugen. Wiederum aus Japan kommt das am zweithäufigsten verkaufte Hybridfahrzeug, der Honda Civic IMA. Er erreichte im Mai 2005 die Zahl von 100.000 verkauften Einheiten (Honda 2005).

Die Akteure der europäischen Hybrid-Allianzen prognostizieren ihre Hybridmodelle bis 2010 marktreif anbieten zu können. Bis dahin läuft die Produktion im Asiatisch-Pazifischen-Raum und in Nordamerika bereits auf Hochtouren. Folgende Abbildung 34 zeigt eine Absatzprognose für Hybridfahrzeuge, die Marktanalysten von PricewaterhouseCoopers erstellten.

Marktpotenziale für Hybridfahrzeuge

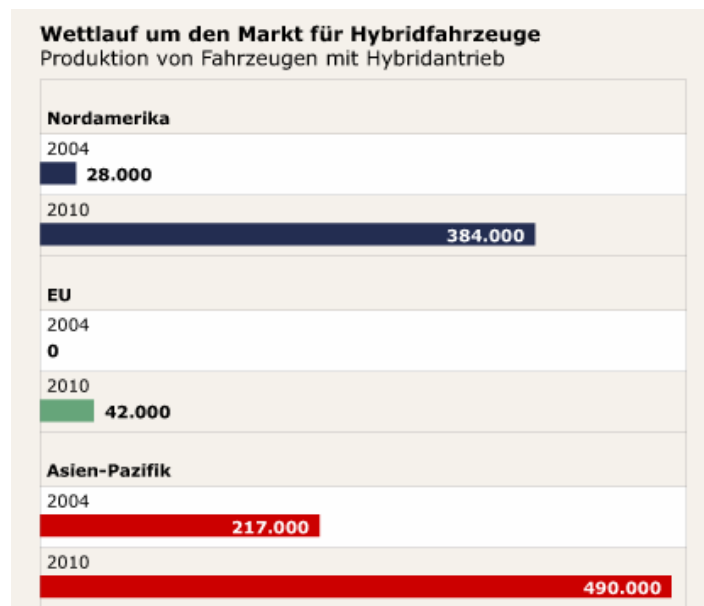


Abbildung 34, Quelle: Manager-Magazin 2005

Dieser Einschätzung zur Folge werden 2010 weltweit etwas mehr als 900.000 Hybridfahrzeuge abgesetzt werden. Europa führt dann mit gerade einmal 42.000 Hybriden immer noch ein eher stiefmütterliches Dasein. Die Zahlen berücksichtigen allerdings nicht Feldversuchs- und Erprobungsfahrzeuge. In Berlin beispielsweise befanden sich im Rahmen einer Felderprobung bereits 2002 zehn Prius bei der Autovermietung Stattauto im Einsatz (Choice 2002).

Hybride stellen eine spezifische Antriebsinnovation dar. Sie können als Brückentechnologie zu rein elektrischen Antrieben mit Batterien oder Brennstoffzellen angesehen werden. So meinte etwa Klaus Egger, Vorstandsmitglied des Automobilzulieferers Siemens VDO anlässlich der Präsentation eines in die Räder integrierten elektrischen Antriebssystems: „Der Hybridantrieb ist nur ein Zwischenschritt auf dem Weg zum Antrieb der Zukunft. Wir sehen im Elektromotor die tatsächlich langfristige Antriebslösung, mit der auch strengste zukünftige Emissionsvorschriften erfüllt werden können.“ (diepresse 2006) Der ökologische Vorteil einer Hybridisierung ist im Teillastbereich unbestritten, bei hoher Geschwindigkeit ist hingegen ein moderner Dieselmotor effektiver. Der Einsatz von alternativen Kraftstoffen in Hybriden ist aufgrund der Mehrkostenproblematik sowie den Schwierigkeiten bei der Realisierung bivalenter Lösungen gegenwärtig noch fraglich.

5.5. Cluster 4: Batterie-Elektroantriebe (»Insel-Brücke«)

Clusterbeschreibung

Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb sind keine neue Erfindung. Noch bevor Daimler und Benz ihre »Motorkutschen« im Jahr 1885 vorstellten, waren in Paris bereits 1881 Elektrofahrzeuge unterwegs. Vermutlich wurde das erste Elektroauto von Gustave Trouvé in Frank-

reich gebaut. Er benutzte bereits einen wiederaufladbaren Blei-Akkumulator, womit seine dreirädrige Konstruktion Geschwindigkeiten von bis zu 12 km/h erreichte. (Elektroauto-Tipp 2006b)

Erstes Elektroauto mit Akkumulatoren von Gustave Trouvé
(Frankreich, 1881)

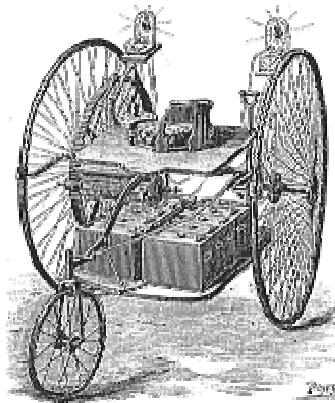


Abbildung 35, Quelle: Elektroauto-Tipp 2006b

Um die Jahrhundertwende hatten in den USA Elektroautos sogar einen größeren Marktanteil als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (ebenda). 1899 war es ein Elektroauto, das als erstes die Grenze von 100 km/h durchbrach (Gerl 2002, 41). Erst mit der Erfindung des elektrischen Anlassers veränderten sich die Wettbewerbsbedingungen schlagartig und der Verbrennungsmotor trat seinen Siegeszug an.

Aus innovationstheoretischer Sicht liegt die technische Innovation demnach nicht in dem altbewährten Elektromotor, sondern vielmehr in der Adoption der Technologie an die Anforderungen eines Fahrzeugs für das 21. Jahrhundert. Dabei sind vor allem intelligente Energiespeicher in Form von Hochleistungsbatterien, wie Lithium-Ionen-Batterien oder Supercaps notwendig, um mit Elektrofahrzeugen Reichweiten zu erzielen, die mit denen des Verbrennungsmotors konkurrieren können.

Um die Innovation einer Technologie zu beurteilen, ist neben der technologischen Neuartigkeit vor allem auch ihre Substitutionskraft mit entscheidend. Dies ist bei Batterie-Elektrofahrzeugen gegeben, denn rein elektrische Antriebstechnik führt zu einer völligen Substitution des thermischen Verbrennungsmotors. Damit stellen sie eine vollwertige Alternative dar und zählen zu den radikalen Innovationen. Bei sauber erzeugtem Batterieladestrom stellen die Batterie-Elektrofahrzeuge auch eine ökologisch-nachhaltige Antriebsalternative dar und verfügen daher über das Potenzial einer systemischen Innovation.

In der Clusterdarstellung der Innovationsmatrix in Abbildung 17 wurden die Batterie-Elektroantriebe dem Cluster 4 zugeordnet. Auf der Antriebsachse sind sie in der Zeile a=7 zu finden. Als Kraftstoff kommt für das Elektroauto nur Strom (k=13) zur Ladung der Batterien in Frage. Damit umfasst das Cluster 4 lediglich die Fahrzeug-Konfiguration $F_{7/13}$.

Funktionsprinzipien

Die Batterie und der Elektromotor stellen die beiden wesentlichen Komponenten eines Batterie-Elektroantriebs dar. Im Folgenden werden wichtige technische Funktionsprinzipien sowie Zukunftsperspektiven dieser Komponenten aufgezeigt.

Elektromotor

Abgesehen von einer Steckdose statt eines Tankstutzens sowie dem fehlenden Auspuff gleicht, von außen betrachtet, ein Batterie-Elektrofahrzeug einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Wesentliche Bestandteile des Fahrzeugs sind der Elektromotor und die Batterie. Gegenüber einem Verbrennungsmotor ist der Elektromotor vergleichsweise klein und kompakt, so dass die große und schwere Traktionsbatterie meistens im Motorraum untergebracht werden kann. Den Rest des Bauraums nehmen elektrische Komponenten wie Umrichter und Steuergeräte ein. Lange Zeit wurden in Elektrofahrzeugen nur Gleichstrommotoren eingesetzt, diese werden heute vor allem durch Drehstrom-Asynchronmotoren verdrängt. Aufgrund eines etwas höheren Steuerungsaufwands sind sie zwar etwas teurer, haben aber höhere Wirkungsgrade. Sie erlauben Drehzahlen bis 15.000 1/min und sind wartungsfrei. (Gerl 2002, 49)

Kurz zusammengefasst bieten Elektroantriebe in Fahrzeugen folgende prinzipielle Vorteile:

- Elektromotoren haben sofort beim Startvorgang ihr maximales Drehmoment und damit eine hervorragende Startdynamik.
- Außerdem sind Elektromotoren überlastbar und können daher kurzzeitig ein höheres Drehmoment und eine höhere Leistung zur Verfügung stellen.
- Getriebe und damit auch Kopplung sind bei der Drehmomentencharakteristik des Elektromotors nicht erforderlich.
- Elektromotoren arbeiten emissionsfrei und sind bei regenerativ erzeugtem Batterieladestrom auch C-frei.

Die Performance eines Elektromotors im Vergleich zu einem Verbrennungsmotor ist in Abbildung 36 dargestellt. Das Schaubild zeigt das Drehmomentverhalten des BMW X5. BMW hat mit diesem Versuchsfahrzeug einen Extremansatz verfolgt, um die Spontaneität und das Ansprechverhalten eines »Power-Hybriden« aufzuzeigen. Auch wenn für normale Fahransprüche solch eine Dynamik sicherlich nicht notwendig ist, zeigt die Untersuchung von BMW sehr deutlich die Stärken des Elektromotors. Mit dem im Jahre 2003 vorgestellten Forschungsfahrzeug wurde ein bis dahin unerreichtes Ansprechverhalten erzielt. Mit dem Elektromotor und Supercaps als Energiespeicher konnte eine Drehmomenterhöhung auf 1000 Nm im unteren Bereich erreicht werden (Hybrid-Autos 2004). Gleichzeitig kann im Fahrzyklus eine Verbrauchssenkung um bis zu 15% erreicht werden (BMW 2004). Der Elektromotor des Forschungsfahrzeugs hat eine Leistung von 70kW, der Verbrennungsmotor von 210 kW (ebenda).

Drehmomentcharakteristik eines Elektromotors im Vergleich zu einem Verbrennungsmotor

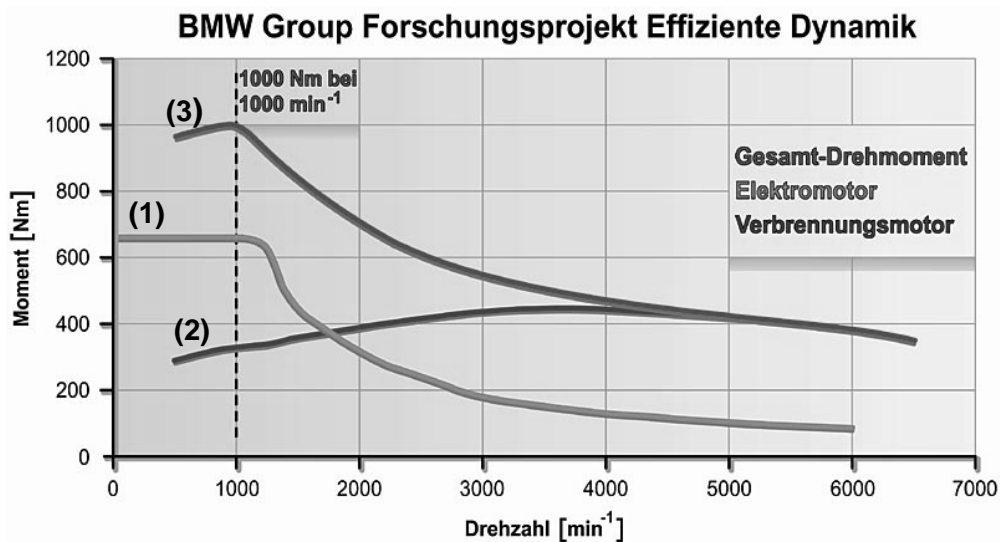


Abbildung 36, Quelle: BMW 2004

Kurve 1 in Abbildung 36 zeigt das Drehmomentverhalten des Elektromotors. Deutlich zu erkennen ist das konstant hohe Drehmoment beim Starten, welches exponentiell mit der Drehzahl abnimmt. Der Verbrennungsmotor, dargestellt in Kurve 2, verfügt über 210 kW Leistung und erreicht sein maximales Drehmoment erst bei hoher Drehzahl. Bei etwa 2000 1/min erreicht er ein höheres Drehmoment als der Elektromotor. In Kurve 3 sind beide Momente zu einem Gesamt-Drehmoment zusammengefasst.

Der eigentliche Charme des Elektromotors, nämlich die Möglichkeit eines emissionsfreien Betriebs, kommt erst bei einem Reinelektroantrieb zum Tragen. Allerdings ist genau zu prüfen, ob die lokale Schadstofffreiheit nicht auf Kosten hoher Kohlendioxidemission bei der Erzeugung des Batterieladestroms erkauft wurde. Wird beispielsweise die Bleibatterie eines Elektrofahrzeugs mit elektrischem Strom aus einem Kohlekraftwerk geladen, so sind die CO₂-Emissionen ungefähr fünf Mal größer als bei der Benzinverbrennung (Stan 2005, 13). In Ländern, wie der Schweiz oder Norwegen, welche sich zu fast 100% aus erneuerbaren Energien versorgen, sind batterieelektrische Fahrzeuge durchaus eine ökologische Alternative zur Verbrennungsmotorik.

Traktionsbatterien

Die zentrale Komponente eines Batterie-Elektrofahrzeuges ist die Traktionsbatterie. Wichtige Größen zur Beurteilung der Tauglichkeit von Batterien als Energiespeicher in Automobilen sind ihre Leistungs- und Energiedichte. Die Leistungsdichte gibt die verfügbare Leistung pro Kilogramm Batteriegewicht an und bestimmt die Höchstgeschwindigkeit und die Beschleunigung des Fahrzeugs. Die Energiedichte gibt den Energieinhalt pro Kilogramm Batteriegewicht an und ist für die Reichweite des Fahrzeugs entscheidend.

Im Vergleich zu Benzin sind die Energiedichten in Batterien sehr begrenzt und der Hauptgrund, warum Elektrofahrzeuge bisher nur in Nischenmärkten Anwendung finden. In einem flüssigen Kraftstoff kann ein Mehrfaches an Energie gegenüber einer Batterie gespeichert werden. 60 Liter Benzin haben beispielsweise ein Gewicht von ca. 50 kg und eine

Energie von 500 kWh. Eine vergleichbare Bleibatterie würde 400 Mal mehr wiegen, also 20 Tonnen (Gerl 2002, 51).

Der Bleiakкумулятор ist auch heute noch der meistverkaufte Energiespeicher für Elektrofahrzeuge, da er preisgünstig in der Herstellung ist und langjährige praktische Erfahrungen vorliegen. Aufgrund seiner geringen Energiedichte von ca. 30 Wh/kg ist er jedoch schwer, so dass zunehmend andere Batterietypen in Pkws zum Einsatz kommen. Dies sind die Nickel-Cadmium (Ni-Cd), Nickel-Metallhydrid-(Ni-MeH), Natrium-Nickelchlorid- (Na-NiCl₂) und Lithium-Ionen Batterien (Li-Ion). Der heutige Stand in der Batterieentwicklung ist in Abbildung 36 dargestellt. Die Daten für 2006 spiegeln den aktuellen Entwicklungsstand wieder (Gerl 2002, Stan 2005, Jossen 2006). Die Prognose für 2015 beruht auf Einschätzungen von Dr. Andreas Jossen, Batterieexperte am Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (Jossen 2006).

Entwicklungsstand und Zukunftsperspektiven von Traktionsbatterien für Elektrofahrzeuge

Batterietyp		Leistungsdichte [W/kg]		Energiedichte [Wh/kg]		Lebensdauer [Jahre]		Kosten [EUR/kWh]	
		2006	2015	2006	2015	2006	2015	2006	2015
Blei-Säure	Pb	150-400 ¹ , < 250 ²	Kein Entwicklungsbedarf	20-30 ¹ 35 ²	< 40 ³	3 ¹ , 2-3 ²	< 3 ²	100 ^{1,2}	100 ^{1,2}
Nickel-Cadmium	Ni-Cd	80-175 ¹ 400 ²		40-60 ^{1,2}	< 60 ³	3 ¹ , 6 ²	6 ²	350 ^{1,2}	350 ²
Nickel-Metallhydrid	Ni-MeH	200-300 ¹ 400 ²		60-80 ^{1,2}	100 ³	5 ^{1,2}	5 ²	300 ¹ , 500 ²	300 ²
Natrium-Nickelchlorid	Na-NiCl ₂	155 ¹ , 200 ²		85- 100 ^{1,2}	k.A.	5 ^{1,2}	k.A.	300 ¹	k.A.
Lithium-Ionen	Li-Ion	300 ¹ , 400 ²		90-120 ¹ 140 ²	180 ³	5 ^{1,2}	10 ²	750 ³	300 ²

Abbildung 37, Quellen: (1) Gerl 2002, 52; (2) Jossen 2006; (3) Stan 2005, 230

Die Anforderungen an Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen sind hoch, der Elektroantrieb wird stets an der technischen Reife des Verbrennungsmotors gemessen werden. Die Leistungsdichten der Batterietypen sind für die Anwendung im Pkw ausreichend, so dass hier kein Entwicklungsbedarf besteht. Aufgrund der hohen geforderten Leistung im Pkw wiegen Traktionsbatterien mehrere hundert Kilogramm, so dass bereits 100 W pro kg für ausreichend Dynamik sorgen. Die Entwicklung konzentriert sich daher darauf, Traktionsbatterien auf möglichst hohe Energiedichten zu trimmen. Um halbwegs akzeptable Reichweiten zu erreichen, werden mindestens 150 bis 200 Wh/kg gefordert. Energiedichten dieser Größenordnung werden derzeit noch nicht erreicht, lediglich die Lithium-Ionen Batterie verfügt in den nächsten zehn Jahren über ausreichend Potenzial, dieses Ziel zu erreichen. Um ansatzweise mit dem Verbrennungsmotor konkurrieren zu können, sollten Traktionsbatterien außerdem wartungsfrei sein, eine Lebensdauer von mindestens fünf, möglichst zehn Jahren aufweisen und ihr Preis sollte unter 150 Euro/kWh liegen.

Die wesentlichen Charakteristika der verschiedenen Batterie-Typen lassen sich wie folgt stichpunktartig zusammenfassen:

- Bleibatterien sind erprobt und kostengünstig, jedoch begrenzt ihre Energiedichte von ca. 30 Wh/kg ihren Einsatz in Automobilen.
- Aufgrund der höheren Energiedichte von 40 bis 60 Wh/kg kann mit einer Nickel-Cadmium Batterie eine ca. 50% höhere Reichweite als mit einer Bleibatterie gleichen Gewichts erreicht werden. Der Batterietyp lässt sich schnell aufladen und weist mit über 2000 Ladezyklen eine gute Lebensdauer auf. (Gerl 2002, 55)
- Eng verwandt und oftmals als Nachfolger der Ni-Cd-Batterie wird die Nickel-Metallhydridbatterie gesehen. Neben der höheren Energiedichte hat sie den Vorteil, dass sie ohne das Schwermetall Cadmium auskommt und der Memoryeffekt weniger ausgeprägt ist. Probleme sind der etwas höhere Preis, die geringere Anzahl an Ladezyklen und ein relativ aufwendiges Recycling. In modernen Elektrofahrzeugen werden heute überwiegend Nickel-Metallhydrid-Batterien eingesetzt. (ebenda).
- Die Natrium-Nickelchlorid Batterie (Na-NiCl₂) zählt zu den Hochtemperaturbatterien. Sie wurde von der Firma AEG Anglo Batteries entwickelt und bis 1999 unter dem Namen ZEBRA-Batterie (zero-emission battery) als Antriebsbatterie für Elektrofahrzeuge vermarktet. 1999 erwarb die Firma MES-DEA S.A. die Technologie für die Produktion der ZEBRA Batterie und setzt den Batterietyp beispielsweise im Twingo oder im Panda ein (MES-DEA 2005). Im Vergleich zu den Bleibatterien hat die Hochtemperaturbatterie eine dreimal höhere Energiedichte, ist wartungsfrei und zeigt keine Selbstentladung. Nachteilig ist eine geringere Lebenserwartung, außerdem muss die Betriebstemperatur von 250°C bis 330°C aufrechterhalten werden. (ebenda, 56)
- Hoffnungsträger in der Fahrzeugbatterieentwicklung ist die Lithium-Ionen Batterie. Energiedichten bis 140 Wh/kg versprechen leichtere Fahrzeuge und größere Reichweiten. Der Nachteil dieses Typs besteht in der Abhängigkeit der Kapazität von der Temperatur und die noch hohen Kosten. In der Entwicklung befinden sich auch Lithium-Polymerbatterien deren Elektrolyt aus einer Polymerfolie besteht. Mit Ihnen sind Leistungsdichten über 150 Wh/kg möglich (ebenda, 52).

Innovationsmuster

Im Gegensatz zu den Hybriden ist das Innovationsmuster beim reinen Batterie-Elektroantrieb weniger komplex. Eine Einteilung in Innovationsbereiche ist hier nicht notwendig, da lediglich Strom als Kraftstoff in Frage kommt. Abbildung 38 ist zu entnehmen, dass die Paarung aus dem Kraftstoff Strom (k=13) mit dem Batterie-Elektroantrieb zu der Fahrzeug-Konfiguration F_{7/13} führt.

Cluster 4 der Innovations-Matrix

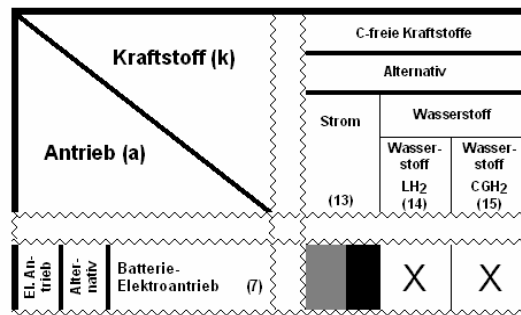


Abbildung 38, Quelle: eigene Darstellung




Da sowohl Strom als auch der Elektroantrieb als Alternativen zur heutigen Konvention angesehen werden können, liegt eine radikale Innovation vor. Ebenso wie Wasserstoff ist auch Strom ein Sekundärenergieträger und damit nur so sauber, wie die zu seiner Erzeugung eingesetzten Primärenergieträger. Sind diese regenerativ, so liegt eine radikale Innovation 2. Grades vor. Handelt es sich um fossile Primärenergieträger, so ist dies eine Innovation 1. Grades.

Beispielmodelle

Die in Abbildung 39 aufgeführten Beispielmodelle zeigen drei unterschiedliche Elektrofahrzeuge, welche der Fahrzeug-Konfiguration $F_{7/13}$ zuzuordnen sind.

- Erstens, den Renault TWINGO Ellettrica als derzeitiges einziges markt-verfügbares Auto der Kompaktklasse. Gebaut wird das Fahrzeug im Tessin in der Schweiz von der Firma MES-DEA. Gegenwärtig beschränkt sich der Verkauf dieser Fahrzeuge auf die Schweiz.
- Bei dem zweiten Beispiel handelt es sich um das Leichtbau-Fahrzeug CityEl. Die technischen Daten zeigen, dass das dreirädrige Leichtbaufahrzeug nicht vergleichbar mit einem vierrädrigen Fahrzeug der Kompaktklasse ist, aber als reines Stadtfahrzeug ein interessantes Fortbewegungsmittel sein kann.
- Und drittens, den Lancer Evolution mit Radnabenantrieb von Mitsubishi. Er soll exemplarisch verdeutlichen, welche Zukunftsperspektive der Batterie-Elektroantrieb hat und welche Potenziale in der Li-Ionen Batterietechnologie liegen. Mit der Technologie sind Reichweiten von über 200 km möglich, so dass das Fahrzeug auch für den außerstädtischen Verkehr interessant wird.

Beispielmodelle zu Cluster 4

Kennwerte		Renault	CityEL	Mitsubishi
				
Modell		TWINGO Elettrica	CityEL Limousine	Lancer Evolution MIEV
Fahrzeug-Konfiguration		F 7/13	F 7/13	F 7/13
Motordaten	Typ	Asynchron Motor	Gleichstrom-Reihenschlußmotor	4 Radnabenmotoren Synchron
	Nennleistung [kW]	16	2,5	k.A.
	Max. Leistung [kW]	36	3,9	50
	Nennrehm. [Nm]	56	k.A.	k.A.
	Max. Drehm. [Nm]	160	k.A.	518
Batterie	Typ	ZEBRA Na-NiCl	Bleisäure	Li-Ion
	Kapazität [Ah]	60	100**	95
	Leerlaufsp. [V]	325	36**	336
	Nennenergie [kWh]	19,5	3,6**	32
	Energiedichte [Wh/kg]	125	k.A.	k.A.
	Gewicht [kg]	160	96	k.A.
Verbrauch	[kWh/100km]	15	k.A.	k.A.
Reichweite	[km]	130	50	250
Höchstgeschw.	[km/h]	120	60	180
Beschleunigung	0-50 km/h [sec]	6	10.5 (0-40 km/h)	k.A.
	50-100 km/h [sec]	20	k.A.	k.A.
Leergewicht	[kg]	920	295	1590
CO₂-Austoss	[g/km]	0 (lokal)	0 (lokal)	0 (lokal)
Preis	[EUR]	ca. 18.500 - 22.000	ab 7.400	k.A.
Anmerkung		nur in der Schweiz erhältlich	marktverfügbar	Prototyp. Serienreife bis 2010.

* Daten umgerechnet von SFR nach EUR (Kurs: 0.618 am 2.1.07, Werte gerundet)

** berechnete Werte

Abbildung 39, Quellen: eigene Darstellung; e-Mobile 2006e; e-Mobile 2006f, Mitsubishi 2005

Das in den Funktionsprinzipien erwähnte Überlastverhalten des Elektromotors ist gut an den Leistungs- und Drehmomentangaben der Elektromotoren des TWINGO und des CityEL zu erkennen. Die Motoren können kurzzeitig gute 40% mehr Leistung abgeben.

Bemerkenswert innovativ ist auch der Radnabenantrieb bei Mitsubishi. Statt wie üblich bewegt sich bei ihnen nicht das Innenteil, sondern der Außenring, der die Funktion des Rotors übernimmt. Das Konzept trägt den Namenszusatz MIEV, der für »Mitsubishi In-wheel motor Electric Vehicle« steht. Die folgende Abbildung 40 zeigt den Aufbau des Mitsubishi Radnabenmotors.

Aufbau des Mitsubishi In-Wheel Radnabenmotors (MIEV)

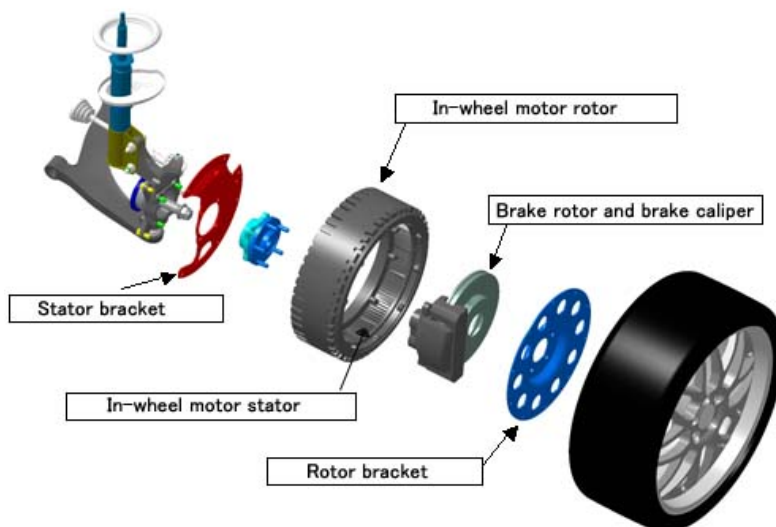


Abbildung 40, Quelle: Mitsubishi 2005

Die vier 50 kW Radnaben-Elektromotoren bringen das Rallye-Auto auf eine sportliche Gesamt-Antriebsleistung von 200 kW. Mit der Li-Ionen Batterie wird für ein Elektroauto eine beachtliche Reichweite von 250 km erzielt.

Marktchancen

Mit dem erreichten Entwicklungsstand in der Batterietechnik und unseren, durch den Verbrennungsmotor geprägten Anforderungen an Mobilität, hat das Elektromobil gegenüber dem Verbrennungsmotor gegenwärtig das Nachsehen. In Punkto Reichweite, Lebensdauer, Geschwindigkeit und bei den Anschaffungskosten kann der »Stromer« nicht mit einem Benzinermithalten. Abgesehen von zwei dreirädrigen Leichtbaufahrzeugen, dem CityEl und dem TWIKE, gibt es derzeit, mit Ausnahme der Schweiz, keine Serienfahrzeuge auf dem europäischen Markt. Interessante Modelle wie der CityStromer von VW, der Peugeot 106 oder der Saxo-elctrique sind vom Markt wieder verschwunden bzw. können auf Anfrage noch bei den Herstellern oder am Gebrauchtwagenmarkt bezogen werden.

Pionier im Bereich der Elektromobile ist die Schweiz. Das Land produziert seinen Strom zu fast 100% aus Wasser- und Kernkraft, also C-frei, und verfügt damit über ausreichend Potenzial, die Fahrzeuge mit grünem Strom zu tanken. Auf dem Schweizer Markt wird beispielsweise der Panda Elettrica oder der TWINGO Elettrica über die MES-DEA angeboten. Ab 2006 ist auch ein Vertrieb in Italien vorgesehen. MES DEA will mit einer Serienproduktion von zunächst 500 Twingo-Fahrzeugen beginnen. Die Kommerzialisierung für weitere europäische Länder ist in der Planungsphase (MES-DEA 2005).

Ein wesentlicher Grund für die Schwierigkeit Elektromobile auf den Markt zu bringen sind die Anforderungen der Gesellschaft an ein Fahrzeug (Knie et al. 1999). Der Begriff der „Rennreiselimousine“ (Canzler/Knie 1994, 7-11) drückt die Erwartungshaltung der Gesellschaft gut aus. Ein Auto soll vor allem dynamisch, geräumig und komfortabel sein.

Eine Möglichkeit dieses Paradigma zu überwinden, bestünde in einem dualen Mobilitätskonzept, in dem ein elektrisches Stadt-Auto und ein verbrennungsmotorisches Überlandauto miteinander kombiniert werden. Für das Stadtauto ist eine kleine Bauform vorteilhaft. Geschwindigkeiten von bis zu 80 km/h sind ausreichend und Strecken über 50 km am Tag werden in Ballungsräumen selten zurückgelegt. Diesen Anforderungen, kann ein Batterie-Elektroauto entsprechen. Im Stadtverkehr kann der Elektromotor seine Stärken wie lokale Emissionsfreiheit, geringe Lärmemissionen und sein hohes Drehmoment beim Starten ausspielen.

Die Kosten für die Ladung der Batterie sind im Verhältnis zu den Kosten einer vergleichbaren Menge an Benzin vernachlässigbar. Für den Twingo Elettrica kostet beispielsweise eine Strecke von 100 km knappe 3 EUR (Verbrauch: 15 kWh pro 100 km, Strompreis für Privathaushalte in Deutschland ca. 20 Cent/kWh). Bei einem angenommenen Verbrauch von 10 Liter Benzin für einen Mittelklasse-Wagen im Stadtverkehr liegen die Spritkosten derzeit bei 14,20 EUR und damit um ein Mehrfaches höher. Den Einsparungen bei den Betriebskosten stehen aber höhere Anschaffungskosten gegenüber. Könnte man auch bei batterieelektrischen Fahrzeugen größere Stückzahlen, ca. 100.000 Einheiten/Jahr, verkaufen, fielen nur noch die Mehrkosten für die Batterie an. Alle anderen Teile könnten genauso in Serie produziert werden wie bei einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Alleine die Mehrkosten für die Batterie würden das Fahrzeug aber immer noch um 40% teurer machen als ein konventionelles Vergleichsfahrzeug (Gerl 2002, 67).

Bedingt durch das Reichweitenproblem und die Forderung nach einem omnipotenten Auto führt der Elektroantrieb bisher ein sehr begrenztes »Insel-dasein«. Die Vorteile des Elektroantriebs kommen nur bei einem Insel-Einsatz zum Tragen. Solche Inseln können beispielsweise der Einsatz von Flurförderfahrzeugen in Hallen, der Fuhrpark eines Flughafens oder auch Busflotten in Städten darstellen. Inseln müssen aber nicht zwangsweise Nischenmärkte sein, sondern können sich auch zu Massenmärkten entwickeln. Ein Beispiel für eine Insel mit dem Potenzial eines Massenmarktes stellen emissionsfreie Innenstädte dar. Bei einer weiteren Verschärfung der Abgasnormen kann der Einsatz eines Batterie-Elektroautos für den Stadtverkehr schnell an Bedeutung gewinnen. In London beispielsweise kann ein Elektroauto sehr schnell eine ökologische und wirtschaftliche Alternative darstellen, denn besonders umweltfreundliche Fahrzeuge, wie die Batterie-Elektrofahrzeuge, sind von der sonst üblichen Maut ausgeschlossen. Und diese beträgt in London acht englische Pfund pro Tag. (DaimlerChrysler 2006).

5.6. Cluster 5: Brennstoffzellen-Elektroantriebe

Clusterbeschreibung

Brennstoffzellen-Autos zählen ebenso wie batteriebetriebene Fahrzeuge zu den Elektrofahrzeugen. Allerdings mit dem Unterschied, dass die elektrische Energie nicht in Batterien gespeichert, sondern in der Brennstoffzelle elektrochemisch aus Wasserstoff gewonnen wird. Im Gegensatz zu Batterien sind Brennstoffzellen also keine Energiespeicher sondern Energiewandler. In Abbildung 9 wurde bereits verdeutlicht, dass es lange andauerte, bis die

Brennstoffzelle von ihrer Invention im Jahr 1838 zur Innovation im Fahrzeugbau des 20. Jahrhunderts reifte. Lange Zeit galt die Brennstoffzelle aufgrund zu geringer Leistungsdichten als unattraktiv für die hohen Anforderungen im Fahrzeugbau. Erst die Entwicklung von Hochleistungspolymermembranen machte die Technologie für den Einsatz in der Automobilindustrie interessant. Ein Durchbruch hinsichtlich Lebensdauer und Leistungsdichte gelang Mitte der 80er Jahre mit dem Einsatz fluorierter Polymere. Eine herausragende Rolle spielte hierbei die von der Firma DuPont entwickelte Nafion[®]-Membran (Jörissen/Garche 2000, 24). Hochleistungsmembranen ermöglichten es der kanadischen Firma Ballard automobiltaugliche Stacks zu entwickeln. Ballard erreichte Mitte der 90er Jahre erstmals automobiltaugliche Leistungsdichten von 1.000 W pro Liter Stackvolumen (Gerl 2002).

Ebenso wie die Batterie-Elektroautos haben wasserstoffgetriebene Brennstoffzellen-Fahrzeuge einen substituierenden Charakter und können das Marktgeschehen auf dem Automobilmarkt radikal verändern. Sie stellen sowohl antriebs- als auch kraftstoffseitig eine Alternative zum Verbrennungsmotor dar und zählen daher zu den radikalen Innovationen. Die Beschreibung des Brennstoffzellen-Clusters erweist sich allerdings als etwas diffizil, da zwei Strukturvarianten von Brennstoffzellen-Fahrzeugen zu unterscheiden sind. Dies sind zum einen Fahrzeuge, welche Wasserstoff direkt tanken können (Strukturvariante 1), zum anderen Fahrzeuge mit der Möglichkeit der Wasserstoffgewinnung direkt im Fahrzeug mittels eines so genannten on-board-Reformers (Strukturvariante 2). Dieser chemische Minireaktor kann aus wasserstoffhaltigen Verbindungen den Wasserstoff gewinnen. Die beiden Strukturvarianten werden im Abschnitt Funktionsprinzipien näher behandelt.

Beide Varianten haben gemein, dass die für mobile Anwendungen am besten geeignete Polymer-Membran-Brennstoffzelle, kurz PEFC (Polymer Elektrolyt Fuel Cell) eingesetzt wird. Dieser Zelltyp hat die Eigenschaft, dass er ausschließlich mit hochreinem Wasserstoff mit einer Reinheit von mindestens 99,99% betrieben werden sollte. Insbesondere bei Wasserstoff aus Reformierungsprozessen ist darauf zu achten, dass er diesen Anforderungen entspricht.

Die Brennstoffzellen-Fahrzeuge sind in der Innovations-Matrix in der letzten Zeile mit dem Index $a=8$ aufgeführt. Wir verstehen unter einem Brennstoffzellenfahrzeug entweder ein direkt-wasserstofftankendes Fahrzeug der Strukturvariante 1 oder ein Fahrzeug mit On-board-Reformer der Strukturvariante 2. Entsprechend zerfällt das Brennstoffzellencluster in die zwei Strukturbereiche:

- In Strukturbereich 1 fallen die beiden Fahrzeugkonfigurationen $F_{8/14}$ und $F_{8/15}$. Sie repräsentieren Brennstoffzellen-Fahrzeuge mit der Möglichkeit Druckwasserstoff ($k=14$) oder Flüssigwasserstoff ($k=15$) direkt zu tanken. Beide Konzepte wurden erfolgreich von verschiedenen Automobilherstellern in Feldversuchen demonstriert, so dass für beide Felder Innovationen vorliegen.
- Im Strukturbereich 2 liegen die Fahrzeug-Konfigurationen $F_{8/k}$ mit den Kraftstoffen $k=1$ bis 12 und stellen Brennstoffzellen-Fahrzeuge mit on-board Reformertechnologie dar. Die Innovationsbetrachtung erweist sich hier schwieriger, da sich die Entwicklung von Kraftstoffreformern für Fahrzeuge meist noch im Inventionsstadium befindet. Eine Ausnahme bildet die Methanolreformierung. DaimlerChrysler konnte den Einsatz in

Form eines Prototyps erfolgreich demonstrieren, so dass für die Fahrzeug-Konfiguration $F_{8/11}$ eine Innovation vorliegt.

Rein technologisch gesehen kann aus jeglichen Kohlenwasserstoffen C_mH_n und Alkoholen C_mH_nOH über Reformierungsprozesse Wasserstoff gewonnen werden. Daher sind auch keine prinzipiell technologisch ausgeschlossenen und mit „x“ gekennzeichneten Felder im Strukturbereich 2 zu finden. Jedoch ist nicht jeder Kraftstoff für die On-board Reformierung in einem Fahrzeug geeignet. Die großtechnische Reformierung von Erdgas und anderen kohlenstoffbasierten Rohstoffen ist in der Petrochemie ein gängiges chemische Verfahren, daher liegt die Herausforderung vor allem in der Miniaturisierung der Technologie.

Interessant für die Reformierung in Kfz-Anwendungen sind aufgrund hoher Energiedichten flüssige Kraftstoffe wie Benzin, (Bio-)Diesel, (Bio-)Methanol oder (Bio-)Ethanol. Besonders geeignet ist dabei Methanol mit der Strukturformel CH_3OH , da der Alkohol in einem Dampfreformer bereits bei $250^\circ C$ bis $300^\circ C$ reformiert werden kann. Außerdem verfügt Methanol über ein sehr gutes C-H-Verhältnis und das Produktgas besteht zu 75% aus Wasserstoff. Die Methanolreformierung wurde in dem auf der A-Klasse basierenden Versuchsfahrzeug NECAR V von DaimlerChrysler erfolgreich demonstriert.

Die Reformierung höherer Alkohole und Kohlenwasserstoffe ist komplexer und erfordert deutlich höhere Prozesstemperaturen von etwa 700 bis $1.000^\circ C$. Durch die hohen Temperaturen wird der Reformer insgesamt komplizierter, schwerer und teurer und die Materialauswahl anspruchsvoller. Außerdem müssen energetisch ungünstigere Reformierungsverfahren mit einer geringeren Wasserstoffausbeute in Kauf genommen werden. Diese sind die partielle Oxidation und die autotherme Reformierung. Bei der autothermen Reformierung handelt es sich um eine Kombination aus Dampfreformierung und partieller Oxidation. An der reinen Dampfreformierung von Benzin unter Kfz-kompatiblen Bedingungen wird derzeit geforscht. Durchbrüche hinsichtlich der Aktivität und Standzeiten der Katalysatoren sind hier aber noch erforderlich (ConNeCat 2006, 16).

Trotz dieser Nachteile befinden sich mineralöltaugliche Reformer für Diesel und Benzin in der Entwicklung. Im Laborbetrieb wird die autotherme Dampfreformierung von entschwefeltem Benzin bereits erfolgreich erprobt, zum Beispiel am Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme in Freiburg (ISE 2002). Eine vollwertige Integration in einen Pkw mit Prototypencharakter ist uns jedoch nicht bekannt, so dass wir diese und andere Bestrebungen auf dem Gebiet der Reformierung noch eher in der Phase der Invention sehen. Eine Ausnahme bildet die von DaimlerChrysler erfolgreich demonstrierte Methanolreformierung im NECAR V.

Funktionsprinzipien

Im Mittelpunkt dieses Abschnitts stehen Effizienzbetrachtungen. Dass wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen lokal emissionsfrei sind und kein CO_2 produzieren, steht außer Frage, diskussionsbedürftig ist aber der energetische Aufwand zur Erzeugung des Brennstoffs. Dies soll im Folgenden in drei Schritten geschehen: In einem ersten Schritt wird zunächst der Systemaufbau in einem Brennstoffzellen-Fahrzeug vorgestellt. Im zweiten Schritt wird dann das »innovative Herzstück« dieser Technik, nämlich der Entwicklungsstand der Polymer-

membran-Brennstoffzelle erläutert. Ausgehend davon wenden wir uns dann in einem dritten Schritt den Effizienzbetrachtungen zu.

Systemaufbau

Zunächst sind zwei grundlegende Strukturvarianten von Brennstoffzellenfahrzeugen zu unterscheiden, welche in Abbildung 41 skizziert sind. Zu Variante 1 zählen Fahrzeuge mit der Möglichkeit, Wasserstoff direkt zu tanken und zu speichern. Fahrzeuge der Variante 2 verfügen über einen in das Fahrzeug integrierten Reformer und können den Wasserstoff on-board erzeugen.

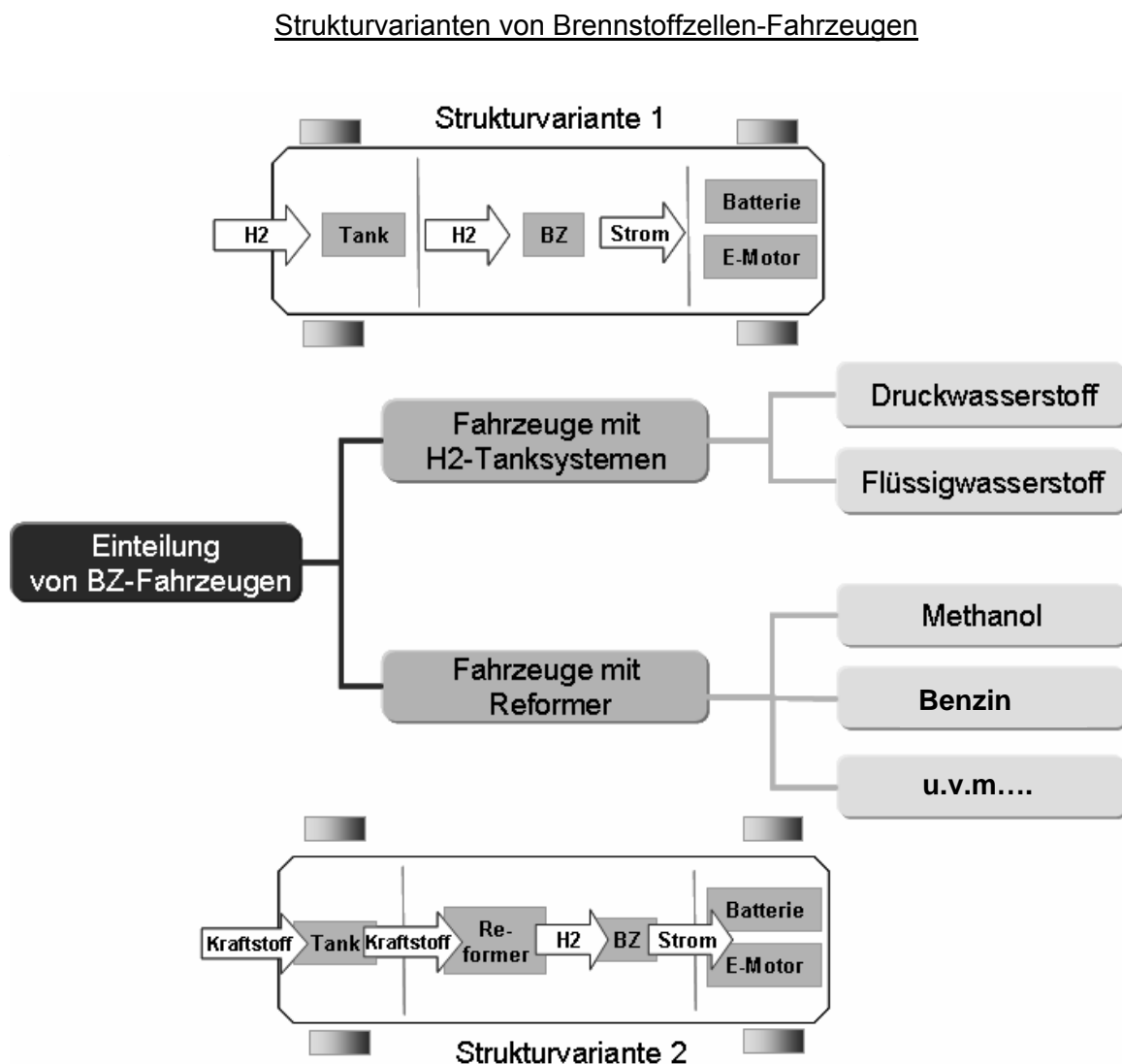


Abbildung 41, Quelle: Eigene Darstellung

Bei Variante 1 wird Wasserstoff entweder flüssig in kryogenen Flüssiggastanks oder gasförmig in Hochdruckbehältern mitgeführt. Flüssiger Wasserstoff hat den Vorteil einer deutlich höheren Energiedichte gegenüber gasförmigem Wasserstoff. Leider verflüssigt sich aber Wasserstoff erst bei -253°C , so dass die Speicher gut isoliert sein müssen, um eine Verdampfung zu verhindern. Bei gasförmiger Betankung muss der Wasserstoff hoch verdichtet

werden, um eine ausreichende Energiemenge mitführen zu können. Drückbehälter für 350 bar sind gegenwärtig Stand der Technik, 700 bar Behälter sind in der Diskussion. Eine dritte Möglichkeit wäre die chemische Speicherung von Wasserstoff in Metallhydridspeichern, diese sind allerdings für mobile Anwendungszwecke zu schwer. Sowohl mit Druck- als auch Flüssigwasserstofftanks befinden sich Brennstoffzellenfahrzeuge in der Erprobung.

Bei Fahrzeugen der Strukturvariante 2 wird der Wasserstoff on-board, also im Fahrzeug, in einem Reformer gewonnen und erst dann der Brennstoffzelle zugeführt. Dieses Verfahren bietet die Möglichkeit, flüssige Kraftstoffe wie Methanol, Ethanol oder Benzin zu tanken, um damit die Probleme bei der Wasserstoffspeicherung zu umgehen. Nachteilig ist, dass der Reformer noch untergebracht werden muss und damit das Fahrzeug schwerer, komplexer und teurer wird. Außerdem sinkt aufgrund der Verluste bei der Reformierung der Antriebswirkungsgrad. DaimlerChrysler hat das Methanol-Konzept in dem Prototypen NECAR V erfolgreich demonstriert und damit die technologische Machbarkeit nachgewiesen. Alle anderen Automobilhersteller setzten allerdings auf die Wasserstoffbetankung, so dass sich auch Daimler dem allgemeinen »Wasserstoff-Hype« anschloss und seit 2001 die Methanol-Entwicklungen einstellte.

Insgesamt hat die Reformierung flüssiger Kraftstoffe im Fahrzeug derzeit geringe Bedeutung, so dass wir uns im Weiteren vor allem den direkt-wasserstofftankenden Pkws zuwenden wollen.

Abbildung 42 zeigt am Beispiel des Feldversuchfahrzeugs „f-cell“, einer brennstoffzellenbetriebenen A-Klasse von DaimlerChrysler den Aufbau eines Brennstoffzellen-Fahrzeuges mit Druckwasserstoffspeicherung. Fahrzeuge anderer Automobilhersteller wie zum Beispiel von Ford, Opel oder Toyota sind ähnlich aufgebaut.

Aufbau eines Brennstoffzellenfahrzeugs mit Druckwasserstoffspeicherung am Beispiel der „f-cell“

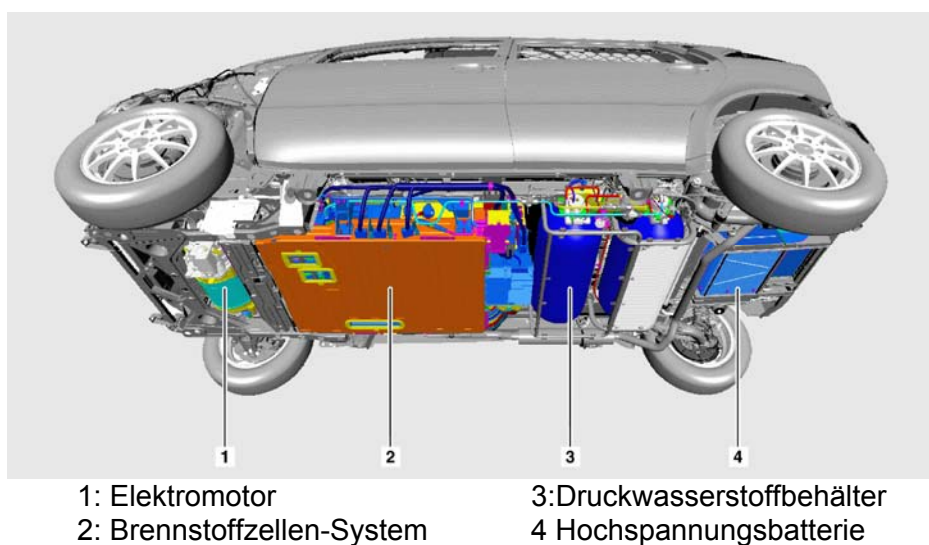


Abbildung 42, Quelle: Stauch 2005

Das Herzstück des Fahrzeugs ist eine 72 kW-Brennstoffzelle von Ballard. Die Brennstoffzelle ist so ausgelegt, dass damit der 62 kW starke Drehstrom-Asynchron-Motor versorgt wird.

Zusätzlich kann Sie eine Hochspannungs-Traktionsbatterie mit einer Spitzenleistung von 20 kW laden. Die Nickel-Metallhydridbatterie hat eine Pufferfunktion und dient zur Abdeckung von Leistungsspitzen beim Starten oder Beschleunigen. Die Kraftstoffversorgung erfolgt über zwei mit 350 bar beladene Wasserstoff-Hochdrucktanks. Die Leistungselektronik hat die Aufgabe, den Gleichstrom der Brennstoffzelle an die Erfordernisse des Drehstrom-Asynchronmotors anzupassen. Weitere technische Daten für das Fahrzeug sind dem Abschnitt Beispielmotive zu entnehmen. (Leistungsangaben aus: Stauch 2005)

Entwicklungsstand der Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle

Ähnlich wie Batterien werden Brennstoffzellen nach den eingesetzten Elektrolyten unterschieden. Gegenwärtig wird an sechs verschiedenen Typen gearbeitet. Jeder Typ hat in einem bestimmten Anwendungsgebiet seine Berechtigung. Die folgende Abbildung 43 gibt einen Überblick über die verschiedenen Brennstoffzellentechnologien, die eingesetzten Elektrolyte und die Betriebstemperaturen sowie über mögliche Anwendungsgebiete.

Überblick Brennstoffzellentechnologien

Typ		Elektrolyt	Temperaturbereich	Anwendungsgebiet*	
AFC	Alkaline FC / Alkalische BZ	Kalilauge	60 -90 °C	Raumfahrt, U-Boote, Straßenfahrzeuge	Niedertemperatur Brennstoffzellen
PEFC (PEM)	Polymere-Elektrolyt-Membrane FC / Polymer-Elektrolyt-Membran BZ	Protonenleitende Membran	50 -80 °C *bis 160°C mit HT-PEM	Straßenfahrzeuge, Hausenergieversorgung, U-Boote, Kleingeräte	
DMFC *	Direct-Methanol FC / Direktmethonal BZ	Protonenleitende Membran	80-110°C	Kleingeräte	
PAFC	Phosphoric Acid FC / Phosphorsäure BZ	Konzentrierte Phosphorsäure	160-220°C	Gewerbliche KWK	Hochtemperatur Brennstoffzellen
MCFC	Molton Carbonate FC / Schmelzkarbonat BZ	Geschmolzene Karbonate	620°C-660°C	Gewerbliche KWK	
SOFC	Solid Oxid FC / Oxidkeramische BZ	Ionenleitende Keramik	800-1000°C	Elektrizitätserzeugung, APU	

Abbildung 43, Quelle: Jörisen/Garche 2000, 17; *eigene Ergänzungen

Für mobile Einsatzzwecke sind ausschließlich Niedertemperatur-Brennstoffzellen interessant, da sie in der Lage sind dynamisch und schnell auf Lastwechsel zu reagieren.

Die Möglichkeit AFC-Zellen einzusetzen, konnte durch die belgische Firma ZEVCO erfolgreich demonstriert werden. ZEVCO lieferte 1998 ein Taxi mit einer 5 kW alkalischen Brennstoffzelle an die englische Stadt Westminster aus (Hyweb 1999). Angetrieben wurde das Fahrzeug allerdings über eine Batterie, welche über die Brennstoffzelle geladen wird. Weitere Versuche AFC Brennstoffzellen in Fahrzeugen einzusetzen, wurden aufgrund der hohen Anforderungen des Typs an die Betriebsgase zu Gunsten der PEFC fallen gelassen.

Der Zelltyp erfordert reinen Sauerstoff für den Betrieb und hat außerdem eine hohe CO₂-Empfindlichkeit.

Die DMFC zählt auch zu den Niedertemperaturzellen und ist der einzige Typ, der nicht Wasserstoff als Betriebsgas benötigt, sondern, wie der Name schon sagt, direkt mit Methanol betrieben werden kann. Die direkte elektrochemische Wandlung von Methanol in der DMFC ist nicht mit der On-Board-Reformierung von Wasserstoff aus Methanol zu verwechseln. Der Zelltyp ist derzeit Gegenstand intensiver Forschungsarbeit, aber für mobile Anwendungen noch nicht ausgereift. In portablen Kleinanwendungen wird die DMFC jedoch bereits erfolgreich eingesetzt.

Auch die SOFC als Hochtemperaturzelle ist in Automobilen zu finden, allerdings nicht für Antriebszwecke, sondern als APU zur Bordstromversorgung. BMW beispielsweise setzt eine SOFC-Brennstoffzelle der amerikanischen UTC zur Bordstromversorgung in der 7er Reihe ein. Der Stack liefert 5 kW Leistung bei 42 Volt Spannung und ermöglicht damit unter anderem den Betrieb der Klimaanlage, ohne dass der Motor laufen muss (Geitmann 2004, 31).

Als alleiniger Kandidat für den mobilen Einsatz bleibt somit die PEFC übrig. Die folgenden Ausführungen gehen deshalb näher auf den Entwicklungsstand und die Zukunftsperspektive der PEFC ein. Technologieführer in der PEFC Stack-Herstellung für Antriebszwecke ist die kanadische Firma Ballard Power Systems. Stacks von Ballard werden unter anderen von DaimlerChrysler, Ford, VW und Audi eingesetzt. Die Zahlen in Abbildung 44 verdeutlichen die Verbesserung der Stackperformance bei Ballard in den letzten vier Jahren und zeigen die gesetzten Ziele bis 2010. Angestrebt wird eine Lebensdauer der Stacks von 5.000 h, dieser Wert ist vergleichbar mit der Lebensdauer konventioneller Motoren. Um das Gewicht der Fahrzeuge weiter reduzieren zu können, soll die Leistungsdichte bis auf 2.500 Watt pro Liter erhöht werden. Der Tabelle ist auch zu entnehmen, dass beachtliche Erfolge in der Verbesserung des Kaltstartverhaltens bei Ballard-Brennstoffzellen zu verbuchen sind.

Auf dem Bild ist der aktuelle Ballard-Stack aus dem Jahr 2005 zu sehen, wie er beispielsweise auch in der Brennstoffzellen A-Klasse von DaimlerChrysler eingesetzt wird. Bei dem MK 902 LD werden 440 Zellen in vier Reihen in Serie geschaltet. Der Stack hat eine Ausgangsleistung von 85 kW bei einer Stromstärke von 300 A (Budd 2006, 6).

Entwicklungsstand und Zukunftsperspektive der PEFC von Ballard


	2002	2003	2004	2005	Ziel 2010	 <p>Ballard-Stack MK 902 LD</p>
Leistungsdichte [W/l]	777	905	1205	1470	2500	
Lebensdauer [h]	200	700	2000	2160	5000	
Dauer Kaltstart bis 50% Leistung [s]	150 (bei 15°C)	50 (bei -15°C)	8 (bei -15°C)	16 (bei -20°C)	30 (bei -30°C)	
Kosten [US\$/kW]	125	120	81	73	30	

Abbildung 44, Quelle: eigene Darstellung; Budd 2006, 14-17

Die Entwicklungen bei der PEFC gehen derzeit dahin, den Zelltyp mit Temperaturen über 100°C betreiben zu können. Die Zellen werden als so genannte Hochtemperatur-Polymer-Membran Brennstoffzellen (kurz HT-PEM oder HT-PEFC) bezeichnet. Streng genommen ist

dieser Ausdruck eigentlich nicht richtig, da als Protonenleiter eine Phosphorsäure zum Einsatz kommt und es sich daher um eine PAFC handelt. Da jedoch der Stackaufbau der HT-PEM eher einer PEFC entspricht, hat sich die etwas unglückliche Bezeichnung »Hochtemperatur-PEM« durchgesetzt. VW hat kürzlich einen Durchbruch bei der Entwicklung von HT-PEM Zellen gemeldet. Die VW-Zelle soll bis 160°C betrieben werden können und Leistungsdichten von 0,9 W/cm² erreichen (VW 2006). VW hätte damit die Tauglichkeit der Zellen grundsätzlich nachgewiesen und beabsichtigt 2010 erste Forschungsfahrzeuge mit der HT-PEM vorstellen. Bis 2020 will der Wolfsburger Konzern dann alltagstaugliche und bezahlbare Brennstoffzellen-Antriebe mit der HT-PEM anbieten (VW 2006).

Effizienzbetrachtung

Der Vorgang der Stromerzeugung in einer Brennstoffzelle unterliegt völlig anderen physikalischen Gesetzmäßigkeiten als in konventionellen Wärmekraftmaschinen. Der Brennstoff, in den meisten Fällen Wasserstoff, wird in einer Brennstoffzelle nicht gezündet, sondern direkt elektrochemisch in Wasser umgesetzt. Dabei wird elektrische Energie und Wärme frei. Die im Wasserstoff gebundene chemische Energie kann also direkt in elektrische Energie umgewandelt werden.

Anders in einem Verbrennungsmotor: Dort wird der Brennstoff gezündet, um mechanische Arbeit an den Hubkolben des Motors zu verrichten. Verbrennungsmotoren zählen zu den Wärme-Kraft-Maschinen (kurz WMK) und unterliegen dem so genannten Carnot-Wirkungsgrad. Er gibt die theoretisch maximal mögliche mechanische Arbeit an, die eine WMK zu leisten vermag. Ein Vergleich mit dem theoretischen Wirkungsgradverlauf einer Brennstoffzelle ist in der folgenden Abbildung 45 dargestellt.

Vergleich des theoretischen Wirkungsgrades einer Brennstoffzelle mit einer Wärmekraftmaschine

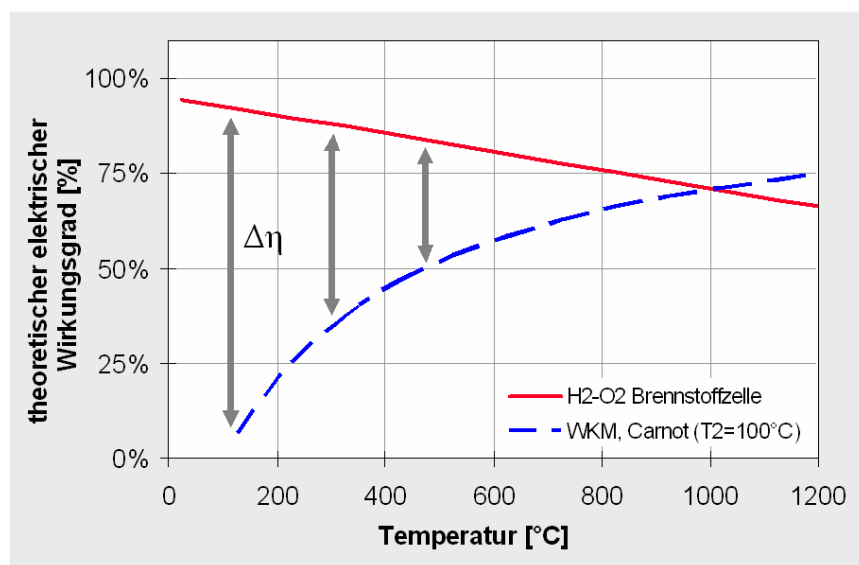


Abbildung 45, Quelle: Jörissen/Aigle 2006, 20

Die Abbildung zeigt deutlich, dass die Brennstoffzelle über einen großen Temperaturbereich eine höhere Effizienz als eine WKM aufweist. Vor allem im Teillastbereich bei niedrigeren Temperaturen arbeiten Brennstoffzellen hocheffizient. Dies erkannte bereits 1887 der Nobelpreisträger Wilhelm Ostwald. Seines Erachtens ist die Brennstoffzelle eine „größere zivilisatorische Leistung“ als der Verbrennungsmotor (Jörissen/Aigle 2006, 18).

Es stellt sich nun die Frage, ob diese theoretischen Effizienzvorteile der elektrochemischen Energiewandlung in Brennstoffzellen auch in der Praxis umgesetzt werden können. Aus der in der folgenden Abbildung 46 dargestellten Untersuchung von Opel geht hervor, dass eine Brennstoffzellenvariante tatsächlich effizienter arbeitet als ein Auto mit Dieselmotor.

Vergleich der Antriebswirkungsgrade von Brennstoffzelle und Dieselmotor am Beispiel des Opel Zafira

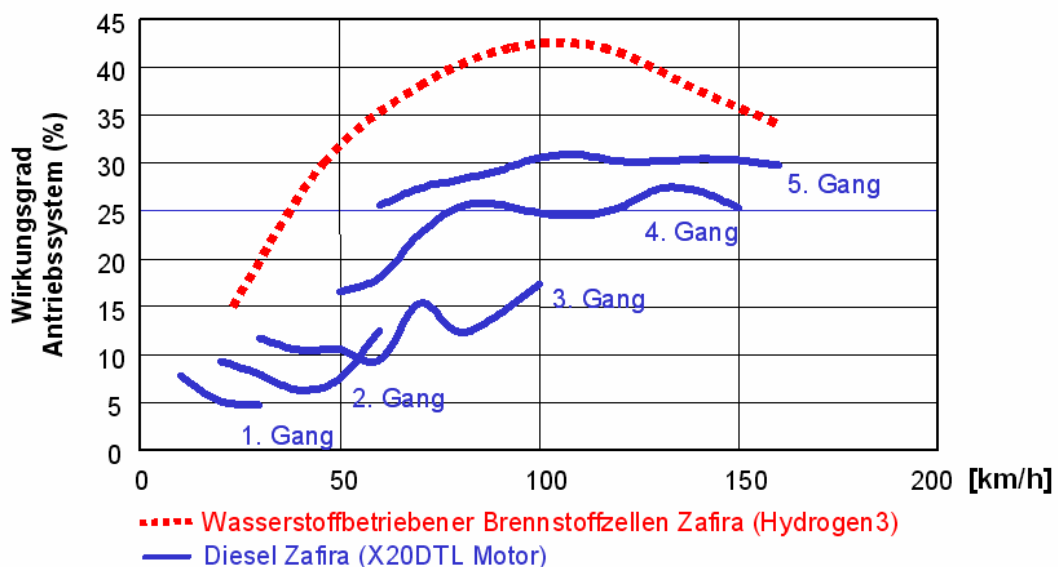


Abbildung 46, Quelle: Jörissen/Aigle/Pioch 2006, 15

In der Untersuchung von Opel wird der Wirkungsgradverlauf eines dieselbetriebenen Opel Zafira mit dem „Hydrogen3“, einem brennstoffzellenbetriebenen Zafira, verglichen. Das Ergebnis ist beachtlich: Vor allem im Stadtverkehr in den Gängen 1 bis 4 spielt die Brennstoffzelle ihre Stärke im Teillastverhalten aus. Aber auch bei Volllast kann sie dem Verbrennungsmotor Paroli bieten. Dabei erreicht der HydroGen3 bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h im optimalen Betriebspunkt einen Wirkungsgrad von über 40% und liegt damit deutlich über dem eines modernen Dieselfahrzeugs. Im europäischen Fahrzyklus ergibt sich für den HydroGen3 ein Wirkungsgrad von 36%, während ein direkteinspritzender Diesel gleicher Leistung nur 22% erreicht (Jörissen/Aigle/Pioch 2006, 9).

Dabei ist ferner nicht zu vergessen, dass Diesel- und Ottomotor eine jahrhundertlange Entwicklung hinter sich haben, während das theoretische Potenzial der Brennstoffzelle noch nicht ausgeschöpft ist, wie die folgende Einschätzung der VES (Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie) und der DaimlerChrysler-Forschung in Abbildung 47 verdeutlicht. Die VES ist eine von der Regierung unterstützte Initiative verschiedenster Automobilhersteller und

Mineralölkonzerne. Bei den aufgeführten Werten handelt es sich um den Wirkungsgrad des kompletten Antriebssystems, er spiegelt die Effizienz wider, mit welcher ein Kraftstoff vom Tank auf das Rad (from Tank to Wheel) übertragen werden kann. Der Untersuchung zufolge werden im Jahr 2010 Pkw mit wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen Antriebswirkungsgrade von knapp unter 50% erreicht.

Entwicklung der Wirkungsgrade vom Tank bis zum Rad (Tank to Wheel)

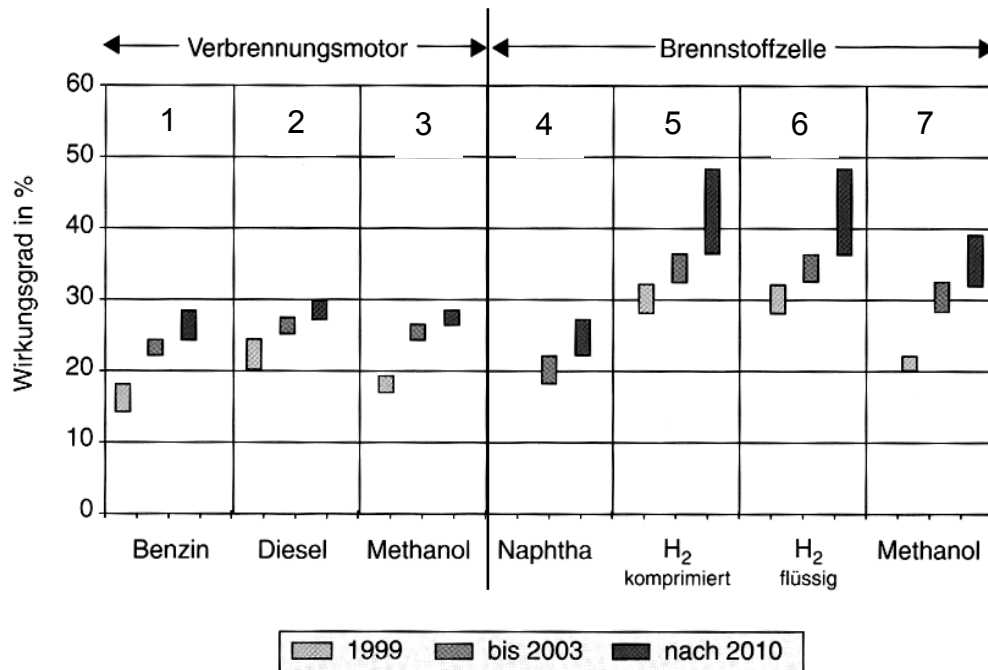


Abbildung 47, Quelle: Gerl 2002, 175

Die bisherigen Überlegen zeigen: Mit der Brennstoffzellentechnologie kann in naher Zukunft eine Verdopplung des Antriebswirkungsgrads gegenüber einem Fahrzeug mit Benzinmotor erreicht werden. Dies würde einen technologischen Quantensprung darstellen und unterstreicht die Radikalität der Innovation Brennstoffzelle.

Eine Tank-to-Wheel-Untersuchung von DaimlerChrysler am NECAR IV, einem mit Flüssigwasserstoff betriebenen Brennstoffzellen A-Klasse-Fahrzeug, führt zu den in Abbildung 48 dargestellten Ergebnissen. Das Energieflussdiagramm zeigt die verschiedenen Verlustmechanismen in einem Brennstoffzellenfahrzeug. Die Brennstoffzelle selbst arbeitet mit einem Wirkungsgrad von über 62%, d.h. ca. 38% der eingesetzten Energie bleiben als Abwärme ungenutzt und müssen weggekühlt werden. Abzüglich der Verluste durch Nebenaggregate, Stromrichter, Motor und Getriebe können 38% der chemischen Energie des Wasserstoffs im NEFZ-Fahzyklus auf die Räder übertragen werden.

Energiefluss im NEFZ-Fahrzyklus (gemessen im NECAR 4)

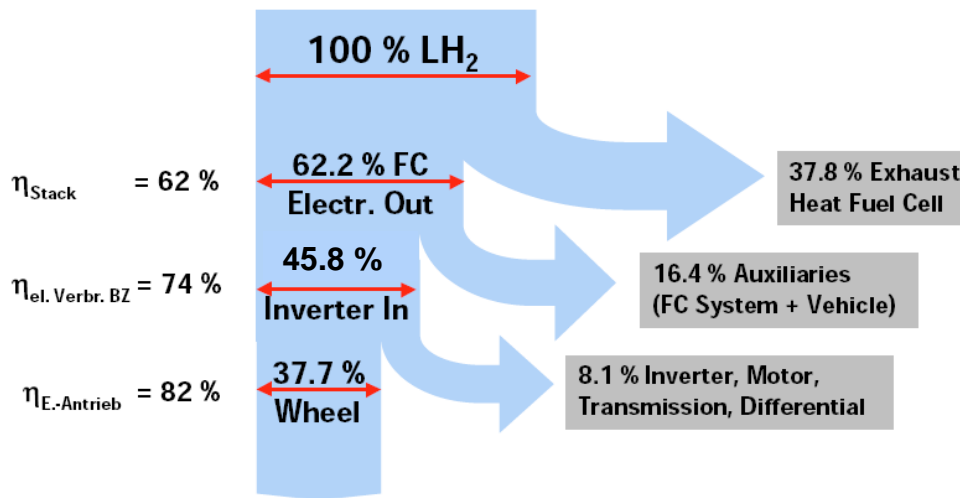


Abbildung 48, Quelle: Lamm 2006, 13

Bisher wurden die Energiewandler Brennstoffzelle und Verbrennungsmotor im Hinblick auf ihre Wandlungseffizienz verglichen. Die Erzeugung des Kraftstoffs wurde dabei nicht betrachtet. Eine ganzheitliche Betrachtung muss aber auch die Kraftstofferzeugung berücksichtigen und wird meistens als »Well to Wheel«-Analyse bezeichnet.

Wasserstoff ist ein Sekundärenergieträger und kein Rohstoff im eigentlichen Sinne. Er kommt auf der Erde nur in gebundener Form vor und muss erst aus Primärenergieträgern, wie zum Beispiel aus Erdgas oder Wasser, gewonnen werden. Der energetische Aufwand hierfür ist in der Regel höher als beispielsweise die Förderung und Veredlung von Öl zu Benzin. Entscheidend für die Beurteilung der ökologischen Nachhaltigkeit der Brennstoffzelle ist demnach die Betrachtung der kompletten Energiekette des Wasserstoffs, also von der Erzeugung über die Bereitstellung bis zur Wandlung des Wasserstoffs. Bei der Wasserstoff-erzeugung ist genau zu prüfen, ob nicht die in Abbildung 47 dargestellten Effizienzvorteile der Brennstoffzelle in der Energiewandlung in der Vorkette »verspielt« werden. Die folgende Abbildung 49 gibt nun Auskunft über die Effizienz der gesamten Energiekette für verschiedene Kraftstoffarten.

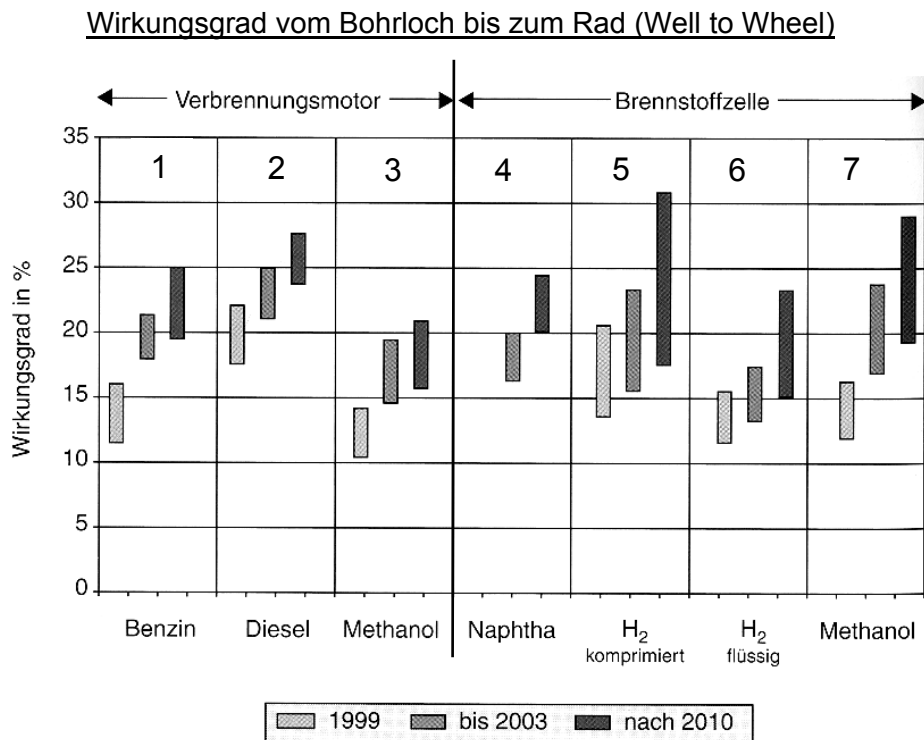


Abbildung 49, Quelle: Gerl 2002, 176

Zum besseren Verständnis der Aussagen in Abbildung 49 werden die Energieketten nun etwas näher betrachtet:

Als Beispiel für eine konventionelle Energiekette dient die Herstellung von Benzin aus Rohöl und die anschließende Wandlung im Ottomotor (Spalte 1 in Abbildung 49). Der Herstellungswirkungsgrad von Benzin liegt zwischen 76% und 82% (Gerl 2002, 172). Wird dieser multipliziert mit dem Wandlungswirkungsgrad eines modernen Ottomotors mit angenommenen 25% ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad der Kette im Bereich von 18 bis 21%.

Die Herstellungsketten zur Erzeugung von Wasserstoff aus Erdgas schneiden im Vergleich zur Benzin-Herstellungskette schlechter ab. Beispielsweise liegt der Wirkungsgrad zur Bereitstellung von 700 bar Druckwasserstoff aus Erdgas bei dezentraler H₂-Produktion im Bereich von 48 bis 56%. Bei zentraler Erzeugung fallen keine Transportverluste an und der Wirkungsgrad liegt zwischen 54 und 63%. (ebenda). Bei einem angenommenen Wandlungswirkungsgrad des Brennstoffzellen-Antriebs von 35 bis 40% ergeben sich damit Werte im Bereich von 17 bis 25%. Diese Werte korrespondieren gut mit dem Balken für das Jahr 2003 in Spalte 5.

Die Verflüssigung von Wasserstoff ist mit einem deutlich höheren Energieaufwand als die 700 bar Verdichtung verbunden, der Herstellungswirkungsgrad von LH₂ liegt zwischen 21 und 28% (ebenda). Entsprechend fällt auch die Gesamtbilanz in Spalte 6 schlechter aus.

Methanol kann aus Erdgas mit einem Wirkungsgrad von 62 bis 66% (ebenda) gewonnen werden. Dies ist effizienter als die Erzeugung von Druckwasserstoff. Allerdings geht dieser Vorteil bei der Wandlung wieder verloren, da Verluste bei der H₂-Erzeugung im Methanolreformer im Fahrzeug anfallen. Der Well-to-Wheel-Wirkungsgrad für Methanol (Spalte 7) liegt 2003 in einem ähnlichen Bereich wie der Wert für komprimierten Wasserstoff.

Die Verwendung von Methanol aus Erdgas im Verbrennungsmotor ist energetisch am ungünstigsten (Spalte 2). Hier wäre sicherlich die direkte Verwendung von Erdgas sinnvoller.

Wird Methanol allerdings aus Biomasse gewonnen, so stellt dies zwar keine gesamtenergetisch optimale Lösung dar, ist aber dennoch ökologisch nachhaltig. Generell ist zu sagen, dass der Wirkungsgrad für eine Energiekette lediglich Auskunft über die Effizienz des Rohstoffeinsatzes gibt und keine Aussage über die ökologische Tragweite trifft.

Naphtha (Spalte 4) ist ein synthetischer Kraftstoff der bei der Refinement von Erdöl oder Erdgas gewonnen werden kann.

Die großen Wirkungsgradintervalle bei der Energiekettenbetrachtung zeigen die Komplexität der Energieketten-Thematik.

Innovationsmuster

Abbildung 50 zeigt das Brennstoffzellen-Cluster der Innovations-Matrix. In der Clusterbeschreibung wurde bereits dargestellt, dass über Reformertechnologie Wasserstoff prinzipiell aus jeglichen Kohlenwasserstoffverbindungen (k=1 bis 12) gewonnenen werden kann. Daher umspannt dieses Cluster ebenso wie das Hybrid-Cluster vier Innovationsbereiche. Die Bereiche 1 bis 3 zählen zur Strukturvariante 2 und repräsentieren die Fahrzeuge mit On-board-Reformierung. Im Bereich 4 liegen die direkt Wasserstoff tankenden Fahrzeuge der Strukturvariante 2.

Cluster 5 der Innovations-Matrix

Kraftstoff (k) Antrieb (a)		CO ₂ -emittierende Kraftstoffe					CO ₂ -neutrale Kraftstoffe					C-freie Kraftstoffe				
		Konventionell		Nicht-konventionell			Semi-alternativ					Alternativ				
		Kohlenwasserstoffe			SynFuels		Öle		Alkohole		Gase	Strom	Wasserstoff			
		Diesel (1)	Benzin (2)	Autogas LPG (3)	Erdgas LNG (4)	Erdgas CHG (5)	GTL (6)	BTL (7)	Bio-Diesel (RME) (8)	Pflanzen-öle (9)	Bio-Ethanol (10)	Bio-Methanol (11)	Biogas (12)	(13)	Wasserstoff LH ₂ (14)	Wasserstoff CGH ₂ (15)
EL-Antriebe	Alternativ															
	Brennstoffzellen-Elektroantrieb (8)	/ 1 /	/	/ 2 /	/	/	/	/	/ 3 /			/	X	4		
												Strukturvariante 1		Strukturvariante 2		

Abbildung 50, Quelle: eigene Darstellung

Das Innovationsmuster im Brennstoffzellen-Cluster hängt von der Kraftstoffwahl ab. Der Brennstoffzellen-Antrieb selbst stellt eine radikale Innovation dar, so dass die Innovativität der gesamten Fahrzeug-Konfiguration vom Kraftstoff abhängig ist.

Folgende Innovationsmuster liegen in den vier Bereichen vor.

- Bereich 1 stellt heute noch einen Inventionsbereich dar. Eventuelle Innovationen in diesem Bereich würden zu inkrementalen Innovationen 1. Grades führen, da ein konventioneller Kraftstoff mit dem alternativen Brennstoffzellenantrieb »gepaart« wird. Die On-board-Benzinreformierung wäre hierfür ein Beispiel.

- Die Entwicklungen im Bereich 2 bewegen sich ebenfalls noch im Inventionsbereich. Im Unterschied zu Bereich 1 würden aber zukünftige Innovationen bereits zu radikalen Innovationen 1. Grades führen, da in Bereich 2 von der heutigen Konvention abweichende Kraftstoffe Einsatz finden.
- Innovationen im Bereich 3 stellen radikale Innovation 2. Grades dar, da in diesem Bereich CO₂-neutrale Kraftstoffe vorliegen. Die Fahrzeug-Konfiguration F_{8/11} stellt die On-board-Reformierung von Bio-Methanol dar. In der Clusterbeschreibung wurde bereits dargestellt, dass die Methanolreformierung als Innovation anzusehen ist und in dem Versuchsfahrzeug NECAR V von DaimlerChrysler auch erfolgreich demonstriert wurde.
- Der Wasserstoff liegt im Bereich 4 und führt zu den beiden radikalen Fahrzeugkonfigurationen F_{8/14} und F_{8/15}. Sie können als radikale Innovation 1. oder 2. Grades vorliegen. Wie auch bei den anderen Clustern gibt der Grad Auskunft über die ökologische Qualität des Wasserstoffs.

Wird die Brennstoffzelle mit Strom (k=12) betrieben, wird der Brennstoffzellenprozess quasi umgedreht und die Brennstoffzelle arbeitet als Elektrolysezelle und produziert Wasserstoff. Technologisch ist dies bei geeigneter Membranwahl im weiteren Sinne denkbar. Für den Antrieb eines Elektromotors macht aber der Umkehrprozess technologisch keinerlei Sinn und daher ist das Feld mit einem „x“ gekennzeichnet.

Beispielmodelle

Bei den folgenden drei Fahrzeugen handelt es sich um Brennstoffzellenfahrzeuge, die in Feldversuchen bereits erprobt wurden. Dabei wird jeweils ein Beispiel für die drei mit Innovationen belegten Felder F_{8/11}, F_{8/14} und F_{8/15} im Cluster 5 gewählt. Dies sind:

- Die »f-cell« von DaimlerChrysler. Bei dem Fahrzeug handelt es sich um eine brennstoffzellenbetriebene A-Klasse mit Druckwasserstoffspeicher. Dies ist ein Fahrzeug der Konfiguration F_{8/15}.
- Der »Hydrogen3« basiert auf dem Opel Zafira und kann mit Flüssigwasserstoff betankt werden. Er ist der Fahrzeug-Konfiguration F_{8/14} zuzuordnen.
- Als drittes Beispiel wurde der »NECAR V« gewählt, um das Methanol-Konzept zu illustrieren. Es handelt sich erneut um eine brennstoffzellenbetriebene A-Klasse, diesmal aber mit On-board-Methanolreformer. Der Prototyp ist im Feld F_{8/11} zu finden.

Beispielmodelle zu Cluster 5




Kennwerte		Daimler	Opel	Daimler
				
Modell		f-cell (A-Klasse)	Hydrogen 3 liquid (Zafira)	NECAR V (A-Klasse)
Fahrzeug-Konfiguration		F 8/15	F 6/14	F 8/11
Klassifikation		Strukturvariante 1	Strukturvariante 1	Strukturvariante 2
Entwicklungsstand		Felderprobung seit 2002	Präsentation Dez. 2002	Entwicklung eingestellt 2001
Motordaten E-Motor	Typ	Drehstrom-Asynchron	Drehstrom-Asynchron	Drehstrom-Asynchron
	Nennleistung [kW]	65 ^a	60 ^d	55 ^a
	Nennrehm.[Nm]	210 ^b	215 ^d	k.A.
Daten Brennstoffzelle	Typ	PEFC	PEFC	PEFC
	Hersteller	Ballard Mark 902 ^a	General Motors	Ballard Mark 900 ^a
	Nennleistung [kW]	85 ^a	94 ^d	75 ^a
Batterie	Typ	NiMh ^b	k.A.	k.A.
	Nenneleistung	20 ^b	k.A.	k.A.
Kraftstoff		CGH ₂ (350bar) ^a	LH ₂ ^d	Methanol ^a
Tankinhalt	[kg], [Liter]	1,8 kg ^a	4,6 kg ^d	25 Liter ^a
Verbrauch	[Liter/100km]	4,2 l Diesel aquiv. ^c	k.A.	k.A.
Reichweite	[km]	160 ^a	400 ^d	480 ^a
Höchstgeschw.	[km/h]	145 ^a	160 ^d	150 ^a
Beschleunigung	0-100 km/h [sec]	16 ^c	16 ^d	k.A.
Leergewicht	[kg]	k.A.	1590 ^d	ca.1450 ^e
CO₂-Ausstoß	[g/km]	0	0	0
Preis	[EUR]	1.000.000 ^a	k.A.	k.A.

Abbildung 51, Quellen: eigene Darstellung; ^a Geitmann 2006, 53; ^b Docter/Fleck/ Frank 2005; ^c Hybrid-Autos 2006; ^d GM 2006; ^e HyCar 2006b

Die nächste Entwicklungsgeneration stellt bei DaimlerChrysler die Umrüstung einer B-Klasse auf Brennstoffzellenantrieb dar. Im Vergleich zur A-Klasse ist geplant, das Fahrzeug mit einem Elektromotor mit 100kW Leistung und entsprechend größeren Brennstoffzellen auszurüsten. Als Energiepuffer wird anstatt der Nickel-Metallhydrid-Batterie eine Lithium-Ionen-Batterie zum Einsatz kommen. Der Wasserstoff soll auf 700 bar verdichtet werden, so dass die Reichweite der B-Klasse 400 km betragen wird. Eine Lebensdauer von 2.000h und ein Kaltstart auf 50% der Leistung in 8 sec bei -15°C wird anvisiert. (Docker/Fleck/Frank 2005).

Marktchancen

2004 befanden sich ca. 350 Brennstoffzellen-Fahrzeuge weltweit in der Demonstrations- und Erprobungsphase. Weitere 30 Stadtbusse bewähren sich in zehn europäischen Städten im Alltagsbetrieb. Alle namhaften Automobilhersteller haben kleine Flotten mit bis zu sechzig Fahrzeugen aufgebaut, um diese auf Alltagstauglichkeit zu prüfen. (BZ-Bündnis 2004, 3)

Die obigen Betrachtungen haben gezeigt, dass die Systemintegration der Brennstoffzellen erfolgreich nachgewiesen werden konnte und die Dynamik der Fahrzeuge den Ansprü-

chen an ein modernes Automobil genügt. Mit der neuen 700 bar Speichertechnik erscheint das Reichweitenproblem lösbar und Stack-Lebensdauern über 2.000 Stunden konnten erreicht werden. Der Entwicklungsschwerpunkt liegt kraftstoffseitig vor allem in der Systemanpassung an die 700 bar Druckwasserstoffspeicherung. Antriebsseitig wird versucht, über Hochtemperatur-PEM-Zellen die Stacktemperatur zu erhöhen um damit die Lebensdauer der Stacks weiter zu steigern. Bis zur Markteinführung wird mindestens noch ein fünfjähriger Entwicklungszyklus notwendig sein, so dass mit einer Markteinführung nicht vor 2012 zu rechnen ist.

Erfolg oder Misserfolg der Markteinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen wird vermutlich nicht primär von der weiteren Brennstoffzellenentwicklung abhängig sein, sondern vielmehr von der Frage, ob sich Wasserstoff als neuer Kraftstoff etablieren kann oder nicht. Grundvoraussetzung hierfür ist ein klares Kommitment der Automobilindustrie zum Wasserstoff, der Wille der Ölkonzerne die notwendige Tankinfrastruktur aufzubauen und natürlich der notwendige Rückenwind seitens der Politik. Der Zwang zum Handeln wird mit steigenden Ölpreisen und wachsenden Klimaproblemen bei allen Akteuren zunehmen.

6. Bilanz und Agenda

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ausgehend von einer Beschreibung der Automobilitäts-Maschine und dem auf ihr lastenden Innovationsdruck die Innovationen beim Umbau dieser Maschine aus einer interdisziplinären Perspektive zu sichten und zu systematisieren. Dabei lag der Fokus dieses Systematisierungsversuchs auf den ding-technischen Innovationen.

Das Fazit dieser Analyse wird nun in diesem abschließenden Kapitel in zwei Schritten gezogen: In einem ersten Schritt werden zunächst die Hauptergebnisse der Untersuchung in komprimierter Form bilanziert. Ausgehend davon wird dann in einem zweiten Schritt eine stichpunktartige Agenda für eine weiterführende innovationstheoretische Analyse der Automobilitäts-Maschine skizziert.

Bilanz

Das Auto ist das paradigmatische Produkt der fossilen Mobilitätsgesellschaft und das Symbol der Moderne schlechthin. Aus soziologischer Perspektive kann diese herausragende Rolle des Automobils als ein sozio-technisches Regime verstanden werden, und zwar ein Regime, das auf Grund seiner Stabilität, Regidität und Funktionalität nicht nur maschinenhafte Züge trägt, sondern selbst die Gestalt einer sozialen Maschine angenommen hat.

Diese Automobilitäts-Maschine gerät zunehmend unter einen dreifachen Innovations-Druck: erstens im Hinblick auf die Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe, insbesondere von Rohöl; zweitens in Bezug auf die Emission von Treibhausgasen und die daraus resultierenden Klimaveränderungen; und drittens schließlich hinsichtlich der ebenso breiten wie tiefgehenden Verflechtung der Automobilitäts-Maschine mit den Kernstrukturen moderner Gesellschaften.

Dieser dreifache Innovationsdruck konzentriert sich auf den Umbau des harten ding-technischen Kerns der Automobilitäts-Maschine, also auf den klassischen Verbrennungsmotor. Hier wurde im letzten Jahrzehnt eine Vielzahl von Innovationen in Angriff genommen, um diesen technischen Kern umzubauen, und zwar sowohl antriebs- als auch kraftstoffseitig.

Mit Blick auf diese Innovations-Praxis und gestützt auf innovationstheoretische Überlegungen lässt sich eine zweidimensionale Innovations-Matrix entwickeln, die es ermöglicht, sowohl die antriebs- und kraftstoffseitigen Innovationen beim Umbau der Automobilitäts-Maschine als auch die dadurch jeweils definierten Fahrzeug-Konfigurationen zu erfassen und zu systematisieren.

Mit Hilfe einer solchen Innovations-Matrix lassen sich sieben verschiedene Konfigurations-Niveaus ausmachen, nämlich

Konfigurationen, die technologisch ausgeschlossen sind,

- Inventionsräume, also Konfigurationen, die technologisch möglich sind, aber noch nicht das Stadium von Innovationen erreicht haben,
- stagnovative Innovationen, also Innovationen, die sowohl antriebs- als auch kraftstoffseitig konventionelle Fahrzeugkonfigurationen nicht überwinden, sondern lediglich optimieren,
- inkrementale Innovationen 1. Grades, also Innovationen, die entweder antriebs- oder kraftstoffseitig konventionelle Fahrzeugkonfigurationen überwinden, die jedoch nur modular und nicht systemisch innovativ sind,
- inkrementale Innovationen 2. Grades, also Innovationen, die entweder antriebs- oder kraftstoffseitig konventionelle Fahrzeugkonfigurationen überwinden und die darüber hinaus nicht nur modular, sondern auch systemisch innovativ sind,
- radikale Innovationen 1. Grades, also Innovationen, die sowohl antriebs- als auch kraftstoffseitig konventionelle Fahrzeugkonfigurationen überwinden, die jedoch nur modular und nicht systemisch innovativ sind,
- radikale Innovationen 2. Grades, also Innovationen, die nicht nur sowohl antriebs- als auch kraftstoffseitig konventionelle Fahrzeugkonfigurationen überwinden, sondern die darüber hinaus sowohl modular als auch systemisch innovativ sind.

Ausgehend von diesen sieben Konfigurations-Niveaus kristallisieren sich fünf Innovations-Cluster heraus, die für den Umbau der Automobilitäts-Maschine von besonderer Bedeutung sind. Im Einzelnen sind dies: nichtalternative Verbrennungsmotoren, Wasserstoff-Verbrennungsmotoren, Hybrid-Antriebe, Batterie-Elektroantriebe und Brennstoffzellen-Elektroantriebe.

Lässt man nun noch einmal die Innovations-Matrix und deren Cluster-Analyse Revue passieren, dann zeichnen sich dabei fünf Ergebnisse ab, die sowohl aus innovationspraktischer als auch aus innovationstheoretischer und innovationsmethodologischer Perspektive von besonderem Interesse sind: Erstens dominieren bislang beim Umbau der Automobilitäts-Maschine die stagnovativen und inkrementalen Innovationen. Zweitens gibt es eine Vielzahl von Inventionsräumen, die bisher kaum oder gar nicht systematisch erschlossen und bewertet wurden. Drittens haben sich drei »Brücken«-Konfigurationen herausgebildet, die für einen radikalen Umbau der Automobilitäts-Maschine von besonderer Bedeutung sind, näm-

lich Wasserstoff-Verbrennungsmotoren («Kraftstoff-Brücke»), Hybrid-Antriebe («Antriebs-Brücke») und Batterie-Elektroantriebe («Insel-Brücke»). Viertens überwiegen gegenwärtig die Innovationen 1. Grades während Innovationen 2. Grades, also Innovationen, die nicht nur modular, sondern auch systemisch nachhaltig sind, eher die Ausnahme bilden. Fünftens schließlich erwies sich das diskursiv offene und analytisch flexible Instrument der Innovations-Matrix bei der Systematisierung der ding-technischen Innovationen als leistungs- und ausbaufähig.

Ausgehend von dieser sehr komprimierten Bilanz ergibt sich folgende Agenda für eine weiterführende innovationstheoretische Analyse:

Agenda

In der vorliegenden Untersuchung wurde an den verschiedensten Stellen explizit und implizit immer wieder deutlich, dass sowohl eine Vertiefung als auch eine Erweiterung der innovationstheoretischen Analyse des Umbaus der Automobilitäts-Maschine nicht nur möglich, sondern auch zwingend notwendig sind. Dies betrifft insbesondere folgende sechs Schwerpunkte:

- *Die Modifizierung der Innovations-Matrix.* Die hier zur Diskussion gestellte zweidimensionale Innovations-Matrix trägt exemplarischen und prototypischen Charakter. Sie lässt sich sowohl in der Antriebs- als auch in der Kraftstoff-Dimension nach unterschiedlichen innovationspraktischen und innovationstheoretischen Bedürfnissen modifizieren. Dabei wäre es denkbar und wünschenswert, dass derartige Modifikationen von beiden Seiten, den Theoretikern und Praktikern, entwickelt werden, und zwar so, dass die Innovations-Matrix nicht nur als Analyse-Instrument sondern auch als Kommunikations-Tool verwendet werden kann.
- *Die laufende Aktualisierung der Innovations-Matrix.* Das ebenso breit gefächerte wie tief gestaffelte Feld der beim Umbau der Automobilitäts-Maschine entwickelten Innovationen ist nicht nur hoch dynamisch sondern auch durch jähle Wenden (Stichwort Hybrid-Antriebe) gekennzeichnet. Mit wachsendem Innovations-Druck werden sowohl die Dynamik als auch plötzliche Richtungswechsel zunehmen. Eine permanente Aktualisierung der vorgestellten oder entsprechend modifizierter Matrizen ist deshalb unumgänglich.
- *Die ding-technische Ergänzung der Analyse.* Die vorliegende Untersuchung der bislang beim Umbau der Automobilitäts-Maschine entwickelten ding-technischen Innovationen konzentrierte sich auf das Auto. Andere Fahrzeugtypen, wie Busse, Lastkraftwagen, Motorräder, Mopeds, Gabelstapler usw. wurden dabei nur am Rande oder gar nicht betrachtet. Da diese und andere Fahrzeugtypen sowohl im Rahmen der gesellschaftlichen Mobilität insgesamt als auch im Hinblick auf die Etablierung und Durchsetzung von Nischen-Innovationen eine wichtige Rolle spielen, sind sie bei einer weiterführenden Analyse unbedingt zu beachten.
- *Die technik-typologische Erweiterung der Analyse.* Die vorliegende Untersuchung war von Anfang an auf die ding-technischen Innovationen beim Umbau der Automobilitäts-Maschine fokussiert. Andere Techniktypen, wie die Bedeutungs-, Selbst- und

Macht-Techniken wurden dabei zunächst völlig ausgeblendet. In einer weiterführenden Analyse muss diese Perspektive erweitert und ergänzt werden, denn Dynamik, Richtung und Barrieren der ding-technischen Innovationen sind letztlich nur im Ensemble mit den entsprechenden bedeutungs-, macht- und selbst-technischen Innovationen verständlich. So sind beispielsweise solche Selbst-Techniken wie Fahrstil, Fahrgewohnheiten oder Verkehrsmittelwahlverhalten für die Akzeptanz von ding-technischen Innovationen von zentraler Bedeutung.

- *Die Systematisierung der Analyse.* Bei der Untersuchung der aus dem Innovationsdruck resultierenden Innovationen standen die antriebs- und kraftsofftechnologischen Innovationen sowie die sich daraus ergebenden Fahrzeug-Konfigurationen im Mittelpunkt der Aufmerksamkeit. Bei einer weiterführenden Analyse muss der Untersuchungshorizont in zweierlei Hinsicht systemisch präzisiert und systematisiert werden: Zum Einen was die ökologische Reichweite von Innovationen anbelangt (Stichwort Output-Druck), zum Anderen in Bezug auf jene Innovationen, die die Verflechtung der Automobilitäts-Maschine mit den Kernstrukturen moderner Gesellschaften betreffen (Stichwort Verflechtungs-Druck).
- *Die »Dynamisierung« der Analyse.* Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine technik-soziologische Systematisierung vorhandener Innovationen. Sie stellt eine mehr oder weniger statische Bestands- und Momentaufnahme der beim Umbau der Automobilitäts-Maschine zu beobachtenden Innovationsprozesse dar. Die Dynamik dieser Prozesse blieb dabei zunächst weitgehend unbeachtet. Dieses Defizit muss durch eine weiterführende, prozessfokussierte Innovationsanalyse beseitigt werden. Konzeptionell kann dabei insbesondere auf evolutionstheoretische Arbeiten zurückgegriffen werden, in denen das Verhältnis von Hyperselektion und Nischen-Entwicklung analysiert wird.

Eine Bearbeitung dieser Agenda ermöglicht und erfordert nicht nur eine interdisziplinäre und interinstitutionelle Kooperation, sondern bietet darüber hinaus auch die Chance, die Zusammenarbeit zwischen Innovations-Praktikern und Innovations-Theoretikern zu vertiefen und effizienter zu gestalten, um so den dringend notwendigen Umbau der Automobilitäts-Maschine weiter voranzutreiben und zu beschleunigen.

7. Bibliographie

- Abernathy, William J.; Clark, Kim B. (1985): Innovation: Mapping the Winds of Creative Destruction, In: Research Policy Vol. 14, No. 1, p. 3-22
- AEEC (Association for Emissions Control by Catalysts) (2006): Air Quality and Health Effects. Internet: http://www.aecc.be/de/Air_Quality_and_Health_Effects.html. Zugriff: 25.9.2006
- Altvater, Elmar (2006): Das Ende des Kapitalismus. In: Blätter für deutsche und internationale Politik, H. 2/2006, S. 171-182
- APTC (Air Power Technologies Corporation) (2006): Homepage. Internet: www.abgasfrei.eu Zugriff: 15.09.2006
- ASPO (Association for the Study of Peak Oil&Gas) (2006): Homepage. Internet: www.peakoil.net Zugriff: 08.08.2006
- Auner, Norbert (2004): Silicium als Bindeglied zwischen Erneuerbaren Energien und Wasserstoff. In: Deutsche Bank Research, Research Notes, Working Paper Series Nr. 11, 20. April 2004
- Autobild (2005): Citroen C3 „Stop & Start“ – Einfach mal abschalten. Artikel, Internet: www.autobild.de/aktuell/meldungen/artikel.php?artikel_id=9895. Zugriff 31.8.2006
- AutoBild (2006a): Test Opel Zafira CNG - Volltanken für 18 Euro. Testbericht in AUTO BILD 17/2006. Internet: www.autobild.de/aktuell/reportagen/artikel.php?artikel_id=11320&artikel_seite=1. Zugriff: 31.01.2007
- AutoBild (2006b): Test Alfa Brera gegen Mazda RX-8 - Kunst kommt von Können. Testbericht in AUTO BILD 6/2006. Internet: www.autobild.de/test/neuwagen/artikel.php?artikel_id=10784&artikel_seite=2. Zugriff: 31.01.2007
- Autoinsidernews (2007): VW working on combustion engine for the future. Internet: www.autoinsidernews.com/2006/12/17/vw-working-on-combustion-engine-of-the-future. Zugriff: 15.01.2007
- Auto-Reporter (2006): Mazda RX-8 Hydrogen feiert Europa-Premiere. Pressemitteilung, Internet: www.auto-reporter.net/artikel.las?katsearch=1&subkatsearch=182&subsubkatsearch=&artikel=16687. Zugriff: 04.10.2006
- Avlonitis, George J.; Papastathopoulou, Paulina G.; Gounaris, Spiros P. (2001): An empirically-based typology of product innovativeness for new financial services: Success and failures scenarios. In: Journal of Product Innovation Management, Vol. 18, No. 5, p. 324-342
- Bady, Ralf (2000): Hybrid-Elektrofahrzeuge – Strukturen und Entwicklungen. Vortrag, 6. Symposium Elektrische Straßenfahrzeuge. Technische Akademie Esslingen.
- Barben, Daniel (1996): Theorietechnik und Politik bei Niklas Luhmann. Grenzen einer universalen Theorie der modernen Gesellschaft, Opladen: Westdeutscher Verlag
- BDI (Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.) (2006): Positionspapier. Industriezölle senken! Warum die deutsche Industrie von der Doha-Runde substanzielle Verbesserungen beim Marktzugang erwartet. Internet: www.bdi-online.de/sbrecherche/infostartpage.asp?Infold=% Zugriff: 05.07.2006
- Becker, Kai (2004): Innovation und Biotechnologie. Eine Betrachtung zyklischer Entwicklungen mit der Theorie der langen Wellen. Internet: www.zhb-flensburg.de/dissert/becker/becker.pdf. Zugriff: 24.07.2006
- Bellman, Klaus; Haritz, André (2001): Innovation in Netzwerken. In: Blecker, Thorsten; Gemünden, Hans G. (Hg) (2001): Innovatives Produktions- und Technologiemanagement: Festschrift für Bernd Kaluza, Berlin et al.: Springer, S. 271-298

- Berkhout, Frans; Smith, Adrian; Stirling, Andy (2003): Socio-technological regimes and transition contexts. SPU Electronic Working Paper. Internet: [www.sustainabletechnologies.ac.uk/PDF/Working Papers/FB1.pdf](http://www.sustainabletechnologies.ac.uk/PDF/Working%20Papers/FB1.pdf). Zugriff: 19.06.2006
- Berman, Marshall (1988): All That Is Solid Melts Into Air. The Experience of Modernity, Harmondsworth: Penguin
- Billing, Fabian (2003): Koordination in radikalen Innovationsvorhaben, Wiesbaden: Universitäts-Verlag
- Biol, Fatih (2002): World Oil Outlook to 2030. Internet: <http://www.iea.org/textbase/speech/2001-2002/biol.pdf> Zugriff: 09.08.2006
- Bisio, Attilio; Sharon Boots (Hg.) (1995): Encyclopedia of energy technology and the environment. New York: John Wiley & Sons. Internet: www.energieinfo.de/eglossar/node29.html, Zugriff: 14.09.2006
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2003): Herausforderung Klimawandel. Internet: www.bmbf.de/pub/klimawandel.pdf. Zugriff: 03.08.2006
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2006): Innovation – mehr als technischer Fortschritt. Internet: www.bmbf.de/de/1316.php. Zugriff: 26.07.2006
- BMW (2004): BMW zeigt in Wien die Antriebsstrategie der Zukunft. Pressemitteilung, Internet: <http://7er.com/news/wmview.php?ArtID=296>. Zugriff: 01.11.2006
- BMW (2006a): Der BMW Hydrogen 7 – eine neue Ära der Mobilität. Pressemitteilung, Internet: www.7-forum.com/news/Der-BMW-Hydrogen-7-eine-neue-Aera-der-Mo-1285.html. Zugriff: 10.10.2006
- BMW (2006b): Der BMW Hydrogen 7. BMW Medien-Dokumentation 11/2006.
- Boklisch, Steffen F. (1987): Prozeßanalyse mit unscharfen Verfahren. Berlin: VEB Verlag Technik
- Borchert, Jan; Goos, Philipp; Hagenhoff, Svenja (2003): Innovations- und Technologiemanagement: Eine Bestandsaufnahme. Institut für Wirtschaftsinformatik. Georg-August-Universität Göttingen. Arbeitsbericht Nr. 4/2003
- Bosch (2005): Bosch-Geschäftsführer Dr. Siegfried Dais auf der 75-Jahr-Feier des FKFS in Stuttgart: "Alle zehn Jahre wird das Auto neu erfunden". Pressemitteilung, Internet: www.cardor.de/nachrichten/anzeigen.php?id=705, Zugriff: 12.09.2006
- Boyer, Robert (2001): The Economist Confronted by Epochal Innovations: The Relationships between History and Theory, BRIE Working Paper 150, University of California
- Braun, Michael; Feige, Andreas; Sommerlatte, Tom (Hg.) (2001): Business Innovation: Quantensprung statt „Innovationchen“. Ein Wegweiser zur zielgerichteten Geschäfts-erneuerung. Frankfurt/Main: F.A.Z.-Institut
- Braun-Thürmann, Holger (2005): Soziologie der Innovation. Themen der Soziologie. Bielefeld: transcript verlag
- Brozen, Yale (1951): Invention, Innovation, and Imitation. In: The American Economic Review, Vol. 41, No. 2, Papers and Proceedings of the Sixty-third Annual Meeting of the American Economic Association (may, 1951), p. 239-257
- Budd, Geoff (2006): A fuel cell bus project for Europe – Lessons learned from a fuel cell perspective. Vortrag, CUTE-Abschlusskonferenz. 22.5.2006, Hamburg.
- Buhr, Regina; Canzler, Weert; Knie, Andreas; Rammler, Stephan (Hg.) (1999): Bewegende Moderne. Fahrzeugverkehr als soziale Praxis. Berlin: edition sigma
- Bundesregierung (2006): Mehr Biokraftstoff in den Tank. Mitteilung vom 24.11.2006. Internet: www.bundesregierung.de/nn_1274/Content/DE/Artikel/2006/11/2006-10-26-mehr-biokraftstoff-in-den-tank.html. Zugriff: 24.01.2006

- BZ-Bündnis (Brennstoffzellen-Bündnis Deutschland) (2004): Markteinführungsstrategie: Zukunftssicherung durch innovative Energieversorgung, neue Arbeitsplätze und nachhaltigen Umweltschutz. Internet: www.bz-buendnis.de/20041208_Markteinfuehrungsstrategie.pdf. Zugriff: 06.11.2006
- Canzler, Weert (1996): Das Zauberlehrlings-Syndrom. Entstehung und Stabilität des Automobil-Leitbildes. Berlin: edition sigma
- Canzler, Weert (1997): Der Erfolg des Automobils und das Zauberlehrlings-Syndrom. In: Dierkes, Meinolf (Hg.) (1997): Technikgenese. Befunde aus einem Forschungsprogramm. Berlin: edition sigma, S. 99-129
- Canzler, Weert; Knie, Andreas (1994): Das Ende des Automobils. Fakten und Trends zum Umbau der Autogesellschaft. Heidelberg: C. F. Müller
- Canzler, Weert; Knie, Andreas (1998): Möglichkeitsräume. Grundrisse einer modernen Mobilitäts- und Verkehrspolitik. Wien/Köln/Weimar: Böhlau
- Canzler, Weert; Knie, Andreas; Marz, Lutz (2006): „Osten erglüht, China ist jung ...“. China als Katalysator einer postfossilen Mobilitätskultur? In: Informationen zur Raumentwicklung, H 8/2006, S. 439-446
- Canzler, Weert; Marz, Lutz (1997): Stagnovation. Der Automobilpakt und die gedopte Arbeitsgesellschaft. In: Universitas, Vol. 52, H. 610, S. 359-371
- Canzler, Weert; Marz, Lutz (2004): Mobil mit innovativen Antrieben? In: politische Ökologie, Jg. 22, H. 87/88, S. 111-112
- Canzler, Weert; Schmidt, Gert (Hg.) (2003): Das zweite Jahrhundert des Automobils. Technische Innovationen, ökonomische Dynamik und kulturelle Aspekte. Berlin: edition sigma
- Carle, Gian (2002): Brennstoffzellen für den Automobilbau im Wettbewerb. ETH, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau (IVT). Internet: http://e-collection.ethbib.ethz.ch/ecol-pool/dipl/dipl_81.pdf. Zugriff: 13.03.2007.
- CEP (Clean Energy Partnership) (2006): Homepage. Internet: www.cep-berlin.de/Fahrzeuge_bmw.html, Zugriff: 20.08.2006
- Choice (2002): Toyota Prius bei Stattauto – Management Summary. Untersuchung der choice mobilitätsproviding GmbH. (unveröffentlichtes Manuskript)
- ConNeCat (Competence Network Catalysis) (2006): Eine Schlüsseltechnologie für nachhaltiges Wirtschaftswachstum, Roadmap der deutschen Katalyseforschung. 2. Auflage, Februar 2006.
- Daimler Chrysler (2006): smart fortwo ev. Pressemitteilung auf Informationsportal alternativ-fahren, Internet: www.alternativ-fahren.de/Elektroantrieb/News/elektro_antrieb_beim_fortwo.shtml. Zugriff: 02.11.2006
- DaimlerChrysler (2005): Globale Allianz bei Hybrid-Antriebsentwicklung – BMW, DaimlerChrysler und General Motors kooperieren. Pressemitteilung, Internet: www.daimlerchrysler.com/dccom/0-5-7153-49-539536-1-0-0-0-0-0-0-8-7145-0-0-0-0-0-1.html. Zugriff: 23.09.2006
- Debus, Christian (2002): Routine und Innovation. Management langfristigen Wachstums etablierter Unternehmungen. Marburg Förderzentrum für Existenzgründer aus der Universität (Mafex), Band 4, Marburg: Mafex
- Deutsch, Karl (1949): Innovation, Entrepreneurship and the Learning Process, In: Change and the Entrepreneur, p. 24-29
- Diepresse (2006): Homepage. Internet: <http://www.diepresse.com/Artikel.aspx?channel=s&ressort=mo&id=592527>. Zugriff: 26.10.2006

- Dierkes, Meinolf (Hg.) (1997): Technikgenese. Befunde aus einem Forschungsprogramm. Berlin: edition sigma
- Dierkes, Meinolf et al. (2006): Abschied vom Hyperwachstum. Chinas neue Elite strebt die Wende zur Wissensgesellschaft an. In: WZB-Mitteilungen, H. 112 Juni 2006, S. 27-29
- Dinges, Manfred (2001): 4 Innovationsdimensionen. In: Braun, Michael; Feige, Andreas; Sommerlatte, Tom (Hg.) (2001): Business Innovation: Quantensprung statt „Innovatiönchen“. Ein Wegweiser zur zielgerichteten Geschäftserneuerung. Frankfurt/Main: F.A.Z.-Institut, S. 154-160
- Docter, Andreas; Fleck, Wolfram; Frank, Georg et al. (2005): Technical Status and Future Perspectives for PEM Fuel Cell Systems at DaimlerChrysler. Vortrag.
- DVFG (Deutscher Verband Flüssiggas e.V.) (2006a): Umwelt. Internet: www.autogastanken.de/index.php?session=sfpkovidgikupeecqjrv7uokb2&entryid=13. Zugriff 22.09.2006
- DVFG (Deutscher Verband Flüssiggas e.V.) (2006b): Vergleich der Abgasemissionen verschiedener Kraftstoffe. Schaubild, Internet: www.autogastanken.de/content/abgas.swf. Zugriff 22.09.2006
- DVFG (Deutscher Verband Flüssiggas e.V.) (2006c): Anzahl der Autogas-Fahrzeuge. Tabelle, Internet: www.autogastanken.de/index.php?session=dsok55b7lcbii2okp9l6g784d6&entryid=15. Zugriff 22.09.2006
- Ebeling, Werner, et al. (1999): Evolutions- und Innovationsdynamik als Suchprozeß in komplexen adaptiven Landschaften, In: Mainzer, Klaus (Hg.) (1999): Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft. Komplexitätsforschung in Deutschland auf dem Weg ins nächste Jahrhundert, Berlin: Springer, S. 446-473
- Ebeling, Werner; Feistel, Rainer (1982): Physik der Selbstorganisation und Evolution, Berlin: Akademie
- Elektroauto-Tipp (2006a): Elektroauto Geschichte. Internet: www.elektroauto-tipp.de/modules.php?name=Eautogeschichte&file=eautog1. Zugriff: 28.8.2006
- Elektroauto-Tipp (2006b): Elektroauto-Geschichte – Elektroautos vor 1900. Internet: www.elektroauto-tipp.de/modules.php?name=Eautogeschichte&file=eautog2. Zugriff: 01.11.2006
- e-Mobile (2006a): Prius II Erdgas – Modellinformation. Internet: www.e-mobile.ch/pdf/2006/ToyotaPrius-CNG_DW.pdf. Zugriff: 22.10.2006
- e-Mobile (2006b): Honda Civic 1.3 i-DSI Hybrid – Modellinformation. Internet: www.e-mobile.ch/pdf/2006/Fact-Sheet_HondaCivic-2006_DW.pdf. Zugriff: 22.10.2006
- e-Mobile (2006c): TOYOTA PRIUS – Modellinformation. Internet: www.e-mobile.ch/pdf/2006/Fact-Sheet_ToyotaPrius-2006_DW.pdf. Zugriff: 22.10.2006
- e-Mobile (2006d): Lexus GS 450h – Modellinformation. Internet: www.e-mobile.ch/pdf/2006/Fact-Sheet_Lexus-GS450h-2006_D.pdf. Zugriff: 22.10.2006.
- e-mobile (2006e). Twingo Quickshift Elettrica – Modellinformation. Internet: www.e-mobile.ch/pdf/2006/Fact-Sheet_TwingoElektra-2006_DW.pdf. Zugriff: 28.10.2006
- e-mobile (2006f). CityEL – Modellinformation. Internet: www.e-mobile.ch/pdf/2005/Fact-Sheet_CityEl_D.pdf. Zugriff: 28.10.2006
- Energieportal24 (2005): Hybrid-Technologie mit P1/2-Getriebe in neuer Mercedes-Benz S-Klasse. Internet: www.energieportal24.de/artikel_1188.htm. Zugriff: 22.01.2007
- Enquete-Kommission Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und Liberalisierung (2002): Endbericht der Enquete-Kommission

- „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und Liberalisierung“ Berlin: Deutscher Bundestag. Bundestagsdrucksache 14/9400
- EP (Europäisches Parlament) (2006): Strengere Abgasnormen für Kraftfahrzeuge: EP beschließt Euro 5- und Euro 6- Normen. Info – Verkehr – 13-12-2006 - 14:08. Internet: www.europarl.europa.eu/news/expert/infopress_page/062-1361-345-12-50-910-20061207IPR01151-11-12-2006-2006-false/default_de.htm. Zugriff: 24.1.2007
- Esso (2005): Oeldorado 2005. Internet: www.esso.de/ueber_uns/info_service/publikationen/downloads/files/oeldorado2005.pdf. Zugriff: 07.08.2006
- Fahrberichte (2006): Fahrbericht zum Mazda RX-8. Internet: www.fahrberichte.de/index.php?option=com_content&task=view&id=573&Itemid=27&limit=1&limitstart=4. Zugriff. 22.09.06
- FAZ (Frankfurter Allgemeine Zeitung) (2006): Neu vorgestellt: Honda Civic Hybrid – der sanfte Schub. Artikel, Internet: www.faz.net/s/Rub1DABC609A05048D997A5F315BF55A001/Doc~EFBBE5CD6FFC744FDB87B7B0FC5F02472~ATpl~Ecommon~Scontent.html. Zugriff: 22.10.2006
- FH-Stralsund (2006): Wasserstoff und die zukünftige Generation der Verbrennungsmotoren. Vortrag, Internet: www.7-forum.com/cleanenergy/h2-motoren.pdf. Zugriff: 28.09.2006
- FNR (Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e.V.) (2005): Biokraftstoffe. Internet: www.bio-kraftstoffe.info. Zugriff: 04.10.2006
- Foerster, Heinz von (1985): Sicht und Einsicht. Versuche zu einer operativen Erkenntnistheorie. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg & Sohn
- Foucault, Michel (1993): Technologien des Selbst. In: Martin, Luther H. (Hg.): Technologien des Selbst. Frankfurt/Main: Fischer, S. 24-62
- freenet (2006): Mercedes E 320 Bluetec: Blue-Probe. Internet: www.freenet.de/freenet/auto/hersteller/Mercedes-Benz/fahrberichte/7f0f2efe94a14_aa3397965d2f463a0ac_2.html Zugriff: 01.02.2007
- Frenken, Koen (2005): History, state and prospects of evolutionary models of technical change: a review with special emphasis on complexity theory. Internet: www.complexityscience.org/NoE/Frenkencomplexityreview.pdf. Zugriff: 17.08.2006
- Freund, Andreas (2006): Der Wankelmotor. Internet: www.der-wankelmotor.de/Wankelmotor/wankelmotor.html. Zugriff am 22.09.2006
- Friedell, Egon (2002): Kulturgeschichte der Neuzeit. Die Krisis der europäischen Seele von der schwarzen Pest bis zum Ersten Weltkrieg. Band 2, München: dtv
- Gambardella, Pascal (2006): Innovation Frameworks. Survey and Synthesis of Current Innovation Approaches. Internet: www.csc.com/aboutus/lef/mds67_off/uploads/2006InnovationFrameworksReport.pdf, Zugriff: 22.08.2006
- Garcia, Rosana; Calantone, Roger (2002): A critical look at technological innovation typology and innovativeness terminology: A literature review. Journal of Product Innovation Management, Jg. 19, H. 2, S. 110-132
- Geitmann, Sven (2004): Erneuerbare Energien & und alternative Kraftstoffe. Kremmen: Hydrogeit-Verlag
- Geitmann, Sven (2006): Wasserstoffautos: Was uns in Zukunft bewegt. Kremmen: Hydrogeit-Verlag
- Gerl, Bernhard (2002): Innovative Automobilantriebe – Konzepte auf der Basis von Brennstoffzellen, Traktionsbatterien und alternativen Kraftstoffen, Landsber/Lech: Verlag moderne Industrie.

- GM (2006): Technical Data of Hydrogen3 liquid. Internet: www.gmeurope.com/marathon/1/131_factsheet.htm. Zugriff: 01.02.2007
- Goldman Sachs Global Investment Research (2005): US Energy: Oil United States. March 30
- Gossen, Frank; Grahl, Marc (1999) : Vergleich von Brennstoffzellen und weiteren zukünftigen Antrieben hinsichtlich Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit. Beitrag zum 8. Aachener Fahrzeugkolloquium, 4.-6. Okt. 1999, S. 1251-1276
- Günther, Gotthard (1971): Die historische Kategorie des Neuen, In: Beyer, Wilhelm R. (Hg.): Hegel-Jahrbuch 1970. Meisenheim am Glan: Anton Hain, S. 34-61
- H₂Mobility (2006a): Homepage, Internet: www.h2mobility.org/1_cardata/c214.htm, Zugriff: 19.08.2006
- H₂Mobility (2006b): Cars, Ford Focus 'C-MAX'. Internet: www.h2mobility.org/1_cardata/c158.htm. Zugriff 04.10.2006
- Handelsblatt (2006): Hybrid mit Doppelherz. Artikel vom 24. Juli 2006. Internet: www.handelsblatt.com/news/printpage.aspx?_p=301626&_t=ftprint&_b=1109404. Zugriff: 31.09.2006
- Hartlieb, Jutta (2006): Feinstaub Streit – Tauziehen um Grenzwerte. Artikel in Spiegel-Online. Internet: www.spiegel.de/auto/werkstatt/0,1518,436017,00.html, Zugriff 08.09.2006
- Hauschildt, Jürgen (1993): Innovationsmanagement, München: Vahlen
- HBS (Hamburger Bildungsserver) (2006): Anthropogener Klimawandel. Internet: <http://hamburger-Bildungsserver.de/welcome.phtml?unten=/klima/klimawandel/ursachen.html>/ Zugriff: 09.08.2006
- Helm, Roland (2001): Planung und Vermarktung von Innovationen: Die Präferenz von Konsumenten für verschiedene Innovationsumfänge unter Berücksichtigung des optimalen Simulationsniveaus und marktbezogener Einflussfaktoren, Stuttgart: Schäffer-Poeschel
- Henderson, Rebecca M.; Clark, Kim B. (1990): Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms, In: Administrative Quarterly, Vol. 35, No. 1, p. 9-30
- Hofmann, Jeanette (1993): Implizite Theorien in der Politik. Interpretationsprobleme regionaler Technologiepolitik, Opladen: Westdeutscher Verlag
- Höhlein, Bernd (2004): Wasserstofflogistik – verteilen, speichern und betanken. In: FVS Themen 2004, S. 152-161
- Honda (2005): Über 100.000 verkaufte Honda-Hybridfahrzeuge. Pressemitteilung, Internet: www.honda.de/content/news/17506_39806.html. Zugriff: 23.10.2006
- Hybrid-Autos (1997): Fahrzeuge – Audi Duo. Internet: www.hybrid-autos.info/Audi-Duo-1997.html. Zugriff: 17.01.2007
- Hybrid-Autos (2004): Fahrzeuge – X5 Efficient Dynamics. Internet: www.hybrid-autos.info/BMW-X5-Efficient-Dynamics-2004.html. Zugriff 01.11.2006
- Hybrid-Autos (2006): f-cell A-Klasse 2002. Internet: www.hybrid-autos.info/Mercedes-F-Cell-A-Klasse-2002.html. Zugriff.01.02.2007
- HybridsPlus (2006a): Products – Prius04-PHEV-15-pnr. Internet: [/www.hybrids-plus.com/ht/Prius04-PHEV-15-pnr.html](http://www.hybrids-plus.com/ht/Prius04-PHEV-15-pnr.html). Zugriff: 27.10.2006
- HybridsPlus (2006b): Products – Prius04-PHEV-13-pnr. Internet: [/www.hybrids-plus.com/ht/Prius04-PHEV-13-pnr.html](http://www.hybrids-plus.com/ht/Prius04-PHEV-13-pnr.html). Zugriff: 27.10.2006
- HybridsPlus (2006c): Products list. Internet: www.hybrids-plus.com/ht/products.html. Zugriff: 27.10.2006

- HyCar (2006): Der Wasserstoff-Wankelmotor. Informationsseiten über Wasserstofffahrzeuge von Jürgen Kern. Internet: www.hycar.de/wankel.htm. Zugriff: 04.10.06
- HyCar (2006b): Fahrzeugkonzepte – Necar5. Internet: www.hycar.de/cars/necar5.htm. Zugriff: 01.02.2007
- Hyweb (1999): Brennstoffzellentaxi von ZEVCO. Internet: www.hyweb.de/Neuigkeiten/archiv398.html#Brennstoffzellentaxi. Zugriff: 08.11.2006
- HyWeb (2006): Industrie skizziert Schritte für eine europäische Wasserstoff-Infrastruktur. Pressemitteilung, Internet: www.hyweb.de/gazette. Zugriff: 02.10.2006
- IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung) (2004): CO₂-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe: Eine Bestandsaufnahme. H. R 523. Heidelberg
- IKA (Institut für Kraftfahrwesen Aachen) (2004): Aktivitäten des ika auf dem Gebiet „Fahrzeug-Hybridantriebe“. Internet: www.ika.rwth-aachen.de/pdf_eb/gb3-00-aktivitaeten-hybrid-antrieb.pdf?PHPSESSID=0a3d. Zugriff: 17.01.2007
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001): Climate Change 2001: Synthesis Report. Internet: <http://www.ipcc.ch> Zugriff: 05.08.2006
- ISE (Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme) (2002): Fraunhofer ISE entwickelt autotherme Benzinreformierung für Brennstoffzellen. Internet: www.diebrennstoffzelle.de/nachrichten/FraunhoferISEentwickeltautothermeBenzinreformierungfrBrennstoffzellen.shtml. Zugriff: 04.11.2006
- Jiménez-Montaño, Miguel. A.; Ebeling, Werner (1980): A Stochastic Evolutionary Model Of Technological Change. In: Collective Phenomena, 1980, Vol. 3, p. 107-114
- Jörissen, Ludwig; Aigle, Thomas; Pioch, Peter (2006): Brennstoffzellen im Fahrzeugbau. Vortrag, Basisseminar Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie, Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle. 12.10.2006, Ulm (unveröffentlichtes Manuskript).
- Jörissen, Ludwig; Garcke, Jürgen (2000): Brennstoffzellen für den Fahrzeugantrieb. In: Wengel, Jürgen; Schirmeister, Elna (Hg.): Innovationsprozess vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle – Chancen und Risiken für die baden-württembergische Industrie. Abschlussbericht. Karlsruhe, Februar 2000, S. 13-48.
- Jossen, Andreas (2006): Leiter Batteriesystementwicklung am Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg
- Jürgens, Ulrich; Meißner, Heinz-Rudolf (2005): Arbeiten am Auto der Zukunft. Produktinnovationen und Perspektiven der Beschäftigung. Berlin: edition sigma
- KBA (Kraftfahrtbundesamt) (2005): Jahresbericht 2005. Statistiken. Internet: www.kba.de/Stabsstelle/Presseservice/Jahrespressebericht/2005/Jahresbericht2005_Kfz_Statistik.pdf. Zugriff: 28.11.2006
- Keklik, Mümtaz (2003): Schumpeter, Innovation and Growth. Long-cycle dynamics in the post-WWII American manufacturing industries. Hampshire: Ashgate
- Kfz-tech (2006): Stichwort: Wirkungsgrad. Internet: <http://www.kfz-tech.de/Formelsammlung/Wirkungsgrad.htm>, Zugriff 28.08.2006
- Kirchhoff, Bruce A.; Walsh, Steven T. (2000): Entrepreneurship's Role in Commercialization of Disruptive Technologies, In: Brauchlin, Emil A.; Pichler, Johann H. (Hg.) (2000): Unternehmer und Unternehmensperspektiven für Klein- und Mittelunternehmen: Festschrift für Hans Jobst Pleitner, Berlin: Duncker&Humblot, S. 323-331
- Knie, Andreas (1991): Diesel – Karriere einer Technik. Genese und Formierungsprozesse im Motorenbau. Berlin: edition sigma
- Knie, Andreas (1994): Wankel-Mut in der Autoindustrie. Anfang und Ende einer Antriebsalternative. Berlin: edition sigma

- Knie, Andreas (1997): Technik als gesellschaftliche Konstruktion, Institutionen als soziale Maschinen. In: Dierkes, Meinolf (Hg.) (1997): Technikgenese. Befunde aus einem Forschungsprogramm. Berlin: edition sigma, S. 225-243
- Knie, Andreas (2003): Die Auto-Bahn: Intermodale Verkehrsdienstleistungen der Deutschen Bahn. In: Canzler, Weert; Schmidt, Gert (Hg.) (2003): Das zweite Jahrhundert des Automobils. Technische Innovationen, ökonomische Dynamik und kulturelle Aspekte. Berlin: edition sigma, S. 141-155
- Knie, Andreas (Hg.) (2006): Zukunft 2020. Perspektiven für Chinas Motorisierung. (unveröffentlichte Studie), Berlin: WZB
- Knie, Andreas; Berthold, Otto; Harms, Sylvia; Truffer, Bernhard (1999): Die Neuerfindung urbaner Automobilität. Elektroautos und ihr Gebrauch in den U.S.A. und Europa, Berlin: edition sigma
- Konrad, Wilfried; Scheer, Dirk (2003): Systeminnovationen: Begriff, Fallbeispiele, Nachhaltigkeitspotentiale. Internet: www.ioew.de/dienstleistung/publikationen/Vortrag_Wilfried_Konrad_und_Dirk_Scheer.pdf. Zugriff: 27.06.2006
- Kroy, Walter (1995): Technologiemanagement für grundlegende Innovationen, In: Zahn, Erich (Hg.) (1995): Handbuch Technologiemanagement, Stuttgart: Schäffer-Poeschel, S. 57-80
- Kwasnicki, Witold (2003): Schumpeterian modelling. Internet: <http://prev.prawo.uni.wroc.pl/~kwasnicki/todownload/Schumpeterian%20modelling.pdf>. Zugriff: 27.07.2006
- Lamm, Arnold (2006): PEM-BZ-Systeme für den mobilen Einsatz. Vortrag, DaimlerChrysler Forschungszentrum Ulm. Internet: www.sfb374.uni-stuttgart.de/rv_02_03/PEM_Brennstoffzelle_Lamm.pdf. Zugriff: 06.11.2006
- Leifer, Richard (2005): Radical Innovation and BSAC: Increasing the Chances of Tech Transfer. BSAC Spring 2005 IAB Meeting. Internet: www-bsac.eecs.berkeley.edu/publications/iab_2005_3.ph, Zugriff: 21.08.2006
- Leifer, Richard et al. (2000): Radical Innovation. How Mature Companies Can Outsmart Upstarts, Boston: Harvard
- Liebermann, Sylvia (2005): Ölkonzern mahnt zum Energiesparen. Spiegel Online, 13.09.2005
- Luhmann, Niklas (1991): Soziologie des Risikos, Berlin/New York: de Gruyter
- Luhmann, Niklas (2000): Organisation und Entscheidung, Wiesbaden: Opladen
- Maclaurin, Rupert W. (1953): The Sequence from Invention to Innovation and its Relation to Economic Growth, in: The Quarterly Journal of Economics, Vol. 67, No. 1, p. 97-111
- Manager-Magazin (2005): Hybridautos – Der Airbag-Effekt. Artikel, Internet: www.manager-magazin.de/unternehmen/artikel/0,2828,373740,00.html. Zugriff: 22.10.2006
- Marr, Rainer (1980): Innovation. In: Grochla, Erwin (Hg.): Handwörterbuch der Organisation, Stuttgart: Poeschel, S. 984-960
- Marx, Karl (1974): Manifest der kommunistischen Partei. In: MEW Bd. 4, Berlin: Dietz, S. 460-493 [früher wurde dieser Text Marx und Engels zugeschrieben, neuere Untersuchungen belegen jedoch zweifelsfrei, dass Marx der Alleinautor ist]
- Marx, Karl (1979): Das Kapital. Kritik der politischen Ökonomie. Band 1. In: MEW Bd. 23, Berlin: Dietz
- Marx, Karl; Engels, Friedrich (2000): Ausgewählte Werke. CD-ROM, Berlin: Directmedia
- Marz, Lutz (1997a): Die Leonidow-Kugel. Zur technischen Paßfähigkeit moderner Architekturen. Poesie der Vergangenheit. Ein Essay zum Anlauf der »Masterplan«-

Debatte. Discussion Paper FS II 97-102, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung

- Marz, Lutz (1997b): Zum Beispiel die Arbeitsschauuhr ... – Zu einem techniksoziologischen Engpaß und einem Ansatz seiner Überwindung. In: Dierkes, Meinolf (Hg.) (1997): Technikgenese. Befunde aus einem Forschungsprogramm. Berlin: edition sigma, S. 195-223
- Marz, Lutz; Dierkes, Meinolf; Knie, Andreas; Wieder, Marc; Zhang, Junhua (i. E.): China 2020. Automobilisierungs-Perspektiven im Reich der Mitte. In: Canzler, Weert; Schmidt, Gert (Hg.) Zukünfte des Automobils, Berlin: edition sigma
- Mazda (2006a): Europa-Premiere des Mazda RX-8 Hydrogen RE. Pressemitteilung, Internet: www.der-wankelmotor.de/wbblite/thread.php?postid=155 Europa-Premiere des Mazda RX-8 Hydrogen RE. Zugriff: 06.10.2006
- Mazda (2006b): Mazda Delivers first rotary hydrogen vehicles to corporate customer fleets. Pressemitteilung, Internet: www.der-wankelmotor.de/News__bliz/news__bliz.html. Zugriff: 10.10.2006
- McKinsey (2006): Drive. The Future of Automotive Power. https://autoassembly.mckinsey.com/login.asp?cookies=True&script_name=/html/resources/publication/b_DRIV E.asp&reason=denied_empty&Resolution=1024x768. Zugriff: 25.07.2006
- MES-DEA (2005): Herstellermitteilung. Internet: www.e-mobile.ch/pdf/2006/Comunicato_stampa_T.pdf#search=%22MES%20DEA%22. Zugriff 31.8.2006
- Michelin (2006): Hybridmotor des Prius, Graphik. In: Saubre Autos: Wer wird das Rennen machen. Artikel, Internet: www.viamichelin.com/viamichelin/deu/tpl/mag4/art20051101/htm/route-voitures-propres.htm. Zugriff 23.10.2006
- Mitsubishi (2005): Mitsubishi Motors to drive forward development of next-generation EVs - Colt EV test car uses in-wheel motors & lithium-ion batteries. Pressemitteilung, Internet: <http://media.mitsubishi-motors.com/pressrelease/e/corporate/detail1269.html>. Zugriff: 02.11.2006
- Mönch, Lars (2006): Erdgas – Wichtig ist was hinten raus kommt. Experte für Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr beim Umweltbundesamt. Internet: <http://erdgasfahrzeuge.01kunden.net/cgi-bin/WebObjects/Erdgas2004.woa/wa/DirectoryWithId/1000202.html?wosid=5tH3tOAZoS S bqP3duoEgag>. Zugriff. 22.9.2006
- Müller, Roland (1997): Innovation gewinnt. Kulturgeschichte und Erfolgsrezepte, Zürich: Orell Füssli
- MWV (Mineralölwirtschaftsverband e.V.) (1999): Mineralöl-Logistik. Internet: www.mwv.de/Broschueren.html, Zugriff: 14.08.2006
- MWV (Mineralölwirtschaftsverband e.V.) (2000): Mineralölversorgung mit Pipelines. Internet: www.mwv.de/Broschueren.html, Zugriff: 14.08.2006
- MWV (Mineralölwirtschaftsverband e.V.) (2006): Jahresbericht Mineralöl-Zahlen 2005. Internet: www.mwv.de/Jahresbericht.html, Zugriff: 14.08.2006
- Nill, Jan; Konrad, Wilfried (2001): Innovationen für Nachhaltigkeit: ein interdisziplinärer Beitrag zur konzeptionellen Klärung aus wirtschafts- und sozialwissenschaftlicher Perspektive, Berlin: IÖW
- Opel (2006): Technische Daten Opel Zafira. Internet: www.opel.de/res/download/pdf/0Q_75_specs.pdf#search=%22Opel%20Zafira%20Erdgas%20technische%20Daten%22. Zugriff: 15.09.2006
- Pehnt, Martin (2001): Ökologische Nachhaltigkeitspotenziale von Verkehrsmitteln und Kraftstoffen. Teilbericht und Materialband im Rahmen des HGF-Projektes „Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland“. Deutsches Zentrum für Luft- und

Raumfahrt e.V. Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung (STB). STB-Bericht Nr. 24 Stuttgart

- PGM (Projektgruppe Mobilität) (2004): Die Mobilitätsmaschine. Versuche zur Umdeutung des Autos. Berlin: edition sigma
- Rammler, Stephan (2001): Mobilität in der Moderne: Geschichte und Theorie der Verkehrssoziologie, Berlin: edition sigma
- Rammler, Stephan; Weider, Marc (2005) (Hg.): Wasserstoffauto – Zwischen Markt und Mythos, Münster: LIT Verlag
- ReFuelNet (Netzwerk regenerative Kraftstoffe) (2006): Kraftstoffe allgemein. Internet: www.refuelnet.de/index.php?l=C&m=A. Zugriff: 27.10.2006
- Roberts, Edward B. (1987): Introduction: Managing Technological Innovation – A Search for Generalizations, In: Roberts, Edward B. (Hg.): Generating Technological Innovation, New York/Oxford, p. 3-21
- Rödl, Ernst (2006): Nikolaus August Otto legt den Grundstein für die Motorentechnik. Internet: www.deutsches-museum.de/ausstell/meister/otto.htm, Zugriff 08.09.2006
- Roventa, Peter; Weber, Johannes (2006): Automobilzulieferer-Mittelstand – quo vadis? Internet: www.corfina.de/downloads/Automobilzulieferer-Mittelstand-quivadis.pdf. Zugriff: 21.07.2006
- Ruttan, Vernin, W. (1959): Usher and Shumpeter on Invention, Innovation, and Technological Change. In: The Quarterly Journal of Economics, Vol. 73, No. 4, p. 596-606
- Scharnhorst, Andrea (2000): Zum Verhältnis von sprunghafter und gradueller Entwicklung, In: Greif, Siegfried; Wölfling, Manfred (Hg.) (2000): Wissenschaft und Innovation. Wissenschaftsforschung Jahrbuch 1999, Berlin: Gesellschaft für Wissenschaftsforschung, S. 81-100
- Schindler, Jörg; Weindorf, Werner (2003): „Well-to-Wheel“ – Ökologische und Ökonomische Bewertung von Fahrzeugkraftstoffen und -antrieben. Vortrag Nürnberg, 12. April 2003. Internet: www.HyWeb.de/Wissen/pdf/Nuernberg_2003.pdf. Zugriff: 24.07.2006
- Schindler, Jörg; Weindorf, Werner (2005): Überblick über derzeit einsetzbare Kraftstoffe und neue Entwicklungen. Internet: www.muenchen.de/vip8/prod1/mde/_de/rubriken/Rathaus/65_raw/01_newsarchiv/01_archiv05/NKO. Zugriff: 14.07.2006
- Schlaak, Thomas M. (1999): Der Innovationsgrad als Schlüsselvariable: Perspektiven für das Management von Produktentwicklungen, Wiesbaden: DVU
- Schubert, Erhard (2003): Forschungs- und Entwicklungsbedarf aus der Sicht eines Industrieunternehmens. Vortrag. Düsseldorf, 30.09.2003. Internet: <http://www.wz.nrw.de/Brennstoffzellen/Schubert%20Pr%E4sentation.pdf#search=%22Veinte%20Nationen%20Bestand%20an%20Fahrzeugen%22>, Zugriff: 27.09.2006
- Schumpeter, Joseph Alois (1972): Kapitalismus, Sozialismus und Demokratie, München: UTB
- Schumpeter, Joseph Alois (1987): Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung: eine Untersuchung über Unternehmengewinn, Kapital, Kredit, Zins und den Konjunkturzyklus, Berlin: Duncker&Humblodt
- Schwartz, Peter; Randall, Doug (2003): Imagining the Unthinkable. An Abrupt Climate Change Scenario and Its Implications for United States National Security. Internet: www.environmentaldefense.org/documents/3566_AbruptClimateChange.pdf. Zugriff: 10.08.2006

- Shell (2001): Mehr Autos – aber Kraftstoffverbrauch und Emissionen sinken. Pressemitteilung. Internet: http://www.innovations-report.de/html/berichte/verkehr_logistik/bericht-4863.html, Zugriff 31.08.2006
- SHISD (Shanghai Huaxia Institute of Social Development) (2005): The Status Quo and its Development of Chinese Automobile Society, Modernization Research Center, (unveröffentlichte Untersuchung)
- Simmel, Georg (2001): Das Werk. CD-ROM. Berlin: heptagon
- Spiegel-Online (2005): Kehrtwende – VW baut Hybridautos. Bericht, Internet: www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,373750,00.html. Zugriff 28.8.2006
- Spiegel-Online (2006a): BMW Hydrogen7: Mit Zisch in die Zukunft. Artikel vom 12.09.2006, Internet: www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,436588,00.html. Zugriff: 13.09.2006
- Spiegel-Online (2006b): Mazda RX-8 Hydrogen Re: Zukunft auf Knopfdruck. Artikel vom 28.08.2006, Internet: www.spiegel.de/auto/fahrberichte/0,1518,433590,00.html. Zugriff: 10.10.2006
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2005): Potenziale und Instrumente zur CO₂-Verminderung von PKW. Auszüge aus dem Sondergutachten Umwelt und Straßenverkehr. Internet: www.umweltrat.de/04presse/download/hintgru/CO2Reduzierung_08_2005.pdf. Zugriff: 15.07.2006
- Stan, Cornel (2005): Alternative Antriebe für Automobile: Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger. Berlin u.a.: Fachbuch Springer-Verlag
- Stauch, Thorsten (2005): Präsentation Technik F-Cell. Vortrag, Praxis-Seminar Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge, Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle. 27.1.2005, Ulm.
- SWR (2007): Technik-Innovationen. Sind Weltneuheiten oft nur alte Hüte? Internet: www.swr.de/rasthaus/archiv/2005/02/12/beitrag3.html. Zugriff: 17.01.2007
- Toyota (2006a): Hybridfahrzeug - Die Definition der UNO. Internet; www.hybridsynergydrive.com/de/un_definition.html. Zugriff: 22.10.2006
- Toyota (2006b): Seriell-paralleles Hybridsystem - Fluss der Systemenergie. Schaubild, Internet: www.hybridsynergydrive.com/de/series_parallel.html. Zugriff: 22.10.2006
- Trinh, Tamara (2005): China 2010+. Welche Faktoren bestimmen die Zukunft Chinas? Siemens Workshop „China“. Deutsche Bank Research, Eibsee. Internet: http://www.dbresearch.com/PROD/DBR_INTERNET_DE-PROD/PROD0000000000191694.pdf. Zugriff: 08.08.2006
- Trömel, Martin; Loose, Susanne (1995): Das Wachstum technischer Systeme. In: Naturwissenschaften 82 (1995), S. 160-169
- UBA (Umweltbundesamt) (2001): Klimaschutz 2001. Tatsachen, Risiken, Handlungsmöglichkeiten. www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/klimaschutz.htm. Zugriff: 05.08.2006
- VCD (Verkehrsclub Deutschland) (2006): Auto-Umweltliste 2006/2007. Berlin 2006.
- VDA (Verband der Automobilindustrie) (2006): Auto Jahresbericht 2006. Köln/Berlin: edition agrippa
- VDI (2006a): Dampf lässt Benziner sparsamer laufen. Artikel in VDI-Nachrichten online. Internet: http://www.vdi-nachrichten.com/vdi_nachrichten/aktuelle_ausgabe/akt_ausg_detail.asp?source=rubrik&cat=2&id=29273, Zugriff 22.09.2006
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure) (2004): Hybridsysteme – ökologisch notwendig und ökonomisch sinnvoll. Artikel in VDI-online, Internet: www.vdi-

- nachrichten.com/vdi_nachrichten/aktuelle_ausgabe/akt_ausgdetail.asp?source=paging&cat=2&id=18970&cp=3&doPrint=1. Zugriff: 22.10.2006
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure) (2006b): Vorteil des Hybridantriebs ist marginal. Artikel in VDI-Nachrichten vom 2. Juni 2006 – Nr. 22, S. 15.
- VW (2006): Internationale Pressevorstellung der neuen Volkswagen Hochtemperatur-Brennstoffzelle. Pressemitteilung Volkswagen Forschung, Oktober 2006. Internet: www.volkswagen-nachhaltigkeit.de/nhk/nhk_folder/de/aktuelles/Brennstoffzelle.Par.0002.Download.pdf. Zugriff: 20.11.2006
- Wartburg, Iwan von (2000): Wissensbasiertes Management technologischer Innovationen. Internet: www.iou.unizh.ch/orga/downloads/diverse/Diss_ivw.pdf Zugriff: 21.07.2006
- Weider, Marc; Marz, Lutz (2005): Quantensprung oder Sackgasse? Zum Stand und den Entwicklungsperspektiven der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in der Automobilindustrie. In: Rammler, Stephan; Weider, Marc (Hg.): Wasserstoffauto-Zwischen Markt und Mythos, Münster: LIT Verlag, S. 9-33.
- Wikipedia (2006a): Stichwort: Brennstoffzelle. Internet: www.wikipedia.de, Zugriff: 19.08.2006
- Wikipedia (2006b): Stichwort: Verbrennungsmotor. Internet: www.wikipedia.de, Zugriff: 14.09.2006
- Wikipedia (2006c): Stichwort: Kohleverflüssigung. Internet: www.wikipedia.de, Zugriff: 15.09.2006
- Wikipedia (2006d): Stichwort: Wankelmotor. Internet: www.wikipedia.de, Zugriff: 22.09.2006
- Wikipedia (2006e): Stichwort: Abgasnorm. Internet: www.wikipedia.de, Zugriff: 22.09.2006
- Wikipedia (2006f): Stichwort: Niedrigenergiefahrzeug. Internet: www.wikipedia.de, Zugriff: 22.09.2006
- Windrum, Paul (2004): Neo-Schumpeterian Simulation Models, MERIT-Infonomics Research Memorandum series No. 2004-002, Maastricht Economic Research Institute on Innovation and Technology
- Winter, Udo; Mettlach, Horst; Matthe, Roland (2005): Energiemanagement in den Brennstoffzellen- Fahrzeugen von General Motors. Untersuchung der Adam Opel AG
- Wood, John H.; Long, Gary R.; Morehouse, David F. (2004): Long-Term World Oil Supply Scenarios. The Future Is Neither as Bleak as Rosy as Some Assert. Internet: http://www.eia.doe.gov/pub/oil_gas/petroleum/feature_articles/2004/worldoilsupply/oilsupply04.html. Zugriff: 09.08.2006
- Zapf, Wolfgang (1989): Über soziale Innovationen. In: Soziale Welt, H. 1/2 1989, S. 170-183
- Zhu, Ying (2003): Leapfrogging into Hydrogen Technology: China's 1990-2000 Energy Balance, Discussion Paper, SP III 2003-114, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung
- Zittel, Werner, Schindler, Jörg (2004): The Countdown for the Peak of Oil Production has Begun – but what are the Views of the Most Important International Energy Agencies? Internet: http://www.odac-info.org/links/documents/LBST_Countdown_2004-10-12.pdf . Zugriff: 25.07.2006
- Zittel, Werner; Schindler, Jörg (2003): Depletion of Oil. Internet: http://www.lbst.de/publications/articles_before2004/34b_Salzburg-update_2003.pdf. Zugriff: 23.07.2006

Veröffentlichungsreihe der Abteilung „Innovation und Organisation“
des Forschungsschwerpunktes Organisationen und Wissen am
Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung

elektronisch verfügbar unter:
www.wz-berlin.de/publikation/discussion_papers/liste_discussion_papers.de

1999

- FS II 99-101 Emily Udler, Israeli Business in Transition, 45 S.
- FS II 99-102 Mark B. Brown, Policy, design, expertise, and citizenship: Revising the California electric vehicle program, 49 S.
- FS II 99-103 Stefan Bratzel, Umweltorientierter Verkehrspolitikwandel in Städten. Eine vergleichende Analyse der Innovationsbedingungen von „relativen Erfolgsfällen“, 74 S.

2000

- FS II 00-101 Sabine Helmers, Ute Hoffmann und Jeanette Hofmann. Internet... The Final Frontier: An Ethnographic Account. Exploring the cultural space of the Net from the inside, 124 S.
- FS II 00-102 Weert Canzler und Sassa Franke, Autofahren zwischen Alltagsnutzung und Routinebruch. Bericht 1 der choice-Forschung, 26 S.
- FS II 00-103 Mikael Hård und Andreas Knie, Getting Out of the Vicious Traffic Circle: Attempts at Restructuring the Cultural Ambience of the Automobile Throughout the 20th Century, 20 S.
- FS II 00-104 Ariane Berthoin Antal, Ilse Stroo and Mieke Willems, Drawing on the Knowledge of Returned Expatriates for Organizational Learning. Case Studies in German Multinational Companies. 47 S.
- FS II 00-105 Ariane Berthoin Antal und Meinolf Dierkes, Organizational Learning: Where Do We Stand? Where Do We Want to Go?, 33 S.

2001

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

2002

- FS II 02-101 Ute Hoffmann und Jeanette Hofmann, Monkeys, Typewriters and Networks. The Internet in the Light of the Theory of Accidental Excellence, 24 S.
- FS II 02-102 Ute Hoffmann, Themenparks re-made in Japan. Ein Reisebericht, 26 S.

- FS II 02-103 Weert Canzler und Sassa Franke, Changing Course in Public Transport: The Car as a Component of Competitive Services. Choice-Research, Report No. 2, 58 S.
- FS II 02-104 Weert Canzler und Sassa Franke, Mit cash car zum intermodalen Verkehrsangebot. Bericht 3 der choice-Forschung, 67 S.
- FS II 02-105 Ariane Berthoin Antal, Meinolf Dierkes, Keith MacMillan & Lutz Marz, Corporate Social Reporting Revisited, 32 S.
- FS II 02-106 Martin Gegner, Die Wege des urbanen Verkehrs zur Daseinsvorsorge, 63 S.
- FS II 02-107 Meinolf Dierkes, Lutz Marz & Ariane Berthoin Antal, Sozialbilanzen. Konzeptioneller Kern und diskursive Karriere einer zivilgesellschaftlichen Innovation, 18 S.
- FS II 02-108 Christiana Weber und Barbara Weber, Learning in and of Corporate Venture Capital Organizations in Germany. Industry structure, companies' strategies, organizational learning capabilities, 19 S.
- FS II 02-109 Jeanette Hofmann unter Mitarbeit von Jessica Schattschneider, Verfahren der Willensbildung und Selbstverwaltung im Internet – Das Beispiel ICANN und die At-Large-Membership, 155 S.
- FS II 02-110 Kathrin Böhling, Learning from Environmental Actors about Environmental Developments. The Case of International Organizations, 40 S.
- FS II 02-111 Astrid Karl, Öffentlicher Verkehr im künftigen Wettbewerb. Wie ein inkonsequenter Ordnungsrahmen und überholte Finanzierungsstrukturen attraktive öffentliche Angebote verhindern, 60 S.
- FS II 02-112 Thomas Sauter-Servaes & Stephan Rammler, Delaytainment an Flughäfen. Die Notwendigkeit eines Verspätungsservices und erste Gestaltungsideen, 83 S.
- FS II 02-113 Ariane Berthoin Antal & Meinolf Dierkes, Organisationslernen und Wissensmanagement: Überlegungen zur Entwicklung und zum Stand des Forschungsfeldes, 39 S.
- FS II 02-114 Ariane Berthoin Antal & Meinolf Dierkes, On the Importance of Being Earnest about Business: Overcoming liberal arts students' misconceptions about leadership in corporate change processes, 31 S.
- FS II 02-115 Daniela Zenone, Das Automobil im italienischen Futurismus und Faschismus. Seine ästhetische und politische Bedeutung, 72 S.

2003

- | | |
|---------------|--|
| SP III 03-101 | Ariane Berthoin Antal und Victor Friedman, Negotiating Reality as an Approach to Intercultural Competence, 35 S. |
| SP III 03-102 | Ariane Berthoin Antal, Camilla Krebsbach-Gnath & Meinolf Dierkes, Hoechst Challenges Received Wisdom on Organizational Learning, 36 S. |
| SP III 03-103 | Ariane Berthoin Antal & Jing Wang. Organizational Learning in China: The Role of Returners, 29 S. |

- SP III 03-104 Jeanette Hofmann, Die Regulierung des Domainnamensystems – Entscheidungsprozess und gesellschaftliche Auswirkungen der Einrichtung neuer Top Level Domains im Internet, 122 S.
- SP III 03-105 Oliver Schöller & Stephan Rammler, „Mobilität im Wettbewerb“ Möglichkeiten und Grenzen integrierter Verkehrssysteme im Kontext einer wettbewerblichen Entwicklung des deutschen und europäischen Verkehrsmarktes – Begründung eines Forschungsvorhabens, 35 S.
- SP III 03-106 Falk Berndt und Hermann Blümel, ÖPNV quo vadis? Aufforderung zu verkehrspolitischen Weichenstellungen im ÖPNV, 73 S.
- SP III 03-107 Tobias Wölfle und Oliver Schöller, Die kommunale „Hilfe zur Arbeit“ im Kontext kapitalistischer Arbeitsdisziplinierung, 26 S.
- SP III 03-108 Markus Petersen. Multimodale Mobilisations und Privat-Pkw, Ein Vergleich auf Basis von Transaktions- und monetären Kosten. Bericht 4 der choice-Forschung, 41 S.
- SP III 03-109 Ariane Berthoin Antal & Victor J. Friedman, Learning to Negotiate Reality: A Strategy for Teaching Intercultural Competencies, 33 S.
- SP III 03-110 Ute Hoffmann (Hg.), Reflexionen der kulturellen Globalisierung. Interkulturelle Begegnungen und ihre Folgen. Dokumentation des Kolloquiums „Identität-Alterität-Interkulturalität. Kultur und Globalisierung“ am 26./27. Mai 2003 in Darmstadt, 183 S.
- SP III 03-111 Christiana Weber, Zeit und Zeitkompensation in der Entstehung und Entwicklung von Organisationskultur, 41 S.
- SP III 03-112 Gerhard Prätorius & Christian Wichert, Integrierte Verkehrspolitik als Realtypus – mehr als die Summe von Teillösungen?, 60 S.
- SP III 03-113 Christiana Weber und Barbara Weber, Corporate Venture Capital Organizations in Germany. A Comparison, 46 S.
- SP III 03-114 Marc Weider, André Metzner, Stephan Rammler, Die Brennstoffzelle zwischen Umwelt-, Energie- und Wirtschaftspolitik. Darstellung der öffentlichen Förderprogramme für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in Deutschland, der Europäischen Union, den USA und Japan, 77 S.
- SP III 03-115 Martin Gegner. Crash, Boom, Bang – Reload, Metamorphosen eines Softwareprojekts in Zeiten des New Economy-Hypes, 32 S.
- SP III 03-116 Ying Zhu, Leapfrogging into Hydrogen Technology: China's 1990-2000 Energy Balance, 43 S.
- SP III 03-117 Maria Oppen, Detlef Sack, Alexander Wegener, Innovationsinseln in korporatistischen Arrangements. Public Private Partnerships im Feld sozialer Dienstleistungen, 61 S.

2004

- SP III 04-101 Marc Weider, André Metzner, Stephan Rammler, Das Brennstoffzellen-Rennen. Aktivitäten und Strategien bezüglich Wasserstoff und Brennstoffzelle in der Automobilindustrie, 137 S.
- SP III 04-102 Ariane Berthoin Antal, The Centrality of ‚Between‘ in Intellectual Entrepreneurship, 27 S.

- SP III 04-103 Martin Gegner, Die Auto-Referenz des öffentlichen Nahverkehrs – Selbst-, Konkurrenz- und Kundenbild im Marketing des Verbands Deutscher Verkehrsbetriebe, 102 S.
- SP III 04-104 Holger Straßheim, Power in intercommunal knowledge networks. On the endogenous dynamics of network governance and knowledge creation, 37 S.
- SP III 04-105 Marc Weider, China – Automobilmarkt der Zukunft? – Wie nachhaltig und zukunftsorientiert sind die Strategien der internationalen Automobilindustrie in China?, 73 S.
- SP III 04-106 Ariane Berthoin Antal & Victor J. Friedman, Overcoming dangerous learning: The role of critical reflection in cross-cultural interactions, 26 S.
- SP III 04-107 Felix Beutler, Intermodalität, Multimodalität und Urbanibility – Vision für einen nachhaltigen Stadtverkehr, 36 S.
- SP III 04-108 Gerhard Prätorius & Christian Wichert, Die Ergänzung der Haushalts- durch Nutzerfinanzierung von Verkehrsinfrastrukturen, 36 S.
- SP III 04-109 Hermann Blümel, Mobilitätsdienstleister ohne Kunden. Kundenorientierung im öffentlichen Nahverkehr, 114 S.
- SP III 04-110 Maria Brie & Hagen Pietzcker, NGOs in China – Die Entwicklung des Dritten Sektors, 53 S.
- SP III 04-111 Anke Borcharding, Strategies, Programs, and Projects Pertaining to Policy on Transport. Research in Selected European States, the United States, and Japan (Short title: “SmartBench”) Final Report on Sweden, 50 S.
- SP III 04-112 Ariane Berthoin Antal & André Sobczak, Beyond CSR: Organizational Learning for Global Responsibility, 41 S.

2005

- SP III 05-101 Martin Lengwiler, Probleme anwendungsorientierter Forschung in den Sozialwissenschaften am Beispiel der Ausgründung “choice”, 59 S.
- SP III 05-102 Maria Brie, Prozesse politischer Entscheidungsfindung in China. Die „Vierte Führungsgeneration“, 58 S.
- SP III 05-103 Miriam Barnat, Lernen und Macht in einer Non-Profit Organisation, 50 S.
- SP III 05-104 Roman Pernack, Öffentlicher Raum und Verkehr. Eine sozialtheoretische Annäherung, 46 S.
- SP III 05-105 Ying Zhu, Energy and Motorization. Scenarios for China’s 2005-2020 Energy Balance, 64 S.
- SP III 05-106 Weert Canzler & Andreas Knie, Demografische und wirtschaftsstrukturelle Auswirkungen auf die künftige Mobilität: Neue Argumente für eine neue Wettbewerbsordnung im Öffentlichen Verkehr, 35 S.
- SP III 05-107 Christiana Weber, Corporate Venture Capital als Beitrag zum Wissensmanagement – eine vergleichende Langzeitstudie in Deutschland, 55 S.

2006

- SP III 06-101 Christian Maertins, Die Intermodalen Dienste der Bahn: Mehr Mobilität und weniger Verkehr? Wirkungen und Potenziale neuer Verkehrsdienstleistungen, 79 S.
- SP III 06-102 Kathrin Böhling, Tanja Busch, Ariane Berthoin Antal & Jeannette Hofmann, Lernprozesse im Kontext von UN-Weltgipfeln. Die Vergesellschaftung internationalen Regierens, 34 S.
- SP III 06-103 Martini, Stefan, Gibt es ein subjektives Recht auf öffentlichen Verkehr? Grundrechte statt Daseinsvorsorge, 61 S.

2007

- SP III 07-101 Ariane Berthoin Antal, Maria Oppen, André Sobczak, (Re)discovering the social responsibility of business in Germany, 33 S.

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

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

Bestellschein

Order Form

Wissenschaftszentrum Berlin
für Sozialforschung gGmbH
PRESSE- UND INFORMATIONSREFERAT
Reichpietschufer 50

D-10785 Berlin

Absender ● Return Address:

Hiermit bestelle ich folgende(s) *Discussion Paper(s)* ● Please send me the following *Discussion Paper(s)* **Autor(en) / Kurztitel ● Author(s) / Title(s)** in brief

Bestellnummer ● Order no.

--	--

