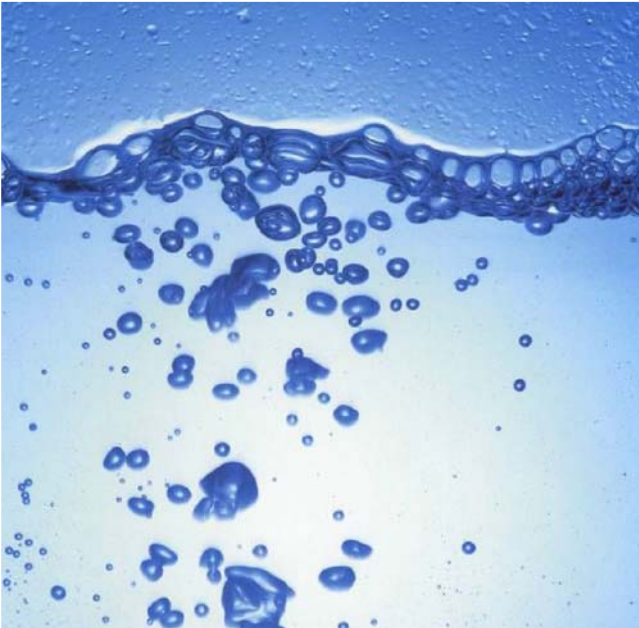




Zukunftsmarkt Hybride Antriebstechnik



Zukunftsmarkt Hybride Antriebstechnik

Fallstudie im Auftrag des Umweltbundesamtes
im Rahmen des Forschungsprojektes
Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern
(Förderkennzeichen 206 14 132/05)

durchgeführt
von

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe

Autor:

Claus Doll

Impressum

Herausgeber: Umweltbundesamt (UBA)
Postfach 1406, 06844 Dessau-Roßlau
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
www.umweltbundesamt.de

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Referat Öffentlichkeitsarbeit
11055 Berlin
E-Mail: service@bmu.bund.de
www.bmu.de

ISSN: 1865-0538

Projektbetreuung: Michael Golde
Umweltbundesamt (UBA)

Peter Franz
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

Autor: Dr. Claus Doll
(Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe)

Titelfotos: Q-Cells AG, BMU / Rupert Oberhäuser, ccvision GmbH

Stand: Dezember 2007

Inhalt

Zusammenfassung	1
Summary	2
1 Einführung	4
2 Bedeutung und Potenziale der hybriden Antriebstechnologie	5
2.1 Hintergrund	5
2.2 Die Technologie	7
2.2.1 Entwicklungsgeschichte hybrider Antriebe	7
2.2.2 Aufbau und Varianten hybrider Antriebssysteme	7
2.2.3 Wirtschafts- und Warenstruktur	12
2.3 Nutzen für Umwelt und Gesellschaft	13
2.4 Wirtschaftliche Potentiale und Märkte	16
2.4.1 Potenziale der Technologie.....	16
2.4.2 Identifikation von Konkurrenten und Zielländern	17
2.4.3 Charakterisierung wichtiger Konkurrenzländer.....	19
2.4.4 Charakterisierung wichtiger Zielländer	21
3 Leistungsfähigkeit der wichtigsten Länder in der betrachteten Techniklinie	23
3.1 Internationale Forschungs- und Entwicklungstrends.....	23
3.2 Internationaler Leistungsvergleich.....	25
3.2.1 Innovationsindikatoren	25
3.2.2 Außenhandelsindikatoren	28
4 Innovationssystem und marktführende Unternehmen in den führenden Ländern und in Deutschland	31
4.1 Akteursanalyse.....	31

4.1.1	Automobilhersteller	31
4.1.2	Zulieferindustrie.....	33
4.2	Rahmenbedingungen und Regulierung.....	33
5	Schlussfolgerungen und Ausblick	36
5.1	Bewertung der Technologie	36
5.2	SWOT Analyse für Deutschland und Europa	36
5.3	Perspektiven bis 2020	37
5.4	Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf.....	38
	Literatur.....	39

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Relative technologische Entwicklungsdynamik hybrider Antriebe und deren Komponenten	13
Abbildung 2-2:	Exporte und Importe von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb der 15 exportstärksten Nationen 2004.....	19
Abbildung 2-3:	Global Competitiveness Indikators der wichtigsten Konkurrenzländer.....	20
Abbildung 2-4:	Global Competitiveness Indikators der wichtigsten Zielländer	22
Abbildung 3-1:	Weltweite Patentanteile hybrider Antriebstechnologien 2000 – 2004	26
Abbildung 3-2:	RPA hybrider Antriebstechnologien 2000 – 2004 im internationalen Vergleich.....	27
Abbildung 3-3:	Relative Patentanteile hybrider Antriebstechnologien 2000 – 2004	28
Abbildung 3-4:	Exporte und Importe von Komponenten hybrider Antriebe der 20 exportstärksten Nationen 2004	29
Abbildung 3-5:	Revealed Comparative Advantage (RCA) bei Komponenten hybrider Antriebe der 10 exportstärksten Länder 2004	30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Potenzielle Marktanteile hybrider Fahrzeuge bis 2020	18
Tabelle 2-2:	Importabhängigkeit europäischer Hersteller bei Komponenten hybrider Antriebe	21
Tabelle 2-3:	Exportchancen für Komponenten hybrider Antriebe europäischer Hersteller	22
Tabelle 4-1:	Verbrauchs- und Absatzzahlen aktueller Hybridmodelle (USA 2006)	32
Tabelle 4-2:	Vergleich Umweltstandards USA – EU	34
Tabelle 5-1:	SWOT-Analyse Hybride Antriebssysteme	37

Zusammenfassung

Hybride Antriebe aus Elektro- und Verbrennungsmotor ermöglichen eine geräuscharme und teilweise lokal emissionsfreie Fahrweise durch den Betrieb des Verbrennungsmotors in einem günstigen Wirkungsbereich. Der tatsächliche Umwelt- und Energieeffizienzvorteil hängt aber stark von der Fahrweise und dem Fahrzyklus ab.

Die Technologiedynamik hybrider Antriebe stellt sich weit intensiver dar als die Dynamik der wichtigsten Komponenten Verbrennungsmotoren, Elektromotoren und Energiespeichertechnik. Aufgrund des höheren Preises und einer aufwendigeren Wartung hybrider Fahrzeuge werden die Zielländer der Technologie am ehesten in Nordamerika, Europa, Japan, Australien und den Metropolen Südamerikas und Südostasiens gesehen.

In technologischer Hinsicht stellen Japan, die USA, Frankreich und Schweden die wichtigsten Konkurrenten Deutschlands dar. Dabei sind europäische Hersteller, insbesondere bei Batterien, vollständig importabhängig und besitzen keine eigene Technologiekompetenz. Die Konkurrenzländer befinden sich, bedingt durch spezifische Voraussetzungen und staatliche Anreizsysteme, auf unterschiedlichen Stadien des Entwicklungsprozesses. Von Bedeutung ist dabei die Ablehnung von Dieselmotoren für Pkw in Japan und den USA sowie steuerliche Anreize und Sonderkonditionen für Hybridfahrzeuge, z. B. bei der Congestion Charge in London.

Trotz der Technologieführerschaft Japans entfallen auf Deutschland 40 % und auf die EU27 60 % der weltweiten Patentanmeldungen im Bereich hybrider Antriebe und deren Komponenten. Die Stärken Europas und speziell Deutschlands im Bereich der hybriden Antriebstechnik liegen zum einen in einer leistungsstarken und international sehr erfolgreichen Automobilindustrie und zum anderen in einer hohen Spezialisierung bei einigen Schlüsselkomponenten.

Als potenziell vorteilhaft kann auch die ambitionierte Umweltpolitik der EU sowie einzelner Mitgliedsstaaten betrachtet werden. Die uneinheitliche Entwicklung umwelt- und verkehrspolitischer Instrumente stellt jedoch einen hemmenden Faktor bei der Entstehung eines einheitlich großen europäischen Marktes für alternative Fahrzeugkonzepte dar. Dies, die zunehmende Konkurrenz durch Aufholländer, der absehbare Mangel an Fachkräften und die weitere Förderung der Dieselmotoren als kostengünstige Alternative zu hybriden und sonstigen alternativen Antriebskonzepten können sich als hemmende Faktoren für die erfolgreiche Entwicklung der hybriden Antriebstechnologie in Europa auswirken.

Summary

Hybrid electric vehicles allow driving quietly and locally emission-free because the internal combustion engine is run in a more favorable load range, while the highly efficient electric motor supports at low speeds and in acceleration phases. Further reductions in fuel consumption are achieved by down sizing the combustion engine and by recuperating brake energy back into the battery. However, the actual environmental and energy advantage strongly depends on driving styles and driving cycles.

The technology dynamics of hybrid propulsion systems appears more intensive than the dynamics of its core components: combustion engine, electric motors and energy storage technology. Due to its higher price and the more expensive maintenance the destination countries of the technology are most likely located in North America, Europe, Japan, Australia and the metropolises of South America and Southeast Asia. However, estimates of future market potential widely diverge.

With regard to technology, Japan, the United States, France and Sweden are the most important competitors for Germany. European producers, however, are completely dependent on imports and lag sufficient technology competence in key areas, namely in the field of battery technology. Due to specific preconditions and national incentive systems, the competing countries are on different stages of the development processes. Important is the disapproval of diesel for cars in Japan and the USA but also tax incentives and special conditions for hybrid cars, e. g. the Congestion Charge in London.

Although Japan appears as the technology leader in the field of hybrid electric vehicles, Germany holds 40 % and the EU 27 60 % of the worldwide patent applications of hybrid propulsion systems and their components. These figures indicate a nameable technological and economic potential of Europe, and especially of Germany, in the field of hybrid propulsion technology, which are the result of the productive and internationally very successful car industry on the one hand and of the high specialization in some key components on the other hand.

Also the ambitious environmental policy of the EU as well as of individual member states constitutes a potential advantage. But the different developments in environmental and transport policies are a retarding factor regarding the creation of a standardized large European market for alternative vehicle concepts. Creating reliable incentive systems for clean vehicle technologies across Europe would create a sufficiently large market, allowing European car manufacturers to build up own competences and production capacities for alternative propulsion systems. Challenges in this

process are the technology advance of US and Asian manufacturers and the foreseen lack of qualified engineers in Europe.

Due to still existing problems with battery capacities or fuel cells, hybrid electric vehicles will play a major role for particular market segments and as a transition technology to totally emission-free propulsion technologies. Moreover, clean diesel technology slowly gains acceptance in the US. Depending on driving patterns and driving habits this concept can even be superior to hybrid electric systems as it does not require heavy batteries and the maintenance of the vehicles is simpler.

1 Einführung

Der Umwelt- und Ressourcenschutz gewinnt national und international eine zunehmende Bedeutung. Damit verbunden wird sich die Nachfrage nach Umwelttechniken weltweit dynamisch entwickeln. Inzwischen hat sich aus dem Umwelt- und Ressourcenschutz auch ein maßgeblicher Treiber für Innovationen entwickelt. Umwelt- und Innovationspolitik wachsen dadurch immer stärker zusammen, moderne Umweltpolitik muss auch Innovationspolitik sein.

Um Wachstums- und Beschäftigungspotenziale zu mobilisieren ist es wichtig, Synergieeffekte zwischen der Verbesserung der Umweltsituation, der Schaffung zukunftsfähiger Arbeitsplätze und der Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit zu identifizieren und zu nutzen. Das Forschungsprojekt „Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern“ analysiert die Innovationsdynamik in wichtigen Handlungsfeldern systematisch und auf zusammenfassender Ebene. Diese Handlungsfelder bildeten die Basis, um elf Produktgruppen/Technologien auszuwählen, die in Fallstudien vertieft untersucht werden.

Jede Fallstudie enthält eine kurze Vorstellung der Grundlagen der entsprechenden Technologie. Anschließend folgt eine nähere Analyse des Zukunftsmarktes und seiner Innovationsdynamik. Besonderes im Blickpunkt stehen dabei die Entwicklung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher und europäischer Unternehmen im internationalen Vergleich, ihr Umfeld sowie Ansatzpunkte für eine Stärkung des deutschen und europäischen Innovationssystems.

Innerhalb der Reihe: „Umwelt, Innovation, Beschäftigung“ sind Fallstudien zu den folgenden Themen erschienen: Solarthermische Stromerzeugung, CO₂-Abscheidung und Speicherung, Elektrische Energiespeicherung, Solares Kühlen, Energieeffiziente Rechenzentren, Biokunststoffe, Synthetische Biokraftstoffe, Hybride Antriebstechnik, Dezentrale Wasseraufbereitung und Regenwassermanagement, Nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologie, Stofferkennung und –trennung.

In dieser Fallstudie werden die Ergebnisse der Fallstudie Hybride Antriebstechnik beschrieben.

2 Bedeutung und Potenziale der hybriden Antriebstechnologie

2.1 Hintergrund

Die Mobilität von Personen und Gütern stellt ein zentrales Element aller wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Aktivitäten dar. Als Medium zum Austausch von Waren und Dienstleistungen bildet der Verkehrssektor damit eine der zentralen Säulen der europäischen Idee des gemeinsamen Binnenmarktes. Im Zeitraum 1995 bis 2004 stieg die Verkehrsleistung im Personenverkehr in der EU25 um 17,7 % von 5149 auf 6061 Mrd. Personenkilometer (Pkm). Dabei sank der Anteil der Eisenbahnen an der Fahrleistung von 6,3 % auf 5,8 %, während der dominierende Anteil der Pkw mit 73,5 % nahezu konstant blieb und der Luftverkehr sogar von 6,3 % auf 8,0 % wuchs (EU, 2006). Auf Grund der negativen demographischen Entwicklung in der EU zeichnet sich jedoch mittelfristig eine Verlangsamung dieses Wachstums ab. Das im Auftrag der EU entwickelte Energie- und Verkehrsmodell PRIMES geht sogar von einem Rückgang der Pkm im Straßenbereich um jährlich 0,3 % ab 2020 aus (Mantzos und Capros, 2006). Dieser wird sich vornehmlich in peripheren, strukturschwachen Gebieten bemerkbar machen, während die großen Ballungszentren weiterhin einen Zuwachs an Verkehrsleistung und der damit verbundenen Umwelt- und Sicherheitsprobleme verzeichnen werden (Schade et al., 2006).

Die Entwicklung im Güterverkehr innerhalb der EU25 wuchs im Zeitraum 1995 bis 2004 noch deutlicher um 31,3 % von 2972 auf 3903 Mrd. Tonnenkilometer (Tkm). Der Straßengüterverkehr konnte dabei seine dominierende Stellung von 42,1 % auf 44,2 % steigern, während der Schienengüterverkehr in gleichem Maße Marktanteile verlor und zuletzt 2004 10,0 % der Transportleistung in der EU beförderte (EU, 2006). Auch im Güterverkehr schwächt sich die Nachfrage nach Transportleistung nach Mantzos und Capros (2006) bis 2030 gegenüber den aktuellen Wachstumsraten ab 2020 um ca. 40 % von aktuell 2 % jährlich auf dann 1,2 % ab. Im Gegensatz zum Personenverkehr wird jedoch der Straßengüterverkehr weiterhin stärker als die anderen Verkehrsträger wachsen und somit den Marktanteil der umweltfreundlichen Verkehrsträger Bahn und Schiff weiter vermindern.

Verkehrliche Aktivitäten sind in der Regel mit erheblichen negativen Auswirkungen wie Stau, Unfällen, Luftverschmutzung, Klimabeeinflussung, Lärm, Flächenverbrauch oder der Zerschneidung natürlicher Lebensräume verbunden. Dabei besteht ein enger Zusammenhang zwischen wirtschaftlichem Wachstum, Verkehrswachstum und dessen negativer Folgen. Die vielbeschworene Entkopplung von Wirtschafts- und Verkehrswachstum oder die Verlagerung des Aufkommens im Personen- wie im Güterverkehr

auf umweltfreundliche Verkehrsträger trat in der Vergangenheit trotz erheblicher finanzieller Anstrengungen seitens der EU und deren Mitgliedsstaaten nicht ein (SRU, 2005). Die Zwischenbilanz des Weißbuchs zur gemeinsamen Verkehrspolitik 2010 der EU-Kommission (EU, 2001) sowie die jüngste Entwicklung in Deutschland zeigen jedoch, dass der Marktanteil der Eisenbahnen bei konsequenter Marktöffnung und der Festsetzung strenger Rahmenbedingungen für einen diskriminierungsfreien Betrieb durchaus gesteigert werden kann (EU, 2005).

In den nächsten 50 Jahren wird die Weltbevölkerung von 6 Mrd. auf 10 Mrd. und die Zahl der Pkw von 700 Mio. auf 2,5 Mrd. steigen (Chan, 2002). Bereits jetzt leben 50 % der Weltbevölkerung in Städten und bis 2020 wird dieser Anteil nach Angaben der Weltbank auf 55 % oder 4,1 Mrd. Menschen wachsen (Leautier, 2006). Neben dem Management des rasant wachsenden internationalen Waren- und Luftverkehrs stellt die Verbesserung der städtischen Umweltsituation damit eines der drängendsten Probleme des Verkehrsbereichs weltweit dar. Lösungsansätze hierzu liegen einerseits in der Bereitstellung öffentlicher Verkehrssysteme (Beispiel TransMilenio Expressbuskonzept in Coritiba und Bogotá), in der Schaffung energieeffizienter Stadtstrukturen mit kurzen Wegen, in einem bürgernahen Mobilitätsmanagement sowie nicht zuletzt in technischen Lösungen. Letztere bieten den Vorteil nachhaltiger Entwicklungspfade, da eine nachhaltigere Verkehrsentwicklung trotz Beibehaltung der gewohnten Verhaltensweisen der Menschen möglich ist. Eine aus ökologischer Sicht nachhaltige Entwicklung muss jedoch in der Regel durch Regulierung und gesetzliche Rahmenbedingungen gefördert oder gar erzwungen werden. Insgesamt sollte sich eine nachhaltige Verkehrs- und Umweltpolitik jedoch auf mehrere Säulen stützen um gesteckte Ziele möglichst schnell, effektiv und kostengünstig realisieren zu lassen.

Die vorliegende Fallstudie betrachtet die hybride Fahrzeugtechnik als eine Möglichkeit Kraftstoff und Emissionen zu sparen. Es handelt sich dabei um eine ausgewählte Technologielinie, welche in Ihrer Zukunftsfähigkeit und Zweckmäßigkeit mit Hinblick auf Nachhaltigkeitsziele hinter anderen Alternativen, wie z. B. der Wasserstofftechnologie, rein elektrischen Antrieben oder moderner Dieselmotortechnologie (Turbo-Direkteinspritzung) zurück bleiben kann. Welche Technologie sich in den nächsten Jahrzehnten durchsetzen wird, erscheint aus heutiger Sicht noch offen. Jedes der diskutierten Konzepte hat spezifische Vor- und Nachteile, womit die Ausbildung von Nischenmärkten wahrscheinlich ist. Die hybride Antriebstechnologie hat hier jedoch den spezifischen Vorteil von Verbesserungen sowohl im Bereich der Elektroantriebe, der Verbrennungsmotoren wie auch der Kraftstoffe profitieren zu können ohne Einschränkungen in der Handhabung oder neue Betankungs-Infrastrukturen zu benötigen.

2.2 Die Technologie

Definition und Abgrenzung: Unter Hybridantrieb ist eine Kombination von zwei oder mehreren Antrieben zu verstehen, die sich idealer Weise gegenseitig ergänzen. Im Zuge der vorliegenden Fallstudie werden unter Hybridfahrzeugen Kraftwagen mit einem kombinierten Antrieb aus Verbrennungs- und Elektromotor/Elektrospeicher verstanden. Die Substitution des Verbrennungsmotors durch eine Brennstoffzelle ergibt einen reinen Elektroantrieb und wird daher im Folgenden nicht betrachtet. Ebenso werden im Forschungsbereich angesiedelte mechanische oder hydraulische Energiespeicher nicht berücksichtigt. Die Darstellungen konzentrieren sich auf Pkw. Einen Überblick gibt Franke (2004).

2.2.1 Entwicklungsgeschichte hybrider Antriebe

Das weltweit erste Patent für ein benzin-elektrisches Motorfahrzeug wurde 1905 angemeldet. Das Ziel der Entwicklung war nicht die Energieeinsparung sondern verbesserte Beschleunigungswerte (0 auf 40 km/h in 10 Sekunden). Trotz schneller Fortschritte bei Benzinmotoren lieferte die Hybridtechnologie Stoff für visionäre Fahrzeugkonzepte in den USA dieser Zeit. Für die Konsumenten war jedoch Geschwindigkeit wichtiger als Sparsamkeit, weshalb ein 1914 angebotener Hybrid mit einem Verbrauch von 3,6 l/100 km keinen Anklang fand. Die ersten Hybrid-Lkw wurden bereits 1918 gebaut.

Zur Verbesserung der Luftqualität empfahl der US-Kongress 1966 die Förderung elektrischer Fahrzeuge. Ferner führten Entwicklungen in anderen Industriebereichen zu langlebigeren Batterien, welche für den Einsatz auf Fernstraßen geeignet waren. Den eigentlichen Schub erlebten hybride Antriebe allerdings erst während der Ölkrise in den 1970ern. Mit größer werdenden städtischen Umweltproblemen nahmen Volkswagen und Toyota weltweit Spitzenstellungen mit der Produktion von Prototypen hybrider Taxis und Busse ein. Die kalifornische Regierung erließ die ersten Gesetze über Mindestverkaufsquoten emissionsfreier Fahrzeuge.

Als erstes Unternehmen bot Toyota 1997 schließlich das erste serienmäßige Hybridfahrzeug an. Diese wurden allerdings nur in Japan angeboten. In den USA war Honda der erste Anbieter von Hybridautos. Nach Prius und Civic folgte 2004 der Ford Escape.

2.2.2 Aufbau und Varianten hybrider Antriebssysteme

Elemente eines Hybridantriebes sind:

- beliebiger Verbrennungsmotor mit Kraftstofftank,

- Elektromotor(en) und Hochleistungsbatterie, deren Be- oder Entladung und damit der Betrieb der E-Maschine(n) als Motor oder Generator, durch die Leistungselektronik geregelt wird sowie,
- Getriebe, über das die verschiedenen Betriebsmodi realisierbar sind.

Der Elektro-Motor ergänzt durch sein hohes Drehmoment bereits bei sehr niedriger Drehzahl das niedrige Drehmoment eines Verbrennungsmotors beim Starten zu einem hohen Gesamtdrehmoment oder übernimmt das Anfahren. Beim Beschleunigen arbeiten beide Motoren zusammen (boosten), d. h. der Verbrennungsmotor kann kleiner ausgelegt werden (downsizing) oder das System erbringt eine größere Leistung/schnellere Beschleunigung. Bremsenergie wird mit Hilfe der E-Maschine in elektrische Energie umgewandelt und zum Laden der Batterie verwendet (Rekuperation). Durch Lastpunktanhebung trägt der Verbrennungsmotor bei hohen Drehzahlen ebenfalls zum Laden der Batterie bei (Generatorbetrieb der E-Maschine). Bei Langsamfahrten (z. B. Stadtverkehr, im Leerlauf, beim Einparken) wird, bei entsprechender Auslegung des Hybridantriebes/des E-Motors/der Batterien und deren aktueller Ladung, der Verbrennungsmotor ganz ausgeschaltet und rein elektrisch gefahren.

Die Kraftstoff-Einsparung ist demnach am höchsten, wenn vorwiegend im Stadt- oder Nahverkehr (Langsamfahrten, sowie bei häufigem Bremsen und Anfahren) gefahren wird. Neben der Verminderung der Verbrennungsemissionen bewirkt eine geringere Erhitzung der Bremsscheiben deren geringeren Verschleiß und die Lärmemissionen sinken beim Anfahren und durch Fahrphasen im rein elektrischen Betrieb.

Hohe Geschwindigkeiten (z. B. schnelle Autobahnfahrten) werden durch hohe Motorleistungen über längere Zeit erbracht. Diese sind vom Verbrennungsmotor bereitzustellen. Kraftstoffverbrauch und Emissionen steigen, trotz Unterstützung des E-Motors beim Beschleunigen, teilweise über diejenigen eines konventionellen Antriebes, da eine höhere Masse bewegt werden muss.

Die **Kombinationsvarianten** der Hybridantriebe reichen von der Startunterstützung des Verbrennungsmotors durch den Elektromotor bis hin zum gleichwertigen Einsatz beider Aggregate. Zu und zwischen diesen Grundformen existieren zahlreiche Detailvarianten:

- Micro-Hybrid: Abschalten des Verbrennungsmotors beim Anhalten und Startunterstützung des E-Motors (2 – 3 kW) und Rekuperation; Kraftstoffeinsparung 5 – 10 %;
- Mild-Hybrid: zusätzlich Boosten und Generatorbetrieb, Kraftstoffeinsparung 15–20 %;
- Full-(Strong)-Hybrid: zusätzlich rein elektrischer Betrieb, Kraftstoffeinsparung > 20 %; Bauarten: parallel, seriell oder leistungsverzweigt; Plug-in erlaubt zusätzlich die Batterien am Stromnetz aufzuladen.

Hinsichtlich Kraftstoffeinsparungen und Emissionsminderungen sind Vollhybride die interessantere Lösung, aber auch die teurere. Parallel- und Powersplit- Hybride weisen einen ähnlichen Wirkungsgrad auf. Die serielle Bauweise empfiehlt sich bei weitgehend konstanter, prognostizierbarer Betriebsweise des Fahrzeuges und hierdurch optimaler Auslegbarkeit des Systems (vgl. Stadtbus, Pkw und Nutzfahrzeuge im Stadt- und Nahverkehrsbereich).

Der Schwerpunkt der Entwicklungen liegt auf Geländewagen und Fahrzeugen der Ober- und Luxusklasse, in denen sich Gewicht und Kosten prozentual am wenigsten bemerkbar machen, so wie auf Benzinmotoren, an denen der Einspareffekt am deutlichsten spürbar ist. Die Entwicklungen zielen auf den amerikanischen Markt ab. Mit der Entwicklung eines Mild-Hybrid der Oberklasse durch BMW, DaimlerChrysler und GM wird jedoch auch langsam der europäische Markt bedient. Volkswagen ist in mehreren Modellvarianten und Preissegmenten aktiv: Nach der Vorstellung des Touran-Prototypen Hybrid plant der Konzern Hybridversionen von Golf, Polo, Touareg und des Audi Q7. In Kooperation mit VW und Audi entwickelt Porsche derzeit eine Hybridversion des Cayenne bis 2010. Dieser ist als Vollhybrid ausgelegt und soll eine Verbrauchsminderung von 15% erreichen (Autokiste, 2007).

Verbrennungsmotor

Grundsätzlich ist es für die Wirkungsweise und die Kraftstoffeinsparung eines Hybridantriebes sekundär, welche Konfiguration als Verbrennungsmotor arbeitet. So ist es auch möglich, im Laufe der Zeit Weiterentwicklungen hinsichtlich Kraftstoffverbrauch und Umweltbelastung zu installieren.

Hinsichtlich technischer Realisierung, Emissionsminderung und Marktakzeptanz sind der Platzbedarf des Motors einschließlich Kraftstofftank, das Gewicht, die Mehrkosten für das Fahrzeug gegenüber einem konventionellen Fahrzeug, die Fahrgewohnheiten des Fahrers und die absolut eingesparten Kraftstoffmengen/-kosten zu berücksichtigen.

Dieselmotoren weisen bereits in den meisten Motorbetriebspunkten einen sehr guten Wirkungsgrad auf. Auf gut ausgebauten Landstraßen und Autobahnen sind sie einem gleichwertigen Hybridfahrzeug (Benzin- + E-Motor) bei gleicher Fahrweise hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs sogar überlegen. Fahrzeughersteller sehen Verbrauchs- und Emissionsminderungen durch weitere Optimierung der Autoformen, des Gewichtes, der Einspritzsysteme, der Verbrennung, der Turbolader und in der Abgasnachbehandlung. So soll durch NO_x- Speicherkatalysator, bei größeren Fahrzeugen durch Einspritzung des Additivs „Adblue“ in das Abgas, eine Reduktion von NO_x von 80 % erreicht werden (Bluetec-Motoren). Biodiesel ist für die modernen Einspritzsysteme und Rußfilter ungeeignet, synthetischer Diesel erfordert einen hohen Energieeinsatz bei der Herstellung. Eine Kombination aus Diesel- und Benzinmotor („Diesotto“) ist in Entwicklung, erfordert aber eine flächendeckende Versorgung mit Spezialkraftstoff.

Benzinmotoren weisen einen höheren Verbrauch als Dieselmotoren auf. Durch Anwendung geeigneter Turbolader und Kompressoren wird die Leistung erhöht, so dass

bei gleicher Leistung kleinere, sparsamere Motoren Verwendung finden können. Weitere Ansatzpunkte sind beispielsweise die Direkteinspritzung, eine Veränderung der Drosselklappenführung und eine Verbesserung der Motorkühlung. Zur Verbesserung der Gesamtemissionsbilanz werden in Zukunft die Motoren auf eine steigende Zumischung von Bioäthanol ausgerichtet (FFV „Flexible Fuel Vehicles“), (bivalente) Nutzung von Benzin und Erdgas, Bio(erd)gas oder LPG (Liquefied Petroleum Gas) kann zur Minderung des Ozonbildungspotentials beitragen.

Wasserstoff könnte aus Biomasse oder mit Hilfe jedweden Energieträgers erzeugt werden. Derzeit jedoch wird er vorwiegend aus Erdgas oder Rohöl erzeugt. An Emissionen fällt bei Wasserstoffbetrieb praktisch nur noch Wasserdampf an. Unabhängig davon ob Wasserstoff direkt im Verbrennungsmotor verwendet wird oder in einer Brennstoffzelle erzeugt wird, bereitet die Speicherung Probleme. Derzeit sind die Möglichkeiten, zumindest im Pkw-Bereich, zu aufwendig und damit zu teuer. In Bussen ist der Einsatz derzeit besser zu realisieren. Weiterentwicklungen sind hinsichtlich der Leistung, der Zuverlässigkeit, der Standzeit, der Kaltstarteigenschaften und für den Betrieb bei niedrigen Temperaturen nötig. Darüber hinaus ist eine kostengünstige, sichere Tankstellentechnik zu entwickeln und das Tankstellennetz aufzubauen.

Elektromotoren und -generatoren

Elektromotoren können vom Start weg ihr maximales Drehmoment erreichen. Sie ergänzen somit im Hybridantrieb das geringe Anfangsdrehmoment des Verbrennungsmotors und ersetzen mittels der eigenen Charakteristik ein aufwendiges Automatikgetriebe/Getriebe und Kupplung. Radantriebe mit integrierten Elektromotoren erlauben eine wahlweise Zu- und Abschaltung nach vielfältigen Kriterien.

Anforderungen an die Elektromotoren sind eine hohe massen- und volumenspezifische Leistung, hoher Wirkungsgrad, geringer technischer Aufwand und möglichst geringe Kosten. In Hybridfahrzeugen kommen vorwiegend Asynchronmotoren und wirkungsgradstarke Permanentmagnet-Synchronmotoren zum Einsatz. Weitere Entwicklungen versuchen die Vorteile beider Motoren zu verknüpfen („Memory motors“). In Zukunft könnten verstärkt mechanische oder hydraulische Verbindungen durch „By-Wire-Techniken“ ersetzt und schließlich in vollintegrierte By-Wire-Technologien und elektrische Radantriebe münden. (Egger, 2006)

Energiespeicherung

Die Energiespeicherung begrenzt derzeit noch die Effizienz der Hybrid- und Elektrofahrzeuge durch relativ geringe Energiedichte, hohes Gewicht und hohe Kosten.

„Heiße“ Batterien (z. B. Na-NiCl₂) werden derzeit selten im Automobilbau eingesetzt. Unter den „kalten“ Batterien weist die Lithium-Ionen-Batterie die höchste Energiedichte auf. Von neueren Entwicklungen (Lithium-Metall-Polymer-, Zink-Sauerstoffbatterien) werden höhere Energiedichten erwartet. Am häufigsten anzutreffen sind derzeit die Ni-MH-Batterien. Sie werden jedoch eher als „Platzhalter“ für die Weiterentwicklungen der Li-Ionen-Batterien eingestuft (FhG-ISI, 2006). Nach technischen Einschätzungen kön-

nen wegen der grundsätzlichen chemischen Eigenschaften bekannter Elemente Energiedichte, Ladezeit und die Lebensdauer von Batterien nur noch begrenzt gesteigert werden. Einen Ansatz verfolgt der US-Hersteller AltairNano: Die an zwei Automobilhersteller ausgelieferten NanoSafe-Batterien sollen durch den Ersatz von Kohle- durch Keramikmembranen wesentlich schnellere Ladezeiten und eine größere Zahl von Ladezyklen erlauben.

Den Markt beherrscht Japan insbesondere auch im Hinblick auf Li-Ionen-Batterien, jedoch dringen China und Korea massiv in diesen Markt ein (FhG-ISI, 2006). In Deutschland beteiligen sich die Degussa AG, die Chemetall GmbH und die Volkswagen AG an der Einrichtung einer Stiftungsprofessur für Angewandte Materialwissenschaften zur Energiespeicherung und Energieumwandlung an der Westfälischen Wilhelmsuniversität Münster. Der Betrieb soll 2007 aufgenommen werden (Uni-Protokolle, 2006).

Getriebeelemente/Leistungs- (Power-) Elektronik

Von zentraler Bedeutung für die effiziente Umsetzung der Betriebsmodi eines Hybridfahrzeuges ist das Modul, das die Leistungsaddition ebenso wie die Leistungszufuhr an den Generator umsetzt. Ebenso wichtig ist die Elektronik, die diesen Vorgang steuert. Die Funktion des Moduls übernimmt in der Regel ein Planetengetriebe.

Die Leistungs- und Kontrollelektronik ist im Gesamtsystem integriert, hat hier eine Vielzahl von Aufgaben zu bewältigen und muss hohe Temperaturen sowie erhebliche Erschütterungen verkraften. Modulare Systeme können eine Lösung für die Aufgabenvielfalt sein, die sich zumindest in Teilen von Anwendung zu Anwendung verändert. Auch in den Elektronikbausteinen selber sind ständig Weiterentwicklungen (z. B. System on Chip-Halbleiter) zu verzeichnen, die wiederum andere Möglichkeiten des Steuerungsaufbaus eröffnen.

Nach Angaben von SIEMENS VDO ergibt sich bei der modularen Anordnung der Elemente im Antriebsstrang grundsätzlich eine Multiplikation der Leistungsverluste. Optimierungsmöglichkeiten bestehen hierbei in der Integration von Getriebe und E-Motoren in der Form von Radnabenmotoren. Neben einem deutlich höheren Wirkungsgrad sparen diese Platz im Fahrzeug für Maßnahmen der passiven Sicherheit sowie für Gepäck oder Fahrgäste. Toyota arbeitet derzeit an entsprechenden Entwicklungen mit einer geplanten Markteinführung innerhalb der nächsten sechs Jahre (Back, 2005; Naunin, 2007)

Bremssysteme

Einen wesentlichen Beitrag zum Einsparen von Kraftstoff durch teil- oder vollelektrische Fahrzeuge ist die Speicherung und spätere Nutzung von Bremsenergie. Hierbei stehen die weniger effizienten hydraulischen Bremssysteme der Toyota-Technologie dem vollelektrischen Wedge-Brake-System von SIEMENS gegenüber. Letzteres bietet neben einer besseren Ausnutzung der Bremsenergie auch höhere Bremsleistungen bei

einer besseren Regelbarkeit und erlaubt somit eine Weiterentwicklung des ABS-Standards. Die Markteinführung wird durch SIEMENS für 2011 angepeilt.

2.2.3 Wirtschafts- und Warenstruktur

Warengruppen

Die hybride Antriebstechnologie in der hier betrachteten klassischen Ausprägung als Verknüpfung von Verbrennungs- und Elektromotor stellt ein Bindeglied des klassischen Fahrzeugbaus und der Elektrotechnik dar. Unterscheiden lassen sich entsprechend der obigen Ausführungen die Segmente:

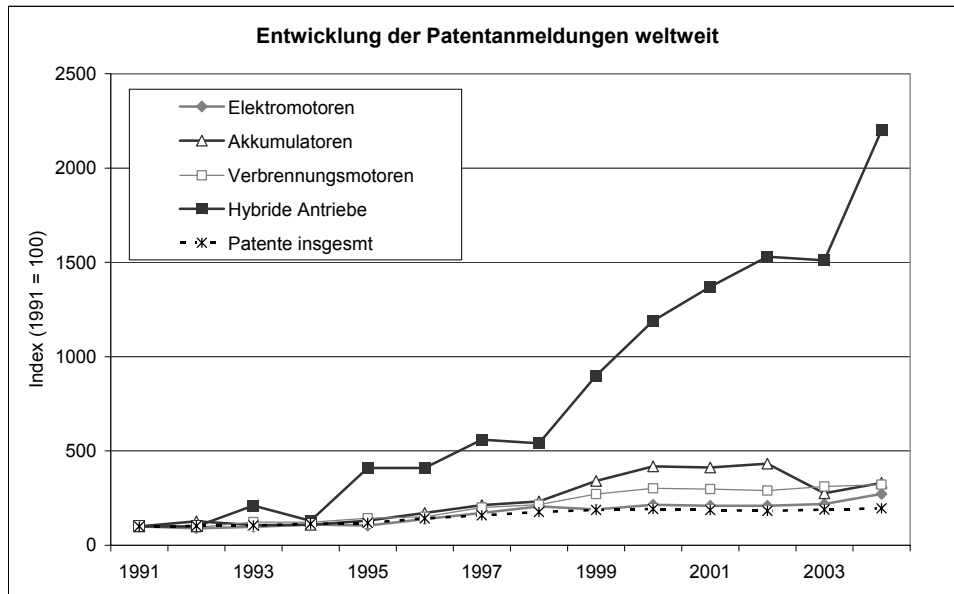
- Fahrzeug- und Motorenbau:
 - Verbrennungsmotoren: klassische Benzin- und Dieselmotoren, jedoch auch alternative Antriebe. Warengruppen 840732 (Benzinmotoren) und 840820 (Dieselmotoren)
 - Getriebebau: Planetengetriebe zur Leistungsaddition. Warengruppen 848340 (Getriebe für Automobile allgemein)
 - Bremsanlagen zur Energierückgewinnung. Warengruppe 850520.
- Elektroindustrie:
 - Elektromotoren: Speziell robuste Hochleistungsmotoren. Warengruppe 8501 (Elektromotoren allgemein nach Leistungsklassen).
 - Akkus mit hoher Leistungsdichte und Lebensdauer. Warengruppe 850780
 - Streuerelektronik für kombinierte Getriebe. Warengruppe nicht verfügbar.

Technologische Entwicklungsdynamik:

Die Technologiedynamik im Bereich hybrider Antriebe ist geprägt durch die Fortschritte in der Energiespeicher-, Getriebe- und Steuerungstechnik einerseits und durch verschärfte technische Standards und Förderprogramme andererseits. Insbesondere die Zero-Emission-Gesetzgebung in dem für die Autoindustrie wichtigen kalifornischen Markt und der Anstieg der Spritpreise in den USA Anfang dieses Jahrhunderts fachte die Nachfrage nach alternativen Antriebskonzepten an.

Die technologische Dynamik im Bereich hybrider Antriebe stellt sich weit intensiver dar als die Dynamik der wichtigsten Komponenten. Dies lässt sich durch die Analyse der Patentanmeldungen im Technologiefeld insgesamt sowie in den Komponenten Verbrennungsmotoren, Elektromotoren und Energiespeichertechnik darstellen. Abbildung 2-1 zeigt eindrucksvoll die Gesamtdynamik des Technologiefeldes „Hybride Antriebe“ auf, die wesentlich höher liegt als die der Teilkomponenten und des Referenzsystems der Verbrennungsmotoren.

Abbildung 2-1: Relative technologische Entwicklungsdynamik hybrider Antriebe und deren Komponenten



Die Abbildung zeigt weiter die starke Entwicklung bis Mitte der 90er Jahre (Euphorie), gefolgt von einer eher stagnierenden Entwicklung bis etwa 1998 (Ernüchterung). Erst Ende der 90er Jahre zog die Entwicklung, nach der Überwindung anfänglicher technischer Schwierigkeiten und Akzeptanzproblemen wieder an und führte zu ersten Markteinführungen. Derzeit sind Hybridfahrzeuge zwar schon am Markt in den USA und Japan etabliert, in Europa gilt die Technologie auf Grund der weiten Verbreitung von Dieselfahrzeugen derzeit noch als Innovation.

2.3 Nutzen für Umwelt und Gesellschaft

Die entscheidenden Potenziale der hybriden Antriebstechnik liegen in der generellen Steigerung der Energieeffizienz und damit eines geringeren Verbrauchs sowie in der Möglichkeit lokale Emissionen unter bestimmten Gegebenheiten ganz zu vermeiden. Die Erhöhung der Kraftstoffeffizienz und somit die Verringerung spezifischer CO₂-Emissionen wird im Wesentlichen auf zwei Wegen erreicht (Grünwald, 2007):

- durch den höheren Wirkungsgrad des Elektromotors im unteren Drehzahlbereich,
- durch den Betrieb des Verbrennungsmotors in einem günstigeren Wirkungsbereich und eine entsprechende Verringerung der Motorleistung (Down-Sizing) und
- durch die teilweise Rückgewinnung der Bremsenergie.

Die Kraftstoffersparnis beträgt, je nach Betriebszyklus, 15 % bis 25 % gegenüber einem vergleichbar motorisierten Fahrzeug mit reinem Ottomotor (Stan, 2005). Die Kraftstoffersparnis tritt jedoch nur in Fahrzyklen mit moderaten Geschwindigkeiten sowie regelmäßigen Beschleunigungs- und Bremsvorgängen zu Tage. Diese Verhältnisse sind vor allem im Stadt- und Nahverkehr gegeben. Auf langen Autobahnfahrten hingegen wird der elektronische Antrieb nicht verwendet und bei zu häufigen starken Bremsmanövern oder Bergabfahrten kann die Batterie die Bremsenergie nicht vollständig aufnehmen. In diesen Fällen macht das zusätzliche Gewicht der Batterie den höheren Wirkungsgrad des hybriden Antriebs zunichte, so dass unter Umständen ein höherer Treibstoffverbrauch als bei einem vergleichbaren Fahrzeug mit reinem Verbrennungsmotor entsteht. Der Effizienzgewinn hängt ferner von der Art des Verbrennungsmotors ab. Er fällt für Ottomotoren deutlich größer aus als für Dieselmotoren (vgl. McLean and Lave, 2002; Stan 2005).

Auf Grund des geräuscharmen Betriebs von Elektromotoren zeigen hybride Antriebe im Stadtverkehr günstigere Lärmemissionswerte, was insbesondere für Brennstoffzellen-Hybride, aber lokal auch für die hier betrachteten Varianten aus Elektro- und Verbrennungsmotoren gilt (Ahmed, 2004). Gelegentliche negative Folgen der leiseren Fahrweise auf das Unfallgeschehen durch fehlende akustische Warnsignale lassen sich durch empirische Daten nicht bestätigen.

Einer der wesentlichen Vorteile hybrider Antriebe ist, dass sie, je nach Dimensionierung des Elektromotors, lokal emissionsfrei gefahren werden können. Insbesondere erlaubt der beim Anfahren des Fahrzeuges aktive Elektromotor das komplette Ausschalten des Antriebs auch während kurzer Standzeiten und somit die Vermeidung jeglicher Emissionen im Stand. Dies und der Elektrobetrieb im unteren Drehzahlbereich, in welchem die NO_x -Emissionen des Verbrennungsmotors überdurchschnittlich hoch ausfallen, machen besonders Vollhybride im Innenstadtbereich, wo Belastung und Sensibilität gegenüber Emissionen und Lärm weit höher sind als außerorts, sehr interessant. Entsprechend sind Hybridfahrzeuge von der Londoner City-Maut befreit und dürfen die Innenstadtbereiche von Athen und die der Metropolen in Kalifornien uneingeschränkt befahren. Romm (2004) bezeichnet die hybride Antriebstechnologie wegen Ihrer technischen Flexibilität und auf Grund noch unausgeschöpfter Potenziale als Antriebstechnologie der Zukunft.

Über die Reduktion des Verbrauchs von Verbrennungskraftstoff trägt das Konzept, je nach Fahrzyklus, zur Abmilderung der Klimaerwärmung bei, ohne Vorgaben für das Verhalten der Verkehrsteilnehmer zu machen. Diese Eigenschaft begünstigt in erheblichem Maße die Akzeptanz der Technologie. So stieg der Absatz hybrider Fahrzeuge in den USA auf Grund der hohen Kraftstoffpreise 2005/06, nach Einführung der City-Maut

in London sowie der Zufahrtsbeschränkungen in Athen deutlich an. Neuere Erhebungen zeigen jedoch eine Abschwächung der anfänglichen Euphorie in den USA (Power, 2007).

Die Vorteile hybrider Antriebe für den Klimaschutz, und mit Einschränkungen auch für die Vermeidung lokaler Schadstoff- und Lärmemissionen, könnten im Prinzip durchaus auch durch technische Verbesserungen von Verbrennungsmotoren und der Abgasbehandlung erzielt werden. Hybridantriebe beschreiten jedoch einen ersten Schritt hin zu komplett neuen Antriebssystemen, wie Batterie- oder Wasserstoffantriebe. Damit fördern sie einerseits ein Umdenken seitens der Automobilhersteller bezüglich zukunftsfähiger Alternativen zu Verbrennungsmotoren und führen andererseits die Kunden an die neue Technologie heran. Die zukünftige Entwicklung wird schließlich durch den Fortschritt in der Energiespeichertechnik bestimmt. Der Charme der hybriden Lösung besteht auch darin, dass sie zusätzlich von technischen Verbesserungen bei den Verbrennungsmotoren profitiert und somit keine Entweder-oder-Entscheidung zwischen zwei Alternativen, sondern eine komplementäre Technologie bildet.

Den positiven Eigenschaften von Hybridfahrzeugen stehen höhere Anschaffungskosten durch eine wesentlich aufwendigere Motorkonstruktion sowie ein höheres Leergewicht des Fahrzeugs gegenüber. Ein Problem kostenseitig sowie aus Umweltgesichtspunkten stellt auch der Lebenszyklus der Batterien dar. Hier kann jedoch davon ausgegangen werden, dass Herstellung, Lebensdauer und Entsorgung mit zunehmender Marktdurchdringung der Technologie gelöst werden. Ferner ist die ökologische Effizienz bei Hybriden mit direkter Aufladung der Batterien am Stromnetz (Plug-Hybrids) entscheidend von der Art der Energieerzeugung abhängig. Auf Grund des Verlustes durch die mehrfache Umwandlung und Speicherung schneidet die Bilanz für fossil erzeugte Elektrizität im Vergleich zum reinen Verbrennungsmotor deutlich schlechter ab (Stan, 2005). Mögliche Probleme werden auch im Bereich von Rebound-Effekten, d. h. Anschaffung größerer Fahrzeuge und Mehrfahrten aufgrund der Effizienz der Hybrid-Technologie vermutet. Untersuchungen aus der Schweiz (de Haan et al., 2006) bestätigen dies jedoch nicht.

2.4 Wirtschaftliche Potentiale und Märkte

2.4.1 Potenziale der Technologie

Die Entwicklungen in den USA, Großbritannien und Griechenland zeigen, dass die wirtschaftlichen Potenziale hybrider Antriebe vor allem dort zu sehen sind, wo strenge Umweltgesetzgebungen den Verkauf oder den Betrieb schadstoffreicher Fahrzeuge beschränken. Die hybride Technologie bietet dabei den Vorteil eines lokal emissionsfreien Betriebs ohne den Nutzer in seinen Gewohnheiten einzuschränken. Entsprechend obliegt die Marktdynamik zu einem großen Teil politischen Rahmenbedingungen.

Der hybriden Antriebstechnik wird die Funktion einer Brückentechnologie hin zu vollkommen emissionsfreien Fahrzeugen auf Batterie- oder Wasserstoff-Basis zugesprochen. Demirdöven und Deutsch (2004) kommen jedoch zu dem Ergebnis, dass die Hybridtechnologie Wasserstoffantrieben bezüglich der Kraftstoffeffizienz überlegen sei und somit der Förderschwerpunkt der Politik auf Hybridfahrzeugen liegen sollte. Da sowohl bei der Batterie- als auch bei der Wasserstoff- bzw. Brennstoffzellen-Technik noch entscheidende technische Hindernisse zu überwinden sind, ist hier ein technischer Durchbruch in absehbarer Zeit nicht zu erwarten. Der Zwischenschritt über die Hybridtechnologie ist hier zwar nicht zwingend notwendig, da gerade bei der Brennstoffzellen-Technologie das Hauptproblem in der Herstellung und Speicherung des Wasserstoffs liegt (Hammerschlag und Mazza, 2005), nach Angaben aus der Zulieferindustrie werden aber letztlich alle derzeit für hybride Fahrzeuge entwickelten Komponenten in den Fahrzeugen der Zukunft zu finden sein. Von entscheidender Bedeutung für die Effizienzsteigerung von Antriebssystemen wird letztendlich ein intelligentes Energiemanagement sein.

Nach Projektionen der US Energy Information Administration (Maples, 2003) beträgt – vorbehaltlich aller Unsicherheiten bezüglich der Umweltpolitik, der Energiepreise und der Einstellung der Verbraucher – der Anteil der Verkäufe hybrider Fahrzeuge 2025 25 % (Schätzungen DaimlerChrysler: 20 %) des gesamten Fahrzeugabsatzes in den USA, womit diese den größten Teil des Fahrzeugbestandes mit alternativen Antrieben stellen. Nach Green et al. (2004) kann der Marktanteil leichter Nutzfahrzeuge mit Hybridantrieb bis 2012 in einem ähnlichen Bereich liegen, während hier der Dieselsechnologie nur ein Marktanteil von 7 % zugesprochen wird. Dem reinen Elektroantrieb oder der Brennstoffzelle wird hingegen kein nennenswerter Marktanteil zugeschrieben.

Die deutsche Fahrzeugindustrie sieht zukünftige Entwicklungstrends neben Vollhybriden auch bei Teilhybriden (Mild-Hybrids), da diese insgesamt kosteneffizienter sind. Ferner gibt es europäische Entwicklungen im Bereich von Diesel-Hybrid-Motoren und Anwendungen im Nutzfahrzeugsegment. Für bestimmte Nischenanwendungen könnten sich Plug-Hybrids etablieren. Die Batterietechnologie wird sich von NiMH hin zu Lithionen entwickeln.

Unter dem Schlagwort „Vehicle to Grid“ wird derzeit von verschiedenen Automobilherstellern und Stromerzeugern die Möglichkeit erörtert, große Flotten von Plug-Hybrid-Fahrzeugen als Zwischenspeicher zum Ausgleich von Lastspitzen oder Engpässen heranzuziehen. Entsprechende Feldversuche in den USA verlaufen bisher positiv (Brooks, 2002).

Nach einer repräsentativen Meinungsumfrage von TNS/Infratest unter deutschen Autofahrern würden sich 4,1% beim nächsten Autokauf auf jeden Fall ein Hybridfahrzeug kaufen. Dies entspricht etwa einer Menge von 70.000 Fahrzeugen. Kostenvorteile und Klimaschutz wurden dabei als die wichtigsten Voraussetzungen für die Kaufentscheidung benannt. (Continental, 2007). Der Umweltaspekt wurde auch durch eine entsprechende Befragung aller Käufer des Toyota Prius in der Schweiz bestätigt.

2.4.2 Identifikation von Konkurrenten und Zielländern

Die hybride Antriebstechnologie ist etwas teurer als konventionelle Verbrennungsmotoren und die Fahrzeuge haben, bedingt durch die vorherrschende Batterietechnologie, eine geringere Gesamtlebensdauer. Ferner erfordert die komplexe Technologie überdurchschnittlich qualifiziertes Wartungspersonal. Entsprechend werden die Zielländer der Technologie am ehesten in Nordamerika, Europa, Japan und Australien gesehen. Die Entwicklung in Europa und zunehmend auch in den USA wird durch die prominente Marktposition von Diesel-Pkw gedämpft, kann jedoch durch entsprechende Emissionsrichtlinien auf lokaler Ebene (Umweltzonen) oder emissionsgestaffelte Straßennutzungsgebühren stimuliert werden. Volkswagen verfolgt jedoch in Zusammenarbeit mit Shanghai Automotive Industrie Corporation das Ziel, 2008 zu den Olympischen Spielen einen Touran Hybrid für die Märkte in Entwicklungs- und Schwellenländern auf den Markt zu bringen. Eine entsprechende Kooperation mit Indien und Russland ist ebenfalls geplant (Volkswagen, 2005).

Vorbehaltlich deren Umweltgesetzgebung stellen auch die großen Metropolen Südostasiens und Südamerikas potenzielle Märkte dar. Bis 2020 werden hier jedoch, auch mit Hinblick auf die unterschiedlichen Politiken zum Einsatz regenerativer Kraftstoffe, keine

nennenswerten Marktanteile erwartet. Nach Angaben von DaimlerChrysler stellen sich die potenziellen Marktanteile bis 2020 weltweit wie folgt dar:

Tabelle 2-1: Potenzielle Marktanteile hybrider Fahrzeuge bis 2020

Land	Potenzieller Marktanteil bis 2020
Europa	10 – 15 %
USA	20 %
Japan	30 %
China	5 %

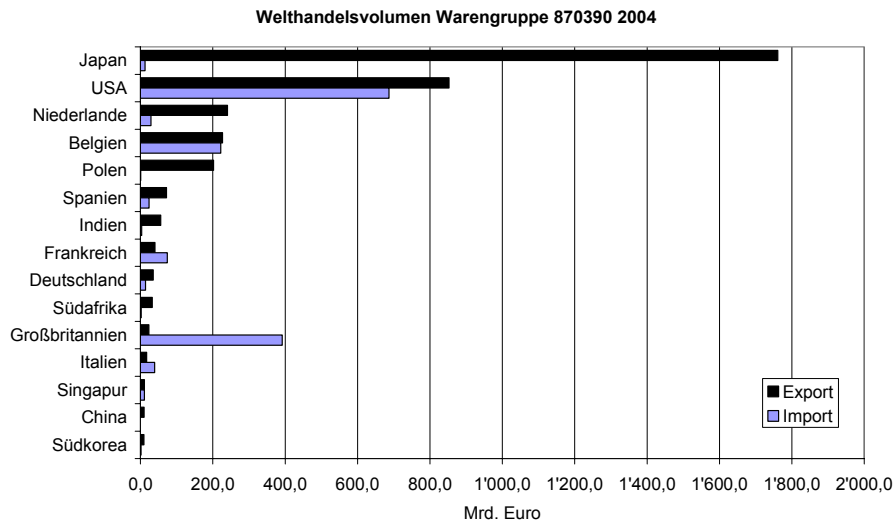
Quelle: Mündliche Angaben DaimlerChrysler

Nach den Ergebnissen der 2007 zum zweiten Mal erstellten Alternative Powertrain Study nimmt jedoch das Kundeninteresse in den USA durch eine nüchternere Betrachtung der Verbrauchsminderung hybrider Fahrzeuge in jüngster Zeit deutlich ab. So sank das Interesse an hybriden Fahrzeugen bei Pkw-Neukäufen von 75 % im Jahr 2006 auf aktuell 50 %. Demgegenüber genießen die in den USA 2007 neu eingeführten sauberen Dieselfahrzeuge steigende Kundenakzeptanz (Power, 2007). Auch nach Angaben der deutschen Industrie (Auto, Motor und Sport, 2007) haben Diesel-Direkteinspritzer-Systeme in Verbindung mit synthetischen Kraftstoffen gegenüber hybriden Antrieben zukünftig deutlich höhere Potenziale.

2004 betrug das Welthandelsvolumen an Fahrzeugen mit elektrischen Antrieben 3,6 Mrd. Euro gemessen an den Exporten¹. Abbildung 2-2 zeigt deutlich den marktbeherrschenden Exportüberschuss Japans, während die USA bei einer ebenfalls bedeutenden Marktstellung eine nahezu ausgeglichene Exportbilanz aufweist. Bemerkenswert sind auch die Exporte einiger europäischer Länder, während der starke Importüberhang Großbritanniens durch die Anreize über die Londoner City Maut erklärt wird. Es ist jedoch zu beachten, dass die hier betrachtete Warengruppe 870390 sämtliche Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb enthält und somit nur bedingt Rückschlüsse auf das Handelsvolumen mit hybriden Fahrzeugen getroffen werden können.

¹ Es wird angenommen, dass hybride Fahrzeuge hieran einen wesentlichen Anteil haben, die harmonisierte Außenhandelsstatistik (HS2002) erlaubt jedoch keine feinere Abgrenzung der Warengruppen.

Abbildung 2-2: Exporte und Importe von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb der 15 exportstärksten Nationen 2004



Im Bezug auf Fahrzeugarten (Pkw, Nutzfahrzeuge) oder Antriebsarten (Otto- vs. Diesel-Verbrennungsmotor) ergibt sich für Europa keine nennenswerte Sonderstellung zu den Konkurrenten Japan und USA. Es lassen sich jedoch einige Besonderheiten von Produktion und Einsatz von Hybridfahrzeugen feststellen:

- Während die meisten Hersteller sich auf den günstigeren Ottomotor in hybriden Antrieben beschränken, entwickelt Renault-PSA derzeit den weltweit einzigen Diesel-Hybrid-Antrieb.
- Busse mit Hybridantrieb sind derzeit in Japan und den USA regulär im Einsatz. In Deutschland stellte MAN 2007 einen neuen Hybrid-Stadtbuss vor, welcher in Nürnberg testweise eingesetzt wird. Daneben kann das AutoTram[®] System des Fraunhofer-IVI genannt werden.
- Hybrid-Lkw sind derzeit lediglich in Japan im Einsatz. Volvo testet derzeit Hybrid-Varianten seines Lkw-Angebots (Modelle ECT und FL6 Hybrid)

2.4.3 Charakterisierung wichtiger Konkurrenzländer

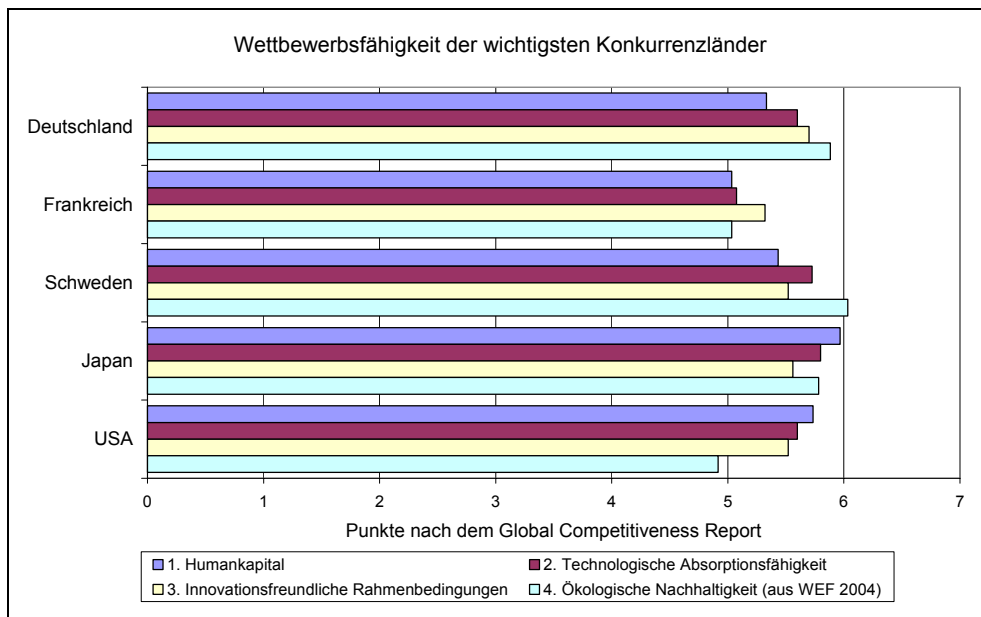
In technologischer Hinsicht stellen innerhalb Europas derzeit Frankreich und Schweden die wichtigsten Konkurrenten dar. Die technologischen Profile der Länder unterscheiden sich jedoch insofern, da Renault und PSA auf die Kombination von Diesel- und Elektromotoren für Pkw setzen, während VOLVO Hybridantriebe im Nutzfahrzeugbereich vorantreibt. Im Rahmen der Kooperationen VW/Porsche und BMW/DaimlerChrysler/GM festigt Deutschland einerseits seine internationale Positio-

nierung und verschafft sich Zugang zum US-Markt, Mit Entwicklungen im Premium-, Sport- und Kleinwagenbereich decken die Hersteller einen breiten Marktbereich ab.

Außerhalb Europas stellen Japan und die USA derzeit die einzigen Konkurrenten dar. Dies könnte sich jedoch mittel- bis langfristig mit dem Engagement Koreas oder Chinas ändern. Da die Hybridtechnologie jedoch teuer und noch sehr forschungsintensiv ist, dürfte sich die Konkurrenzsituation auf absehbare Zeit auf die erstgenannten Länder konzentrieren (vgl. Gallagher, 2006).

Die Indikatoren des Global Competitiveness Report erlauben eine grobe Charakterisierung dieser Länder. Hiernach fallen die europäischen Länder bezüglich Humankapital und technischer Absorptionsfähigkeit hinter Japan und den USA zurück. Andererseits bietet Europa nach dieser Beurteilung weltweit durchaus innovationsfreundliche Rahmenbedingungen und fällt bezüglich der Förderung einer ökologisch nachhaltigen Entwicklung besonders positiv auf. Innerhalb des europäischen Vergleichs fällt Frankreich hinter Deutschland und Schweden zurück. International belegt hiernach Japan in nahezu allen Indikatoren den Spitzenplatz (Abbildung 2-3).

Abbildung 2-3: Global Competitiveness Indikatoren der wichtigsten Konkurrenzländer.



Die Importabhängigkeit europäischer Hersteller hybrider Antriebe stellt sich für die einzelnen Komponenten unterschiedlich dar. So besteht eine sehr hohe Abhängigkeit im Bereich der Batterietechnologie, während in den Bereichen Verbrennungsmotoren und Getriebe keine oder kaum Abhängigkeiten bestehen.

Tabelle 2-2: Importabhängigkeit europäischer Hersteller bei Komponenten hybrider Antriebe

Komponente	Importabhängigkeit
Verbrennungsmotoren	keine
Elektromotoren	zum Teil
Getriebe	kaum
Batterien	sehr hoch
Bremssysteme	zum Teil

Quelle: Recherchen des FhG-ISI

2.4.4 Charakterisierung wichtiger Zielländer

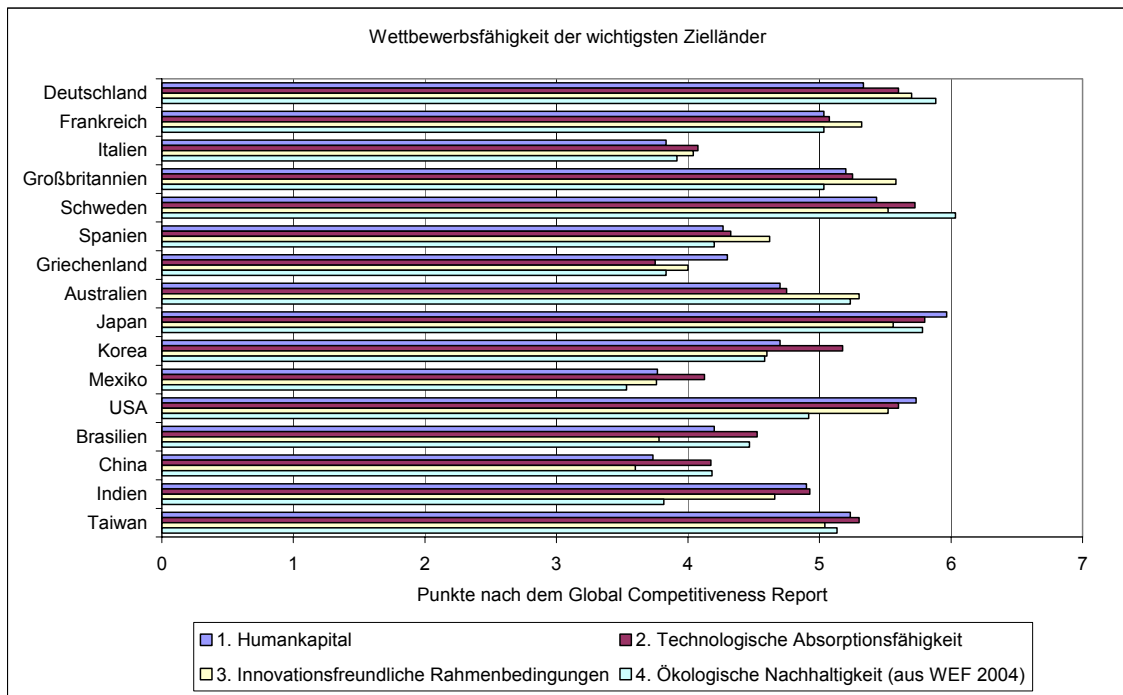
Den weltweit größten Markt stellen die USA dar. Dieser Markt ist einerseits durch sehr unterschiedliche Umweltgesetzgebungen zwischen den Staaten gekennzeichnet und somit weiter zu differenzieren. Andererseits ist das Käuferverhalten auf dem US-Markt grundsätzlich weit mehr an Leistungsdaten als an Sparsamkeit interessiert. Momentan spielt die Hybridtechnologie als Möglichkeit einer weiteren Leistungssteigerung u. a. bei Sports Utility Vehicles (SUVs) eine zentrale Rolle. Die Kraftstoffpreiserhöhungen 2005/06 haben jedoch gezeigt, dass das Kostenargument sehr kurzfristig in eine erhöhte Nachfrage münden kann.

Sowohl die USA als auch Japan zeichnen sich weiter durch eine Ablehnung von Dieselmotoren für Pkw aus, da dieser als nicht sauber genug wahrgenommen wird. Weiter zeichnete sich Japan in der Vergangenheit durch eine etwas größere Technikfreudigkeit der Käufer aus, was die Einführung des Hybrid-Konzepts begünstigt hat. Nach Aussagen der Automobilindustrie ist dies jedoch mittlerweile auch in Europa und den USA in ähnlicher Weise der Fall.

Ähnlich wie in den USA zeichnet sich auch der europäische Markt durch heterogene Umweltnormen auf lokaler Ebene aus. Ferner erfüllt die Diesel-Technologie die Kosteneffizienzvorteile eines Hybridfahrzeugs in ähnlicher Weise, so dass hier der Marktdurchbruch langsamer als in Japan oder den USA vonstatten gehen wird. Die Anstrengungen der europäischen Autobauer in diese Richtung könnten jedoch für eine erhöhte Akzeptanz seitens der Käufer sorgen.

Abbildung 2-4 stellt die vier Hauptindikatoren des Global Competitiveness Reports für eine Auswahl der oben umrissenen Zielländer dar. Für den Markterfolg hybrider Fahrzeuge zeichnet sich dabei die „ökologische Nachhaltigkeit“ aus. Diese fällt für die an der Hybridentwicklung arbeitenden Länder (Deutschland, Frankreich, Schweden, Japan und USA), jedoch auch für einige Schwellenländer (Taiwan, Korea oder Brasilien) vergleichsweise hoch aus.

Abbildung 2-4: Global Competitiveness Indikators der wichtigsten Zielländer



Nach Einschätzungen führender europäischer Fahrzeughersteller stellen sich die Exportchancen für Komponenten hybrider Antriebe aus europäischer Produktion eher schwierig dar oder lassen sich nicht abschätzen. Insbesondere bei Elektromotoren, Batterien oder Getriebeelementen scheinen internationale Hersteller ausreichend über eigene Kompetenz zu verfügen.

Tabelle 2-3: Exportchancen für Komponenten hybrider Antriebe europäischer Hersteller

Komponente	Exportchancen
Verbrennungsmotoren	gering
Elektromotoren	keine
Getriebe	keine
Batterien	keine
Bremssysteme	nicht bekannt

Quelle: Recherchen des FhG-ISI

3 Leistungsfähigkeit der wichtigsten Länder in der betrachteten Techniklinie

3.1 Internationale Forschungs- und Entwicklungstrends

In der Forschung und Entwicklung im Bereich Hybrider Antriebe sind vor allem Japan und die USA, aber auch Deutschland, Frankreich, Schweden und einige andere europäische Länder aktiv. Diese Länder befinden sich, bedingt durch spezifische Voraussetzungen und staatliche Anreizsysteme, auf unterschiedlichen Stadien des Entwicklungsprozesses:

- Für japanische Unternehmen hat sich die Hybridtechnologie frühzeitig für Mittelklasse-Pkw mit Ottomotor etabliert. In diesem Marktsegment versuchen die Unternehmen weitere Effizienzsteigerungen zu erzielen um die Technologie weiter am Markt zu verbreiten. Die führenden japanischen Unternehmen sind Toyota und Honda.
- USA: Die amerikanischen Unternehmen stehen unter dem besonderen Druck die Zero-Emission-Vehicle-Gesetzgebung des wichtigen kalifornischen Marktes (10 % Emissionsfreie Fahrzeuge ab 2003) erfüllen zu müssen. Da die Quote zu 8 % aus teilweise emissionsfreien Fahrzeugen erfüllt werden kann, bilden hybride Antriebe hier ein wichtiges Marktsegment. Der Fokus liegt hier auf der Ausstattung von Sports-Utility-Vehicles (SUVs) mit dem Elektromotor als Zusatzaggregat zur weiteren Leistungssteigerung. Ein weiterer Entwicklungstrend liegt in der Kombination aus Diesel- und Elektromotor für SUVs und leichte Nutzfahrzeuge.
- Deutschland: Aufgrund der staatlichen Förderung und weiten Verbreitung von Dieselfahrzeugen hat die hybride Antriebstechnik lange keinen großen Stellenwert eingenommen. Aktuelle Entwicklungen werden durch mehrere Joint Ventures vorangetrieben: BMW, DaimlerChrysler und GM entwickeln derzeit ein Mild-Hybridfahrzeug in der oberen Premiumklasse. VW/Audi und Porsche arbeiten an einem Vollhybrid-Konzept für einen breiteren Einsatz in Ober-, Mittelklasse- und Sportwagen.
- Frankreich und Schweden: Vor allem Volvo und Peugeot haben bereits vor einigen Jahren mit der Entwicklung hybrider Systeme begonnen. Anders als in Japan und den USA lag das Augenmerk mehr auf der Entwicklung von Diesel-Hybriden. Frankreich konzentriert sich hierbei auf den Pkw-Bereich während Volvo Entwicklungen für Lkw plant.

In der Vergangenheit konnten sich Hybridautos auf dem europäischen Markt nicht durchsetzen, ihre Produktion wurde weitgehend eingestellt. In den letzten Jahren, unter den Zeichen erhöhter Kraftstoffpreise, gesetzlicher Rahmenbedingungen und politischer Forderungen sowie der Nachfrage insbesondere auf dem amerikanischen Markt schließen sich Firmen zusammen, um die Entwicklung rasch voranzutreiben:

- Porsche, VW und Audi: Entwicklung eines Hybridantriebes für Geländewagen (z. B. Porsche Cayenne Hybrid bis 2009)

- DaimlerChrysler (Mercedes Benz, Chrysler, Maybach, Jeep, Dodge), General Motors (GMC, Opel, Buick, Chevrolet, Saturn, Pontiac, Cadillac, Saab) und BMW (BMW, Rolls- Royce, Mini): Entwicklung des Two-mode-Full-Hybrid für den Einsatz in größeren und schwereren Autos wie leichten Nutzfahrzeugen und Geländewagen.

PSA (Peugeot Societé Anonyme) plant 2010 mit einem Diesel-Hybrid (z. B. Peugeot 307 CC Hybrid) an den Markt zu kommen. Der Diesel-Hybrid verbindet die dem Benzin-Hybrid überlegenen Verbrauchseigenschaften des Dieselmotors z. B. bei schnellen Autobahnfahrten mit den Vorzügen des E-Motors im Stadtverkehr. Absolut gesehen sind aber die Einspareffekte bei geringeren Kraftstoffkosten und einem höheren Neupreis geringer als bei Benzin-Motoren. Damit sind die zusätzlichen Kosten dem Kunden schlechter zu vermitteln.

Insgesamt liegt der Schwerpunkt auf Geländewagen und Fahrzeugen der Ober- und Luxusklasse, in denen sich Gewicht und Kosten prozentual am wenigsten bemerkbar machen, so wie auf Benzinmotoren, an denen der Einspareffekt am deutlichsten spürbar ist. Die Entwicklungen zielen auf den amerikanischen Markt. Ihre Einführung z. B. auf den deutschen Markt ist nicht oder zumindest vorläufig nicht geplant (vgl. Kapitel 2.2.2, Verbrennungsmotoren).

Auf dem europäischen Markt könnten Micro- oder Mild-Hybridvarianten mit geringeren Aufpreisen greifen. Auch hier wurden Entwicklungsgemeinschaften gebildet, z. B.:

- DaimlerChrysler und BMW: Entwicklung eines Mild-Hybridantriebes (E-Motor etwa 14 bis zu 21 PS) für die Oberklassenlimousinen (BMW 7/Mercedes S-Klasse), später auch für etwas kleinere Modelle.
- Volkswagen (mit den Marken VW und Audi) und Porsche arbeiten an einem Vollhybrid-Konzept mit Otto- und Elektromotor für verschiedene Fahrzeugklassen. Geplant sind Hybridvarianten für die Modelle VW Touareg, Golf und Polo, Audi Q7 und Porsche Cayenne. Markteinführung soll Ende des Jahrzehnts sein.

Kleine Nutzfahrzeuge, LKW, Busse

Im Stadt- und Regionalverkehr ist der Einsatz eines Hybridantriebs mit erheblichen Kraftstoff- und Emissionsminderungen verbunden. Auf vorgegebenen Linien ist das Fahrverhalten der Busse und LKW weitgehend bekannt: regelmäßige Stopps an den Haltestellen/Auslieferungsstellen, geringe Höchstgeschwindigkeiten, insbesondere bei Bussen langsames Anfahren und Bremsen. Auf diesen jeweils zu analysierenden Fahrzyklus kann ein linearer Full-Hybrid ausgelegt und auf Abgas- und Lärmemissionen oder auf Kraftstoffverbrauch optimiert werden. Dennoch sind auch hier Weiterentwicklungen hinsichtlich Systemkosten und -wartungsaufwand zur Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Batterien notwendig.

- Volvo stellte im März 2006 den ersten Hybridantrieb für schwere LKW vor und gibt Verbrauchsminderungen von 35 % an. Einige Fahrzeuge sind in der Erprobung. Mit einer Serienfertigung wird 2009 gerechnet. (Welt online, 2006)
- Mercedes bringt in New York, San Francisco und Toronto mehrere Hundert Busse DC Hybrid „Orion“ auf die Straßen. Angegeben werden 90 % Reduktion der Partikelbelastung, 40 % weniger NO_x, 30 % weniger Treibhausgase und geringere Lärmemissionen. (Mohr dieck, 2007)
- MAN plant 2007 einen Stadtbus und 2008 dessen Weiterentwicklung im Nahverkehrssystem zu erproben.

Außerdem werden kleinere Zugmaschinen für die Gepäck- oder Güterabfertigung angeboten. Im Hallenbereich fahren sie mit 10 km/h leise und ohne Emissionen, außerhalb schneller mit Dieselantrieb (z. B.: Rofan, 2007; Volk, 2007). Im Bereich der leichten Nutzfahrzeuge sind Hybridantriebe insbesondere für häufige Nutzung im Stadtbetrieb oder z. B. in Messehallen (Elektroantrieb) und außerhalb (Dieselantrieb) in Erprobung (Parallel-Hybrid); als mittelschwerer LKW mit Hebebühne wurde ein Dieselhybrid 2006 als Prototyp vorgestellt (Parallelhybrid) (z. B. persönliche Angaben DaimlerChrysler, 2007)

Schieneverkehr

Straßenbahnen: Kombinationen aus Stromantrieb im Straßenbahnnetz und einem kombinierten Diesel-/Stromantrieb wurde 2003 in Nordhausen (Freistaat Thüringen) vorgestellt. Der Dieselmotor erzeugt hier über einen Generator Strom zum Betrieb der Straßenbahn (lineare Bauweise). Seit 2005 sind derartige Straßenbahnwagen z. B. im Regionalnetz der Stadt Kassel im Einsatz.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die europäischen, aber bedingt auch die amerikanischen Hersteller gegenüber Japan in einer frühen Innovationsphase befinden. Dies trifft in verstärktem Maße auf Deutschland zu, hier werden jedoch Anstrengungen zum Aufholen dieses Defizits unternommen.

3.2 Internationaler Leistungsvergleich

3.2.1 Innovationsindikatoren

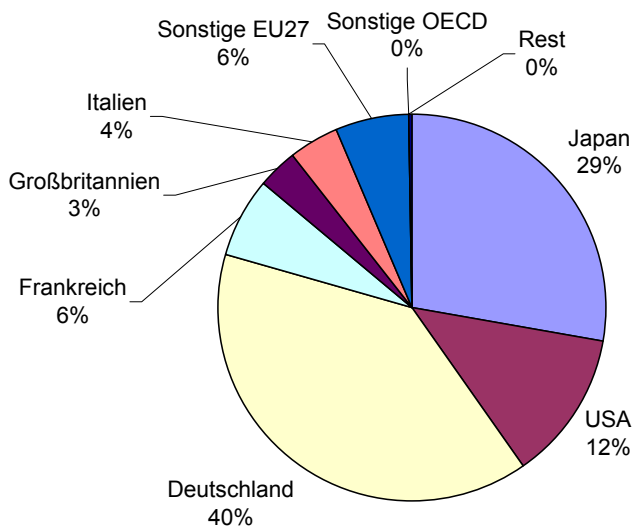
Innerhalb des Handlungsfeldes „nachhaltige Mobilität“ entfielen im Zeitraum 2000 – 2004 54 % der weltweiten Patentanmeldungen auf den Teilbereich „Antriebstechnologien“. Hiervon entfallen 77 % auf effiziente Verbrennungsmotoren, 6 % auf mobile Brennstoffzellen und 17 % auf hybride Antriebssysteme.

Innerhalb des Segmentes „hybride Antriebe“ spiegeln die Patentanmeldungen nach Ländern die Weltmarktanteile entsprechend Abbildung 2-2 nicht ganz wider. Die Pa-

Anteile Japans und der USA betragen „nur“ 29 % bzw. 12 % während Deutschland mit einem Anteil von 40 % die führende Position einnimmt. Zur Erklärung: Diese Patentzahlen beziehen sich sowohl auf Antriebsaggregate insgesamt als auch auf deren Komponenten. Diese umfassen Medien zur Energiespeicherung, Elektromotoren und Bremssysteme zur Energierückgewinnung. Aus der Literatur ist bekannt (Fhg-ISI 2006), dass im Bereich der Akkumulatoren Japan und zum Teil die USA die wesentlichen Technologieführer darstellen, während sich die deutsche Kompetenz auf den Bereich der E-Motoren und Bremssysteme erstreckt.

Abbildung 3-1: Weltweite Patentanteile hybrider Antriebstechnologien 2000 – 2004

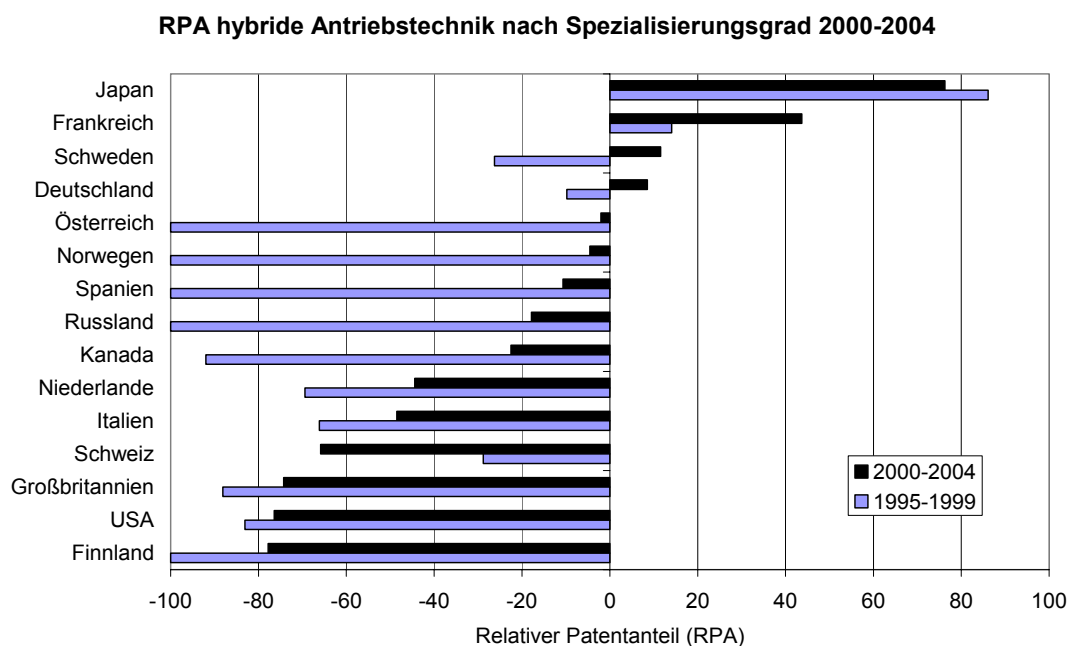
Weltweiter Patentanteil 200-2004: Komponenten hybrider Antriebssysteme



Insgesamt entfallen auf die EU27 knapp 60 % der weltweiten Patentanmeldungen, was ein bedeutendes Potenzial im Bereich der hybriden Antriebstechnologie signalisiert. Hinzu kommt die hohe Kompetenz Deutschlands und Europas im Bereich effizienter Verbrennungsmotoren, welche in der hier gewählten Abgrenzung spezifischer Komponenten hybrider Antriebe nicht enthalten sind.

Gemessen am relativen Anteil der Patentanmeldungen im Bereich hybrider Antriebssysteme gegenüber allen Patentanmeldungen eines Landes (RPA²) stellt sich die Spezialisierung der Länder eher entsprechend der beobachteten Marktsituation dar. Hiernach weist Japan, gefolgt von Frankreich und Schweden, den höchsten Spezialisierungsgrad auf. Daneben zeigt nur noch Deutschland einen positiven RPA-Wert, während dieser für Großbritannien und die USA mit jeweils etwa -75 deutlich negativ ist. Diese beiden Länder, welche einen wichtigen Markt für hybride Fahrzeuge darstellen und eine leistungsfähige Automobilindustrie haben, rangieren damit auf den Plätzen 13 und 14. Allerdings ist bei der Interpretation zu bedenken, dass der RPA die Patentaktivitäten im Bereich der Hybridtechnik im Verhältnis zu allen anderen Aktivitäten betrachtet. Insofern spiegelt der negative Wert für die USA z. T. auch die überproportionalen Patentaktivitäten in anderen Bereichen (Pharma- und Biotechnologie) wider.

Abbildung 3-2: RPA hybrider Antriebstechnologien im internationalen Vergleich



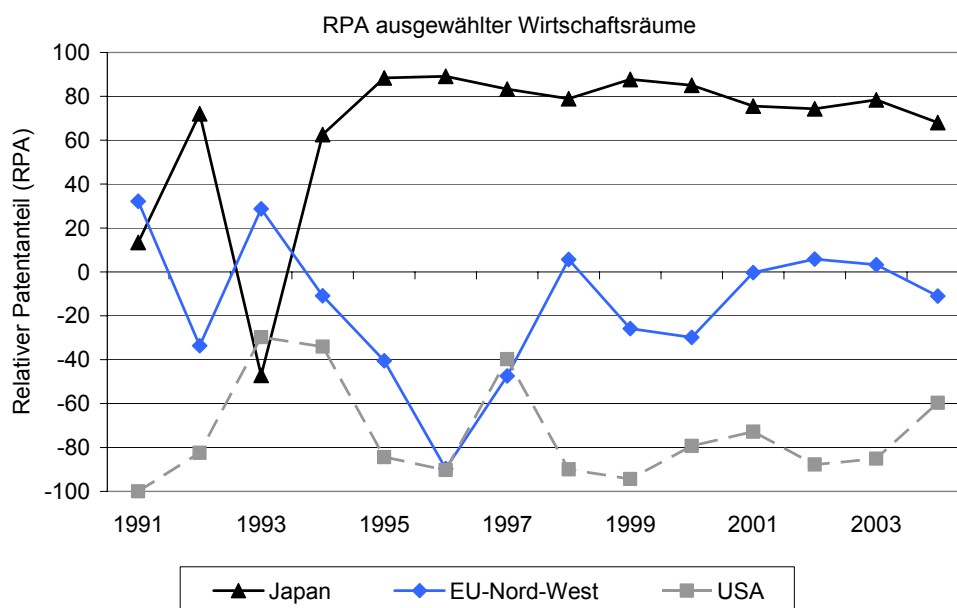
² Der RPA (Relativer Patent-Anteil oder Revealed Patent Advantage) gibt die Spezialisierung eines bestimmten Landes im spezifischen Kompetenzfeld in Relation zu den Patentanteilen des Landes bei allen Patenten wieder. Ist der Patentanteil für das Kompetenzfeld überdurchschnittlich hoch, dann nimmt der RPA einen positiven Wert an. Dies bedeutet, dass innerhalb des betreffenden Landes überproportional viel im Kompetenzfeld patentiert wird und daher überdurchschnittliche nationale Kenntnisse bestehen. Für jedes Land i und jedes Kompetenzfeld j wird der RPA nach folgender Formel berechnet:

$$RPA_{ij} = 100 \cdot \tanh \cdot \ln \left[\left(\frac{p_{ij}}{\sum_i p_{ij}} \right) / \left(\frac{\sum_j p_{ij}}{\sum_{ij} p_{ij}} \right) \right]$$

Abbildung 3-3 stellt die Entwicklung der relativen Patentanteile für Japan, die USA sowie für europäische und weltweite Regionen dar. Zunächst fallen die enormen Schwankungen des Indikators auf. Diese Ausschläge werden durch die vergleichsweise geringe absolute Patentanzahl im Bereich hybrider Antriebe für einige Teilregionen (z. B. Südostasien) hervorgerufen. Insgesamt lassen sich folgende Trends ableiten:

- Eine nachhaltige Spezialisierung Japans setzt erst Mitte der 90er Jahre ein. Bis dahin liegen die westlichen und nördlichen Staaten der EU bezüglich des RPA mit Japan gleichauf.
- Mit dem Aufstieg Japans bricht die Spezialisierung der EU-Nord-West ein und bewegt sich erst Anfang der 2000er Jahre auf ein ausgeglichenes Niveau, wo es seither mit einigen Schwankungen verharrt.
- Die USA hatten sich zwar der ersten Entwicklungswelle der hybriden Antriebstechnik angeschlossen, was jedoch – mit aus oben genannten Gründen – nicht zu einem dauerhaft steigenden oder gar positiven Spezialisierungsgrad in diesem Technologiefeld geführt hat.

Abbildung 3-3: Relative Patentanteile hybrider Antriebstechnologien 2000 – 2004

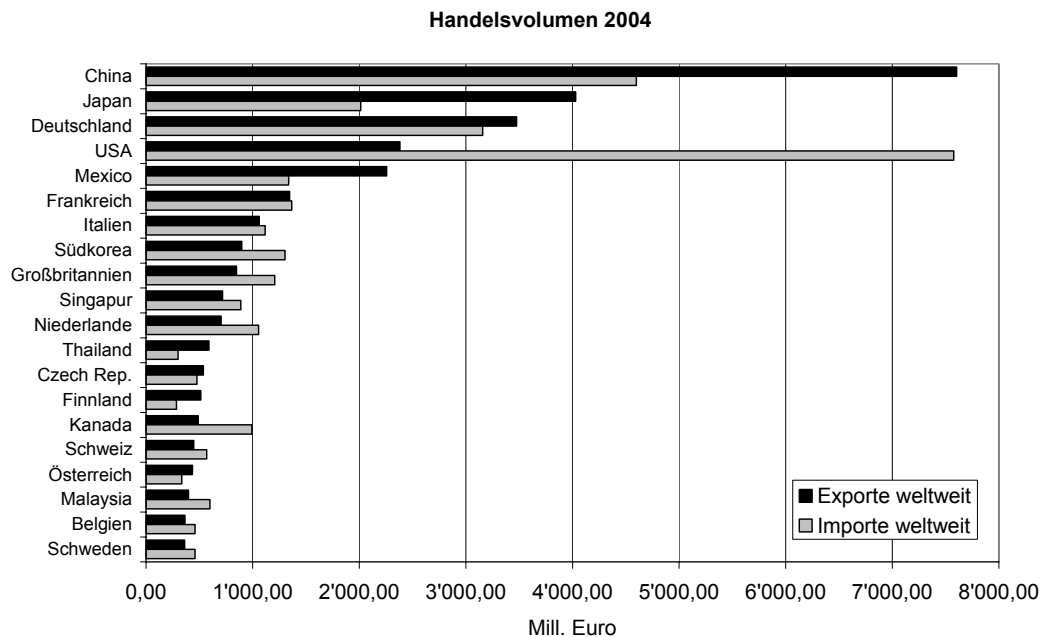


3.2.2 Außenhandelsindikatoren

Das Welthandelsvolumen mit den wichtigsten Komponenten hybrider Fahrzeugtechnik betrug 2004 knapp 32 Mrd. Euro und umfasst somit das zehnfache des Handelsvolumens von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb. Dies setzt sich im Wesentlichen zusammen aus Elektromotoren und Energiespeichermedien. Hauptexporteure dieser

Komponenten sind China und Japan. Knapp hinter Japan belegt Deutschland den dritten Rang, während die USA den mit weitem Abstand größten Teil des Welthandelsvolumens dieser Komponenten importieren.

Abbildung 3-4: Exporte und Importe von Komponenten hybrider Antriebe der 20 exportstärksten Nationen 2004



Neben der Bestätigung Japans als Marktführer in dem Segment zeigen die Zahlen der Abbildung 3-4 das große Potenzial Deutschlands und anderer europäischer Länder innerhalb des Handlungsfeldes. Sie weisen auch auf die enorme Bedeutung Chinas und einiger anderer Schwellenländer wie Mexiko hin.

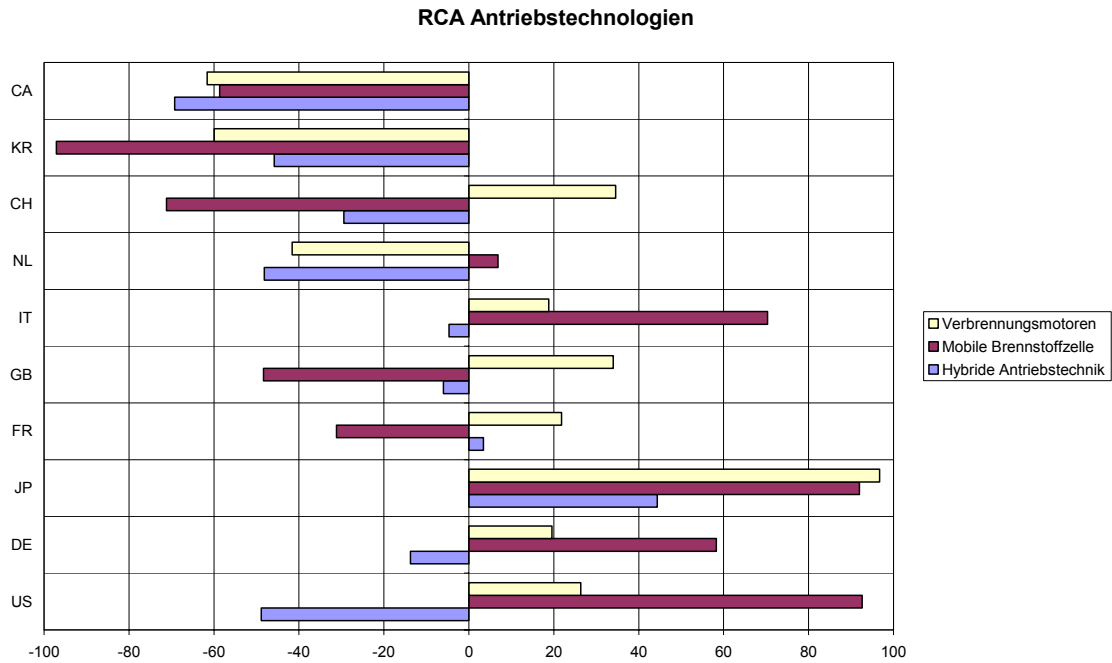
Bei der Betrachtung der Außenhandelspezialisierung mittels des relativen Außenhandelsüberschusses (RCA³) zeigen Japan und – mit schwächerer Ausprägung Frankreich – schließlich als einzige Länder positive Werte. Dies deckt sich gut mit den aktuellen Handelszahlen. Gemessen an den stark negativen RCA-Werten der USA und

³ Der RCA (Revealed Comparative Advantage) gibt die Spezialisierung im Außenhandel eines Landes im spezifischen Kompetenzfeld wieder. Neben den Ausfuhren (a) berücksichtigt er auch die Einfuhren (e) des jeweiligen Landes und gilt insofern als umfassender Indikator der Außenhandelsposition. Positive Werte deuten auf eine starke internationale Wettbewerbssituation des jeweiligen Landes im betrachteten Kompetenzfeld hin. Für jedes Land i und jedes Kompetenzfeld j wird der RCA nach folgender Formel berechnet:

$$RCA_{ij} = 100 \cdot \tanh \ln \left[\frac{(a_{ij}/e_{ij})}{(\sum_j a_{ij} / \sum_j e_{ij})} \right]$$

anderer OECD-Staaten weisen jedoch die moderaten Defizite für einige der großen EU-Länder (Deutschland, Großbritannien und Italien) neben dem positiven Wert Frankreichs darauf hin, dass die EU in diesem Technologiefeld durchaus gut aufgestellt ist.

Abbildung 3-5: Revealed Comparative Advantage (RCA) bei Komponenten hybrider Antriebe der 10 exportstärksten Länder 2004



4 Innovationssystem und marktführende Unternehmen in den führenden Ländern und in Deutschland

Die Entwicklung hybrider Antriebstechnologien und deren Durchsetzung am Markt haben sich in verschiedenen Industrieländern während der letzten Jahre unterschiedlich entwickelt. So stellt dieses Fahrzeugsegment in Japan und in den USA mittlerweile keine Marktnische mehr da, während in Europa Hybridfahrzeuge weder von der heimischen Industrie als Serienmodelle angeboten noch vom heimischen Markt angenommen werden. Hierfür zeigen sich verschiedene Gründe verantwortlich, welche sowohl bei den Akteuren als auch dem politisch-ökonomisch-technischen Umfeld zu suchen sind. Als Messgrößen bieten sich Patentstatistiken zur Quantifizierung der Forschungsaktivität sowie Handelsstatistiken zur Abschätzung der internationalen Leistungsfähigkeit an.

4.1 Akteursanalyse

4.1.1 Automobilhersteller

Der aktuelle Weltmarkt für hybride Fahrzeuge teilt sich im Wesentlichen auf drei Hersteller und fünf Marken auf: Die Toyota-Gruppe mit der Oberklassenmarke Lexus, Honda und die Ford-Mercury-Gruppe. Verkaufszahlen liegen nur für die USA vor, dieser Markt ist jedoch für die OEMs (Original Equipment Manufacturer) von vorrangiger Bedeutung und lässt somit Schlüsse auf die Stellung der Anbieter weltweit zu. Tabelle 4-1 stellt die aktuellen Verkaufszahlen 2006 in den USA zusammen und gibt ausgewählte Leistungsdaten der Modelle an.

Marktführer im Bereich der OEMs ist unangefochten **Toyota**. In den USA hat die Firma einen Marktanteil von 67 %. Zuzüglich zum Marktanteil der Marke Lexus von 9 % hat die gesamte Toyota-Gruppe 2006 in den USA somit mehr als $\frac{3}{4}$ des Marktes. Insgesamt belegen die drei Toyota-Modelle Prius, Highlander und Camry die Spitzenplätze der Hybrid-Modelle.

Zweitwichtigster Automobilhersteller im Bereich hybrider Antriebe ist **Honda** mit drei Modellen (Accord, Civic und Insight) mit einem Marktanteil 2006 von 15 % in den USA. Die japanischen Hersteller halten somit einen Marktanteil von über 90 % auf dem wichtigen amerikanischen Markt.

Die verbleibenden 9 % entfallen auf die **Ford/Mercury-Gruppe**. Ford war das erste Unternehmen in Detroit das Hybridfahrzeuge entwickelt und wird dies auch weiter tun. Das Ziel für 2010 250'000 Fahrzeuge zu verkaufen, wird aber nicht erreicht werden.

Stattdessen fokussiert Ford auf Flexible Fuel Vehicles (FFV). In diesem Marktsegment sind japanische Autohersteller in den USA nicht aktiv⁴.

Tabelle 4-1: Verbrauchs- und Absatzzahlen aktueller Hybridmodelle (USA 2006)

Marke und Modell	Verbrauch außerorts	Verbrauch innerorts	Verkaufte Fahrzeuge USA
	l/100 km		Stück
TOYOTA Prius	4,6	3,9	106'971
TOYOTA Highlander	8,8	7,6	31'485
TOYOTA Camry	6,2	5,9	31'341
TOYOTA gesamt			169'797
HONDA Accord	8,2	11,8	5'598
HONDA Civic	4,6	4,8	31'253
HONDA Insight			722
HONDA gesamt			37'573
FORD Mercury Marriner	10,3	13,1	
FORD Escape+Marriner	8,2	7,2	22'549
LEXUS GS450h	8,4	9,5	1'784
LEXUS RX400h	8,8	7,4	20'161
LEXUS gesamt			21'945
INSGESAMT			

Source: <http://hybridreview.blogspot.com/2007/01/hybrid-car-sales-in-2006.html>

DaimlerChrysler, BMW und GM versuchen derzeit über einen Mild-Hybrid in den amerikanischen Markt zu kommen. Kritisiert wird die Strategie jedoch durch eine im Vergleich zu Toyota zu geringe Energieeinsparung. Bisher hatten die deutschen Unternehmen stark auf die saubere Dieselmotortechnologie (BlueTech etc.) gesetzt, welche jedoch bei amerikanischen und japanischen Konsumenten wegen Ressentiments gegenüber Dieselmotoren bisher nicht durchsetzbar war. Eine Trendumkehr ist jedoch mit der Einführung der sauberen Diesel-Direkteinspritzer-Technologie seit 2007 in den USA zu beobachten (Power, 2007).

Volkswagen und Porsche planen mit einer gemeinsamen Entwicklung die obere Fahrzeugklasse (Touareg, Q7), Mittelklasse- und Kleinwagen (Golf, Polo) sowie Sportwagen (Cayenne) mit Vollhybridantrieben auszustatten.

Nissan geht einen anderen Weg des Markteintritts. Mittels Toyota-Technologie wird Nissan den Altima, in den acht US-Bundesstaaten mit den strengsten Abgasnormen, einführen. Langfristig plant die Firma eine eigene Hybridtechnologie aufzubauen.

⁴ <http://www.iht.com/articles/2006/06/30/business/ford.php>

Nach Industrieangaben lässt sich die Entwicklung der Hersteller bis 2020 wie folgt abschätzen: Weltweit wird Toyota seine Stellung behaupten oder eventuell sogar ausbauen können. Sicher werden auch VW und DaimlerChrysler eine wichtige Rolle spielen, aber neben GM und Ford werden als weitere Kraft chinesische Hersteller ein gewichtiges Wort mitsprechen.

4.1.2 Zulieferindustrie

Auch im Bereich der deutschen wie der internationalen Zulieferindustrie, welche nach Angaben des VDA bereits etwa 70% zur Wertschöpfung eines Pkw beitragen, sind Zusammenschlüsse, innovative Geschäftsideen und intensive Entwicklungsarbeiten im Gange, die sich entsprechend der Prioritäten der Autobauer ebenfalls an schweren, größeren Fahrzeugen orientieren (VDA, 2004):

- Bosch (Motor- und Getriebemanagementsysteme) und Getrag (Antriebsstrang, Doppelkupplungsgetriebe): Entwicklung von Antrieben, die serielle und parallele Hybridantriebsfunktionen für Fahrzeuge mit Front- oder Allradantrieb im Kompakt-, Mittelklasse- und oberen Mittelklassensegment sowie für Sportwagen vereinen. Geplanter Produktionsstart 2010.
- ZF Sachs und Continental: Entwicklung, Produktion und Vertrieb eines Full-Hybridantriebes für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge. Geplanter Produktionsstart 2007.
- Degussa, Chemetall GmbH und VW beteiligen sich gemeinsam am Aufbau eines Lehrstuhles für angewandte Materialwissenschaften zur Energiespeicherung und Energieumwandlung. Forschungsschwerpunkt ist die Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Batterie für Hybridfahrzeuge (2006).

4.2 Rahmenbedingungen und Regulierung

Die politischen Rahmenbedingungen zur Förderung alternativer Fahrzeugantriebe teilen sich in drei Bereiche:

- die direkte Förderung von Forschung und Entwicklung bestimmter Technologien,
- technische Normen und Regulierungen für Neufahrzeuge,
- preispolitische Maßnahmen und Regulationen zum Fahrzeugbesitz und -betrieb.

Eine direkte Bedeutung der öffentlichen Forschungsförderung für die Entwicklung und Verbreitung von Hybridfahrzeugen wird von den Herstellern nicht bestätigt. Hierzu seien die staatlichen Fördermittel im Vergleich zu den erwarteten Gewinnen oder Verlusten bei einer erfolgreichen bzw. fehlgeschlagenen Markteinführung zu gering. Dies gilt für die Märkte in Japan, Europa und den USA. Staatliche Fördermaßnahmen können jedoch in Technologiebereichen, welche weiter von einer breiten Markteinführung ent-

fernt sind, gleichwohl technologische Entwicklungen vorantreiben. Der Erfolg des 500-Millionen-Euro-Programms der Bundesregierung zur Förderung der Wasserstofftechnologie macht dies deutlich.

Technische Normen und Regulierungen für Neufahrzeuge umfassen Verpflichtungen der Hersteller zur Einhaltung technischer Standards sowohl einzelner Fahrzeuge als auch der Flotte insgesamt. Fahrzeugspezifische Grenzwerte sind in Europa in Form der EURO-Normen für Benzin- und Dieselfahrzeuge und in den USA in Form der „Low-Emission-Vehicle-Klassen“ (LEV, ULEV, SULEV) bereits seit Anfang der 90er Jahre verbindlich. Diese Normen lassen sich jedoch durch Filter- und Katalysator-Technologien in Verbindung mit innermotorischen Verbesserungen erfüllen; der Einsatz neuer Antriebskonzepte oder Kraftstoffe ist hierfür nicht erforderlich. Die folgende Tabelle vergleicht die aktuellen Emissionsnormen der EU und der USA.

Tabelle 4-2: Vergleich Umweltstandards USA – EU

Abgasnorm	CO (g/km)		HC/HCHO ¹⁾ (g/km)		NO _x (g/km)		PM (g/km)	NMOG (g/km)
	Otto	Diesel	Otto	Diesel	Otto	Diesel	Diesel	Otto
	Europäische Union							
Euro 1 (7/1992)	3.16	3.16	1.13 ²⁾	1.13 ²⁾	²⁾	²⁾	0.18	-
Euro 2 (7/1997)	2.2	1	0.5 ²⁾	0.7 ²⁾	²⁾	²⁾	0.08	-
Euro 3 (4/2000)	2.3	0.64	0.2	0	0.15	0.5	0.05	-
Euro 4 (4/2005)	1	0.5	0.1	0	0.08	0.25	0.025	-
Euro 5 (2008)	1		0.05	0	0.08	0.08	0.025	-
Euro 6 (2010)	1		0.05	0	0.04	0.04	0.025	-
	Vereinigte Staaten							
LEV	2.11		0.009		0.03		-	0.046
ULEV	1.05		0.005		0.03		-	0.024
SULEV	0.62		0.002		0.01		-	0.006

Anmerkungen: ¹⁾ EU: HC, US: HCHO

²⁾ gemeinsamer Grenzwert für HC+NO_x

Abkürzungen: - HCHO = Formaldehyd - NMOG = nicht-methanhaltige organische Gase
 - LEV = Low Emission Vehicle. - ULEV = Ultra Low Emission Vehicle.
 - SULEV = Super Ultra Low Emission Vehicle.

Quelle: Zusammenstellung nach Stan (2005)

Eine weitaus direktere Wirkung auf die technologische Entwicklung hat die staatliche Einflussnahme auf die Flottenstruktur wie sie bspw. in Kalifornien gegeben ist. Als Reaktion auf die massiven Smogprobleme des US-Bundesstaates wurden die Hersteller

verpflichtet, dass ab 2003 mindestens 10 % der verkauften Fahrzeuge „Zero Emission Vehicles“ (ZEVs) sein müssen. Hierzu zählen Fahrzeuge mit Elektro- und Wasserstoffantrieb. Der 10 %-Richtwert muss durch mindestens 2 % echte ZEVs abgedeckt werden, während die verbleibenden 8 % über ein Punktesystem mittels „Partially-ZEVs“ erfüllt werden können. Zu letzterer Kategorie zählen hauptsächlich Hybridfahrzeuge mit Elektro- oder Wasserstoff-Zusatzantrieb. Das Californian Air Resource Board (ARB) hat für Mitte 2007 einen Bericht über den Erfolg des Programms und den aktuellen Stand der Forschung im Bereich der ZEVs angekündigt.

Ähnliche Erfolge bezüglich der Verbreitung neuer Antriebskonzepte sind durch den geplanten Flottengrenzwert der EU bezüglich des CO₂-Ausstoßes nicht zu erwarten. Zum einen handelt es sich hierbei nur um eine graduelle Verbesserung aktueller Emissionswerte und zum anderen kann dieser durchaus mit bestehender Technologie erreicht werden.

Preispolitik und Regulation des Besitzes und Betriebs von Kraftfahrzeugen umfassen die Bemessung von Kraftfahrzeugsteuern oder Straßenbenutzungsgebühren am Emissionsausstoß oder der verwendeten Technologie oder die Restriktion von Ein- und Durchfahrtsgenehmigungen für schadstoffreiche Fahrzeuge. Beispiele sind die geplante Neuregelung der deutschen Kfz-Steuer, die Staffelung der Lkw-Eurovignette und der Mautgebühren in Deutschland und der Schweiz nach Schadstoffklassen und die Einfahrterlaubnis in die Umweltzonen zahlreicher europäischer Städte. Die Regelungen in London und Athen erteilen explizit Sondergenehmigungen für ganz oder teilweise emissionsfreie Fahrzeuge. Aus diesem Grund entstehen hier große Märkte für den Absatz hybrider Fahrzeuge. Im Gegensatz hierzu regen rein emissionsgestaffelte Preismechanismen die weitere Optimierung jeglicher Antriebssysteme auf der Basis von Verbrennungsmotoren an.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

5.1 Bewertung der Technologie

Die hybride Antriebstechnologie bietet die Möglichkeit bewährte Verbrennungsmotoren mit sämtlichen Potenzialen für eine weitere Verbesserung durch die Hinzunahme elektrischer Aggregate in einem günstigeren Drehzahlbereich zu betreiben. Je nach Fahrzyklus ist hierbei eine Kraftstoffersparnis bis zu 25 % möglich. Ferner bietet der rein elektrische Betrieb die Möglichkeit teilweise lokal emissionsfrei zu fahren.

Diesen Potenzialen steht jedoch eine Reihe von Einschränkungen gegenüber. So ist eine echte Kraftstoffersparnis nur bei bestimmten Fahrzyklen aus Stadt- und Überlandfahrten erzielbar; im Extremfall ist wegen des hohen Gewichts der Batterien sogar ein Mehrverbrauch möglich. Ferner sind wichtige Fragen der Lebensdauer der Batterien und der Umweltprobleme bei deren Produktion und Entsorgung noch offen. Schließlich wird die Kundenakzeptanz auch durch einen höheren Preis von Hybridfahrzeugen im Gegensatz zu vergleichbar motorisierten konventionellen Fahrzeugen gedämpft.

5.2 SWOT Analyse für Deutschland und Europa

Die Stärken Europas und speziell Deutschlands im Bereich der hybriden Antriebstechnik liegen zum einen in einer leistungsstarken und international sehr erfolgreichen Automobilindustrie und zum anderen in einer hohen Spezialisierung bei einigen Schlüsselkomponenten. Als potenziell vorteilhaft kann auch die ambitionierte Umweltpolitik der EU sowie einzelner Mitgliedsstaaten betrachtet werden. Die uneinheitliche Entwicklung umwelt- und verkehrspolitischer Instrumente stellt jedoch einen hemmenden Faktor bei der Entstehung eines einheitlich großen europäischen Marktes für alternative Fahrzeugkonzepte dar. Dies, die zunehmende Konkurrenz durch Aufholländer, der absehbare Mangel an Fachkräften und die weitere Förderung der Dieselsechnologie als kostengünstige Alternative zu hybriden und sonstigen alternativen Antriebskonzepten können sich als hemmende Faktoren für die erfolgreiche Entwicklung der hybriden Antriebstechnologie in Europa auswirken. Die folgende Übersicht stellt die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken dieser Entwicklung dar.

Tabelle 5-1: SWOT-Analyse Hybride Antriebssysteme

Stärken	Chancen
<ul style="list-style-type: none"> • leistungsfähige Automobilindustrie • gut ausgebildete Ingenieure • hervorragende Ausgangsposition in einigen Einzelkomponenten (Verbrennungsmotoren, Elektronik) • Entwicklung von Hybrid-Systemen für schwere Nutzfahrzeuge 	<ul style="list-style-type: none"> • ambitionierte Umweltpolitik der EU • weltweit wachsende Städte in Verbindung mit wachsendem Umweltbewusstsein • umweltbewusste und zahlungskräftige Verbraucher • weiter steigende Energiepreise
Schwächen	Herausforderungen
<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklungsrückstand bei hybriden Antriebskonzepten allgemein • keine Kompetenz im Bereich der Akkumulatoren 	<ul style="list-style-type: none"> • starke Konkurrenz durch Aufholländer • Fachkräftemangel • Nachfragerückgang aufgrund demographischen Wandels • weitere Bevorzugung der Dieselsechnologie für Pkw

5.3 Perspektiven bis 2020

Die US Energy Information Administration (EIA, 2003) schätzt den Marktanteil hybrider Fahrzeuge im Kleinwagenbereich in den nächsten zwei Jahrzehnten auf ca. 8 % an den Neuverkäufen bzw. auf ca. zwei Millionen Fahrzeuge (EIA, 2007) in den USA. Demgegenüber gehen Schätzungen der deutschen Automobilindustrie von Marktanteilen im Premium-Segment in den USA von bis zu 20 % aus. Hiernach erreichen auch Europa (10 % – 15 %) und Japan (30 %) sehr hohe Marktanteile. Für China werden bis 2020 ca. 5 % Hybridfahrzeuge erwartet (Quelle: Interview mit DaimlerChrysler).

Die Beispiele Kalifornien, London und Athen sowie die jüngste Kraftstoffpreiserhöhung in den USA zeigen deutlich, wie stark die Nachfrage nach alternativen Fahrzeugen durch politische Rahmenbedingungen beeinflusst werden kann. Der Schlüssel zur Abschätzung des zukünftigen Marktanteils dieser Fahrzeuge liegt entsprechend in der Voraussicht der zukünftigen Verkehrspolitik.

Langfristig wird die Hybridtechnologie als Brückentechnologie auf den Weg zum Marktdurchbruch vollkommen emissionsfreier Fahrzeuge auf der Basis von Batterie- oder Wasserstoffantrieben gesehen. Der entscheidende Engpass zur Entwicklung attraktiver Elektrofahrzeuge liegt dabei in der Batterietechnik. Für entsprechende Speichermedien kann durch die großflächige Markteinführung von Hybridfahrzeugen ein lukrativer Markt, und somit Anreize und Ressourcen für verstärkte Forschungen auf diesem Gebiet geschaffen werden.

Die hybride Antriebstechnologie birgt jedoch auch Probleme im Bezug auf die Abhängigkeit von bestimmten Fahrzyklen sowie durch das Gewicht und die Lebenszykluskosten der Batterien. Der von der europäischen Industrie eingeschlagene Weg der Entwicklung sauberer Dieselfahrzeuge bietet für viele Anwendungszwecke die preisgünstigere und effizientere Lösung zur Steigerung der Energieeffizienz im Straßenverkehr. Jüngste Verkaufszahlen in den USA bescheinigen für diese Technologie auch ein weltweit steigendes Potenzial.

5.4 Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf

Die Märkte für hybride Antriebssysteme in den USA, Japan und zukünftig auch China sind sehr groß und aus Sicht der technologischen Kompetenz ist die europäische Automobilindustrie durchaus in der Lage in diese einzutreten. Erste Schritte hierzu haben bereits stattgefunden. Hierzu wird jedoch ein starker europäischer Markt benötigt. Ferner bietet die Hybridtechnologie gewisse ökologische Vorteile durch die lokale Vermeidung von Schadstoffemissionen und Lärm, was im Zuge der Grenzwerte für Feinstaub (ab 2005), NO_x und Umgebungslärm (ab 2010) relevant ist.

Zu beachten sind jedoch auch die angeführten Probleme der Hybridtechnologie, die Tatsache, dass sie nur eine Teillösung des Emissionsproblems bietet sowie der bestehende Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei Energiespeicherung, Brennstoffzelle und andere alternative Antriebe. Hieraus abgeleitet ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen für die Politik:

1. Forcierung verbindlicher CO₂-Flottengrenzwerte
2. Finanzielle Förderung des Betriebs teilweise oder ganz emissionsfreier Fahrzeuge über die Kfz-Steuer oder über entsprechende Rabatte bei Straßenbenutzungsgebühren.
3. Ausweitung städtischer Umweltzonen mit Bevorzugung teilweise oder ganz emissionsfreier Fahrzeuge.

Forschungsbedarf besteht sowohl in den Bereichen der Energiespeicherung als auch in der Antriebssteuerung. Bei den Energiespeichermedien ist sowohl

- die Speicherdichte (Reichweite der Fahrzeuge im emissionsfreien Betrieb),
- die Lebensdauer (Anzahl möglicher Ladezyklen) als auch
- die Ladezeit zur optimalen Energieausnutzung und Reduktion des „Tankvorgangs“

zu erreichen. Ferner zu klären sind Fragen der Sicherheit und der Entsorgung der Speichermedien.

Literatur

- Ahmed, M. A. H. (2004): Bewertung von alternativen Antriebskonzepten in Fahrzeugen mit unterschiedlichen Einsatzcharakteristiken. Univ. Dissertation and der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden, Sept. 2004.
- Autokiste (2007): Porsche: Hybrid-Cayenne wird entwickelt. Internet: <http://www.autokiste.de/index.htm?site=/psg/0509/4619.htm>, 18.7.2007
- Back, M (2005): Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen. Schriften des Instituts für Regelungs- und Steuerungssysteme, Universität Karlsruhe (TH), Band 02. Universitätsverlag Karlsruhe.
- Auto Motor und Sport (2007): Bosch-Hybrid für VW, Audi und Porsche. dpa, 13.6.2007, 10:54h.
- Brooks, A. (2002): Vehicle-to-Grid Demonstration Project: Grid Regulation Ancillary Service with a Battery Electric Vehicle. Schlussbericht an das Kalifornische Air Resources Board und die kalifornische Environmental Protection Agency. San Dimas, Dezember 2002.
- Chan, C. C. (2002): The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles. IEEE Proceedings, Ausg. 90 Nr. 2, Februar 2002.
- Continental (2007): Auszug aus der repräsentativen Meinungsumfrage von TNS/Infratest unter deutschen Autofahrern zum Thema Hybridantrieb im Auftrag der Continental AG Hannover. Befragungszeitraum 28.2. – 29.3.2007.
- Demiodöven, N. und J. Deutsch (2004): Hybrid Cars Now, Fuel Cell Cars Later. Science 305, 974 (2004).
- EU (2001): Weissbuch Die gemeinsame Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellungen für die Zukunft. Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften, Luxemburg.
- EU (2005): Conference „Mid-term review of the White Paper on European transport policy“, Brüssel, 1.12.2005. Zusammenfassung der Beiträge.
- EU (2006): Energy and Transport in Figures 2006. Generaldirektion Energien und Verkehr in Kooperation mit Eurostat.
- Egger, Klaus (2006): Mit Elektronik und Mechatronik den Verbrauch senken. 15. Aachener Kolloquium für Fahrzeug- und Motortechnik. Aachen, 9. – 11.10.2006

- EIA (2003): Annual Energy Outlook 2003: Projections to 2025, US Energy Information Administration, Washington D.C., Januar 2003.
- EIA (2007): Annual Energy Outlook 2003: Projections to 2030, US Energy Information Administration, Washington D.C., Januar 2007.
- FhG (2006): Die Bahn auf der Straße. Presseinformation der Fraunhofer-Gesellschaft. München, 31.10.2006 Nr. 69.
- FhG-ISI (2006): Foresight and Assessment for Environmental Technologies. Work Package 1 Identification and Characterisation of Environmental Technologies. Task 1.1 und 1.2. Karlsruhe, 4./ 5. Dezember 2006
- Franke, F. (2004): Mit dem PRIUS in die Zukunft, Hybrid-Technologie für das 21. Jahrhundert. Motorbuch Verlag Stuttgart.
- Gallagher, K. S. (2006): Round Table on Barriers and Incentives for Hybrid Vehicles in China. Belfer Center for Science and International Affairs und China Automotive Technology and Research Center. Beijing, Mai 2006.
- Green, D. L., K. G. Duleep und W. McManus (2004): Future Potential of Hybrid and Diesel Powertrains in the U. S. Light Duty Vehicle Market. Studie im Auftrag des US Department for Energy. Washington D.C.
- de Haan, P. (2005): Charakteristika und Beweggründe von Käufern des Toyota Prius 2. Forschungsbericht zum Projekt Hybridfahrzeuge. ETH Zürich.
- de Haan, P., M. G. Müller und A. Peters (2006): Does the Hybrid Toyota Prius Lead to Rebound Effects? Analysis of Size and Number of Cars Previously Owned by Swiss Prius Buyers. *Ecological Economics* 58 (2006), pp. 592 – 605. Elsevier.
- Hammerschlag, R. und P. Mazza (2005): Questioning Hydrogene. *Energy Policy* 33 (2005) pp. 2039 – 2043. Elsevier.
- Power, J. D. (2007): 2007 Alternative Powertrain Study. J. D. Power Associates, Westlake Village, USA
- Léautier, F. A. (ed., 2006): Cities in a Globalizing World. Governance, Performance & Sustainability. WBI Learning Research Series, The World Bank Institute, The World Bank, Washington DC.
- Mantzou, L. and Capros, P (2006): EU (2006) European Energy and Transport Trends to 2030 – update 2006. Bericht an die Europäische Kommission, Mai 2006.

- Maples, J. (2003): Annual Energy Outlook 2003: Projections of Light Vehicle Energy Use and Travel. Präsentation der US Energy Information Administration (EIA), Januar 2003.
- McLean, H. L., Lave, L. B. (2002): Evaluating automobile fuel/propulsion system technologies. Progress in Energy and Combustion Science. Pergamon. September 2002.
- Mohrdeck (2007): Alternative Drive Trains for Sustainable Mobility. 4. Braunschweiger Symposium „Hybrid Vehicles and Energy Management“ 14./15.2.2007
- Naunin, Dietrich (2007):Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge : Technik, Strukturen und Entwicklungen. 4. Aufl., Expert-Verlag, Renningen.
- Rofan (2007): Firmenprospekt
- Romm, J. (2004): The Car and Fuel of the Future. Energy Policy 34 (2006), pp. 2609 – 2614. Elsevier.
- Schade W, Doll C, Maibach M, Peter M, Crespo F, Carvalho D, Caiado G, Conti M, Lilico A, Nazish Afraz (2006): Analysis of the contribution of transport policies to the competitiveness of the EU economy and comparison with the United States (COMPETE). Schlussbericht an die Europäische Kommission, Generaldirektion Energie und Verkehr. Projektleitung: Fraunhofer-ISI, Karlsruhe. .
- SRU (2005): Umwelt und Straßenverkehr. Sondergutachten des Sachverständigenrats für Umweltfragen. Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden
- Stan C. (2005): Alternative Antriebe für Automobile. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- Grünwand (2007): Perspektiven eines CO₂- und emissionsfreien Verkehrs – Kraftstoffe und Antriebe im Überblick. Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag. Berlin.
- Uni-Protokolle (2006): <http://www.uni-protokolle.de/nachrichten/id/125807/>. Stand: 18.7.2007
- VDA (2004): Future Automotive Industry Structure (FAST) 2015 – die neue Arbeitsteilung in der Automobilindustrie. Materialien zur Automobilindustrie Nr. 32. Mercer-Consulting im Auftrag des Verbandes der Automobilindustrie e. V., Frankfurt am Main.
- Volk (2007): <http://www.volk.de/hybridschlepper/hybridschlepper.html>
- Volkswagen (2005): Nachhaltigkeitsbericht 2005/2006 – Generationen Bewegten
- Welt online (2006): Volvo präsentiert weltweit ersten Hybridantrieb für schwere Lkw, 11. März 2006

In der Reihe „Umwelt, Innovation, Beschäftigung“ sind bisher die folgenden Bände erschienen:

- | | |
|-------|--|
| 01/07 | Wirtschaftsfaktor Umweltschutz: Vertiefende Analyse zu Umweltschutz und Innovation |
| 02/07 | Umweltpolitische Innovations- und Wachstumsmärkte aus Sicht der Unternehmen |
| 03/07 | Zukunftsmarkt Solarthermische Stromerzeugung |
| 04/07 | Zukunftsmarkt CO ₂ -Abscheidung und –Speicherung |
| 05/07 | Zukunftsmarkt Elektrische Energiespeicherung |
| 06/07 | Zukunftsmarkt Solares Kühlen |
| 07/07 | Zukunftsmarkt Energieeffiziente Rechenzentren |
| 08/07 | Zukunftsmarkt Biokunststoffe |
| 09/07 | Zukunftsmarkt Synthetische Biokraftstoffe |
| 10/07 | Zukunftsmarkt Hybride Antriebstechnik |
| 11/07 | Zukunftsmarkt Dezentrale Wasseraufbereitung und Regenwassermanagement |
| 12/07 | Zukunftsmarkt Nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologie |
| 13/07 | Zukunftsmarkt Stofferkennung und -trennung |

Alle Veröffentlichungen können kostenlos auf www.umweltbundesamt.de heruntergeladen werden.