

Kraftstoffe und Antriebe für die Zukunft

Volker Schindler, Carolin Funk,
Jürgen-Friedrich Hake, Jochen Linßen (Hrsg.)



Vorlesungsmanuskripte

TU Berlin (Veranstalter des Herbstseminars)

Forschungszentrum Jülich GmbH
Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung
Technische Universität Berlin
Institut für Land-und Seeverkehr Fachgebiet Kraftfahrzeuge

Volker Schindler, Carolin Funk, Jürgen-Friedrich Hake,
Jochen Linßen (Hrsg.)

Kraftstoffe und Antriebe für die Zukunft

Vorlesungsmanuskripte des 1. Herbstseminars „Kraftstoffe und
Antriebe für die Zukunft“ vom 9.-13. Oktober 2006 an der
TU Berlin (Veranstalter des Herbstseminars)

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energietechnik/Energy Technology

Band/Volume 56

ISSN 1433-5522

ISBN 3-89336-452-8

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte Bibliografische Daten sind im Internet
über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Herausgeber Forschungszentrum Jülich GmbH
und Vertrieb: Zentralbibliothek, Verlag
 D-52425 Jülich
 Telefon: 02461 61-5368 · Telefax: 02461 61-6103
 e-mail: zb-publikation@fz-juelich.de
 Internet: <http://www.fz-juelich.de/zb>

Umschlaggestaltung: Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck: Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Copyright: Forschungszentrum Jülich 2006

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie /Energy Technology Band/Volume 56

ISSN 1433-5530

ISBN-10: 3-89336-452-8

ISBN-13: 978-389336-452-7

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie oder
in einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter
Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Vorwort

Klimaschutzziele, wie sie in Kyoto und Rio de Janeiro diskutiert bzw. vereinbart wurden, stellen neue Herausforderungen an den Umgang mit Energie in allen Bereichen. Mit einem derzeitigen Anteil von knapp 21 % an den weltweiten energiebedingten Kohlendioxidemissionen und einer prognostizierten jährlichen Steigerungsrate verkehrsbedingter CO₂-Emissionen zwischen 1,3 % und 1,7 %, besteht im Verkehrssektor großer Handlungsbedarf. Um den gegenwärtigen Trend zu brechen, Klimaschutzziele zu erreichen und langfristig sichern zu können, werden vielfältige technische Lösungsansätze diskutiert: Effizienzsteigerungen von Fahrzeug- und Transportsystemen, der Einsatz neuer Energiewandlungs- und Antriebstechniken, effiziente Kraftstoffbereitstellungswege und der Einsatz von Kohlenstoff-armen und –freien Kraftstoffen. Ein Zusammenspiel der unterschiedlichen Lösungen soll es zukünftig ermöglichen, eine nachhaltige Verkehrsentwicklung zu sichern. In Anbetracht der großen Bedeutung, die der Verkehrssektor für die übrige Volkswirtschaft und für die Gesellschaft hat, muss dabei besondere Sorgfalt walten.

Das 1. Berliner Herbstseminar „Energie 2006 - Kraftstoffe und Antriebe für die Zukunft“ vom 9. bis 13. Oktober 2006 wird vom Institut für Land- und Seeverkehr, Fachgebiete Kraftfahrzeuge, der Technischen Universität Berlin zusammen mit dem Institut für Energieforschung, Systemforschung und Technologische Entwicklung, des Forschungszentrums Jülich veranstaltet. Ziel der Veranstaltung ist es, die technischen, energiewirtschaftlichen und umweltseitigen Kenntnisse der Teilnehmer zu vertiefen und die Vernetzung von Technik, Ökonomie, Umwelt und Politik aufzuzeigen. Das Herbstseminar bietet den Teilnehmern und Teilnehmerinnen die Möglichkeit zu vertiefenden Diskussionen, zu eigenständiger Erarbeitung von Lösungsansätzen und zum Gedankenaustausch mit Referenten und Teilnehmern.

An fünf Tagen finden im Rahmen der Veranstaltung Vorträge, Diskussionsrunden und Workshops zu den Themenschwerpunkten Umwelt, Verbrennungsmotoren, Hybrid- und Wasserstoffantriebe, Biokraftstoffe sowie Politik statt. Ein Filmabend, Exkursionen zur Fertigung von Dieselmotoren der DaimlerChrysler AG, zu den beiden Wasserstofftankstellen der Clean Energy Partnership und zum Bundestag werden den Bezug zur Praxis herstellen.

Der vorliegende Band fasst die Unterlagen zu den Themen des Herbstseminars zusammen. Den Autorinnen und Autoren der schriftlichen Beiträge sei für ihre Sorgfalt und ihr großes Engagement gedankt.

Das 1. Berliner Herbstseminar wird von zahlreichen Unternehmen und Organisationen durch Vorträge bzw. Beiträge zum vorliegenden Tagungsband, durch die Gewährung eines Einblicks in den praktischen Alltag im Rahmen von Exkursionen bzw. durch finanzielle Hilfen unterstützt.

Die Veranstalter bedanken sich hiermit besonders bei:

- BMW AG,
- DaimlerChrysler,
- Clean Energy Partnership.

Berlin - Jülich, Oktober 2006

Volker Schindler

Carolin Funk

Jürgen-Friedrich Hake

Jochen Linßen

Vorläufiges Programm

Montag, 9. Oktober 2006, Umwelt

10.30	Begrüßung der Teilnehmer - Prof. Dr. Volker Schindler und Carolin Funk, TU Berlin
11.00	Zukunft der Mobilität – Ein Blick in das Jahr 2050 - Frank Hansen, IFMO
12.00	Diskussion
12.30	Mittagspause
13.30	Anforderungen an Endenergieträger für den mobilen Einsatz - Prof. Dr. Volker Schindler, TU Berlin
14.30	Diskussion
14.45	Entwicklung der weltweiten Erdölreserven - Karl Schult-Bornemann, ESSO
15.45	Diskussion
16.00	Workshops zum Thema Umwelt
17.00	Vorstellung der Ergebnisse der Workshops
18.00	Abendessen
19.30	Filmabend

Dienstag, 10. Oktober 2006, Verbrennungsmotoren

08.30	Umweltwirkungen des Verkehrs weltweit - Dr. Axel Friedrich, UBA
09.30	Diskussion
09.45	Verbrennungsmotoren – Grundlagen - Prof. Dr.-Ing. Helmut Pucher, TU Berlin
10.45	Diskussion und Kaffeepause
11.15	Verbrennungsmotoren – Aufladung - Prof. Dr.-Ing. Helmut Pucher, TU Berlin
12.15	Diskussion
12.30	Mittagspause
13.30	HCCI und andere „neue“ Brennverfahren – Max Brauer, Efstratios Mylidakis, IAV

14.30	Diskussion
14.45	Workshops zum Thema Verbrennungsmotoren und Erdöl
15.45	Vorstellung der Ergebnisse der Workshops
17.00	Besichtigung der Dieselmotorenfertigung bei DaimlerChrysler, Berlin-Marienfelde, Ralf Kortenkamp

Mittwoch, 11. Oktober 2006, Hybrid- und Wasserstofffahrzeuge

08.30	Emissionsrichtlinien und Kraftstoffe weltweit - Carolin Funk, TU Berlin
09.00	Fahrzeug- und Antriebskonzepte für den urbanen Gebrauch - Prof. Dr. Volker Schindler, TU Berlin
09.30	Diskussion
09.45	Effiziente Dynamik - Der BMW-Hybridansatz - Olaf Eckart, BMW AG
10.45	Diskussion und Kaffeepause
11.15	Energiemanagement in Kraftfahrzeugen - Stephan Raming, TU Berlin
12.15	Diskussion
12.30	Mittagspause
13.30	Brennstoffzellen - Thomas Grube, FZ Jülich
14.30	Diskussion
14.45	Der neue 12-Zylinder-Wasserstoffmotor für die 7er-Reihe: Das Wasserstoffzeitalter hat begonnen - Christian Bock, BMW AG
16.00	Fahrt mit einem Wasserstoffbus
16.30	Besichtigung der TOTAL-Wasserstofftankstelle - Ulrike Wäser, TOTAL
18.00	Besichtigung der ARAL-Wasserstofftankstelle - Stefan Leonards, Iser und Schmidt
18.30	Evolution von Wasserstofffahrzeugen - Christian Bock, BMW AG
19.00	Abendessen

Donnerstag, 12.Oktober, Biokraftstoffe

08.30	Bereitstellungsformen von Kraftstoffen aus Biomasse - Prof. Dr. Frank Behrendt, TU Berlin
09.30	Diskussion
09.45	BTL-Kraftstoffe aus Biomasse- Das Karlsruher bioliq [®] -Verfahren – Prof. Dr. Eckhard Dinjus, FZ Karlsruhe
10.45	Diskussion und Kaffeepause
11.15	Biomassearten, Logistik, Anbauflächen und Potenziale - Thomas Breuer, Universität Bonn
12.15	Diskussion
12.30	Mittagspause
13.30	Rekonstruktion ethischer Standpunkte zum Anbau nachwachsender Rohstoffe - Dr. Gernot Pütz, TTN
14.30	Diskussion
14.45	Systemanalytische Bewertung verschiedener Kraftstoffoptionen - Jochen Linßen, FZ Jülich
15.45	Diskussion
16.00	Workshops zum Thema Biomasseanbau und Akzeptanz in der Bevölkerung
17.00	Vorstellung der Ergebnisse der Workshops

Freitag, 13.Oktober 2006, Politik und Einführungsstrategien

10.30	Besuch des Bundestages
12.00	Mittagspause
13.30	Die Kraftstoffstrategie der Bundesregierung - Frank Bonaldo, Referatsleiter Deutsche und europäische Mineralölmärkte, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
14.30	Diskussion
14.45	Workshops zum Thema Mobilität und Verkehr
15.45	Vorstellung der Ergebnisse der Workshops
16.15	Verabschiedung der Teilnehmer

Inhalt

Umwelt

Zukunft der Mobilität – Ein Blick in das Jahr 2050.....	2
<i>F. Hansen</i> <i>Institut für Mobilitätsforschung</i>	
Anforderungen an Endenergieträger für den mobilen Einsatz.....	11
<i>V. Schindler</i> <i>Technische Universität Berlin</i>	
Entwicklung der weltweiten Erdölreserven	26
<i>K. Schult-Bornemann</i> <i>ExxonMobil Central Europe Holding GmbH</i>	

Verbrennungsmotoren

Aufladung von Verbrennungsmotoren	38
<i>H. Pucher</i> <i>Technische Universität Berlin</i>	

Hybrid- und Wasserstofffahrzeuge

Emissionsrichtlinien und Kraftstoffe weltweit.....	58
<i>C. Funk</i> <i>Technische Universität Berlin</i>	
Fahrzeug- und Antriebskonzepte für den urbanen Gebrauch.....	70
<i>V. Schindler</i> <i>Technische Universität Berlin</i>	
Effiziente Dynamik – Der BMW-Hybridansatz.....	85
<i>O. Eckart</i> <i>BMW Group</i>	
Energiemanagement in Kraftfahrzeugen.....	100
<i>S. Raming</i> <i>Technische Universität Berlin</i>	
Brennstoffzellen	112
<i>L. Blum</i> <i>Forschungszentrum Jülich GmbH</i>	

Der neue 12-Zylinder-Wasserstoffmotor für die 7er-Reihe: Das Wasserstoffzeitalter hat begonnen.....	123
---	-----

C. Bock
BMW Group

Biokraftstoffe

Bereitstellungsformen von Kraftstoffen aus Biomassen	144
--	-----

F. Behrendt, Y. Neubauer
Technische Universität Berlin

BTL-Kraftstoffe aus Biomasse- Das Karlsruher bioliq [®] -Verfahren	158
---	-----

N. Dahmen, E. Dinjus, E. Henrich
Forschungszentrum Karlsruhe

Biomassearten, Logistik, Anbauflächen und Potenziale	169
--	-----

Th. Breuer
Universität Bonn

Bewertung der Optionen	187
------------------------------	-----

J. Linßen, M. Walbeck
Forschungszentrum Jülich GmbH

Das Proálcool-Programm – Bioethanol in Brasilien	199
--	-----

F. Weber, C. Funk
Technische Universität Berlin

Umwelt

Zukunft der Mobilität - Ein Blick in das Jahr 2025

Frank Hansen

Institut für Mobilitätsforschung (ifmo)

Szenarien für die Zukunft der Mobilität

Mobilität spielt in vielen Bereichen unseres Lebens eine wichtige, manchmal sogar die entscheidende Rolle. Sie bildet eine Grundvoraussetzung für das Funktionieren unserer Wirtschaft. Die Rahmenbedingungen für die Mobilität in der Zukunft sind jedoch mit vielen Unsicherheiten verbunden. Mobilität wird von vielen Einflussfaktoren getrieben, die stetigen Veränderungsprozessen unterlegen sind. Eine exakte Vorhersage für eine Zukunft der Mobilität in zwanzig Jahren ist daher nahezu unmöglich. Das ist umso bedauerlicher, als dass die Weichen für Zukunft der Mobilität von zahlreichen Entscheidungen und Maßnahmen im Hier und Jetzt abhängen.

Mit Hilfe der Szenariotechnik ist es jedoch möglich, systematisch und wissenschaftlich fundiert mögliche zukünftige Entwicklungen zu identifizieren und miteinander zu verknüpfen. Auf der Basis von Expertenwissen liefert sie konsistente, in sich schlüssige Zukunftsbilder, mit deren Hilfe man sich in realistische zukünftige Welten versetzen kann, um sich heute besser auf die Zukunft vorbereiten zu können.

Auf dieser methodischen Basis hat das Institut für Mobilitätsforschung (ifmo) in einem Kooperationsprojekt zwischen BMW Group, Deutsche Lufthansa AG, Deutsche Bahn AG und MAN AG eine umfangreiche Szenariostudie mit dem Titel „Zukunft der Mobilität“ gestartet. Das methodische Know-how hat Prof. Dr. Horst Geschka beigesteuert, einer der Mitentwickler der Szenariotechnik am Battelle-Institut. Die Rohdaten der Szenarien wurden mit Hilfe von 80 Experten aus den für die Mobilität relevanten Einflussumfeldern wie z. B. Wirtschaft, Technologie, Gesellschaft, Verkehrsangebot und -nachfrage in zahlreichen Workshops erarbeitet. Im Ergebnis liegen erstmalig Gesamtverkehrsszenarien vor, die nicht nur übergreifend die Verkehrsträger Straße, Schiene, Luft und Wasser analysieren, sondern sowohl Personen- als auch Güterverkehr in die Betrachtungen einbeziehen.

Die Szenariostudie beinhaltet zwei Szenarien und zwei Trendbruchereignisse. Im Folgenden werden einige Eckpunkte des Hauptszenarios „Mobilität braucht Aktion“ beschrieben. Eine ausführliche Beschreibung der Szenarien findet sich in der Publikation „Zukunft der Mobilität – Szenarien für das Jahr 2025“.

Das Szenario „Mobilität braucht Aktion“

Entwicklung von Wirtschaft- und Verkehrsleistung

Bemerkenswert am Szenario „Mobilität braucht Aktion“ ist zunächst einmal, dass ein über mehrere Jahrzehnte geltender enger Zusammenhang zwischen Verkehrs- und Wirtschaftswachstum außer Kraft gesetzt zu sein scheint. Bei einem moderaten Wirtschaftswachstum von durchschnittlich 1,8 Prozent jährlich fällt das Wachstum der Personenverkehrsleistung mit 0,4 Prozent jährlich im Durchschnitt über die nächsten zwanzig Jahre deutlich geringer aus. Im Güterverkehr hingegen wächst die Verkehrsleistung mit durchschnittlichen Wachstumsraten von 2,7 Prozent weiterhin stark an. Über die nächsten zwanzig Jahre bedeutet dies einen Anstieg der Güterverkehrsleistung von insgesamt 80 Prozent, während das Wachstum im Personenverkehr von nur 10 Prozent bis 2025 einer Stagnation nahe kommt (siehe Abbildung 1).

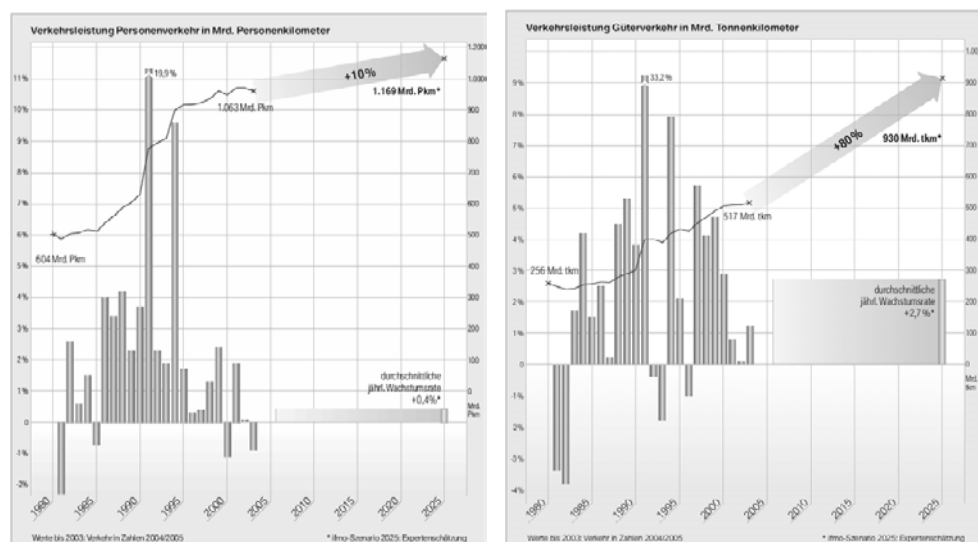


Abb. 1: Projektion der Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr bis 2025, Quelle: ifmo

Die Abschwächung des Wachstums im Personenverkehr erklärt sich zunächst einmal dadurch, dass die Bevölkerung in Deutschland zwischen 2005 und 2025 bei etwa 82 Millionen Einwohnern stagniert ist - und dies nur aufgrund eines (Netto-) Saldos von durchschnittlich 200.000 Zuwanderern p.a. Ohne Zuwanderung wäre die deutsche Bevölkerung aufgrund der demografischen Entwicklung geschrumpft. Die Altersstruktur der Bevölkerung hat sich dennoch deutlich zu Lasten der jüngeren Segmente verschoben (siehe Abbildung 2).

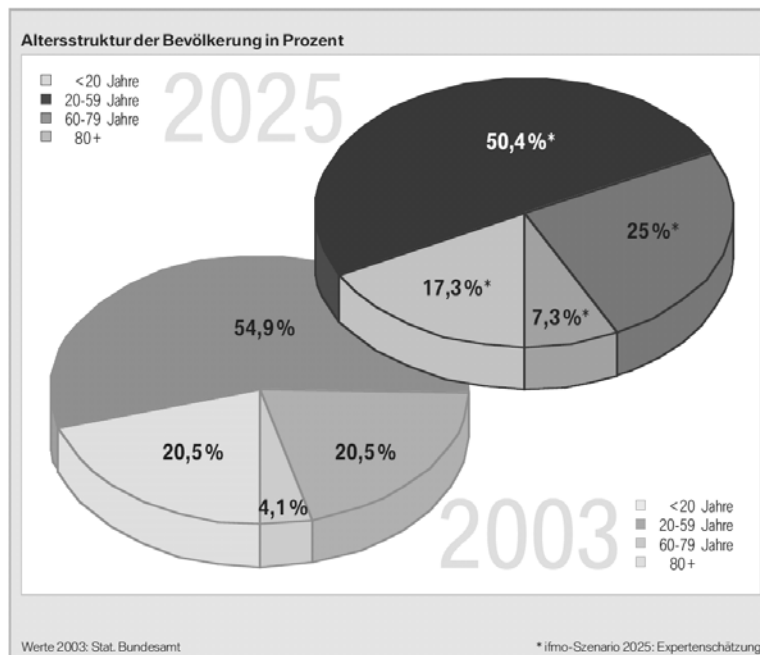


Abb. 2: Projektion der Altersstruktur in Deutschland bis 2025, Quelle: ifmo

Autofahren wird teurer

Trotz des moderaten Wachstums des Bruttoinlandsprodukts steigen die disponiblen Einkommen der privaten Haushalte durchschnittlich nur schwach. Das geringe Wachstum findet zudem nicht gleichmäßig über alle soziale Schichten statt. Die Einkommensverteilung wird ungleicher, so dass unteren und Teilen der mittleren Einkommensebenen real weniger zur Verfügung steht als noch 2005.

Demgegenüber sind die Mobilitätskosten deutlich gestiegen, vor allem im motorisierten Individualverkehr. In diesem Szenario werden analog zur Lkw-Maut auf Bundesfernstraßen auch Nutzungsgebühren für Pkw erhoben. Die eingenommenen Mittel fließen allerdings nahezu vollständig zurück in die Straßeninfrastruktur, die im Bundesfernstraßennetz zu großen Teilen von privaten Gesellschaften betrieben wird. Ebenso erheben viele Ballungsräume für die Zufahrt zu den Innenstädten eine City-Maut.

Darüber hinaus ist der Kraftstoffbasispreis weiter deutlich gestiegen. Im Szenario „Mobilität braucht Aktion“ wurde auf Basis von Expertenschätzungen in 2004 von einer Verdoppelung des Kraftstoffbasispreises auf etwa 70 Dollar pro Barrel ausgegangen. Da die 70 Dollar Marke bereits in 2005 und 2006 mehrmals überstiegen wurde und mit weiter steigender weltweiter Nachfrage nach Erdöl zu rechnen ist, kann man für 2025 noch von deutlich höheren Preisen ausgehen.

In dem Szenario verstärkt die Automobilindustrie ihre Aktivitäten in punkto Verbrauchsreduktion und alternativen Antrieben deutlich. Mit großen Anstrengungen seitens Industrie und Politik werden alternative Kraftstoffe wie z. B. Biokraftstoffe und Wasserstoff mit einem Anteil von 20 Prozent zu einem substanziellen Marktsegment. Die Einführung von Fahrzeugen mit entsprechenden Antrieben wird unter anderem durch den erleichterten oder vergünstigten Zugang zu vielen Innenstädten gefördert. Die durchschnittlichen CO₂-Emissionen durch Verbrennung fossiler Brennstoffe kann in 2025 bei neu zugelassenen Fahrzeugen auf 70g/km gesenkt werden (siehe Abbildung 3)

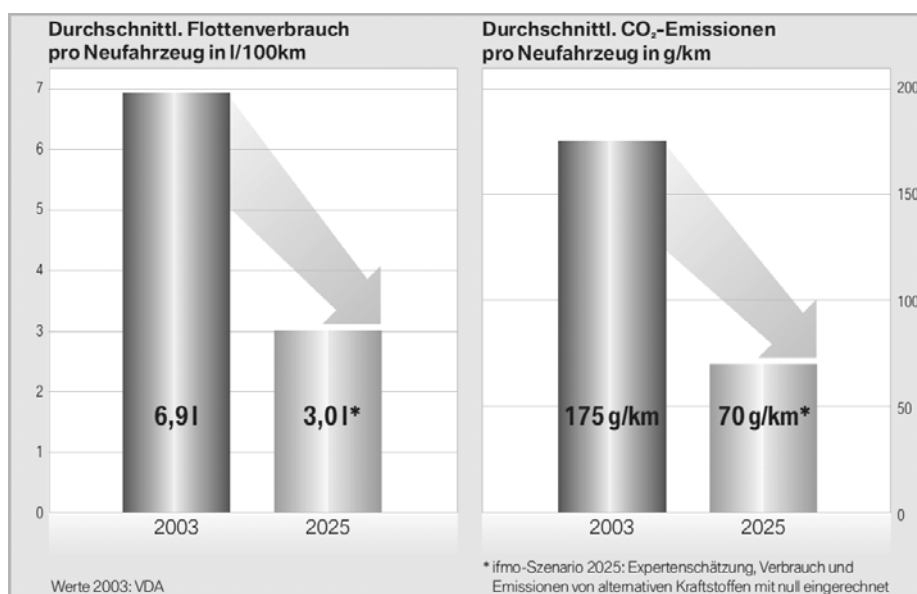


Abb. 3: Projektion des durchschnittlichen Flottenverbrauchs Pkw-Neufahrzeuge bis 2025, Quelle: ifmo

Insgesamt wird Autofahren deutlich teurer. Dabei werden vor allem die variablen Kosten des privaten Autoverkehrs steigen. Der private Kfz-Nutzer wird sich bei jeder einzelnen Fahrt in Zukunft noch mehr als bislang ausdrücklich fragen müssen, ob er sich diese konkrete Ausgabe leisten will und kann.

Für eine Beschreibung der Entwicklung des Personenverkehrs in der Luft und Schienenverkehr soll an dieser Stelle auf die Szenariostudie verwiesen werden. Im Folgenden werden die wesentlichen Eckpunkte der Entwicklung des Güterverkehrs beschrieben, der mit einem Wachstum von 80 Prozent im Szenario „Mobilität braucht Aktion“ eine wesentlich stärkere Veränderung erfahren wird.

Deutschland wird eine Güterdrehscheibe

Die beschriebene Entwicklung der Haushaltseinkommen in Kombination mit Verschiebungen der Haushaltsausgaben, vor allem in Richtung private Altersvorsorge, stehen zunächst einmal in einem Widerspruch zum starken Wachstum der Güterverkehrsleistung. So fallen die Stagnation der Haushaltseinkommen und die Veränderung der Ausgabenstruktur doch hauptsächlich zu Lasten der klassischen Konsumgüter aus. Und dies sind schließlich die physischen Güter, die Güteraufkommen generieren.

Will man die Ursachen für das starke Güterverkehrswachstum im Szenario „Mobilität braucht Aktion“ ausfindig machen, so muss man das geografische Umfeld zunächst einmal deutlich erweitern und jenseits der Grenzen Deutschlands suchen. Die Treiber für dieses Wachstum sind vor allem folgende Entwicklungen:

- Die wirtschaftliche Globalisierung und die internationale industrielle Arbeitsteilung werden in den nächsten zwanzig Jahren weitestgehend ungehemmt voranschreiten. Das Welthandelsvolumen wird sich bei durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten von 6-7 Prozent mehr als verdreifachen (in Werten).
- Die Volkswirtschaften in Osteuropa werden stark wachsen. Auf den deutschen Außenhandelskorridoren nach Osten erhöhen sich die Güteraufkommen zum Teil um über 200 Prozent (siehe Abbildung 4).
- Das starke Wirtschaftswachstum in Osteuropa wird jedoch nicht nur das Wachstum des deutschen Außenhandelsvolumens begünstigen, sondern auch zu einem starken Anstieg der Transitverkehre durch Deutschland führen. Aufgrund der zentralen Lage Deutschlands in einer erweiterten EU und den geschilderten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wird das Transitaufkommen in den nächsten zwei Jahrzehnten mit durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten von 4 Prozent um knapp 150 Prozent wachsen.

Die Ursachen für den Anstieg der Güterverkehrsleistung sind demnach im Wesentlichen nicht in der binnenländischen Nachfrage, sondern in globalwirtschaftlichen Zusammenhängen und der Entwicklung Europas zu verorten. Deutschland wird so mehr und mehr zu einer Güterdrehscheibe.

Güterverkehr wächst vor allem auf der Straße

Von dem starken Anstieg der Verkehrsleistung werden alle Verkehrsträger profitieren, allerdings in deutlich unterschiedlichen Ausmaßen. Denn das Wachstum im Güterverkehr wird im Wesentlichen auf der Straße stattfinden. Dies ist zunächst einmal bemerkenswert, denn einige Entwicklungen im Szenario „Mobilität braucht Aktion“ sprechen zunächst einmal für das Binnenschiff und die Schiene. An dieser Stelle sei dabei auf den deutlichen Anstieg der Entfernungen im Güterverkehr, die kontinuierliche Harmonisierung des europäischen Schienenverkehrs oder das Wachstum des Containeraufkommens verwiesen.

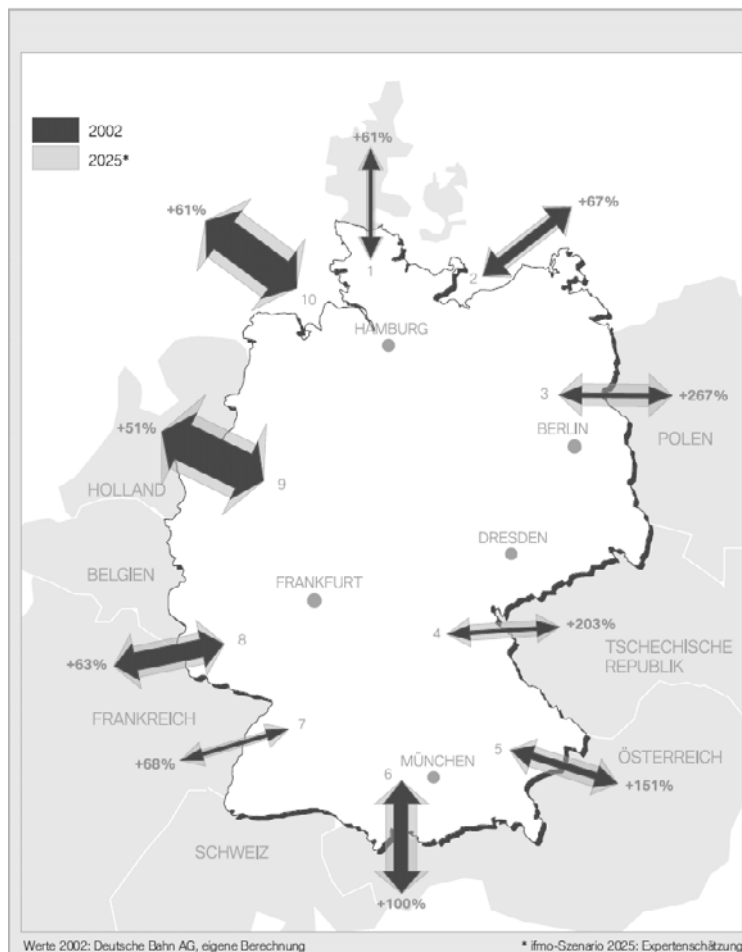


Abb. 4.: Projektion der Korridore des deutschen Außenhandels (in t), Quelle: ifmo

Um die Gründe für das weitere überproportionale Wachstum des Straßengüterverkehrs auszumachen, muss man sich den Zuwachs des Verkehrs - also den neu entstandenen Bedarf und die daraus resultierende Nachfrage nach Gütertransport - etwas genauer anschauen.

Der Nachfrager mit dem größten wachsenden Bedarf an Güterverkehr ist in dem Szenario „Mobilität braucht Aktion“ die verladende Industrie. Die Unternehmen werden ihre Produktion weiter in Netzwerken aufspannen. Durch die sinkende Fertigungstiefe, das weitere Outsourcing und die dadurch wachsende Anzahl von Akteuren in den Produktionsprozessen wird die industrielle Produktion zunehmend kleinteiliger. Beim Transport der dabei anfallenden geringen Sendungsgrößen ist die Straße systembedingt und durch ihre Kostenstruktur mit ihren vergleichsweise geringen Fixkosten eindeutig im Vorteil. Flexibilität ist zudem durch die ständig neu entstehenden bzw. häufiger wechselnden Relationen in den Produktionsnetzwerken ein entscheidendes Kriterium für die verladende Industrie und die

Logistikdienstleister. Auch diese Entwicklung spricht für die Straße, die im Vergleich der Verkehrsträger die höchste Netzdichte aufweist.

Darüber hinaus wird sich die Struktur der transportierten Güter durch die Entwicklungen bei der verladenden Industrie weiter von Massengütern in Richtung Stückgüter verschieben. Makroökonomisch betrachtet wird diese Verschiebung kontinuierlich durch das Wirtschaftswachstum und die daraus resultierenden Veränderungen der Sektorstrukturen getrieben, vor allem in Osteuropa. An der Verkehrsleistung in Deutschland wird der Anteil von Massengütern in dem Szenario von rund 40 Prozent auf etwa 27 Prozent zurückgehen. Demgegenüber wird der Anteil der Stückgüter von rund 53 Prozent auf etwa 66 Prozent anwachsen (siehe Abbildung 5).

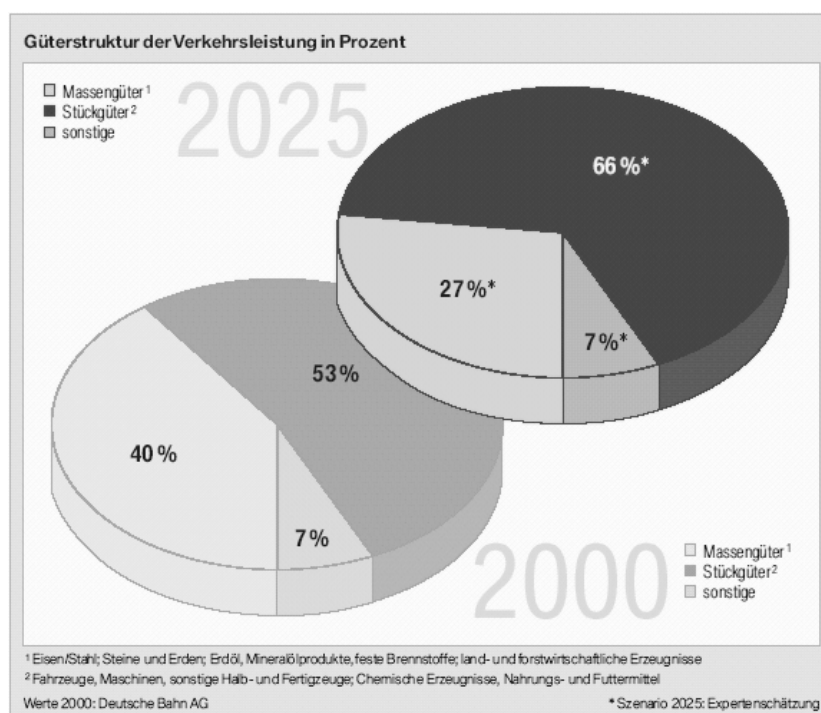


Abb. 5: Projektion der Güterstruktur, Quelle: ifmo

Diesem enormen Zuwachs an Straßengüterverkehr wird mit herkömmlichen Infrastrukturausbau nicht mehr beizukommen sein. Die knappen zur Verfügung stehenden finanziellen Ressourcen müssen zu wesentlichen Teilen in die Instandhaltung von Straßen und Brücken investiert werden. Darüber hinaus kann noch für die Beseitigung von besonders akuten Engpässen gesorgt werden. Aber für einen Ausbau des Straßennetzes, der dem Zuwachs an Straßengüterverkehr gerecht werden würde, werden die Mittel bei weitem nicht ausreichen. Und dies, obwohl in dem Szenario unterstellt wird, dass große Teile des

Bundesfernstraßennetzes von privaten Investoren betrieben werden und von Lkw als auch für Pkw erhobene Straßenbenutzungsgebühren vollständig in die Infrastruktur zurückfließen.

Den Erhalt der Leistungsfähigkeit der Straße in dem Szenario „Mobilität braucht Aktion“ haben die Experten an das Zusammenwirken zahlreicher verkehrspolitischer Entscheidungen und die konsequenten Umsetzung wichtiger Innovationen geknüpft, u. a.:

- Vernetzung der öffentlichen Verkehrsmanagementsysteme mit privaten Navigationsdiensten und Fahrzeug-basierten Sensornetzwerken zur übergreifenden Erfassung der Verkehrslage in Echtzeit. Und dies sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr.
- Erweiterung der kollektiven Verkehrssteuerung um netzweite individuelle Verkehrssteuerung.
- Erweiterung der Maut um auslastungsabhängige Kriterien; Einsatz als Verkehrssteuerungsinstrument.
- Erhöhung der zulässigen LKW-Abmessungen.

Geringes Wachstum bei Schiene und Binnenschiff

Auch die Schiene kann in dem Szenario vom allgemeinen Zuwachs im Güterverkehr profitieren. Die Zuwachsraten fallen jedoch im Vergleich zur Straße deutlich geringer aus. Im Vergleich zum Gesamtwachstum wächst der Schienengüterverkehr sogar nur unterproportional. Eine Verlagerung des Gütertransports von der Straße auf die Schiene – von Seiten der Verkehrspolitik vielerorts heftig gefordert und häufig prognostiziert – wird also nach Meinung der Experten nicht eintreten. Die wesentlichen Ursachen dafür sind in der Struktur des gewachsenen Güterverkehrs zu finden und bereits als Gründe für den Zuwachs im Straßengüterverkehr genannt.

Die Anbieter im Schienengüterverkehr werden sich in dem Szenario auf die rentablen Relationen mit hohen, schienenaffinen Güteraufkommen konzentrieren, auf denen vorrangig Ganzzüge gefahren werden können, wie z. B. auf den Hinterlandverbindungen der Containerseehäfen. Auf diesen Relationen werden sogar vergleichsweise hohe Wachstumsraten erzielt. Dafür werden jedoch in dem Szenario einige Entwicklungen als Annahmen vorausgesetzt, u. a.:

- Weitere Interoperabilisierung der europäischen Schienenverkehre; technische Interoperabilität, vor allem bei den Signalsystemen; Beseitigung institutioneller Hemmnisse.
- Entkoppelung von Güter- und Personenverkehr auf den Magistralen
- Konsequente Fortsetzung der Marktliberalisierung auf europäischer Ebene

Die Binnenschifffahrt kann in dem Szenario wie der Schienengüterverkehr von den hohen Wachstumsraten des Seecontaineraufkommens profitieren, vor allem auf dem Rhein. Doch auch hier spricht die geschilderte Struktur des zusätzlichen Bedarfs gegen Wachstumsraten, die höher als die der gesamten Güterverkehrsleistung ausfallen könnten, unter anderem wegen der geringen Netzdichte.

In dem Szenario hat neben dem Straßengüterverkehr auch die Luftfracht hohe Wachstumsraten zu verzeichnen. Neben der fortgeschrittenen wirtschaftlichen Globalisierung und dem stark steigenden Welthandelsvolumen liegt die Ursache dafür vor allem in der beschriebenen Verschiebung der Güterstruktur. So wird beispielsweise der Anteil an hochwertigen Maschinen im deutschen Export deutlich ansteigen.

Diese und die anderen beschriebenen Entwicklungen sind Ausschnitte eines Zukunftsbildes, das auf dem Wissen von 80 Experten basiert. Das Szenario „Mobilität braucht Aktion“ beschreibt eine mögliche Zukunft der Mobilität in Deutschland – es spiegelt nicht die Interessen der beteiligten Unternehmen wider. Das Szenario soll auf denkbare zukünftige Entwicklungen in den für Mobilität relevanten Umfeldern hinweisen und diese in ihren vernetzten Zusammenhängen darstellen.

Die ausführliche Beschreibung dieses Szenarios ist ein Teil der Studie „Zukunft der Mobilität – Szenarien für das Jahr 2025“. Der vollständige Ergebnisbericht ist kostenlos bestellbar unter www.ifmo.de.

Anforderungen an Endenergieträger für den mobilen Einsatz

Volker Schindler

Technische Universität Berlin

Was wird benötigt, um ein Fahrzeug anzutreiben?

Für den Antrieb von Landfahrzeugen wird letztlich Bewegungsenergie an Rädern benötigt; für Kettenantriebe, Laufmaschinen usw. gilt das analog; Rückstoßantriebe berücksichtigen wir hier nicht. Es handelt sich also um mechanische Energie; wir vernachlässigen damit Hilfsenergien, die zum Betrieb des Fahrzeugs ebenfalls benötigt werden wie Elektrizität für Kraftstoffpumpe, Steuergerät, Zündung oder Einspritzung oder Wärme, die z. B. zum Heizen von Katalysatoren oder des Innenraum benötigt wird. Diese Vereinfachung ist hier zulässig, weil die Hilfsenergien bei heutigen Antrieben immer zusammen mit der Bewegungsenergie bereit gestellt werden, also vom Betrieb des Haupt-Energiewandlers abhängen. Das muss nicht so sein; gerade in der Aufhebung dieser Kopplung können Potentiale für beträchtliche Verbesserungen liegen (siehe S. Raming).

Die Bewegungsenergie an den Rädern kann mit zwei grundsätzlich verschiedenen technischen Ansätzen bereitgestellt werden: Durch Gewinnung der Arbeitsfähigkeit (Exergie) im Fahrzeug oder durch Lieferung von nahezu reiner Exergie zum Fahrzeug. Unter Exergie wird dabei der Anteil einer Energiemenge verstanden, der theoretisch - also im Falle einer reversiblen Prozessführung - vollständig in jede andere Energieform umgewandelt werden kann. Das sind hier kinetische, potentielle und elektrische Energie. Den verbleibenden Rest einer Energiemenge nennt man Anergie. Es gilt also

$$\text{Energie} = \text{Exergie} + \text{Anergie}$$

Exergie steht in der Natur nur in geringem Umfang so zur Verfügung, dass sie leicht genutzt werden kann. Sie kann aber aus Primärennergie gewonnen werden. Dazu sind Prozesse der Energiewandlung notwendig, in der Regel thermodynamische Kreisprozesse. Für ein Fahrzeug stellt sich die Frage, ob es zweckmäßiger ist, ausgehend von einem Endenergieträger einen solchen Prozess außerhalb des Fahrzeug durchzuführen und die Exergie zuzuführen, oder ob es geschickter ist, einen geeigneten Energiewandler und einen darauf abgestimmten Brennstoff mitzuführen und während der Fahrt zu betreiben.

Versorgung von Außen

Die Versorgung mit Exergie von Außen macht einen geeigneten Übertragungsmechanismus erforderlich. Grundsätzlich möglich sind z. B. die genau bedarfssynchrone Bereitstellung durch

- Antrieb über Seil oder Kette: Seilbahn, Cablecar, Aufzug, Rolltreppe, Laufband
- Versorgung mit elektrischer Energie über Leitung und Schleifkontakt (O-Bus, Straßenbahn, Eisenbahn) oder mittels induktiver Übertragung (Transrapid)



Abb. 1: Deutschlands ältester O-Bus-Betrieb in Eberswalde

Eine andere Möglichkeit der Versorgung mit Exergie besteht darin, sie von Außen bereit zu stellen und im Fahrzeug für den späteren Bedarf zu speichern. Das erfordert ein geeignetes Speichermedium und einen darauf abgestimmten Wandlungsprozess wie

- Elektrochemische Batterie
- Kondensator, d.h. Wandlung in elektrostatische Energie
- Induktivität, d.h. Wandlung in magnetische Energie
- Schwungradspeicher, d.h. Wandlung in mechanische Energie (Gyro-Bus)
- Hydraulischer oder pneumatischer Druckspeicher (Pressluft-Lokomotive)

Alle damit verbundenen Lade- und Entladeprozesse sind verlustbehaftet.

Für den Straßenverkehr kommt praktisch nur die Variante mit Zwischenspeicherung in Frage. Oberleitungs-Busse spielen heute in der Praxis kaum eine Rolle. Die Idee der induktiven Versorgung von Straßenfahrzeugen über entsprechende Systeme in der Straße wurde gelegentlich verfolgt, hat aber bisher keine praktische Relevanz erlangt.

Energiewandler im Fahrzeug

Die Gewinnung von Exergie aus einem Energieträger im Fahrzeug macht es notwendig, eine Kraftmaschine mitzuführen, die daraus mittels eines physikalisch-chemischen Prozesses die notwendige Arbeitsfähigkeit erzeugt. Als Energieträger kommen in Frage:

- Chemisch gebundene Energie: Aus ihr kann mittels Verbrennung zunächst Druck, Wärme, Strömungsenergie oder auch eine Elektromotorische Kraft erzeugt werden, woraus dann wiederum mechanische Energie gewonnen werden kann.
- Physikalisch gespeicherte Energie in Form von
 - o fühlbarer Wärme (Lokomotive mit Dampfspeicher)
 - o latenter Wärme
 - o Mischungssystemen („Natron-Lokomotive“: Wasser wird in konzentrierter NaOH gelöst)

aus denen z.B. mittels thermodynamischer Prozesse mechanische Energie gewonnen werden kann.

Unter den chemischen Energieträgern stehen wiederum zahlreiche Wahlmöglichkeiten offen. Zunächst muss entschieden werden, ob ein Energieträger verwendet werden soll, der so formuliert wurde, dass es nur noch eines äußeren Auslösers bedarf, um die Reaktion einzuleiten; pyrotechnische Materialien weisen diese Eigenschaft auf. Eine andere Möglichkeit besteht darin, zwei Reaktanden zu verwenden, die erst dann zu einer starken Reaktion fähig sind, wenn sie miteinander gemischt werden; Raketentreibstoffe gehören zu dieser Gruppe. Die dritte Möglichkeit besteht darin, einen Verbrennungsprozess unter Nutzung von Luft zu nutzen, die uns ja auf der Erdoberfläche überall zur Verfügung steht. Der große Vorteil dieses Weges besteht darin, dass nur „die Hälfte“ der Materialmengen im Fahrzeug mitgeführt werden muss.

Eine weitere Wahlmöglichkeit betrifft die Endprodukte der Verbrennung. Wenn sie bei Umgebungsbedingungen fest oder flüssig sind, nehmen sie nicht viel Platz ein und können grundsätzlich an Bord des Fahrzeugs gesammelt werden. Das ermöglicht eine spätere, geordnete Entsorgung oder auch eine Wiederverwertung. Nachteil ist natürlich, dass die „Asche“ mitgeführt werden muss und die Energie- und Leistungsdichte des Antriebssystems entsprechend verschlechtert wird. In diese Kategorie gehören einige Batteriesysteme wie Zink-Luft und Aluminium-Luft. Man kann sich auch geeignete Verbrennungsprozesse vorstellen; in diesem Zusammenhang wurde Silizium als Energieträger diskutiert.

Die andere Möglichkeit besteht in der Wahl von Stoffen, deren Verbrennungsprodukte gasförmig sind. Diese können nicht sinnvoll im Fahrzeug zurückgehalten und gespeichert werden; sie müssen in die Umgebung entlassen werden. Daraus folgt, dass darin nur chemische Elemente und Verbindungen enthalten sein dürfen, die in der Luft natürlich vorkommen. Damit ist die Auswahl unter den möglichen Kraftstoffen extrem eingeschränkt; es kommen nur noch Verbindungen in Frage, deren Verbrennungsprodukte Wasserdampf, Kohlendioxid oder Stickstoff sind. Die Kraftstoffe dürfen also nur Stickstoff, Sauerstoff, Kohlenstoff und Wasserstoff enthalten. Damit bleiben als mögliche Stoffgruppen:

- Alle Kohlenwasserstoffe inkl. derer mit Sauerstoff- und Stickstoff-Verbindungen
- Alle Verbindungen von Stickstoff mit Wasserstoff

- Wasserstoff

Eine besonders exotische Variante ist Wasserstoffperoxid – H_2O_2 – ein Stoff, der sich unter Einwirkung eines Katalysators explosionsartig zersetzen lässt.

Tatsächlich hat die parallele Evolution von Motoren und Kraftstoffen eine Auswahl unter genau diesen Stoffen getroffen. Alle – durchaus zahlreichen – Versuche, andere Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge zu nutzen, sind wieder aufgegeben worden.



Abb. 2: H_2O_2 -Turbine in einem Wartburg; 1979 von Dr. Glaubrecht in Torgau entwickelt, 120 PS bei 16.000 U/min; ausgestellt im Fahrzeugmuseum Chemnitz-Klaffenbach

Kriterien für die Auswahl von Energieträgern für den Straßenverkehr

Auch wenn die Einschränkung auf wenige chemische Elemente als Grundbestandteile für Kraftstoffe sehr einengend erscheint, bleibt doch eine Vielzahl von möglichen Substanzen übrig, die grundsätzlich in Frage kommen. Die Auswahl muss also weiter verkleinert werden. Es gilt dafür sinnvolle Kriterien zu finden.

Energieträger für den Antrieb von Automobilen müssen eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen. Die Wichtigsten werden im Folgenden in sehr summarischer Form angegeben (Reihenfolge ohne Wertung):

Bezogen auf das Fahrzeug:

- Gute Fähigkeit, den wechselnden Leistungsanforderungen im realen Betrieb zu folgen: Steht der Energieträger unmittelbar zur Verfügung oder muss er über einen Umwandlungsprozess zuvor bereit gestellt werden?

- Hohe Energiedichte (Wh/kg und Wh/l) und Leistungsdichte (W/kg und W/l) des Systems (Energieträger, Energiespeicher, Peripherie)
- Möglichst freie Formgebung des Systems im Hinblick auf die Unterbringung im Fahrzeug für ein effizientes Packaging
- Keine Energieverluste bei Nichtbenutzen des Fahrzeugs
- Der Kraftstoff löst keine Korrosion an den Materialien des Systems aus.

Bezogen auf einen Verbrennungsmotor:

- Einhaltung enger Toleranzen für physikalische und chemische Eigenschaften
- Zündwilligkeit bzw. Klopfestigkeit im geforderten
- Ausreichend hoher Dampfdruck für Kaltstarts auch bei tiefen Temperaturen
- Keine schädlichen Ablagerungen von Inhaltsstoffen des Kraftstoffs oder von Verbrennungsprodukten im Gemischbildungssystem, im Brennraum und im Abgassystem
- Keine Substanzen, die als Katalysatorgifte wirken
- Geringe Anforderungen an die Technik des Motors (z.B. Vermeidung sehr hoher Einspritzdrücke)
- Saubere Verbrennung, insbesondere Minimierung der Rohemissionen von NO_x, HC und Ruß; dadurch einfache Abgasnachbehandlung zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte
- Tribologische Verträglichkeit (z. B. selbst schmierende Eigenschaften, Verträglichkeit mit Schmierstoffen)

Bei einer Brennstoffzelle oder bei einem Energiewandler mit äußerer Verbrennung gelten diese Anforderungen analog.

Bezogen auf Handhabung und Sicherheit der Kraftstoffe:

- Lagerbar und transportierbar bei allen Umgebungsbedingungen
- Gefahrlose Handhabung durch Laien
- Geringer Dampfdruck zur Vermeidung von Verdunstungsverlusten
- Kein Risiko bei mechanischen und thermischen Belastungen Kraftstoff führender Bauteile
- Keine Neigung zur Bildung explosionsfähiger Gemische bei der Handhabung und bei Unfällen in Räumen und im Freien
- Nutzung von engen Räumen ohne Einschränkungen möglich, z.B. Abstellen des Fahrzeugs in Garagen, Tunneldurchfahrt

Bezogen auf die Wirtschaftlichkeit:

- Vertretbare und langfristig kalkulierbare Kosten
- Primärenergie und Rohstoffe verfügbar in großen Mengen aus unterschiedlichen Weltregionen
- Weltweite Verfügbarkeit des Kraftstoffs bzw. zumindest Verfügbarkeit auf quantitativ wichtigen Fahrzeugmärkten über dichte Infrastrukturen

Bezogen auf die Wirkung des Kraftstoffs und dessen Reaktionsprodukten auf den Menschen:

- Keine Gefährdung bei Kontakt oder Inhalation
- Nicht toxisch
- Nicht narkotisierend
- Nicht ätzend
- Nicht geruchsbelästigend
- Nicht Allergie erregend
- Leicht ab- bzw. auswaschbar

Bezogen auf Umweltwirkungen:

- Keine Emissionen bei der Gewinnung der Rohstoffe und Primärenergien
- Keine Emissionen bei der Herstellung des Kraftstoffs
- Keine Emissionen bei Transport, Lagerung und Umfüllung des Kraftstoffs
- Keine Freisetzung von chemischen Elementen und Verbindungen bei der Nutzung, die in der Luft nicht natürlich vorkommen
- Kein photochemisches Potenzial der Abgase (geringer Beitrag zu Smog und Ozonbildung)
- Der Kraftstoff, die Gewinnung seiner Vorprodukte und die Verbrennungsprodukte sind nicht treibhauswirksam
- Keine Umweltschädigung bei ungewollter Freisetzung in Böden, im Wasser und in der Luft; biologisch leicht abbaubar

Die genannten Forderungen stehen teilweise miteinander im Konflikt. Kein Energieträger kann allen Kriterien in gleicher Weise entsprechen. Vor allem aus Gründen der Energie- und Leistungsdichte und der Handhabbarkeit haben chemisch gebundene Energien für Verbrennungsprozesse große Vorteile. Dabei haben sich aus Gründen des baulichen Aufwandes (Gewicht, Bauraum, Kosten) und des Ansprechverhaltens Prozesse mit innerer Verbrennung in Otto- und Dieselmotoren gegenüber solchen mit äußerer Verbrennung wie Dampfmaschinen oder Stirlingmotoren vollständig durchgesetzt. Die bei weitem breiteste Verwendung hat chemische Energie gespeichert in den Gemischen von flüssigen Kohlenwasserstoffen gefunden, die als "Benzin" und "Diesel" bekannt sind.

Gasförmige Brennstoffe haben Nachteile bezüglich der Speicherbarkeit und spielen daher bisher ebenfalls nur eine begrenzte Rolle. Abbildung 3 zeigt die Speicherdichten, jeweils von Kraftstoff und Behälter, von wichtigen Gasen im Vergleich zu Benzin und Diesel. Als Referenzgröße des Kraftstoffspeichers wurde ein 50l Benzintank gewählt.

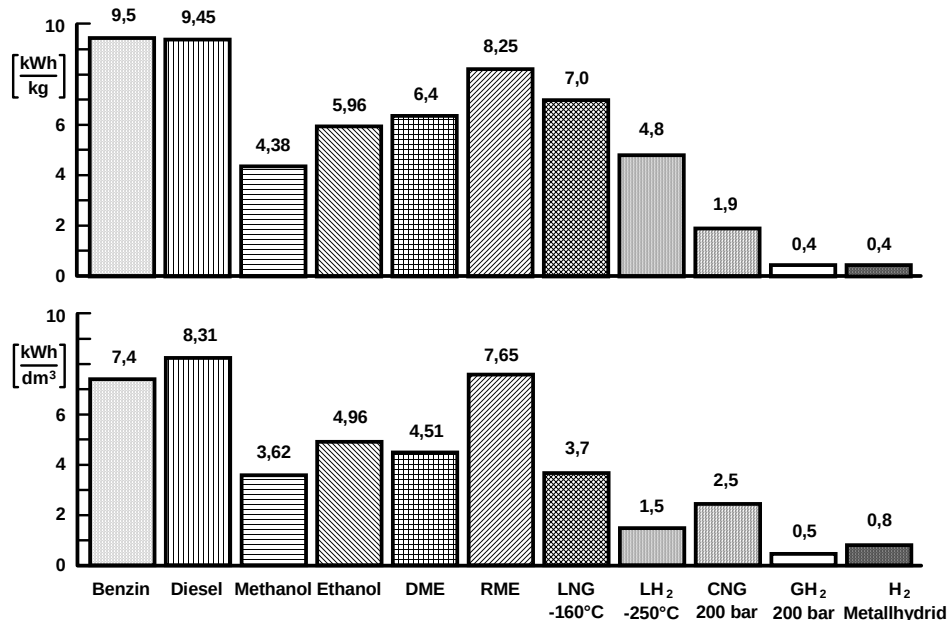


Abb. 3: Energiedichten für unterschiedliche Kraftstoffe. Für CNG und CH₂ wurden Stahlbehälter angenommen, für LNG und LH₂ gewichtsoptimierte Aluminiumtanks.

Abbildung 4 zeigt den Gemischheizwert über dem stöchiometrischen Luftbedarf als wesentliche Kenngröße zur Beurteilung einer Eignung als Motorkraftstoff für verschiedene Energieträger im Vergleich zu Benzin und Diesel. Trotz unterschiedlicher Heizwerte der Kraftstoffe liegen die Gemischheizwerte der verschiedenen Kraftstoffe etwa in der gleichen Größenordnung. Daraus folgt, dass die erreichbaren Mitteldrücke der verschiedenen Kraftstoffe in einem Motor auch in etwa gleich sind. Der höhere stöchiometrische Luftbedarf des Wasserstoffs zeigt an, dass im Vergleich zu den anderen Kraftstoffen für eine bestimmte zu verbrennende Luftmasse eine deutlich geringere Wasserstoffmasse benötigt wird. Grund dafür ist der hohe gravimetrische Energieinhalt des Wasserstoffs. Ein Nachteil kann sich daraus ergeben, wenn die Füllung des Brennraums für eine hohe spezifische Leistung eine Verdichtung des Gemisches erfordert.

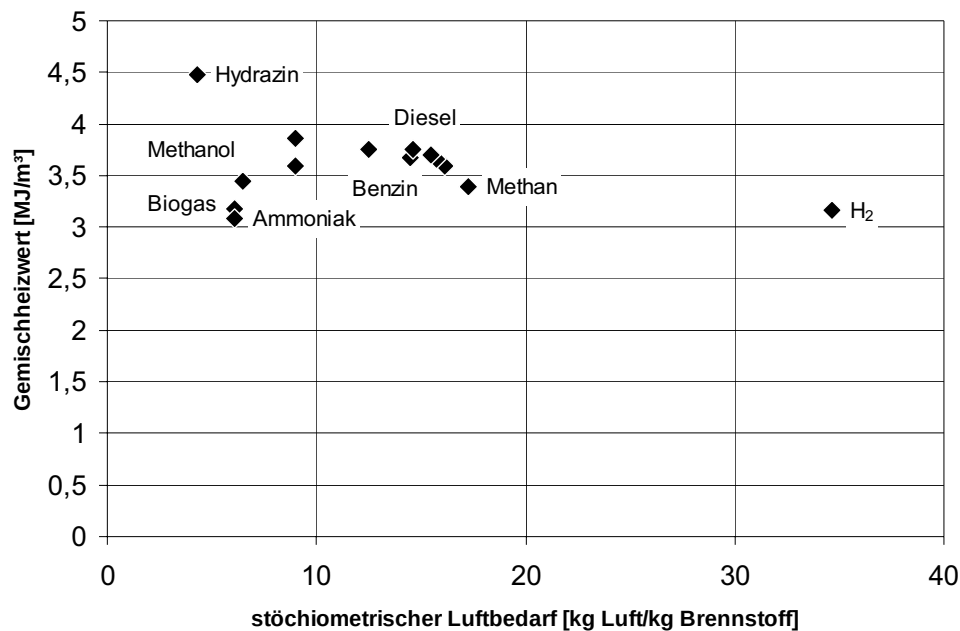


Abb. 4: Stöchiometrische Gemischheizwerte für verschiedene konventionelle und alternative Kraftstoffe für $T = 0^\circ\text{C}$ und 1,01325 bar (Benzin, Diesel, Methan, Ethan, Propan, Butan, Methanol, Ethanol, RME, DME, Biogas, Wasserstoff und als Exoten Ammoniak und Hydrazin)

Fasst man alle Kriterien zusammen, ist erkennbar, dass als mobile Energieträger bisher nicht zu Unrecht fast ausschließlich Benzin und Dieselmotorkraftstoff eingesetzt wurden. Sie bilden bereits eine recht gute und weltweit in der Summe ihrer Eigenschaften akzeptierte Annäherung an die genannten Anforderungen. Neue technische Entwicklungen können aber durchaus dazu führen, dass Optionen, die bisher als unattraktiv gelten mussten, reif für eine breitere Anwendung werden.

Konventionelle Kraftstoffe und Möglichkeiten zu ihrer Weiterentwicklung

Bisher werden Benzin und Dieselmotorkraftstoff nahezu ausschließlich durch die Auftrennung des natürlich vorkommenden Stoffgemisches "Rohöl" gewonnen; chemische Veränderungen daran werden nur in begrenztem Umfang vorgenommen. Die zugehörigen Raffinerieprozesse werden hier nicht näher beschrieben, weiterführende Literatur ist in [1] zu finden.

Benzin und Dieselmotorkraftstoff können durch gezielte Beeinflussung der Zusammensetzung deutlich verbessert werden. Dabei werden zwei Wege verfolgt. Einmal werden die Fraktionen aus dem Raffinerieprozess, die zu Benzin bzw. Diesel gemischt werden, zuvor weiter behandelt. Ziel kann eine Entschwefelung oder die Reduzierung des Aromatengehalts sein.

Der andere Weg besteht darin, dem Benzin bei der Abmischung des fertigen Produktes Komponenten beizufügen, die besondere Eigenschaften haben. Zu nennen sind hier Klopfverbesserer, reinigende, konservierende und schmierende Beimischungen (Additive, Scavenger). In letzter Zeit gewinnen synthetisch erzeugte Teilmengen aus GtL-Prozessen eine gewisse Bedeutung. In jüngster Zeit werden – allerdings aus Gründen der CO₂-Minderung und nicht der Qualitätsverbesserung – auch auf Pflanzen gewonnene Fettsäuren bzw. ihre Ester (RME) dem Diesel zugemischt bzw. Ethanol dem Benzin beigemischt. Ab 2007 soll nach den Plänen der Bundesregierung eine Verpflichtung zur Beimischung eingeführt werden. Viele Mineralölfirmen bieten inzwischen an ihren Tankstellen Premiumqualitäten ihrer Kraftstoffe an.

Neben der weiteren Nutzung von Rohöl gibt es grundsätzlich viele andere Möglichkeiten zur Herstellung von Benzin, Diesel oder anderen Kraftstoffen. Interessant sind vor allem der Fischer-Tropsch-Prozess zur Herstellung von Dieselmotorkraftstoff und der Mobil Oil Prozess zur Herstellung von Benzin [1]. In beiden Fällen dient Synthesegas als Ausgangspunkt für die weiteren Prozessschritte. Da Synthesegas unter Energieeinsatz grundsätzlich aus beliebigen kohlenstoff-, sauerstoff- und wasserstoffhaltigen Ausgangsmaterialien hergestellt werden kann, erlauben diese Wege eine völlige Abkopplung der Kraftstoffherstellung vom Erdöl. In Prozessen zur Erzeugung von synthetischem Kraftstoff kann zudem jede beliebige zur Verfügung stehende Primärenergie eingekoppelt werden. Auch in Bezug auf die Prozessenergie kann daher die Basis "Erdöl" völlig verlassen werden. Die materielle Basis für einen Kraftstoff kann aus Erdgas oder Kohle genauso bestehen wie aus Biomasse [2]; sogar die Verwendung von Kohlendioxid aus der Luft und von Wasser wäre theoretisch möglich, wenn man die erforderliche Prozessenergie zu akzeptablen Kosten bereitstellen könnte.

Synthesegas als Ausgangsbasis für die Synthese von Kraftstoffen hat noch einen weiteren Vorteil: Im Gegensatz zur Gewinnung aus Erdöl wird nicht ein vorhandenes Stoffgemisch lediglich passend getrennt und geringfügig chemisch verändert, sondern es werden die gewünschten Stoffe gezielt aus sehr kleinen Ausgangsmolekülen chemisch aufgebaut. Diesen Prozess kann man präzise steuern und so Benzin und Dieselmotorkraftstoff in Qualitäten gewinnen, die denen aus klassischen Raffinerieprozessen deutlich überlegen sind. Mit solchen maßgeschneiderten Kraftstoffen – designed fuels – lassen sich nochmals erhebliche Verbesserungen im Emissionsverhalten der Fahrzeuge erreichen [3].

Aus Synthesegas lassen sich auch zahlreiche andere als Kraftstoffe geeignete Verbindungen wie Methanol, Ethanol, DME usw. herstellen. Es muss jeweils im Einzelnen geprüft werden, ob sie tatsächlich im Sinne der oben genannten Anforderungen Vorteile gegenüber – heutigen oder verbesserten – Dieselmotorkraftstoff- oder Benzinqualitäten haben.

Gründe für die Suche nach alternativen Energieträgern für Fahrzeuge

Neben Benzin und Dieselmotorkraftstoff gibt es viele weitere Stoffe, die den oben genannten Anforderungen in der Summe ähnlich gut, aber mit anderen Schwerpunkten entsprechen. Hier sind vor allem die Kohlenwasserstoffe Methanol, Ethanol, Methan (CNG, compressed natural gas, bzw. LNG, liquefied natural gas) und LPG (liquefied petroleum gas) zu nennen.

Unter den Ansprüchen an die Energieträger für den Verkehr haben in der jüngeren Vergangenheit vor allem ökologische Eigenschaften eine besondere Relevanz erhalten. Einerseits sollen die Emissionen an Stoffen, die in der Luft normalerweise nicht oder nur geringfügig vorhanden sind – CO, Stickstoffoxide, Kohlenwasserstoffe, Partikel, Benzol, ... – auf ein mit Sicherheit ungefährliches Minimum begrenzt werden. Andererseits soll die Freisetzung von Kohlendioxid vermindert werden, um einer Erwärmung der Erdatmosphäre infolge des Treibhauseffektes vorzubeugen [4, 5].

Im ersten Fall handelt es sich um eine Fragestellung, für die die Herkunft der Kraftstoffe und die Prozesse zu ihrer Veredelung nur von begrenztem Interesse sind. Es gilt “lediglich” die Emissionen beim Betrieb, d.h. im Wesentlichen aus dem Auspuff zu mindern. Dazu müssen die Verbrennung und die Abgasnachbehandlung fein aufeinander abgestimmt werden; dies gelingt am besten mit eng tolerierten, d.h. in ihren für die Motoren wesentlichen chemisch-physikalischen Eigenschaften präzise bekannten Kraftstoffen. Ein besonders hohes Potenzial zur Verbesserung der ökologischen Kennwerte weist Wasserstoff auf.

In Bezug auf die lokalen ökologischen Auswirkungen haben Elektrofahrzeuge ihren wesentlichen Vorteil gegenüber Antriebssystemen mit chemischen Energieträgern. Für sie kommt überwiegend die Speicherung von Strom in Batterien in Betracht. Großer Entwicklungsaufwand wird in die Entwicklung von Brennstoffzellen zur Stromerzeugung aus geeigneten chemischen Energieträgern gesteckt. Bis zur Reife für die große Serie sind noch zahlreiche technische und ökonomische Probleme zu lösen. Alle anderen Varianten der Strombereitstellung im Fahrzeug scheinen derzeit gar nicht oder nur für Spezialanwendungen tauglich zu sein.

Bei der Betrachtung von Klimaauswirkungen muss die gesamte Kette von der Gewinnung der Ausgangsmaterialien (z.B. des Rohöls) bis zur Verwendung im Auto betrachtet werden, da es für den Treibhauseffekt gleichgültig ist, wo die klimawirksamen Gase freigesetzt werden. Um hier zu einer Bewertung zu gelangen, wurden umfangreiche Studien durchgeführt [4, 6, 7]. Es kommt dabei einerseits darauf an, welche Auswirkungen die Verwendung eines Energieträgers auf das Fahrzeug hat. Noch wichtiger ist aber, aus welchen Ausgangsmaterialien er mit welcher Primärenergie und mit welchen Prozessen hergestellt wurde. Ein wesentliches Ziel ist in diesem Zusammenhang die Nutzung von nicht fossiler Primärenergie. Vor diesem Hintergrund werden folgende Optionen verfolgt:

- Nicht fossile, biogene Kraftstoffe
- Methanol aus Erdgas
- Erdgas
- Wasserstoff

Nicht fossile, biogene Kraftstoffe

In der Diskussion um alternative Kraftstoffe werden verstärkt auch Produkte der Landwirtschaft betrachtet. In einer Reihe von Pflanzen entstehen Öle, die nach relativ

geringer chemischer Umwandlung als Dieselmotorkraftstoffe geeignet sind. In Europa handelt es sich vor allem um Rapsöl, in tropischen Ländern kommt auch Palmöl in Betracht. In ihren lokalen Emissionsauswirkungen haben sie keine wesentlichen Vor- oder Nachteile gegenüber heutigem Diesel. Bei Gewinnung und Verbrauch wird bezogen auf die gesamte Prozesskette auch unter Einschluss der Bodenbestellung und Ernte weniger Kohlendioxid freigesetzt als bei Diesel aus Erdöl. Dieser Vorteil wird jedoch mit deutlich höheren Kosten (bzw. mit Steuerverzicht) erkauft [1].

Aus Zucker und Stärke kann man mit gängigen Verfahren Ethanol herstellen, das sich gut als Ottokraftstoff eignet [9]. Vor allem in Brasilien wird Ethanol seit dem Ende der 70er-Jahre gefördert durch staatliche Programme großtechnisch genutzt [10]. Ethanol bietet jedoch keine wesentlichen Vorteile bei den lokalen Emissionen gegenüber Benzin. Bei Betrachtung der gesamten Kette von der Düngerproduktion über den Anbau und die Ethanolgewinnung bis zum Verbrauch im Fahrzeug bietet Ethanol eine gewisse Entlastung für den Treibhauseffekt. Auch hier stehen hohe volkswirtschaftliche Kosten einem relativ begrenzten ökologischen Nutzen gegenüber, sodass zusätzliche – z.B. beschäftigungspolitische, agrarstrukturelle oder andere – Gründe für eine Rechtfertigung dieses Weges erforderlich sind [1].

Ein weiterer Prozess geht von der Vergasung von Biomasse zu Synthesegas und der anschließenden Erzeugung von Diesel oder Benzin oder Methanol aus. Auch hier sprechen die Kosten eigentlich gegen einen umfassenden Einsatz. Allerdings können sich Nischen ergeben, wenn die Biomasse günstig bereit gestellt werden kann [11] oder wenn eine Subventionierung der Biomasseproduktion aus anderen Gründen politisch geraten erscheint. Falls sich die derzeitigen Rohölpreise (ca. 70 USD/bbl) als dauerhaft erweisen, kann die Schwelle der Rentabilität in vielen Fällen erreicht werden.

Methanol

Die Vorteile von Methanol (CH_3OH) als Kraftstoff liegen in seinem reduzierten Ozonbildungspotenzial im Vergleich zu Benzin und in der relativ einfachen Herstellung aus Synthesegas. Vor diesem Hintergrund wurden in den 70er und 80er-Jahren umfangreiche Forschungen und Großversuche zur Nutzung von Methanol als Kraftstoff durchgeführt [12]. Als Rohstoffbasis sollte Kohle verwendet werden, die Prozessenergie aus HTR bereit gestellt werden. Eine Zeit lang wurde Methanol auch unter dem Aspekt diskutiert, daraus im Fahrzeug durch Steam-Reforming Wasserstoff zum Betrieb von PEM-Brennstoffzellen zu gewinnen.

Nachteile von Methanol sind vor allem die hohe Toxizität und der im Vergleich zu Benzin um ca. 50 % geringere Energiegehalt. In welchem Umfang bei Verwendung von Methanol auf vorhandene Infrastrukturen für Benzin und Diesel (Tanks, Transportfahrzeuge, Zapfstellen, ...) zurückgegriffen werden kann, ist angesichts der größeren Aggressivität nicht abschließend geklärt.

Die Erzeugung von Methanol aus Kohle weist einen maximalen Wirkungsgrad von ca. 50 % auf, bei der Herstellung aus Erdgas liegt er bei etwa zwei Dritteln. Ein direkter Einsatz von Erdgas kann daher die sinnvollere Alternative sein.

Erdgas

Erdgas ist der umweltverträglichste fossile Energieträger. Er besteht im Wesentlichen aus Methan (CH_4), das den höchsten Wasserstoffgehalt aller Kohlenwasserstoffe aufweist. Je niedriger der Kohlenwasserstoffgehalt eines Energieträgers ist, desto geringer sind die durch Kohlenstoff bedingten Emissionen von Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Ruß und Kohlenwasserstoffen. Die Ressourcenverfügbarkeit von Erdgas ist besser als die von Mineralöl, sodass eine Diversifizierung von der ausschließlichen Abhängigkeit von Öl möglich ist [13]. Erdgas ist ein ausgezeichneter Ottokraftstoff und kann ohne chemische Veränderung in Verbrennungskraftmaschinen verwendet werden. Allerdings ist in Abhängigkeit vom Gewinnungsort eine Reinigung (vor allem eine Trocknung), sowie eine Anpassung des Verbrennungsprozesses an die jeweils vorliegende Gasqualität erforderlich.

Für den Transport von Erdgas in einem Fahrzeug muss seine volumetrische Energiedichte erhöht werden. Dies erfolgt entweder durch Speicherung bei hohem Druck oder bei sehr niedriger Temperatur. Die Druckgasspeicherung wird üblicherweise bis 200 bar praktiziert; an der Beherrschung sehr viel höherer Drücke wird gearbeitet. Eine Reihe von Fahrzeugmodellen wurde nach speziell entwickelten Richtlinien der europäischen Union zugelassen und wird auf dem Markt angeboten [14].

In der Gasindustrie ist bei Überseetransport und auch bei einigen stationären Anwendungen ein Trend zu tiefkalt flüssigen Gasen zu beobachten. In der Flüssigphase bei -160 °C wird auch bei Berücksichtigung des tatsächlichen Volumens für die erforderliche, sehr gute thermische Isolation ein erheblich höherer Energieinhalt als bei Druckspeicherung erreicht. Diese Option ist auch deshalb interessant, weil LNG ein viel besser standardisiertes Produkt ist als Erdgas aus dem Leitungsnetz. Zudem scheint sich abzuzeichnen, dass nach jahrzehntelangen Planungen nun doch ein LNG-Terminal in Wilhelmshafen gebaut wird. Die Bereitstellungswirkungsgrade für komprimiertes oder verflüssigtes Erdgas erreichen bis zu 90 % und liegen damit ähnlich günstig wie die Werte für die heutigen konventionellen Kraftstoffe [15]. Es ist aber dennoch angesichts des beträchtlichen, fahrzeugseitigen Mehraufwandes nicht wahrscheinlich, dass dieser Energieträger im Verkehrssektor eine wesentliche Rolle spielen wird.

Wasserstoff

Vom Standpunkt der Vermeidung lokaler Emissionen ist die Verwendung von Wasserstoff in Ottomotoren nahezu optimal. Bei geeigneter Prozessführung entstehen nur minimale Mengen an Stickstoffoxiden, das einzige Oxidationsprodukt ist Wasser, wenn man von sehr geringen Mengen NO_x und Kohlenwasserstoffen aus der Verbrennung von Schmieröl absehen kann.

Für die Gesamtbewertung ist auch hier die Erzeugung des Endenergieträgers entscheidend. Heute wird Wasserstoff nahezu ausschließlich durch Steamreforming von Erdgas erzeugt. Dabei wird der gesamte Kohlenstoffgehalt des Erdgases in Form von CO_2 freigesetzt. Eine sehr viel günstigere Perspektive bietet die Nutzung von Strom, der aus erneuerbaren – Wasserkraft, Sonnenenergie, Windenergie – oder nuklearen Primärenergien erzeugt wurde. Damit kann aus Wasser nahezu emissionsfrei Wasserstoff erzeugt werden. Allerdings sind die

Kosten ganz erheblich höher und konkurrierende Nutzungen des Stroms mögen bessere Renditen erlauben.

Mit der Entwicklung der technische Basis für die Nutzung von Wasserstoff für mobile Verbraucher wurde Mitte der 70er-Jahre begonnen. Die Wasserstoffspeichertechnik ist der Erdgastechnik sehr ähnlich, allerdings ist die volumetrische Energiedichte niedriger. Druckgassysteme bei 200 und 250 bar werden schon sehr lange verwendet [16, 17]. Sie eignen sich vor allem für Nutzfahrzeuge mit begrenzten Reichweitenanforderungen. Auch 350 bar Systeme werden zunehmend eingesetzt und an der Realisierung von Hochdrucksystemen bis 700 bar wird gearbeitet.

Seit den frühen 80er-Jahren wird die chemische Wasserstoffspeicherung in Metallhydriden umfassend untersucht [18, 24]; es wurden ähnliche Speicherdichten wie bei der 200 bar Druckwasserstoffspeicherung erreicht.

Die Speicherung des Wasserstoffs in flüssiger, tiefkalter (-253 °C) Form weist mit Abstand die höchste Energiedichte auf. Die Technik wurde zunächst für die Raumfahrt entwickelt und dann für Automobilanwendungen weiterentwickelt [19, 20]. Der Bereitstellungswirkungsgrad von maximal 70 % ist ungünstiger als bei der Druckgastechnik.

Der langfristige Erfolg von Wasserstoff als Energieträger wird im Wesentlichen davon abhängen

- wie effizient Wasserstoff hergestellt werden kann,
- in welchem Maße eine Nutzungskonkurrenz anderer Verbraucher auftritt,
- ob Sicherheit und Gebrauchseigenschaften auf ein Niveau gebracht werden können, dass für eine umfassende Akzeptanz durch der Gesellschaft erforderlich ist.

Bewertung der Optionen

Angesichts der Endlichkeit der fossilen Ressourcen und der sich verdichtenden Indizien zum Treibhauseffekt, vor allem aber wegen der Verletzbarkeit der Energieversorgung durch politische Eingriffe und die dadurch bedingten, sehr hohen Preise (nicht Kosten!) werden erhebliche Veränderungen am Weltenergiesystem erforderlich werden. In den nächsten Dekaden wird voraussichtlich der Verbrauch der fossilen Energieressourcen einen Maximalwert erreichen. In den entwickelten Ländern wird die wirtschaftliche Entwicklung noch stärker als bisher vom Energieverbrauch entkoppelt. Ein Großteil der weltweit dennoch zusätzlich benötigten Energie wird durch erneuerbare und nukleare Energien abgedeckt werden. Neue großtechnische Nutzungsmöglichkeiten für nichtfossile Primärenergieformen sind in Vorbereitung. Wichtige Rollen werden dabei je nach den Bedingungen am Einsatzort die Erzeugung von Solarstrom, Windenergie, Geothermie, Biomasse und – auch entlegene – Wasserkraft spielen. In vielen Ländern wird außerdem die Kernenergie eine wichtige Rolle spielen. Es bleibt abzuwarten, ob sich vor diesem Hintergrund eine Verschiebung der Energieversorgung des Straßenverkehrs hin alternativen Energieträgern – Wasserstoff, nicht-fossile Kohlenwasserstoffe oder ganz andere Stoffe – ergeben wird oder ob der

Verkehrssektor weiterhin überwiegend auf – möglicherweise in stationären Anwendungen frei gesetzten – fossile Kraftstoffen beruhen wird.

Glossar

bbl: Barrel, 1 bbl = 159 l

CH₂: Unter Druck gespeicherter Wasserstoff

CNG: Compressed Natural Gas

DME: Di-Methyl-Ether

GtL: Gas-to-Liquid

HTR: Hochtemperaturreaktor

LH₂: In flüssiger Form gespeicherter Wasserstoff

LNG: Liquid Petroleum Gas

NO_x: Stickstoffoxide

PEM: Polymer Elektrolyt Membran

RME: Rapsöl-Methyl-Ester

USD: US-Dollar

Literatur:

[1] Schindler, V.: Kraftstoffe für morgen, eine Analyse von Zusammenhängen und Handlungsoptionen, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1997

[2] Steiger, W.; Warnecke, W.: Potential of Interactions between Fuels and Future Powertrains. Tagung Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden, 24.-25. Okt. 2002, VDI Berichte 1704.

[3] Steiger, W.; Heinrich, H.: Synthetische Kraftstoffe: Strategie für die Zukunft. VDA, Technischer Kongress, Wolfsburg, Germany, 2.-3. April 2003.

[4] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): „Emissions Scenarios. Summary for Policymakers.“ A Special Report of IPCC, Working Group III. Cambridge, 2000.

[5] Bericht der Enquete-Kommission des 14. Deutschen Bundestages „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“, Berlin 2002

- [6] GM: Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems – A European Study, L-B-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn, Germany, Sept. 27, 2002
- [7] Kassem, N.: Techno-Economic Evaluation of Novel Hydrogen Production Systems Subject to Uncertainties, World Automotive Congress, FISITA 2002, , Helsinki, Finland, June 2-7 2002,
- [8] Fabri, J.; Heinrich, H.; Heinen, J.; Heuer, W.; Huss, C.; Krumm, H.; Nierhauve, B.; Schaller, K. V.; Wolf, J.: TES - An Initiative for Tomorrow's Fuel. In: On Energies of Change - The Hydrogen Solution (Editor: Carl-Jochen Winter), Gerling Akademie Verlag, Aug. 2000
- [9] Menrad, H.: Äthanol als Kraftstoff für Ottomotoren, ATZ 81 (1979) 6
- [10] Macedo, I.: Commercial Perspectives of Bioalcohol in Brazil; Proceedings of 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry; p. 35, Sevilla, Spain, 5-9 June 2000
- [11] Commission of the European Communities, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the Economic and Social Committee and the Committee of Regions on alternative fuels for road transportation and on a set of measures to promote the use of biofuels, COM(2001) 547, Brussels, 7.11.2001
- [12] Ingamells, J. C.; Lindquist, R. H.: Methanol as a Motor Fuel or a Gasoline Blending Component, SAE 750123, 1975
- [13] World Energy Council: Survey of Energy Resources 18th edition, London, 1998
- [14] Wackertrapp, H.; Wember, G.: Erdgasfahrzeuge – ein neues Geschäftsfeld für die Gaswirtschaft, gwf – gas/Erdgas, 142 (2001), Nr. 7, S. 498-504
- [15] Mauch, W.; Fröchtenicht, R.: Energieaufwand und Kosten für die Bereitstellung von Erdgas als CNG und LNG, ETG-Fachbericht 65, VDE-Verlag, Berlin Offenbach, 1997
- [16] Stockhausen, W.; Natkin, R.; Kabat, D.; Reams, L.; Xiaoguo, T.; Siamak, H.; Szabowski, S.; Zanardelli, V.: Ford P2000 Hydrogen Engine Design and Vehicle Development Program, SAE World Congress Detroit, 4-7 March 2002
- [17] Akiba, E.: Hydrogen-absorbing alloys, Current Opinion in Solid State and Materials, Science, 4, 267-272, 1999
- [18] Förster, H. J.: Alternative Antriebskonzepte Elektro-, Hybrid- und Wasserstoffantrieb, VDI-Berichte Nr. 817, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990
- [19] Braess, H.-H.; Strobl, W.: Hydrogen as a Fuel for Road Transport of the Future: Possibilities and Prerequisites. In: Hydrogen Energy Progress XI, Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference, Stuttgart, 23. – 28. 6. 1996
- [20] Pehr, K.; Burekhardt, S.; Koppi, J.; Korn, T.; Partsch, P.: Mit Wasserstoff in die Zukunft – der BMW 750hL. ATZ 104, (2002) Nr. 2, pp. 120-131

Entwicklung der weltweiten Ölreserven

Karl-Heinz Schult-Bornemann

ExxonMobil Central Europe Holding GmbH, Hamburg

I. Aktuelle Entwicklung im Jahre 2005

Der gesamte Ölsektor hat in seinen wichtigsten Kennzahlen zugelegt.

Die Reserven sind um mehr als 2 Milliarden Tonnen gestiegen, ein Zuwachs von 1,2 Prozent. Es handelt sich hierbei nur um die sicher bestätigten Reserven, das sind solche, die bereits durch Bohrungen bestätigt und mit heutiger Technik wirtschaftlich förderbar sind. Diese sehr einschränkenden Kriterien führen dazu, dass nur ein geringer Teil der tatsächlich vorhandenen Vorkommen mit dieser Zahl erfasst wird. Die aktuelle Zahl ist das Ergebnis unterschiedlicher Entwicklungen in der Welt. In Amerika und in Europa gingen die Reserven zurück, ebenso wie in Süd- und Ostasien. Diese Rückgänge wurden aber von dem Anstieg in den übrigen Gebieten überkompensiert. Der mit Abstand größte Teil der neuen Reserven wurde im Nahen Osten ermittelt, womit dort mehr als 100 Milliarden Tonnen an Reserven festgestellt sind. Iran und Saudi-Arabien verfügen zusammen über rund 1,5 Milliarden Tonnen an sicher bestätigten Reserven. In Afrika erhöhte sich die Reservenzahl um 250 Millionen Tonnen, wobei Westafrika mit seinen Offshore-Gebieten besonders hervorzuheben ist. (Chart 1)

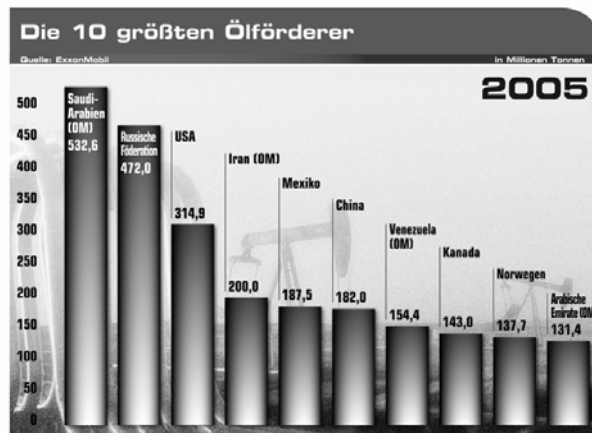
Erdöl

	2004	2005	+/- %
Reserven	173,3 Mrd. t	175,4 Mrd. t	+ 1,2 %
Weltförderung	3.869 Mill. t	3.921 Mill. t	+ 1,3 %
Raffineriekapazität	4.121 Mill. t	4.252 Mill. t	+ 3,2 %
Verbrauch	3.793 Mill. t	3.838 Mill. t	+ 1,2 %

Weltförderung

Auch die Ölförderung in der Welt hat sich 2005 um mehr als 50 Millionen Tonnen auf 3.921 Millionen Tonnen erhöht. Dies ist angesichts der hohen Preise kein Wunder. Viele Förderkapazitäten wurden bis zur Kapazitätsgrenze ausgelastet. Auch diese Zahl ist das Ergebnis einer Saldierung: Die meisten OPEC-Mitglieder konnten ihre Förderung halten oder ausweiten, in einigen Ländern gab es jedoch auch Rückgänge.

(Chart 2)



Investitionen

Besonders nach dem Anstieg des Ölpreises auf 70 Dollar ist privaten Ölgesellschaften vorgeworfen worden, sie hätten nicht rechtzeitig genug in neue Förderkapazitäten investiert. Dies trifft nicht zu.

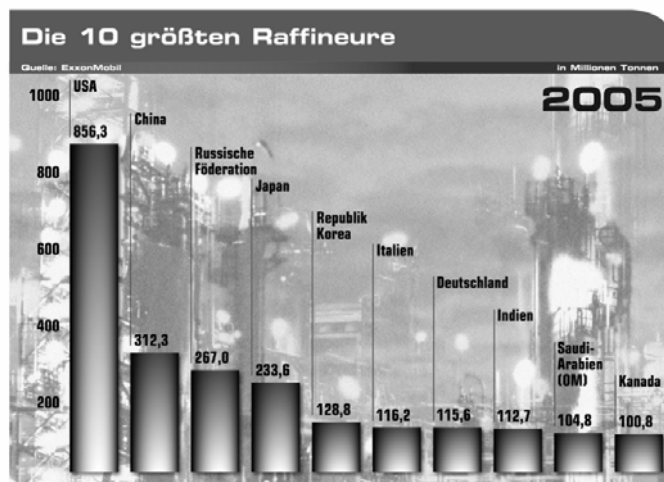
Zum Hintergrund: Die zehn größten privaten Ölgesellschaften der Welt vereinigen nur knapp 15 Prozent der Weltölförderung auf sich. Rund 85 Prozent der Förderung liegt daher in den Händen der Staatshandelsgesellschaften, die es nicht nur innerhalb der OPEC gibt. Jede Ausweitung der Investitionstätigkeit im staatlichen Sektor hat also eine ungleich größere Wirkung als die der privaten Ölgesellschaften. Diese haben bereits in den vergangenen Jahren erhebliche Mittel in die Exploration und Förderung gesteckt. Geld allein reicht aber nicht aus. Bei den heutigen komplizierten Explorations- und Fördermethoden bedarf es hochqualifizierter Spezialisten, um in den immer schwieriger werdenden Förderumfeldern (unwirtliche Gebiete, Tiefwasser) dieses Geld auch optimal einsetzen zu können. Diese Investitionstätigkeit setzt sich im Jahr 2006 auf einem noch höheren Niveau bei den privaten Ölgesellschaften fort - allein ExxonMobil wird im Jahr 2006 rund 20 Milliarden US-Dollar investieren - aber es sind weitere Anstrengungen in den nächsten Jahrzehnten erforderlich. Die notwendigen Investitionen in Exploration und Förderung werden durchschnittlich auf 200 Milliarden Dollar pro Jahr geschätzt, wenn der allgemein vorausgesagte Anstieg des Ölverbrauchs bis 2030 gedeckt werden soll. Hierzu müssen die staatlichen Ölgesellschaften natürlich ebenfalls ihren Teil beitragen.

Raffineriekapazität

Am kräftigsten, mit einem Zuwachs von 3,2 Prozent, hat sich die Raffineriekapazität weltweit entwickelt. Sie liegt jetzt mit 4.251 Millionen Tonnen um mehr als 400 Millionen Tonnen über dem Verbrauch des Jahres 2005. Von einer weltweiten Knappheit an Raffineriekapazität kann also keine Rede sein. Raffineriekapazität kann aber nur dort wirtschaftlich eingesetzt werden, wo sie einigermaßen verbrauchsnahe existiert. Das ist nicht überall der Fall. So ist

auch in diesem Jahr wieder Raffineriekapazität abgebaut worden, und zwar in den Ländern der GUS, wo Raffineriekapazitäten aus überwiegend militärischen Gründen errichtet worden waren, die in vielen Fällen nie ihre Nennkapazität ausgefahren haben.

Ganz anders sieht es dagegen in Nordamerika und Asien aus. Dort waren bereits in den vergangenen Jahren Engpässe erkennbar geworden. In den USA hatte dies u.a. seine Ursache in den erhöhten Anforderungen an die Produktqualitäten, die aus Umweltgründen gestellt worden waren. Sie waren mit der vorhandenen Raffineriekonfiguration nicht vollständig zu erfüllen. Als im Oktober des vergangenen Jahres die Hurrikane ein Drittel der Verlade- und Raffineriekapazitäten der USA zerstörten, wurde der Engpass verschärft mit der Folge, dass weltweit die Produktpreise sprunghaft anstiegen. Diese Entwicklungen erhöhten natürlich die Investitionen in neue Raffineriekapazitäten. Anders jedoch als in Asien, wo 76 Millionen Tonnen hinzukamen, die sich häufig auf neu gebaute Raffinerien gründeten, ist der Anstieg der Raffineriekapazität in den USA ausschließlich auf die Erweiterung vorhandener Raffinerien zurück-zuführen. Genehmigungen für Erweiterungen bereits bestehender Raffinerien sind wesentlich schneller zu erlangen als für Neubauten. Sie können daher schneller in Betrieb genommen werden. (Chart 3)

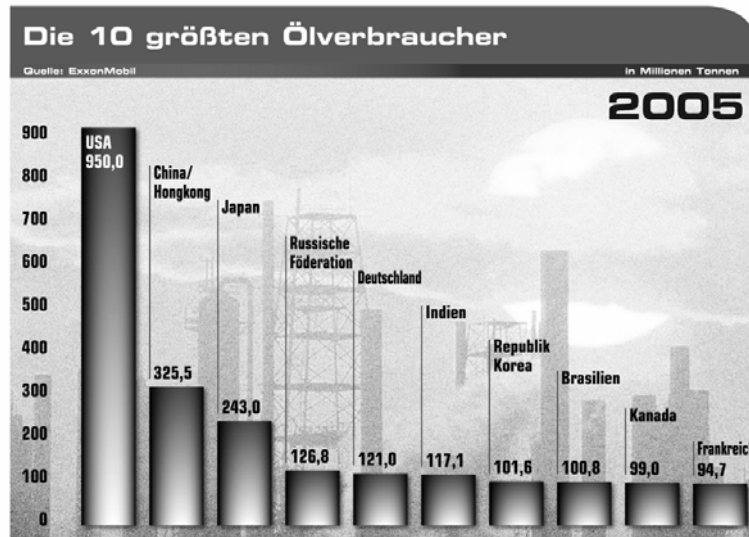


Verbrauch

Auch der Verbrauch hat sich erhöht, um 1,2 Prozent auf 3.838 Millionen Tonnen. Damit ist der Anstieg des Verbrauchs zwar prozentual genauso groß wie der der Reserven, es handelt sich jedoch bei den Reserven um eine ganz andere Größenordnung. Da wir bei den Reserven über Milliarden Tonnen reden, ist der Anstieg der Reserven ungefähr 45-mal so groß wie der Anstieg des Verbrauchs.

Auch dieser Anstieg ist das Ergebnis unterschiedlicher Entwicklungen in der Welt: In Asien und den USA wurden jeweils 18 Millionen Tonnen mehr verbraucht, in Europa und in der

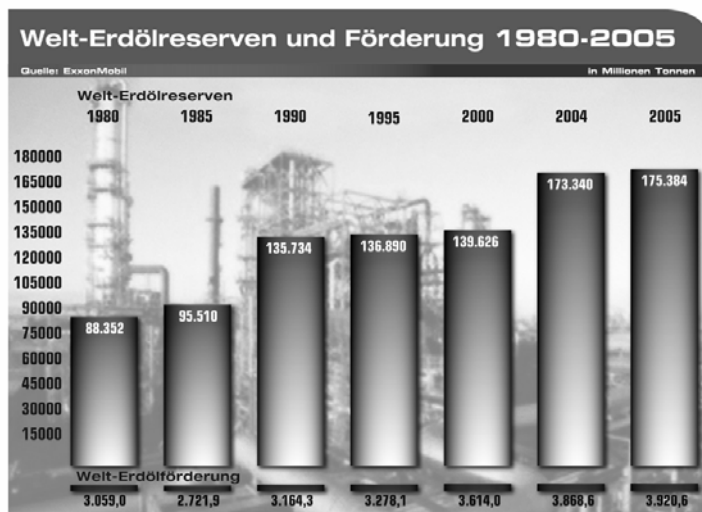
GUS sank er. Exemplarisch sei Deutschland erwähnt, wo er von 124 Millionen Tonnen auf 121 Millionen Tonnen zurückging. (Chart 4)



Welterdölreserven und Förderung

In den 25 Jahren von 1980 bis heute haben sich die sicher bestätigten Reserven mehr als verdoppelt. Die Erdölförderung hat sich im gleichen Zeitraum dagegen nur um ein knappes Drittel erhöht. Die Sprünge in der Reservenentwicklung sind im Wesentlichen durch technische Errungenschaften zu erklären.

In der Zeit von 1985 bis 1990 fanden zahlreiche Neubewertungen bereits bekannter Felder statt. Dies war möglich geworden auf Grund einer neuen Technik, für deren Entwicklung ExxonMobil mit dem Distinguished Award der US Geological Society ausgezeichnet worden ist: die 3-D-Seismik. Mit Hilfe dieser Technik ist es möglich geworden, den voraussichtlichen Inhalt von Öllagerstätten wesentlich genauer zu bestimmen als vorher. Der zweite Sprung zwischen 2000 und 2004 lag an der Einbeziehung der kanadischen Ölreserven aus Ölsänden im Jahre 2002. Kanada, bis dahin ein Reserven-Nobody, hatte über Jahre hinweg technisch stabil und wirtschaftlich erfolgreich die Gewinnung von Öl aus Ölsänden erreicht. Die durchschnittlichen Produktionskosten lagen durch erheblich gesteigerten technischen Fortschritt damals bei 12-18 Dollar pro Barrel. Angesichts der heutigen Preise ist klar, dass diese Ölvorkommen in der Zukunft eine ganz wichtige Rolle bei der Weltölversorgung spielen werden. (Chart 5)



II. Wie lange reicht das Öl noch?

Subventionen wegen Ressourcenerschöpfung?

Es gibt zahlreiche Subventionen zugunsten erneuerbarer Energien. Es werden Windräder, Solaranlagen, Biogasanlagen, Biomasse, Geothermie und vieles andere gefördert. Als Begründung für diese Subventionen wird vieles angeführt, unter anderem, dass die Ölreserven demnächst erschöpft seien. Gegen eine Förderung ist nichts einzuwenden, solange sie sich auf Unterstützung der Forschung bezieht oder lediglich eine Anschubfinanzierung für neue Energieformen darstellt. Was aber vermieden werden sollte, ist eine Dauersubventionierung. Mittel, die durch zwangsweise Umlenkung in irgendeine bevorzugte Energieart gehen, können nicht mehr dorthin fließen, wo sie im freien Wettbewerb gelandet wären. Diese Fehlleitung von Mitteln ist bei der Windenergie im Subventions-Weltmeisterland Deutschland mittlerweile erkannt worden, bei Solarenergie und Zwangsbeimischungen von Biokraftstoffen noch nicht.

Öl und Gas reichlich vorhanden

Reservenerschöpfung droht weder bei Öl noch bei Gas und ist kein Grund für die Förderung anderer Energien. Es mag andere gute Gründe geben, diese Energiearten zu unterstützen. Die Furcht vor der baldigen Erschöpfung ist jedoch kein Grund, weil beide Energieträger noch reichlich vorhanden sind.

'Ölreichweite'

Woher kommt die weit verbreitete Annahme, in 45 Jahren sei kein Öl mehr vorhanden? Ausschlaggebend für dieses Mißverständnis ist ein Wort. Es ist das Wort 'Ölreichweite', die meistens in Jahren angegeben wird und in den letzten zehn Jahren immer um den Wert 40 Jahre geschwankt hat. Wenn man das Wort hört, denkt man gleich an Tankreichweite, bei dem man ein festes Tankvolumen durch den Verbrauch seines Autos teilen kann und weiß, wie weit man mit einer Tankfüllung kommt. Eine solche Übertragung der Vorstellung des Autotanks auf die Öl- oder Gasreserven ist jedoch falsch. Es handelt sich bei der Ölreichweite um eine ganz spezielle Stichtagsbetrachtung, der eine statische und keine dynamische Betrachtung zugrundeliegt. Eine dynamische Betrachtung wäre aber viel realistischer.

Bei der Stichtagsbetrachtung werden am Ende eines Jahres die sicher bestätigten Reserven durch den Verbrauch eben dieses Jahres geteilt. Für das Jahr 2005 lautet die Rechnung also 175 Milliarden Tonnen geteilt durch die 3.838 Milliarden Tonnen des Verbrauchs im Jahr 2005. Daraus ergibt sich die Zahl 45,6. Schon zu sagen, dass es sich hierbei um 46 Jahre handelt, ist eigentlich falsch, denn man legt den Verbrauch des Jahres 2005 auch für die Zukunft fest. Betrachtet man jetzt die Entwicklung der Reserven und der sich daraus ergebenden sogenannten Ölreichweite in der Vergangenheit, so zeigt sich folgendes: Im Jahr 1940 betrugen die sicher bestätigten Reserven sechs Milliarden Tonnen und die sich aufgrund des damaligen Verbrauchs ergebende Reichweite 21 Jahre. Als diese 21 Jahre vorbei waren, nämlich im Jahr 1960, waren die sicher bestätigten Reserven auf das Fünffache, nämlich 41 Milliarden Tonnen, gestiegen, und die Reichweite hatte sich auf 38 Jahre verlängert, obwohl der jährliche Verbrauch erheblich zugenommen hatte. Als auch diese Zeit vorbei war, war trotz erheblicher Steigerung des Verbrauchs der Bestand an sicher bestätigten Reserven auf 175 Milliarden Tonnen gestiegen, entsprechend 46 Jahren des Verbrauchs im Jahre 2005.

Es wird überdeutlich, dass eine Gleichsetzung der "Ölreichweite" mit einer Tankreichweite offensichtlich falsch ist. (Chart 6)

Ressourcen

- Subventionen wegen Ressourcenerschöpfung?

$$\frac{\text{Sicher bestätigte Reserven}}{\text{Verbrauch 2005}} = \frac{175 \text{ Mrd. Tonnen}}{3.838 \text{ Mill. Tonnen}} = 45,6$$

	„Ölreichweite“	Reserven
1940	21 Jahre	6 Mrd. t
1960	38 Jahre	41 Mrd. t
2000	40 Jahre	140 Mrd. t
2005	46 Jahre	175 Mrd. t

- „Sicher bestätigte Reserven“
 - durch Bohrungen bestätigt
 - mit heutiger Technik förderbar
 - heute wirtschaftlich

SEC -Definition 1978

“Reserves that will be recoverable with 'reasonable certainty' given existing economic and operating conditions.”

Während der Divisor, der Jahresverbrauch, relativ einfach zu ermitteln ist, ist der Begriff "sicher bestätigte Reserven" erklärungsbedürftig.

Was sind "sicher bestätigte Reserven"?

Der Begriff wird für eine Reihe von Rohstoffen benutzt. Er gilt also nicht nur für Öl, sondern für Gas, Kohle und viele andere Rohstoffe gleichermaßen.

Zu den sicher bestätigten Reserven zählen nach dieser Definition, die der SEC entstammt - in verkürzter Form - nur die Mengen, die unter heutigen wirtschaftlichen und technischen Bedingungen mit "vernünftiger Sicherheit" gewonnen werden können "reasonable certainty".

Das heißt:

- a) durch Bohrungen bestätigt
- b) mit heutiger Technik förderbar
- c) bei heutigen Preisen wirtschaftlich gewinnbar.

Schon eine oberflächliche Betrachtung dieser sehr einschränkenden Definitionskriterien zeigt, dass man damit nur einen kleinen Teil der tatsächlich vorhandenen Reserven erfasst, die um ein Vielfaches größer sind als die sicher bestätigten Reserven.

Durch Bohrungen bestätigt

"Durch Bohrungen bestätigt" bedeutet, dass es nicht ausreicht, Daten über geologische Formationen im Untergrund, die gewöhnlich ölhöfzig sind, ermittelt zu haben. Diese Daten über Strukturen, die häufig mehrere Kilometer unter der Erdoberfläche liegen, werden heute durch die Auswertung von Satellitendaten ermittelt. Lieferten die Satelliten ursprünglich nur fotografische, später auch Infrarot-Aufnahmen, so sind heute Aufzeichnungen über den Erdmagnetismus und gravimetrische Messungen hinzugekommen, also solche, die sich mit dem Schwerfeld der Erde befassen. Aus diesen Daten, deren Auswertung erst durch den Fortschritt der Computertechnik möglich geworden ist, können Spezialisten in sehr langwieriger Arbeit Rückschlüsse auf die unter der Erdoberfläche liegenden geologischen Strukturen ziehen.

Ist diese Arbeit abgeschlossen, werden zu den vielversprechenden Gebieten Trupps geschickt, die vor Ort seismische Untersuchungen durchführen. Das bedeutet, dass mit Hilfe der Auswertung des Echos von Erschütterungen eine Feinstruktur des geologischen Zustandes in einem umrissenen Gebiet erstellt wird.

Die Gegenden, in denen nach Öl und Gas gesucht wird, werden immer unwirtlicher. Arktis, Wüstengegenden mit Temperaturschwankungen von 50°C pro Tag oder Bergdschungel

stellen extreme Anforderungen. Eine ganze Fülle von technischen Entwicklungen, von der Satelliten-Kommunikation und -navigation bis zu Spezialstahlsorten hat geholfen, die Kosten dennoch zu senken. Dieser Prozess geht laufend weiter.

Es ist ExxonMobil z. B. gelungen, das Verhältnis von trockenen zu fruchtigen Bohrungen in den letzten 15 Jahren von 10:1 auf 2:1 zu verbessern. Das bedeutet, dass die Kosten ganz erheblich gesunken sind, selbst wenn die einzelne Bohrung, zum Beispiel aus Umweltschutzgründen, wesentlich teurer geworden ist. Gleichzeitig sinkt damit natürlich auch die Zahl der Eingriffe in die Natur.

Die Spitze der Entwicklung bei den Suchmethoden ist zur Zeit eine neue, auf Elektromagnetismus basierende Vorgehensweise. Alle Methoden zur Auffindung von Öl und Gas hatten bisher den Nachteil, dass man zwar die geologischen Strukturen gut bestimmen konnte, doch die Unsicherheit blieb, ob man Kohlenwasserstoffe in flüssiger oder gasförmiger Form antreffen würde. Die Bohrung blieb die Nagelprobe. Bei der neuen Methode besteht die berechnete Hoffnung, mit Hilfe der Auswertung elektromagnetischer Signale genau diese Unsicherheit zu beseitigen. Nach einem sehr vielversprechenden Test offshore Angola wird jetzt ein weiteres großes Vorhaben vor der Küste von Kolumbien durchgeführt. Bislang funktioniert diese Methode nur bei Offshore-Feldern.

Man sieht also, dass der technische Fortschritt sowohl das Auffinden möglicher Ölfelder als auch die Trefferquote beträchtlich verbessert hat, bei gleichzeitiger Kostensenkung.

Mit heutiger Technik

Das Merkmal "mit heutiger Technik förderbar" bedeutet für den Reservenbegriff eine besonders starke Einschränkung. Was heute eine technische Spitzenleistung ist, steht in 30 Jahren im Museum. Die Geschwindigkeit der Entwicklung auf diesem Gebiet ist enorm. War man zum Beispiel zu Beginn der Förderung in der Nordsee außerordentlich stolz, eine Wassertiefe von 75 Metern zu erreichen, so hielt man später 200 Meter angesichts der Bedingungen in der Nordsee für das maximal Erreichbare. Heute ist nicht nur die 400 Meter tiefe Nordsee erschlossen, sondern es gibt jetzt bereits Bohrungen in 1.800 m Wassertiefe.

Bedenkt man, dass die Offshore-Förderung erst wenige Gebiete der Welt erschlossen hat und dass fünf Siebtel der Erde von Wasser bedeckt sind, so wird deutlich, welches ungeheure Potential hier noch schlummert. Die Tiefwassergebiete vor Westafrika und der brasilianischen Küste waren in den Lizenzbieterrunden heiß umkämpft. Es bestehen jetzt bereits konkrete Planungen für den Bau von Einrichtungen zum Erschließen von Vorkommen in 3.000 Meter Wassertiefe.

Eine weitere, sehr vielversprechende Technik ist die Horizontalbohrung. Während man früher nur senkrecht von oben nach unten in eine ölführende Schicht bohren konnte und den dort angetroffenen Horizont in einem gewissen Umkreis dieser Bohrung ausfordern konnte, ist es gelungen, Bohrungen untertage abzulenken, so dass sie genau innerhalb der öl- oder gasführenden Schichten bleiben. Damit konnte die Ausbeute der einzelnen Bohrung natürlich erheblich gesteigert werden. Hinzugekommen ist die Möglichkeit, das Gestein, in dem Öl

Söhlingen Z-14

Frac 7

Tiefe 4.736 m

1.600 m

200 m

Frac 1

Tiefe 4.605 m

Bohrlochlänge 6.502 m

Spaltbreite bis zu 10 mm

ca. 200 m

ca. 60 m



Zu heutigen Preisen wirtschaftlich

Alle bisher genannten Betrachtungen beziehen sich nur auf das sogenannte konventionelle Öl, das mit herkömmlichen Bohrungen und anderen Methoden gewonnen werden kann. Nicht einbezogen wurden die Ölvorräte in Ölschiefern und Schwerstöle. Man hat vor einigen

Jahrzehnten, als der Ölpreis zum Teil bei über 40 Dollar lag, zum Beispiel mit dem Abbau von Ölsänden begonnen. Damals lagen die Kosten für den Abbau von Ölsand bei ungefähr 36 Dollar pro Barrel. Sobald der Preis unter diese Marke fiel, wurde der Abbau mehr oder weniger eingestellt. In Kanada sind der Abbau und die Entwicklung der Methoden jedoch weitergegangen. Es ist gelungen, die Betriebskosten im Ölsandbereich auf 12 bis 18 Dollar pro Barrel zu senken. Nachdem nun in einer Reihe von Firmen über Jahre hinweg die Produktion stabil lief und durch technische Verbesserungen die Kosten erheblich gesenkt werden konnten, sind diese Vorräte im Jahr 2002 in die 'sicher bestätigten Reserven' aufgenommen worden. Der Effekt ist auf der Graphik der Reservenentwicklung deutlich zu sehen. (vgl. Chart 5)

Ölschiefer abzubauen, ist noch etwas teurer, wird aber auch schon gemacht.

Betrachtet man alle diese Einschränkungen, so fragt man sich natürlich, warum eine solche Definition ausgerechnet für die Zukunftsbetrachtung herangezogen wird. Es handelt sich um eine Definition der Banken. Die Banken in den USA gaben nur einen Kredit an Ölfördergesellschaften, wenn diese drei genannten Voraussetzungen erfüllt waren. Das war ein verhältnismäßig sicheres Geschäft. Denn wenn die Ölmengen bereits durch Bohrungen bestätigt sind, brauchte man nur noch die Zuflussrate mit dem aktuellen Ölpreis zu multiplizieren, um eine einigermaßen sichere Abschätzung für das zukünftige Geschäft zu machen. 1978 ist diese Definition von der amerikanischen Börsenaufsicht, der SEC, aufgenommen worden, um die Anleger zu schützen. Sie ist rein stichtagsbezogen, berücksichtigt keinerlei technischen Fortschritt und ist daher äußerst prognosefeindlich. Anders ausgedrückt, nur wenn wir wirklich von heute auf morgen sämtliche Bemühungen im Bereich der Exploration einstellen würden, 46 Jahre lang die Hände in den Schoß legen würden und nichts tun, dann in der Tat hätten wir nach 46 Jahren zunächst kein Öl mehr. Für eine Berechnung der Reichweite der Ölvorräte sind diese drei einschränkenden Kriterien irreführend.

Es werden andere Techniken der Energiegewinnung und der Energienutzung dazu führen, dass Öl auch noch dann vorhanden sein wird, wenn wir es gar nicht mehr brauchen. Hierzu gibt es ein großes Forschungsvorhaben, das seit 2004 von der Universität Stanford, Kalifornien, koordiniert wird. Es ist auf zehn Jahre angelegt und wird durch namhafte, weltweit tätige Unternehmen unterstützt. Bisher sind 275 Millionen Dollar von diesen Unternehmen (General Electrics, Schlumberger, Toyota und ExxonMobil) zugesagt. ExxonMobil steuert 100 Millionen Dollar bei. Das Ziel ist, den gesamten Bereich der Energiegewinnung, -verteilung und des -verbrauchs mit weniger Treibhausgasen zu gestalten. Die Unternehmen tragen nicht nur Geld bei, sondern auch ihre in der Praxis erworbene Expertise. Im Vordergrund steht die Verbesserung der Energieeffizienz. Das Projekt heißt Global Climate and Energy Project (www.stanford.edu/gcep).

So ist es eine sichere Voraussage, dass weder wir, noch unsere Enkel, noch deren Enkel das Ende des Öls erleben werden. Vielmehr wird das Ölzeitalter nicht aus Mangel an Öl zu Ende gehen, genauso wie die Steinzeit nicht aus Mangel an Steinen zu Ende ging. Es wird andere Formen der Energiebereitstellung geben.

Verbrennungsmotoren

Aufladung von Verbrennungsmotoren

Helmut Pucher

Technische Universität Berlin

Allgemeines

Definition und Ziele der Aufladung

Die Aufladung des Verbrennungsmotors stellt primär ein Verfahren zur Steigerung seiner Leistungsdichte dar. Die Bestimmungsgleichung für die effektive Motorleistung P_e

$$P_e = \frac{H_u}{L_{\min}} \cdot \frac{V_H}{a} \cdot \frac{1}{\lambda_V} \cdot \lambda_l \cdot n_M \cdot \rho_L \cdot \eta_e \quad (1)$$

mit $a = 2$ für Viertakt,

$a = 1$ für Zweitakt

V_H ...Hubvolumen

λ_v Verbrennungsluftverhältnis

λ_lLiefergrad

besagt, dass diese für einen bestimmten Motor (V_H , a) unter Verwendung eines bestimmten Kraftstoffs (H_u , $L_{\min}$) und eines bestimmten Brennverfahrens (λ_v) bei einer bestimmten Drehzahl n_M ($\rightarrow \lambda_l = \text{konst.}$), abgesehen vom effektiven Wirkungsgrad η_e , nur noch von der Dichte ρ_L der Luft vor Motoreinlass abhängt. Wird diese dem Motor mit einem höheren Wert als dem der Umgebungsluft angeboten, so liegt *Aufladung* vor.

Da nach der thermischen Gaszustandsgleichung

$$\rho_L = \frac{1}{R} \cdot \frac{p_L}{T_L} \quad (2)$$

die Dichte ρ_L vom Druck p_L und der Temperatur T_L bestimmt wird, und T_L im Normalfall nicht unter die Umgebungstemperatur abgesenkt werden kann, versteht sich die Aufladung in erster Linie als eine Anhebung des Drucks vor Einlass auf einen Wert oberhalb des Umgebungsdrucks, den *Ladedruck* p_L . Das dazu eingesetzte Aggregat wird als *Lader* bezeichnet. Die Arten der Aufladung sind in DIN 6262 festgelegt.

Vergleich von Abgasturboaufladung und mechanischer Aufladung

Da die *Abgasturboaufladung* und die *mechanische Aufladung* die größte praktische Bedeutung erlangt haben, soll deren unterschiedliche Arbeitsweise vergleichend dargestellt werden und zwar zunächst anhand des jeweiligen idealisierten thermodynamischen Prozesses des Viertaktmotors (**Bild 1**).

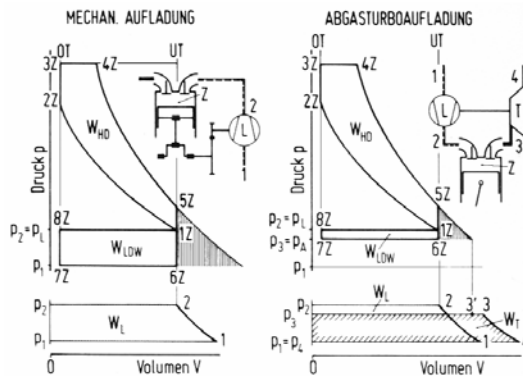


Bild 1: Die Aufladung bei idealisierter Prozessführung

Im Falle der mechanischen Aufladung liefert der vom Motor angetriebene Lader L den Zylindern Z Luft vom Druck $p_2 = p_L$, mit dem während des Saughubs der Zylinderdruck identisch ist, so dass der VerdichtungsHub bei einem gegenüber dem Saugmotor erhöhten Druck einsetzt (1Z). Nach Abschluss des Expansionshubs (5Z) öffnet das Auslassventil, und die Zylinderladung wird gegen den Umgebungsdruck (p_1) ausgeschoben. Dadurch ergibt sich eine, im Sinne einer vom Motor abgegebenen Arbeit, positive Ladungswechselarbeit W_{LDW} . Die vom Motor aufzubringende Laderarbeit W_L ist allerdings betragsmäßig größer als seine Ladungswechselarbeit. Die senkrecht schraffierte Fläche entspricht dem Arbeitsverlust, der dadurch entsteht, dass die Zylinderladung vom Zustand 5Z auf den Druck p_1 (nach Auslassventil) abgedrosselt und nicht auf diesen isentrop entspannt wird (*Verlust durch unvollkommene Dehnung*).

Im Falle der Abgasturboaufladung mögen der gleiche Ladedruck p_2 und die gleiche Hochdruckphase des Motorprozesses wie bei der mechanischen Aufladung vorliegen. Damit ist auch die gleich große Laderarbeit W_L aufzubringen und es liegt auch der gleiche Zylinderzustand bei Expansionsende (5Z) vor. Die Laderarbeit W_L wird nunmehr jedoch nicht von der Motor-Nutzarbeit abgezweigt, sondern von der (flächengleichen) Turbinenarbeit W_T abgedeckt, die aus der Abgasenergie entnommen wird. Da die Abgastemperatur T_3 vor Turbine höher ist als T_2 , liegt unter der Bedingung $W_T = W_L$ der Abgasdruck p_3 vor Turbine niedriger als p_2 , so dass sich auch hier eine positive Ladungswechselarbeit W_{LDW} einstellt. Darüber hinaus ist wegen des höheren Gegendrucks am Auslass der Arbeitsverlust infolge unvollkommener Dehnung der Zylinderladung (senkrecht schraffierte Fläche) geringer als im Falle der mechanischen Aufladung. Dass ein Teil dieses zylinderseitigen Arbeitsverlustes von der Abgasturbine sogar zurückgewonnen wird, kommt darin zum Ausdruck, dass T_3 größer ist als die Temperatur T_3' , welche sich bei isentroper Expansion der Zylinderladung auf den Abgasdruck p_3 einstellen würde.

Auch wenn Bild 1 nur idealisierten Zustandsänderungen entspricht, so deutet sich doch bereits an, dass bezüglich des Motorgesamtwirkungsgrads die Abgasturboaufladung wohl günstigere Voraussetzungen bietet als die mechanische Aufladung.

Zusammenwirken von Motor und Lader

Laderbauarten und ihre Kennfelder

Vom Wirkprinzip her lassen sich alle bekannten Laderbauarten in zwei Gruppen einteilen, nämlich in

- Verdrängerlader
- Strömungslader.

Entsprechend existieren auch zwei Grundformen des Laderkennfelds, worunter vornehmlich die Darstellung des Laderdruckverhältnisses $\pi_L = p_2/p_1$ über dem auf einen definierten Bezugszustand (p_1, T_1) bezogenen Fördervolumenstrom $\dot{V}_1$ verstanden wird, mit Isolinien für die Laderdrehzahl n_L (Laderkennlinie) und den isentropen Laderwirkungsgrad η_{sL} (Bild 2 und Bild 3).

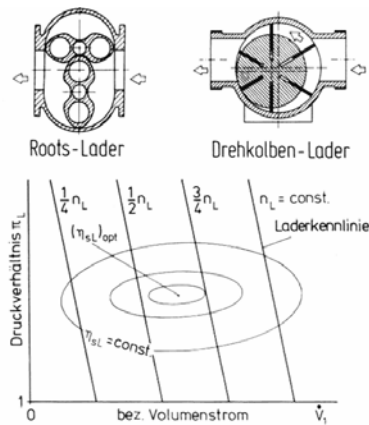


Bild 2: Kennfeld des Verdrängerladers (schematisch)

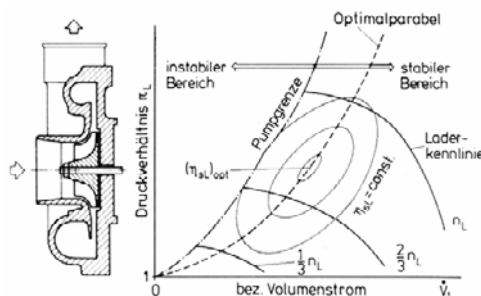


Bild 3: Kennfeld des Strömungsladers (schematisch)

Verdrängerlader

Zu den Verdrängerladern zählen insbesondere das *Rootsgebläse*, die verschiedenen *Dreh- und Kreiskolbenverdichter*, der *Spirallader* und auch der *Schraubenlader* (Bild 2).

Entsprechend dem Verdrängerprinzip verlaufen die Laderkennlinien ($n_L = \text{const.}$) relativ steil. Beim verlustfreien Lader würden sie sogar exakt senkrecht verlaufen, was bedeutet, dass der Durchsatz nur von der Drehzahl und nicht vom Druckverhältnis abhängt.

Im realen Verdrängerlader nehmen mit dem Druckverhältnis, je nach Bauart, die Spaltverluste oder die Verluste durch Rückexpansion des verdichteten Mediums im Schadraum zu und (bei $n_L = \text{konst.}$) der Fördervolumenstrom entsprechend ab. Daraus folgt:

- Das erreichbare Druckverhältnis ist unabhängig von der Drehzahl.
- Der Fördervolumenstrom $\dot{V}_1$ hängt praktisch nur von der Drehzahl ab.
- Das Kennfeld ist im gesamten Bereich stabil und dementsprechend für die Aufladung nutzbar.

Strömungslader

Weil der Radialverdichter, anders als der Axialverdichter, bereits in einstufiger Ausführung ein hohes Druckverhältnis liefern kann, kommt er für Aufladezwecke praktisch ausschließlich zum Einsatz. Bild 3 zeigt schematisch das zugehörige Kennfeld. Der Fördervolumenstrom $\dot{V}_1$ nimmt in etwa proportional, das Druckverhältnis π_L in etwa quadratisch mit der Laderdrehzahl n_L zu. Die Laderkennlinien erreichen mit abnehmendem Volumenstrom in der Nähe ihres jeweiligen Scheitels die Pumpgrenze, die das Laderkennfeld in einen stabilen (rechts) und einen instabilen (links) Kennfeldbereich teilt. Ein Lader ist immer so an den Motor anzupassen, dass der zu erwartende Betriebsbereich rechts der Pumpgrenze liegt. Das Pumpen äußert sich in einem Pulsieren von Druck und Fördervolumenstrom, wodurch, einmal abgesehen vom diskontinuierlichen Luftangebot an den Motor, Schaufelschwingungen des Laders angeregt werden, die zu seiner Beschädigung führen können.

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

- Das erreichbare Druckverhältnis ist drehzahlabhängig; bei kleinen Drehzahlen und damit kleinen Volumenströmen sind keine hohen Druckverhältnisse zu erreichen.
- Der Fördervolumenstrom hängt von der Drehzahl und dem Druckverhältnis ab.
- Der Kennfeldbereich links der Pumpgrenze ist ein instabiler Bereich.

Motorschlucklinie

Zur Veranschaulichung des Zusammenwirkens von Motor und Lader ist es zweckmäßig, den Motor als "Verbraucher" im Laderkennfeld darzustellen. Diese Verbrauchercharakteristik wird als Motorschlucklinie bezeichnet und verläuft für Viertakt- und Zweitaktmotor grundsätzlich unterschiedlich.

Viertaktmotor

Um die Darstellung übersichtlich zu halten, sei zunächst von einem Motor ohne Ventilüberschneidung (ohne Durchspülung) ausgegangen. Damit lässt sich der auf den Ansaugzustand (p_1, T_1) bezogene, vom Motor "geschluckte" Volumenstrom $\dot{V}_1$ darstellen als

$$\dot{V}_I = \frac{\dot{m}_L}{\rho_I} = V_H \cdot \lambda_I \cdot \frac{n_M}{2} \cdot \frac{\rho_L}{\rho_I} \quad (3)$$

Unter sinngemäßer Verwendung von Gl. (2) lässt sich Gl. (3) für einen bestimmten Motor ($V_H = \text{konst.}$) in die Form

$$\pi_L = \frac{p_L}{p_I} \approx \frac{T_L}{\lambda_I \cdot n_M} \cdot \dot{V}_I \quad (4)$$

bringen, die besagt, dass bei einer bestimmten Motordrehzahl n_M und damit auch gegebenem Liefergrad λ_I für eine bestimmte Ladelufttemperatur T_L Ladedruckverhältnis π_L und durchgesetzter Volumenstrom $\dot{V}_I$ direkt proportional sind, was in **Bild 4** einer Geraden durch den Ursprung entspricht. Für eine höhere Drehzahl ($n_{M2} > n_{M1}$) weist die entsprechende Gerade einen geringeren Anstieg auf. Praktischen Sinn besitzt diese Geradenschar allerdings nur für Druckverhältniswerte $\pi_L \geq 1$, wobei $\pi_L = 1,0$ dem Saugmotor entspricht.

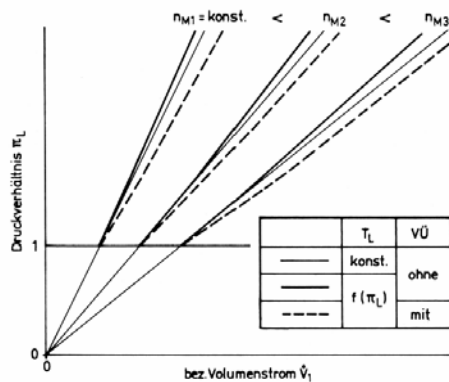


Bild 4: Motorschlucklinie des Viertaktmotors (schematisch)

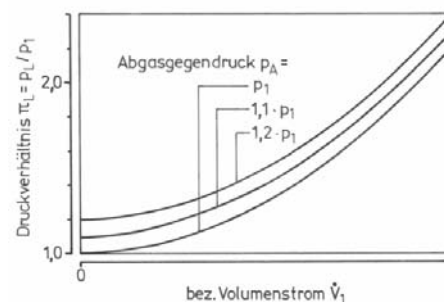


Bild 5: Motorschlucklinie des Zweitaktmotors bei unterschiedlichem Abgasgegendruck

Soll berücksichtigt werden, dass T_L mit π_L ansteigt, ergibt sich für $\pi_L \geq 1$ die dick gezeichnete Linienschar. Wird am betrachteten Motor zusätzlich eine Ventilüberschneidung (VÜ) realisiert, so nehmen die Schlucklinien die gestrichelt gezeichneten Verläufe an. Dabei ist in Bild 4 unterstellt, dass auf der Auslassseite der Druck p_I anliegt.

Zweitaktmotor

Der Ladungswechsel des Zweitaktzylinders erfordert zwingend ein Druckgefälle von der Einlass- zur Auslassseite. Ein- und Auslassöffnungen des Zweitaktzylinders wirken, unabhängig von der Motordrehzahl, wie zwei hintereinander geschaltete Drosseln, die sich zu einer Ersatzdrossel für den gesamten Motor zusammenfassen lassen, an der das Druckverhältnis p_I/p_A anliegt. Entsprechend nimmt die Schlucklinie in **Bild 5** die Form einer

Drosselkennlinie an, bei der das Druckverhältnis π_L in etwa quadratisch mit dem Durchsatz $\dot{V}_1$ zunimmt, mit dem Druck p_A nach Auslass als Parameter. Die Unabhängigkeit von der Motordrehzahl rührt daher, dass der Kolben während des Ladungswechsels nahezu "steht" (in UT-Nähe) und daher keine Ansaug- oder Ausschubwirkung ausübt.

Motorbetriebslinien

Jeder Motorbetriebspunkt eines aufgeladenen Motors erscheint im Laderkennfeld als der Schnittpunkt zwischen zugehöriger Motorschlucklinie und zugehöriger Laderkennlinie. Die Verbindung aller bei einer bestimmten Motorbetriebsart möglichen Schnittpunkte ergibt die Motorbetriebslinie.

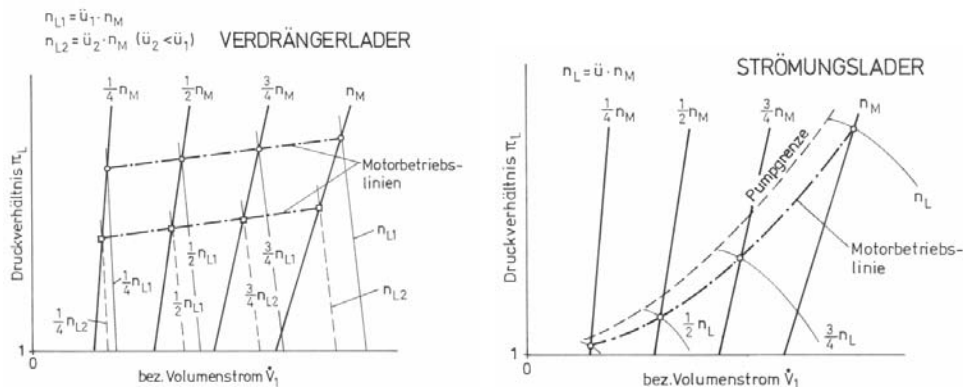


Bild 6: Mechanisch aufgeladener Viertaktmotor

Mechanische Aufladung

Bild 6 (links) zeigt die mechanische Aufladung eines Viertaktmotors mit einem Verdrängerlader. Für ein konstantes Übersetzungsverhältnis $\dot{u}$ zwischen Motordrehzahl n_M und Laderdrehzahl n_L stellt sich eine mit der Motordrehzahl leicht abfallende Motorbetriebslinie ein. Der Abfall ist allerdings so gering, dass auch im unteren Drehzahlbereich noch ein relativ hoher Ladedruck zur Verfügung steht, was beispielsweise einem PKW-Motor ein gutes Beschleunigungsverhalten ermöglicht. Über ein Vergrößern des Übersetzungsverhältnisses $\dot{u}$ kann das Ladedruckniveau insgesamt angehoben und im umgekehrten Falle abgesenkt werden.

Völlig anders verhält sich hingegen der Strömungslader bei mechanischer Aufladung – s. dazu **Bild 6**-rechts. Unterstellt man zunächst, dass das Übersetzungsverhältnis zwischen Lader und Motor so gewählt sei, dass bei Nenndrehzahl sich der gleiche Ladedruck wie mit dem Verdrängerlader einstellt, so nimmt mit abfallender Motordrehzahl der Ladedruck nun aber wesentlich stärker ab. Wenn dennoch heute Entwicklungsbemühungen unternommen werden, auch den Strömungslader zur mechanischen Aufladung einzusetzen – im

Wesentlichen wegen seiner hohen Wirkungsgrade – so ist dabei immer ein variables Übersetzungsverhältnis (*CVT-Getriebe*) wesentliches Konzeptmerkmal.

Abgasturboaufladung

Bei der Abgasturboaufladung wird die Laderdrehzahl nicht wie bei der mechanischen Aufladung direkt von der Motordrehzahl bestimmt, sondern vom momentanen Abgasenergieangebot (Abgasleistung) des Motors an den Abgasturbolader.

Bild 7-links steht für einen Auslegungsfall, bei dem für einen Viertakt Dieselmotor der Abgasturbolader so ausgewählt ist, dass im Nennleistungspunkt $P_e = 100\%$ der gewünschte Ladedruck erreicht wird.

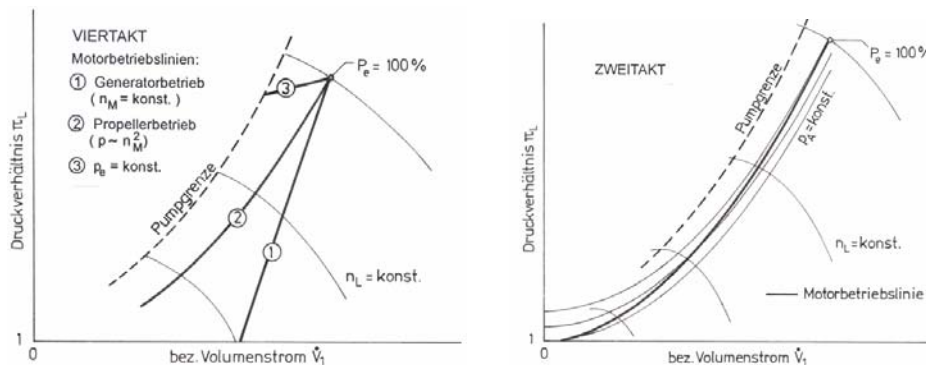


Bild 7: Motorbetriebslinien bei ATL-Aufladung im Laderkennfeld

Bei *Generatorbetrieb* ($n_M = \text{konst.}$) verschiebt sich mit abnehmender Motorleistung wegen der damit auch abnehmenden Abgasleistung der Betriebspunkt entlang der Motorschlucklinie nach unten. Dieser Ladedruckabfall ist, zumindest im stationären Betrieb, unproblematisch, weil für eine niedrigere Motorlast auch nur ein geringerer Ladedruck erforderlich ist.

Wird die Motorleistung unter der Bedingung $p_e = \text{konst.}$ (*Drehzahlrückung*) zurückgenommen, so muss auch dabei wegen der abnehmenden Abgasleistung ein Ladedruckabfall hingenommen werden, auch wenn für $p_e = \text{konst.}$ an sich ein gleichbleibender Ladedruck wünschenswert wäre. Zudem gelangt der Betriebspunkt relativ bald an die Pumpgrenze.

Im Falle des *Propellerbetriebs*, für einen Festpropeller gilt dabei der Zusammenhang $p_e \sim n_M^2$, liegt der bei abnehmender Motordrehzahl jeweils verfügbare Ladedruck, zumindest im Stationärbetrieb, normalerweise ausreichend hoch.

Beim abgasturboaufgeladenen Zweitakt Dieselmotor (**Bild 7**-rechts) ergibt sich für alle drei in Bild 7a berücksichtigten Betriebsweisen nur eine einzige Motorbetriebslinie, wobei mit zunehmendem Durchsatz ($\dot{V}_1$) der Abgasgegendruck p_A nach den Zylindern bzw. vor der ATL-Turbine ansteigt.

Abgasturboaufladung

Turboladerhauptgleichungen, Turboladerwirkungsgrad

Bei stationärem Betrieb besteht Leistungsgleichheit zwischen Lader und Turbine:

$$P_L = P_T \quad (5)$$

Dabei gilt für die Laderleistung

$$P_L = \dot{m}_L \cdot \Delta h_{sL} \cdot \frac{1}{\eta_{sL} \cdot \eta_{mL}} \quad (6)$$

mit der isentropen Enthalpiedifferenz des Laders

$$\Delta h_{sL} = c_{pL} \cdot T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa_L - 1}{\kappa_L}} - 1 \right] \quad (7)$$

und analog für die Turbinenleistung

$$P_T = \dot{m}_T \cdot \Delta h_{sT} \cdot \eta_{sT} \cdot \eta_{mL} \quad (8)$$

$$\Delta h_{sT} = c_{pT} \cdot T_3 \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\kappa_T - 1}{\kappa_T}} \right] \quad (9)$$

Damit lässt sich Gl. (5) schreiben in der Form

$$\begin{aligned} \dot{m}_L \cdot c_{pL} \cdot T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa_L - 1}{\kappa_L}} - 1 \right] = \\ \eta_{sL} \cdot \eta_{mL} \cdot \eta_{mT} \cdot \eta_{sT} \cdot \dot{m}_T \cdot c_{pT} \cdot T_3 \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\kappa_T - 1}{\kappa_T}} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

Da Turbine und Lader eine gemeinsame Welle besitzen, sind die zugehörigen mechanischen Verluste im mechanischen Wirkungsgrad η_{mTL} des Turboladers zusammenzufassen:

$$\eta_{mTL} = \eta_{mL} \cdot \eta_{mT} \quad (11)$$

In der Praxis werden die mechanischen Verluste des (gesamten) Turboladers dem isentropen Turbinenwirkungsgrad η_{sT} zugeschlagen, so dass dieser übergeht in den Turbinenwirkungsgrad η_T :

$$\eta_T = \eta_{sT} \cdot \eta_{mTL} \quad (12)$$

Die gesamte Wirkungsgrad-Produktkette in Gl. (10) wird als der Turboladerwirkungsgrad η_{TL} bezeichnet:

$$\eta_{TL} = \eta_{sL} \cdot \eta_T \quad (13)$$

Unter Verwendung von Gl.(13) lässt sich Gl. (10) umstellen in die I. Turboladerhauptgleichung

$$\pi_L = \frac{p_2}{p_1} = \left(1 + \frac{\dot{m}_T}{\dot{m}_L} \cdot \frac{c_{pT}}{c_{pL}} \cdot \frac{T_3}{T_1} \cdot \eta_{TL} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\kappa_T - 1}{\kappa_T}} \right] \right)^{\frac{\kappa_L}{\kappa_L - 1}} \quad (14)$$

Gl. (14) lässt sich zudem umformen in die Bestimmungsgleichung für den Turboladerwirkungsgrad:

$$\eta_{TL} = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_T} \cdot \frac{c_{pL}}{c_{pT}} \cdot \frac{T_1}{T_3} \cdot \frac{\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa_L - 1}{\kappa_L}} - 1}{1 - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\kappa_T - 1}{\kappa_T}}} \quad (15)$$

Sie stellt gleichzeitig auch die Bestimmungsgleichung für den sog. Aufladewirkungsgrad dar. Dieser ist allgemein auf Aufladesysteme mit Abgasenergienutzung anwendbar.

Das Aufladesystem wird dabei als eine "black box" betrachtet, der Abgas mit dem Zustand p_3 , T_3 zugeführt wird, das darin auf den Gegendruck p_4 entspannt wird, und die im Gegenzug Luft vom Ansaugzustand p_1 , T_1 auf den Ladedruck p_2 verdichtet. Diese "black box" kann außer für einen (einstufigen) Abgasturbolader auch für ein zweistufiges Turboladeraggregat einschließlich Zwischenkühler oder einen Druckwellenlader (COMPREX) stehen.

Aus der Bedingung, dass bei stationärem Betrieb der Abgasmassenstrom des Motors dem der Turbine zugeführten entspricht, folgt die II. Turboladerhauptgleichung:

$$\dot{m}_T = A_{Teff} \cdot \frac{p_3}{\sqrt{R \cdot T_3}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa_T}{\kappa_T - 1} \left[\left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{2}{\kappa_T}} - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\kappa_T + 1}{\kappa_T}} \right]} \quad (16)$$

Sie entspricht der Durchflussgleichung für eine Drosselstelle mit dem effektiven Querschnitt gleich dem effektiven Turbinenquerschnitt A_{Teff} , der außer von der Turbinengeometrie insbesondere vom Turbinendruckverhältnis p_3/p_4 abhängt. Je größer dieses wird, umso größer wird A_{Teff} .

Für Fahrzeugturbolader ist die Darstellung des Turbinenschluckvermögens als reduzierter Durchsatz

$$\dot{m}_{Tred} = \frac{\dot{m}_T \cdot \sqrt{T_3}}{p_3} = \frac{A_{Teff}}{\sqrt{R}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa_T}{\kappa_T - 1} \left[\left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{2}{\kappa_T}} - \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\kappa_T + 1}{\kappa_T}} \right]} \quad (17)$$

über dem Turbinendruckverhältnis üblich.

Einfluss der Abgasleitung

Bei der Abgasturboaufladung kommt der Abgasleitung eine ganz besondere Bedeutung zu. Sie soll so gestaltet sein, dass

- (1) die angeschlossenen Zylinder sich nicht gegenseitig beim Auslassvorgang behindern,
- (2) die Abgasenergie möglichst verlustarm vom Zylinder zur Turbine transportiert wird,
- (3) die Abgasenergie der Turbine in einem Zustand angeboten wird, der eine möglichst effiziente Umsetzung in Turbinenarbeit gewährleistet.

Es ist zwischen zwei wesentlichen Grundformen zu unterscheiden, der Stoßaufladung und der Stauaufladung. Die nachfolgenden Ausführungen sind insbesondere für Großdieselmotoren von großer Bedeutung.

Stoßaufladung

Die Stoßaufladung geht auf das Büchi-Patent von 1925 zum sog. Druckwellen-Verfahren zurück [1]. Danach sollen in Rohrleitungen mit einem Strömungsquerschnitt gleich dem Zylinderkopfaustrittsquerschnitt die Abgase von jeweils nur solchen Zylindern einer Zylinderreihe zu einem gemeinsamen Abgasleitungsteilstrang zusammengefasst und auf einen separaten Turbineneintritt geleitet werden, die im Zündabstand soweit auseinander liegen, dass sie sich nicht gegenseitig während des Ladungswechsels behindern. Der Zündabstand zweier aufeinanderfolgend ausschiebender Zylinder eines Teilstrangs sollte aber wiederum auch nicht so groß sein, dass der Abgasdruck im zugehörigen Abgasleitungsteilstrang zwischen zwei Auspuffstößen bis auf den Turbinengegendruck abfällt.

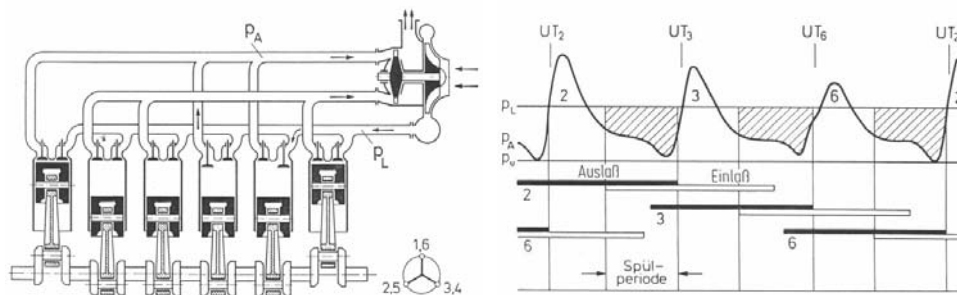


Bild 8: Abgasdruckverläufe und Abgasleitungsführung bei einem Sechszylindermotor mit Stoßaufladung nach [6]

Diese Forderungen werden am besten von der *Dreierstoß-Aufladung* erfüllt. Sie weist bei Viertakt einen Zündabstand von $3 \times 240^\circ$ KW auf, siehe **Bild 8**. Sie kann allerdings nur bei solchen Zylinderzahlen (je Zylinderreihe) realisiert werden, die ganzzahlig durch drei teilbar sind.

Für andere Zylinderzahlen, sofern sie ganzzahlig durch zwei teilbar sind, kommt die *Symmetrische Zweierstoß-Aufladung* in Betracht.

Für Motoren mit 5 oder 7 Zylindern je Zylinderreihe kann die Stoßaufladung nur durch eine Kombination aus zwei- bzw. dreifachem *Unsymmetrischen Zweierstoß* und jeweils einem *Einerstoß* realisiert werden.

Für Zylinderzahlen je Zylinderreihe, die ganzzahlig durch vier teilbar sind, kommt außer dem Symmetrischen Zweierstoß auch der Viererstoß als Stoßaufladungsvariante in Frage, wobei der Zündabstand dann $4 \times 180^\circ$ KW beträgt. Da demzufolge der Auspuffstoß des nachfolgend ausschubenden Zylinders bereits während der Spülphase des betrachteten Zylinders an dessen Auslassventil eintrifft, müsste allein aufgrund der bisherigen Ausführungen der Viererstoß als besonders nachteilig angesehen werden. Dieses Urteil hätte vor vielleicht 25 Jahren auch tatsächlich so gefällt werden müssen. Bei den heute hohen Turboladereffizienzen reicht für einen angestrebten Ladedruck bereits ein so niedriges Abgasdruckniveau aus, dass beim Viererstoß noch auftretende Abgasdruckpulsationen während der Ventilüberschneidungsphase nicht mehr den Ladedruck übersteigen und damit während der gesamten Spülphase ein positives Spülgefälle zur Verfügung steht. Wegen des kurzen Zündabstands und des relativ großen Turbineneintrittsquerschnitts je Abgasleitungsteilstrang weist der Abgasdruckverlauf bei Viererstoß-Aufladung nur noch relativ geringe Amplituden auf und liefert der Turbine ein zeitlich weitgehend gleichmäßigtes Abgasenergieangebot.

Stauaufladung

Bei Stauaufladung sind alle Zylinder einer Zylinderreihe abgasseitig mit relativ kurzen Verbindungsrohren an einem Sammelleitungsrohr angeschlossen, das entlang der Zylinderreihe geführt wird und an einem Ende mit der Turboladerturbine verbunden ist. Der Innenquerschnitt des Sammelleitungsrohres wird meist etwas größer als der Zylinderquerschnitt gewählt. Über dieses relativ große Abgasleitungsvolumen wird erreicht, dass trotz der intermittierenden Beaufschlagung durch die Zylinder ein weitgehend gleichmäßigter Abgasenergiestrom an der Turbine ansteht. Dementsprechend spielt bei einem stauaufgeladenen Motor die Zylinderzahl keine nennenswerte Rolle mehr, d.h. ein Fünfzylinder-Reihenmotor unterscheidet sich aufladetechnisch nicht mehr von einem Sechszylinder.

Aus thermodynamischer Sicht steht bei Stauaufladung dem Vorteil der weitgehend kontinuierlichen Beaufschlagung der Turbine der Nachteil gegenüber, dass beim Ausströmen aus dem Zylinder größere Drosselverluste als bei Stoßaufladung auftreten, weil der Abgasdruck in der Sammelleitung auf seinem zeitlich nahezu konstanten Niveau verbleibt, während bei Stoßaufladung aufgrund der engeren Abgasleitung nach Öffnen des

Auslassventils der vom Zylinder "verspürte" Abgasgegendruck schnell nahezu bis auf das momentane Zylinderdruckniveau ansteigt.

Nach [2] gilt für mittelschnelllaufende Dieselmotoren, dass ab $p_e \approx 18$ bar (bei Nennleistung) die Stauaufladung von Vorteil ist, was Ladedrücken von etwa 3,5 bar entspricht.

Bezüglich Teillast- und Beschleunigungsverhalten schneidet die Stoßaufladung grundsätzlich immer günstiger ab als die Stauaufladung. Bei niedriger Motorleistung und dementsprechend geringem Abgasenergieangebot der Motorzylinder arbeitet die Turbine nämlich in beiden Fällen mit einem sehr niedrigen Wirkungsgrad. Die Stoßaufladung liefert wegen der geringeren Drosselverluste am Zylinder jedoch etwas mehr nutzbare Abgasenergie an die Turbine.

Da bei Fahrzeugmotoren ein gutes Beschleunigungsverhalten besonders wichtig ist, sollten deren Abgasleitungen immer weitgehend nach den Forderungen der Stoßaufladung gestaltet werden.

Ladeluftkühlung

Bei der Verdichtung der Luft in einem Lader vom Zustand 1 auf den Druck p_2 steigt mit dem Druck auch die Temperatur, die am Laderaustritt (T_2) normalerweise höher liegt als die entsprechende Temperatur T_{2s} bei isentroper Verdichtung. Ist der isentrope Laderwirkungsgrad η_{sL} bekannt, der nach

$$\eta_{sL} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \quad \text{mit} \quad T_{2s} = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (18)$$

im Versuch zu bestimmen bzw. dem Laderkennfeld zu entnehmen ist, lässt sich die Temperatur T_2 berechnen:

$$T_2 = T_1 \left(1 + \frac{1}{\eta_{sL}} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \right) \quad (19)$$

Durch eine isobare Rückkühlung (bei $p_2 = \text{konst.}$), also durch *Ladeluftkühlung* in einem *Ladeluftkühler*, lässt sich der motortechnisch unerwünschte Temperaturanstieg im Lader teilweise zurücknehmen.

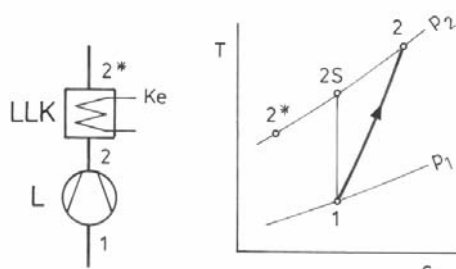


Bild 9: Temperaturerhöhung im Lader und Ladeluftkühlung

Die mögliche Temperaturabsenkung im Ladeluftkühler LLK (siehe **Bild 9**) wird außer vom Temperaturniveau des verfügbaren Kühlmediums (Kühlmitteleintrittstemperatur T_{Ke}) vom Ladeluftkühlerwirkungsgrad bestimmt:

$$\eta_{LLK} = \frac{T_2 - T_{2*}}{T_2 - T_{Ke}} \quad (20)$$

Abgesehen vom dafür zu treibenden gerätetechnischen Aufwand bringt die Ladeluftkühlung für Diesel- und Ottomotoren nur Vorteile, nämlich

- geringere thermische Belastung des Motors
- geringere mechanische Belastung des Motors, weil bei Ladeluftkühlung ein angestrebter Wert der Zylinderladungsdichte schon bei einem niedrigeren Ladedruck erreicht wird
- geringere NOx-Emission.

Bei Ottomotoren ist die Ladeluftkühlung zur Verringerung der Klopfneigung unverzichtbar.

Ladedruckregelung

Wie alle Strömungsmaschinen sind auch der Verdichter (Lader) und die Turbine des Abgasturboladers jeweils für einen bestimmten Betriebspunkt ausgelegt (Auslegungspunkt), bei dem sie unter jeweils optimalen Bedingungen arbeiten.

Die Anpassung des Turboladers an einen bestimmten Betriebspunkt des Motors ist dann erreicht, wenn mit dem in diesem Betriebspunkt vom Motor gelieferten Abgasenergiestrom vom Turbolader der gewünschte Ladedruck bereitgestellt wird, siehe Punkt A in Bild 10.

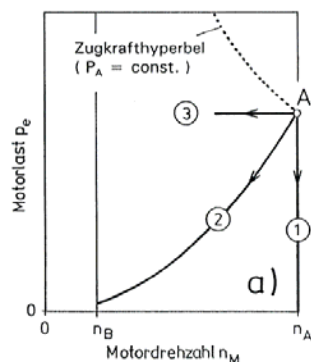


Bild 10a

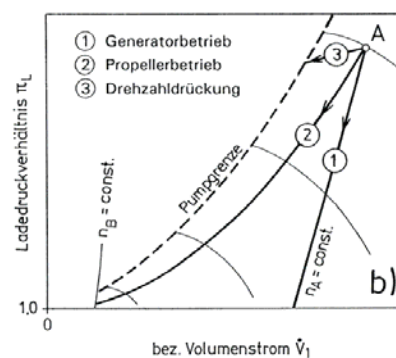


Bild 10b

Bild 10: Motorbetriebslinien in Motor- und Laderkennfeld bei abnehmender Motorleistung, Viertaktdieselmotor mit ungeregeltem ATL

Für die drei ausgezeichneten Betriebsarten – Generatorbetrieb, Propellerbetrieb und DrehzahlDrückung - sind die Betriebslinien im Motorkennfeld (Bild 10a) und (für einen Viertaktmotor) im Laderkennfeld (Bild 10b) eingetragen.

[illegible]

Für Motordrehzahlen zunehmend größer als diejenige beim maximalen Motordrehmoment ($n > n_2$) steigt ohne jeden Regeleingriff in den Turbolader der Volllast-Ladedruck immer weiter an. Wegen der grundsätzlich robusteren Bauweise von Nutzfahrzeugmotoren kann bei dieser Motorenkategorie dieser Volllast-Ladedruckanstieg akzeptiert werden und wird wegen der zur Nennzahl hin abfallenden Volllast-Momentenkurve zur Darstellung eines entsprechend großen Verbrennungsluftverhältnisses genutzt.

51

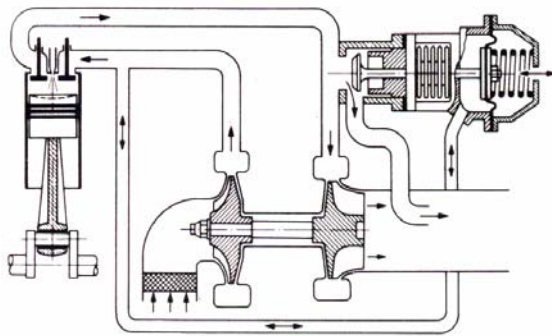


Bild 12: Ladedruckbegrenzung mit (ungeregeltem) Waste-Gate [6]

Geregeltes Waste-Gate

Ausgelöst durch die diesbezüglich besonderen Anforderungen des Ottomotors (Quantitätsregelung) findet sich heute in Otto- und Dieselmotoren überwiegend eine *elektronische Ladedruckregelung*. Dabei vergleicht ein Regler den Ladedruck-Istwert mit dem im Motor-Steuergerät abgelegten Betriebspunktabhängigen Sollwert und regelt diesen über eine entsprechende elektropneumatische oder elektrische Ansteuerung des Waste-Gates ein. Je kleiner der bei Teillast einzustellende Ladedruck gegenüber dem Volllast-Ladedruck ist, umso kleiner ist dabei auch der Abgasdruck vor Turbine, was sich nicht zuletzt in einem entsprechend geringeren Kraftstoffverbrauch des Motors niederschlägt.

Variable Turbinengeometrie

Eine Annäherung des Luftangebots des Turboladers an den Betriebspunktabhängigen Luftbedarf des Motors, die bei Verwendung eines unregelmäßigen Turboladers insbesondere mit abnehmender Motordrehzahl immer weiter auseinanderklaffen, kann auch über eine *Variable Turbinengeometrie* (VTG) erreicht werden. Dabei wird die Turboladerturbine in ihrem Querschnitt so (groß) gewählt, dass im Nennleistungspunkt des Motors der gewünschte Ladedruck erreicht wird. Mit abnehmender Motordrehzahl wird einem unerwünschten Ladedruckabfall über das Verengen des Zuströmquerschnitts zum Turbinenlaufrad, insbesondere durch verstellbare Leitschaufeln, entgegengewirkt. Dieses führt zu einem erhöhten Aufstauen des Abgases vor Turbine – höhere Werte für p_3 und T_3 in Gl. (14) – und in der Folge zu einem höheren Ladedruck. Es ist allerdings darauf zu achten, dass mit der Verringerung des Querschnitts des Turbinenleitapparats die Strömungsbedingungen im Laufrad nicht zu sehr verschlechtert werden, weil ansonsten über eine zu starke Abnahme von η_{TL} (s. Gl. 15) das erhöhte Abgasenergieangebot zu wenig zur Ladedrucksteigerung genutzt werden kann.

Downsizing

Von Downsizing spricht man bei Konzepten, eine gewünschte Motornennleistung über einen kleineren Motor (kleineres Gesamthubvolumen, eventuell zusätzlich kleinere Zylinderzahl) darzustellen, der dementsprechend hoch aufgeladen wird. Durch die geringere Reibung des kleineren Motors steigt dessen mechanischer und damit auch sein effektiver Wirkungsgrad.

Zudem ergibt sich ein geringeres Motorgewicht, was bei Fahrzeugmotoren besonders wichtig ist, weshalb vor allem für deren Entwicklung Downsizing zu einem wichtigen Konzeptionsmerkmal geworden ist.

Sonderformen der Abgasturboaufladung

Registeraufladung

Eine andere Lösung, den Turbolader-Turbinenquerschnitt an den momentanen (Ladedruck-)Bedarf des Motors anzupassen, bietet die Registeraufladung. Dazu ist ein Motor mit mehreren parallel geschalteten Turboladern ausgestattet, von denen jeder über luft- und abgasseitige Klappen zu- oder abgeschaltet werden kann, so dass dem Motor betriebspunktabhängig der jeweils "richtige" Turbinenquerschnitt zur Verfügung steht.

Zweistufige Aufladung

Unter zweistufiger Aufladung wird die Reihenschaltung zweier freilaufender

Abgasturbolader verstanden, wovon der eine als Niederdruck-, der andere als Hochdruck-Turbolader bezeichnet wird. Es ist zwischen den beiden Varianten

- Ungeregelte zweistufige Aufladung
- Geregelte zweistufige Aufladung

zu unterscheiden.

Ungeregelte zweistufige Aufladung.

Wesentlicher Beweggrund dafür ist das Erfordernis von Ladedruckverhältnissen bis zu sechs und darüber, wenn mittlere effektive Drücke im Bereich von $p_e = 30$ bar und größer darzustellen sind.

Schaltet man zwei Lader (Verdichter) hintereinander, von denen beispielsweise jeder ein Druckverhältnis von $\pi_L = 2,5$ bei einem isentropen Laderwirkungsgrad von $\eta_{sL} = 80\%$ aufbaut, so wird damit ein Gesamt-Ladedruckverhältnis von $\pi_{Lges} = 6,25$ mit einem isentropen Wirkungsgrad über beide Laderstufen von immerhin noch 77,5% erreicht. Ein Ladedruckverhältnis von 6,25 ließe sich zwar unter Umständen auch noch über eine einzige Radialverdichterstufe verwirklichen, jedoch nur mit einem deutlich niedrigeren Wirkungsgrad. Dieser Vorteil der zweistufigen Verdichtung wird noch verstärkt durch die Einbindung eines Zwischenkühlers. Dieser verringert die Temperatur der Luft vor Eintritt in den Hochdrucklader und damit gemäß Gl. (7) die für das gewünschte Druckverhältnis aufzubringende Verdichterleistung. Jeder der beiden genannten Effekte wirkt sich positiv auf den Aufladewirkungsgrad und damit auf den spezifischen Kraftstoffverbrauch des Motors aus.

Die positive Wirkung der Zwischenkühlung auf den Aufladewirkungsgrad und damit mittelbar auf den Motorgesamtwirkungsgrad wird umso kleiner, je mehr der momentane Ladedruck (bei Teilleistung) vom maximalen Ladedruck (bei Nennleistung) abweicht, weil es dann auch entsprechend weniger zu kühlen gibt.

Geregelte zweistufige Aufladung

Bei Nutzfahrzeug- wie bei Pkw-Dieselmotoren findet inzwischen die so genannte geregelte zweistufige Aufladung Anwendung, nicht unbedingt zum Zweck, einen besonders hohen Ladedruck darstellen zu können, sondern als Alternative zur Zwei-Turbolader-Registeraufladung.

Wesentlicher Unterschied zur unregelmäßig zweistufigen Aufladung ist je ein steuerbarer Bypass um die Hochdruckturbinen und den Hochdrucklader (s. **Bild 13**), bei der Pkw-Anwendung zusätzlich noch ein Waste-Gate an der ND-Turbine. Von Fahrzeugmotoren wird für ein hohes Beschleunigungsvermögen auch schon im unteren Motordrehzahlbereich ein möglichst hoher Ladedruck benötigt, was mit einfacher Abgasturboaufladung (ohne Ladedruckregelung) nicht zu realisieren ist, weil der Abgasmassenstrom des Motors entsprechend niedrig ist. In dieser Betriebsphase werden bei geregelter zweistufiger Aufladung beide Bypassventile geschlossen gehalten. Dies bewirkt, dass der gesamte Abgasmassenstrom bzw. der gesamte Abgasenergiestrom auf die (kleinere) HD-Turbine geleitet wird, welche ähnlich einer eng gestellten VTG-Turbine dadurch sehr schnell dreht, so dass im HD-Lader der gewünschte hohe Ladedruck erzeugt wird. Für die nachgeschaltete ND-Turbine bleibt in dieser Motorbetriebsphase nur noch ein kleiner Rest nutzbarer Abgasenergie. Sie dreht entsprechend langsam, so dass der ND-Lader, der zwar den gesamten Luftmassenstrom durchsetzt, auch nur ein sehr kleines Druckverhältnis aufbaut.

Wenn mit zunehmender Motordrehzahl und steigender Last der Abgasmassenstrom durch den Motor und der Abgasenergiestrom aus dem Motor anwachsen, werden die beiden Bypassventile immer weiter geöffnet, bis HD- und ND-Turbocharger in einer Art Mischform aus Reihen- und Parallelschaltung arbeiten. Motoren, welche mit solch einem Aufladesystem ausgerüstet sind, zeigen ein enorm gutes Ansprechverhalten [7].

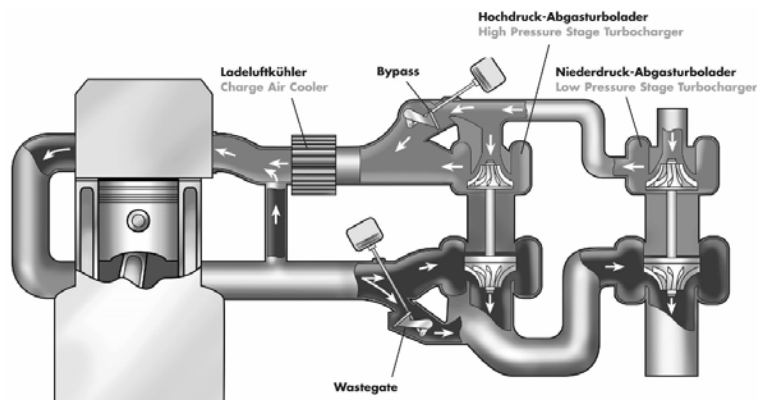


Bild 13: Schaltschema der Geregelten zweistufigen Aufladung (Quelle: BorgWarner Turbosystems)

Elektrischer oder mechanischer Zusatzlader

Zur Erhöhung des Ladedrucks im unteren Motordrehzahlbereich (*low end torque*), insbesondere zur Verbesserung des Beschleunigungsverhaltens, wird dem Turbolader-Verdichter ein Zusatzlader in Reihe vorgeschaltet. Dieser wird entweder elektrisch (*eBooster*) oder (von der Kurbelwelle aus) mechanisch [4] angetrieben. Der Zusatzlader wird, bei beiden Versionen, jeweils nur in diesen Motorbetriebsphasen zugeschaltet. Bei abgeschaltetem Zusatzlader wird der Ansaugluftstrom über einen Bypass um den Zusatzlader herumgeleitet. Der über eine Schaltkupplung zuschaltbare Zusatzlader gemäß Bild 14 wird durch einen Roots-Lader mit tordierten Rotoren dargestellt.

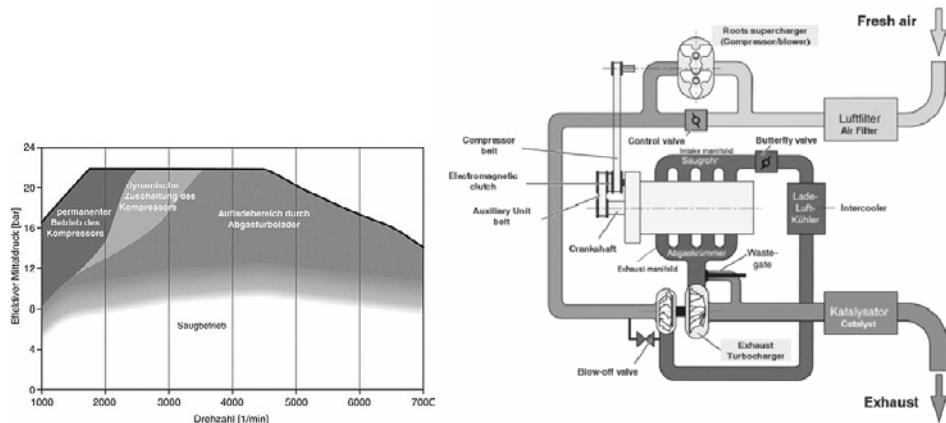


Bild 14: Volkswagen TSI (Twincharger), Ottomotor mit Roots-Vorschaltlader, $V_H = 1.4$ l, $P_e = 125$ kW, $M_{dmax} = 240$ Nm

Turbocompounding

Man spricht von Verbundverfahren oder Turbocompounding, wenn ein Verbrennungsmotor mit einer oder mehreren Abgasturbinen zusammenarbeitet und dabei nicht nur vom Motor, sondern auch von mindestens einer der Turbinen Nutzleistung abgenommen wird.

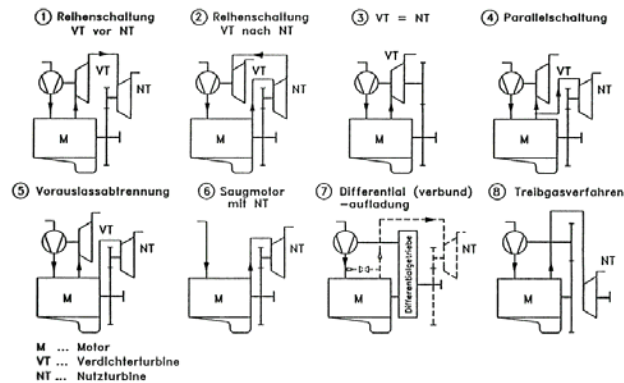


Bild 15: Schaltungsarten für Verbundbetrieb [5]

Von den in **Bild 15** dargestellten Schaltungsarten [5] haben inzwischen die Variante (4) für Großdieselmotoren und die Variante (1) für Nutzfahrzeugdieselmotoren praktische Bedeutung erlangt. In beiden Fällen bildet der abgasturboaufgeladene Motor die Ausgangsversion.

Literaturhinweise

- [1] DRP Nr. 56885
- [2] Zapf, H.; H. Pucher: Abgasenergie-Transport und Nutzung für Stoß- und Stau-Aufladung. HANSA Schifffahrt-Schiffbau-Hafen 114 (1977) 14, S. 1321-1326
- [3] Deutschmann, H.: Neue Verfahren für Dieselmotoren zur Mitteldrucksteigerung auf 30bar und zur optimalen Nutzung alternativer Kraftstoffe. Beitrag in H. Pucher u.a.: Aufladung von Verbrennungsmotoren. Sindelfingen: Expert-Verlag 1985
- [4] Middendorf, H.; Krebs, R.; Szengel, R.; Pott, E.; Fleiß, M.; Hagelstein, D.: Der weltweit erste doppeltaufgeladene Otto-Direkt-Einspritzmotor von Volkswagen. 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2005
- [5] Woschni, G.; F. Bergbauer: Verbesserung von Kraftstoffverbrauch und Betriebsverhalten von Verbrennungsmotoren durch Turbocompounding. MTZ 51 (1990), 3, S. 108-116
- [6] Zinner, K.: Aufladung von Verbrennungsmotoren. 3. Auflage, Springer-Verlag, 1985
- [7] Stütz, W.; Staub, P.; Mayr, K.; Neuhauser, W.: Neues 2-stufiges Aufladekonzept für PKW-Dieselmotoren. Tagungsband der 9. Aufladetechnischen Konferenz, S. 211-228, Dresden 2004

Hybrid- und Wasserstofffahrzeuge

Emissionsrichtlinien und Kraftstoffe weltweit

Carolin Funk

Technische Universität Berlin

Einleitung

Die Globalisierung sorgt auch im Kraftfahrzeugbereich dafür, dass ein weltweiter Handel an Fahrzeugen stattfindet. Neben den Anforderungen der Märkte sind die Gesetze und Richtlinien der verschiedenen Länder bei dem Fahrzeugexport zu beachten. Dabei müssen die Fahrzeuge nicht nur den Emissionsrichtlinien genügen, es muss auch beachtet werden, dass in den verschiedenen Ländern verschiedene Kraftstoffspezifikationen existieren. Der folgende Beitrag soll einen Überblick über die wichtigsten weltweit existierenden Emissionsrichtlinien geben und deren Unterschiede darstellen. Weiterhin werden die Abweichungen der Kraftstoffspezifikationen untereinander dargestellt. Zukünftig wird verstärkt nach Alternativen zu den herkömmlichen, fossilen Kraftstoffen gesucht. Sei es zur Senkung der Emissionen oder zur Steigerung des Wirkungsgrades von Verbrennungsmotoren, alternative Kraftstoffe werden zunehmend an Bedeutung gewinnen. Deshalb werden als Ausblick im vorliegenden Beitrag die Biokraftstoffproduktion und deren Förderrichtlinien in den verschiedenen europäischen Mitgliedsstaaten dargestellt.

Kraftstoffverbrauch

Im Folgenden wird der Kraftstoffverbrauch weltweit und für Europa dargestellt. Dabei werden nur die Verbräuche von Otto- und Dieselmotoren berücksichtigt. Andere Kraftstoffe wie Erdgas, Biodiesel und Ethanol werden auf Grund ihrer noch geringen Absatzmengen nicht dargestellt. Abbildung 1 zeigt den Kraftstoffverbrauch ausgewählter Nationen weltweit.

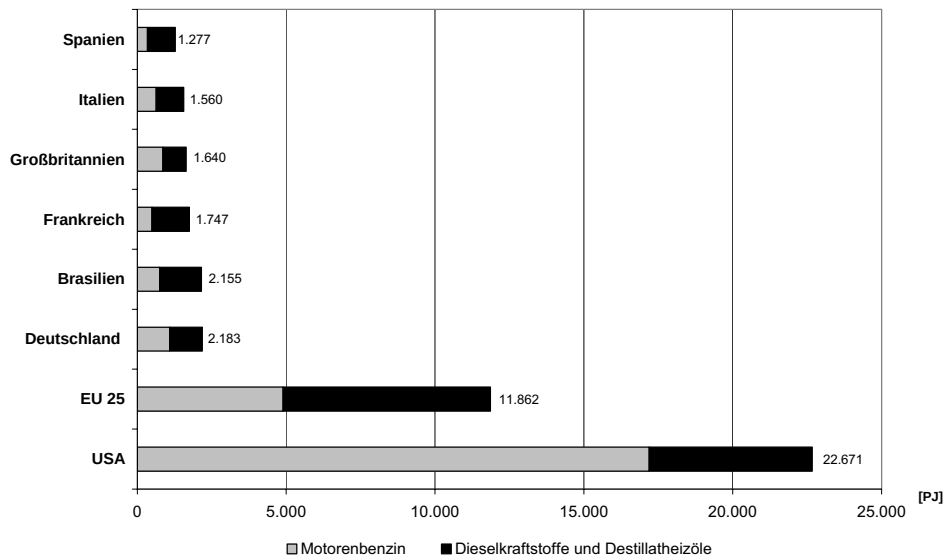


Abb.1: Kraftstoffverbrauch des Verkehrs weltweit 2004 in PJ [EUROSTAT, EIA]

Es lässt sich erkennen, dass die USA mit Abstand den größten Kraftstoffverbraucher darstellen. Betrachtet man den pro Kopf Verbrauch, so entspricht Wert der USA ca. dem dreifachen des Wertes der EU 25¹ [Eurostat].

Innerhalb der europäischen Mitgliedsstaaten liegt Luxemburg als Ausreißer im pro Kopf Verbrauch weit vorne. Danach folgen Irland, Österreich und Belgien (39,6/34,7/33,8 GJ/Kopf). Den geringsten pro Kopf Verbrauch der EU Mitgliedsstaaten weist Polen auf (9,9 GJ/Kopf), unter den Beitrittskandidaten ist es die Türkei (5,3 GJ/Kopf). In Abbildung 2 ist der Kraftstoffverbrauch des Straßenverkehrs der europäischen Mitgliedsstaaten und der Beitrittskandidaten dargestellt. Dabei verbrauchen unter den Mitgliedsstaaten die bevölkerungsstärksten Länder den größten Anteil an Kraftstoff. Bei den Beitrittskandidaten ist der Kraftstoffverbrauch deutlich geringer als bei Mitgliedsstaaten ähnlicher Einwohnerzahl.

¹ Für 2004: 77,2 GJ pro Kopf Verbrauch in den USA im Vergleich zu 25,8 GJ in den EU 25.

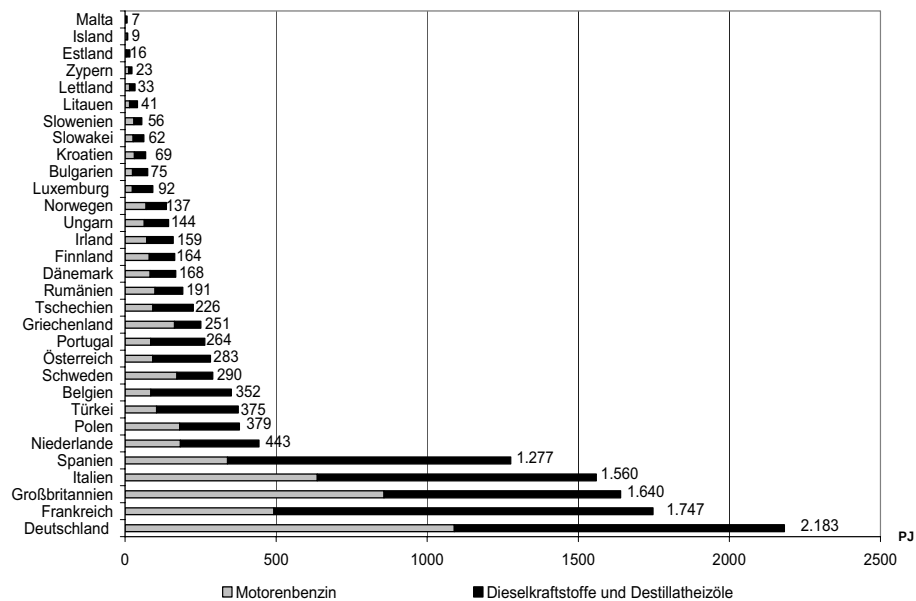


Abb. 2: Kraftstoffverbrauch in Europa 2004 in PJ [EUROSTAT]

Ein Blick auf Deutschland spiegelt die Verbrauchssteigerung in den letzten Jahrzehnten wider. Dabei ist deutlich der starke Anstieg des gesamten Verbrauchs, aber auch die Annäherung des Dieselsverbrauchs an den Benzinverbrauch erkennbar.

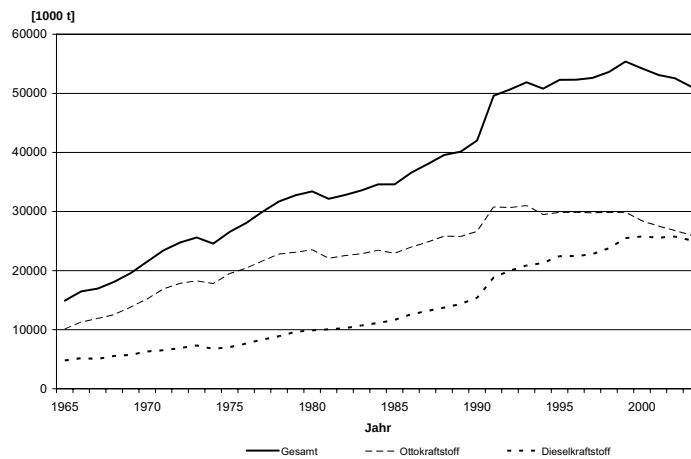


Abb. 3: Endenergieverbrauch des Straßenverkehrs in Deutschland in 1000 t [VERKEHR]

Emissionsrichtlinien

Im folgenden Abschnitt werden die Emissionsrichtlinien in der EU und den USA dargestellt. Die Emissionsrichtlinien vieler anderer Länder stützen sich auf die Testverfahren und Richtlinien dieser beiden Regionen. Für Brasilien, Japan und Süd Korea hingegen existieren eigene Richtlinien. Im Anschluss an die Darstellung der Richtlinien wird ein Vergleich der beiden Systeme vorgenommen.

Emissionsrichtlinien in Europa

Zur Bestimmung der Emissionen für die EU Staaten wird der Neue Europäische Fahrzyklus verwendet. Dieser Fahrzyklus besteht aus zwei Testphasen, von denen die erste die innerstädtische Fahrt und die zweite eine Überlandfahrt abbilden soll. Die maximale Geschwindigkeit beträgt 120 km/h. Mit Hilfe dieses Tests werden nicht nur die Emissionen sondern auch der Verbrauch von Kraftfahrzeugen gemessen. Die Entwicklung der europäischen Emissionsrichtlinien ist in Tabelle 1 dargestellt.

	Euro 1 1992			Euro 2 1996		
	Diesel DI	Diesel IDI	Benzin	Diesel DI	Diesel IDI	Benzin
CO	2,75	2,75	2,72	1	1	2,2
HC						
NO _x						
HC+ NO _x	1,36	0,97	0,97	0,9	0,7	0,5
PM	0,19	0,14	-	0,1	0,08	-
	Euro 3 2000		Euro 4 2005		Euro 5 (2008?)	
	Diesel	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	Benzin
CO	0,64	2,3	0,5	1	0,5	1
HC		0,2		0,1	-	0,075
NO _x	0,5	0,15	0,25	0,08	0,2	0,06
HC+ NO _x	0,56	0,35	0,3	0,18	0,25	-
PM	0,05	-	0,025	-	0,005	0,005

Alle Werte in g/km

Tab. 1: Entwicklung der Emissionsrichtlinien der EU [BOSCH]

In Abbildung 4 und 5 werden die in Tabelle 1 gezeigten Werte graphisch dargestellt. Dabei wird die starke Reduzierung der CO- und HC + NO_x-Emissionen in den letzten 15 Jahren deutlich. Bei Dieselfahrzeugen besteht vor allem das Problem der Partikel- und Stickstoffemissionen. Benzinfahrzeuge haben einen höheren Verbrauch und dadurch höhere CO₂-Emissionen, CO-Emissionen sind ein weiteres Problem bei Ottomotoren. Es ist wichtig zu beachten, dass alle Formen der Abgasnachbehandlung zu (wenn auch zum Teil geringem) Mehrverbrauch führen. Für Ottomotoren gilt weiterhin, dass durch die Verwendung des 3-

Wege-Katalysators eine Kraftstoffreduzierung durch Magerbetrieb auf Grund des vom Katalysator geforderten stöchiometrischen Luftgemisches nicht möglich ist.

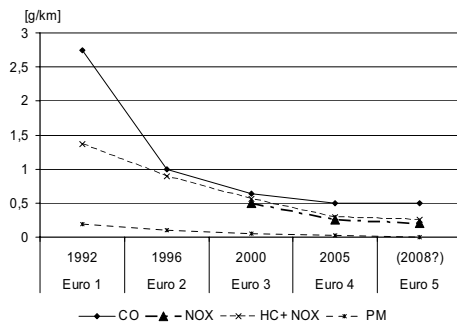


Abb. 4: Entwicklung der Dieselemissionsrichtlinien der EU [Eigene Darstellung]

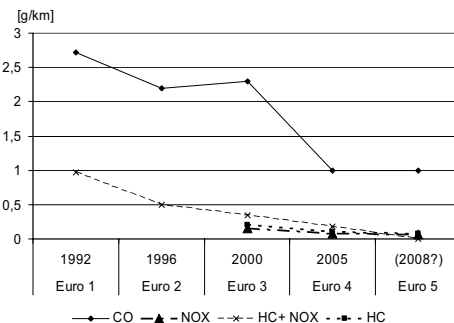


Abb. 5: Entwicklung der Benzinemissionsrichtlinien der EU [Eigene Darstellung]

Emissionsrichtlinien in den USA

Bundesstaatlich – EPA

In den USA werden die bundesstaatlichen „Tier 1“-Vorschriften (engl. für „Stufe 1“), die seit 1996 gültig sind, ab dem Modelljahr 2004 schrittweise von den strengeren Tier 2-Vorschriften abgelöst. In den neuen Vorschriften werden Elemente der kalifornischen LEV 2-Gesetze übernommen. Tabelle 2 stellt die Emissionsvorschriften der EPA dar. Die Fahrzeuge werden in den USA mit Hilfe der Federal Test Procedure 75 (FTP 75, auch City Cycle genannt) getestet. Bei diesem Test werden in einer Kaltstartphase, einer Übergangsphase und einer Heißstartphase mit maximal 92 km/h die Fahrzeugemissionen gemessen.

Kategorie	80.000 km	160.000 km
HC	0,25	-
NMHC	0,16	0,19
CO	2,1	2,6
NO _x Diesel	0,62	0,78
NO _x Gasoline	0,25	0,37
PM	0,05	0,05

Alle Werte in g/km

Tab. 2: EPA Tier 1 Emissionsstandards für PKW [EPA]

Kalifornien – CARB

Folgende Grenzwerte sind für die US Bundesstaaten Kalifornien, New York, Massachusetts, Maine, Connecticut, Vermont, Rhode Island, Pennsylvania, New Jersey, Oregon, und Washington gültig. Die Werte der „LEV 1-Richtlinie“ (Low Emission Vehicles) gelten bis zum Jahr 2007, ab 2004 wird bereits die „LEV 2-Richtlinie“ schrittweise eingeführt. Die LEV 1 und 2 Grenzwerte sind in Tabelle 3 dargestellt. Für die „NMOG“ (Non-methane organic gases) gelten zusätzliche Flotten-Grenzwerte, die sich jährlich verringern. Als Testzyklen werden in Kalifornien neben dem FTP-Test spezielle Langstrecken-, Hochgeschwindigkeits- und Klimaanlagenzyklen durchgeführt.

LEV 1					
	Kategorie	TLEV	LEV	ULEV	ZEV
NMOG	80.000 km	0,078	0,047	0,025	0
	160.000 km	0,097	0,056	0,034	0
CO	80.000 km	2,112	2,112	1,056	0
	160.000 km	2,609	2,609	1,304	0
NOX	80.000 km	0,248	0,124	0,124	0
	160.000 km	0,373	0,186	0,186	0
PM	80.000 km	-	-	-	0
	160.000 km	0,050	0,050	0,025	0
Formaldehyd e	80.000 km	0,009	0,009	0,005	0
	160.000 km	0,011	0,011	0,007	0
LEV 2					
	Kategorie	LEV	ULEV	SULEV	ZEV
NMOG	80.000 km	0,047	0,025	-	0
	192.000 km	0,056	0,034	0,006	0
CO	80.000 km	2,112	1,056	-	0
	192.000 km	2,609	1,304	0,621	0
NOX	80.000 km	0,031	0,031	-	0
	192.000 km	0,043	0,043	0,012	0
PM	80.000 km	-	-	-	0
	192.000 km	0,006	0,006	0,006	0
Formaldehyd e	80.000 km	0,009	0,005	-	0
	192.000 km	0,011	0,007	0,002	0

Alle Werte in g/km

Tab. 3: California LEV Emission Standards, Passenger Cars and LDVs < 8500 lbs [CARB]

Die verschiedenen Fahrzeugkategorien sind folgendermaßen definiert:

- Transitional Low Emission Vehicles (TLEV)
- Low Emission Vehicles (LEV)
- Ultra Low Emission Vehicles (ULEV)
- Super Ultra Low Emission Vehicles (SULEV)

- Zero Emission Vehicles (ZEV).

In Kalifornien wird weiterhin seit 2003 gefordert, dass 10 % der neu zugelassenen Fahrzeuge den Richtlinien für die ZEV entsprechen müssen, also keine Emissionen verursachen dürfen.

Vergleich

Ein Vergleich der Grenzwerte fällt auf Grund der unterschiedlichen Testverfahren und der in den USA bestehenden Flottenregelung schwer. Weiterhin gibt es in der EU keine Fahrzeugkategorisierung wie in den USA, wo nach Laufleistung unterschieden wird. Dagegen wird in den USA nur bei sehr speziellen Regelungen nach Diesel und Benzin unterschieden. In Kalifornien werden auch Langstreckentests über bis zu 120.000 Meilen durchgeführt.

In einem Vergleich von Euro 5 zu LEV 2 lässt sich insgesamt sagen, dass

- die CO-Emissionen bei Euro 5 unter denen für ULEVs liegen müssen,
- die Anforderungen an die NO_x-Emissionen bei LEV 2 deutlich unter denen von Euro 2 liegen (ca. die Hälfte für Benzinfahrzeuge),
- die PM-Emissionsanforderungen ungefähr gleich sind.

Kraftstoffspezifikationen

In den USA existieren verschiedene Kraftstoffspezifikationen, die je nach Bundesstaat unterschiedlich sein können. In Europa gilt die Richtlinie 98/70/EC, in der die DIN EN 228 Otto- und die DIN EN 590 für Dieselmotorkraftstoffe enthalten sind.

Vergleicht man die vorgeschriebenen Grenzwerte für Vergleichskraftstoffe in den beiden Regionen, so ergibt sich, dass sowohl die Cetan- als auch Oktanzahl in den USA geringer sein dürfen. Der Schwefelgehalt liegt in den USA deutlich über dem in der EU. Insgesamt liegen die Kraftstoffanforderungen in den USA unter den europäischen. Die Ausnahme bilden die Anforderungen in Kalifornien. Aber auch dort liegen die Anforderungen an Oktan- und Cetanzahl unter den europäischen Richtlinien. In den neuen Anforderungen an schwefelarme Kraftstoffe liegen die Grenzwerte zum Teil unter den Anforderungen der EU.

Ausblick: Biokraftstoffproduktion in der EU

Die Verschärfung von Emissionsrichtlinien ist eine Möglichkeit zur Senkung von Emissionen. Auch die Einführung von Biokraftstoffen kann dabei helfen, vor allem globale Emissionen zu verringern. Biokraftstoffe der zweiten Generation wie synthetische Biokraftstoffe und Wasserstoff bieten auch Potenziale zur Minderung der lokalen Emissionen. Durch geeignete Antriebssysteme wie die homogene Verbrennung kann der Wirkungsgrad optimiert und Ruß- und Stickoxidemissionen stark vermindert werden.

Nicht nur die Emissionsrichtlinien sind in den verschiedenen Regionen der Welt unterschiedlich, sondern auch die, nach denen Biokraftstoffe gefördert werden. Auch diese Richtlinien sind für die Automobilhersteller weltweit wichtig, um zu erkennen, in welchen Märkten welche Produkte erfolgreich sein können. Der folgende Ausblick zeigt einerseits, die europäischen Länder mit dem größten Verbrauch an Biokraftstoff, andererseits wird dargestellt, wie diese Länder ihren Absatz an Biokraftstoffen steigern.

Menge an produziertem Biodiesel und Bioethanol in Europa

In Abbildung 6 ist die Menge an Biotreibstoff dargestellt, die im Straßenverkehr verbraucht wird. Dabei werden nur die europäischen Länder mit dem größten Verbrauch dargestellt. Weltweit zählen vor allem Brasilien und die USA zu den größten Verbrauchern an Bioethanol. Deutschland ist weltweit führend in der Produktion von Biodiesel (oder Rapsmethylester). Frankreichs deckt seinen Bedarf an Biokraftstoff vor allem mit Ethanol.

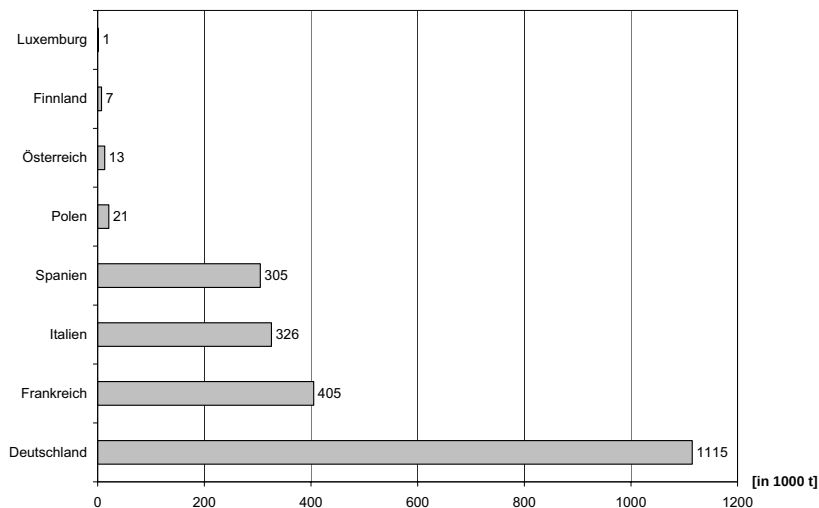


Abb. 6: Energetischer Endenergieverbrauch des Straßenverkehrs an Biotreibstoff in Europa [EUROSTAT]

Subventionen für Biokraftstoffe

Ziele für die Subvention von Biokraftstoffen sind vor allem:

- Steigerung der Sicherheit der Energieversorgung durch lokale Erzeugung,
- Reduktion von Emissionen,
- Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der Biokraftstofferzeugung,
- Förderung des Arbeitsmarktes.

Dabei existieren unter anderem folgende Arten der Subventionierung:

➤ Budgetierte Subventionen²

- Bargeldüberweisungen z.B. an Biomasse- oder Biokraftstoffproduzenten oder Verbraucher,
- Günstige Kredite z.B. für Anlagenbetreiber.

➤ Nicht budgetierte Subventionen

- Steuerbefreiungen oder –nachlässe, diese können sich sowohl auf die Kraftstoffsteuern, auf Kohlenstoffgehalt des Kraftstoffes als auch auf Kraftfahrzeugsteuern für z.B. Fahrzeuge mit besonders niedrigem Verbrauch oder besonders niedrigen Emissionen beziehen.
- bevorzugter Zugang zu Märkten oder Ressourcen, z.B. spezielle Einfahrgenehmigungen zu Innenstädten für Fahrzeuge mit besonders niedrigem Verbrauch oder Emissionen.
- regulierende Unterstützungsmechanismen, z. B. Anforderungen an Kraftstoffe und Fahrzeuge.
- CO₂-Emissionshandel.

Im folgenden Abschnitt werden die Subventionierungen der in den in Abb. angegebenen EU-Staaten dargestellt [EU, FNR].

Deutschland

Ab dem 1. August 2006 wird die bisher bestehende vollständige Steuerbefreiung für Biokraft- und Bioheizstoffe, die für aus Biomasse hergestellte Kraftstoffe galt, in Stufen bis 2012 verringert (vergleiche Tabelle 4). Dies besagt ein entsprechendes Energiesteuergesetz, das der Deutsche Bundestag am 28. Juni 2006 verabschiedet hat. Für Pflanzenöl setzt die Besteuerung ab 2008 ein.

Weiterhin wurde eine Beimischungspflicht für Benzin und Diesel beschlossen. Das heißt, dass den Kraftstoffen ein bestimmter Anteil an biogen erzeugtem Kraftstoff zugemischt werden muss. Dabei ist für Diesel ab 2007 eine Beimischungsquote von 4,4 Prozent und von 2,0 Prozent für Benzin (3 Prozent ab 2010) vorgesehen. Die Quote für Diesel und Benzin zusammen soll im Jahr 2009 mindestens 5,7 Prozent und im Jahr 2010 mindestens 6 Prozent betragen. [BUND] Die zur Erfüllung der Quotenregelung verkauften Biokraftstoffe sind voll zu versteuern.

² Mittelzuweisungen, die in der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung als öffentliche Ausgaben geführt werden.

bis 2007	9 cent/l
2008	15 cent/l
2009	21 cent/l
2010	27 cent/l
2011	33 cent/l
2012	45 cent/l

Tab. 4: Steuersätze für Biodiesel

Frankreich

Seit 2005 existiert in Frankreich ein so genanntes „Bonus-Malus“ System. Einer teilweisen Steuerentlastung für Biokraftstoffe steht dabei eine Strafsteuer für Unternehmen gegenüber, die nicht die Mindestmenge in Umlauf bringen. Die Hersteller von Biokraftstoffen müssen eine Zulassung erhalten, die nach einer Ausschreibung erteilt wird.

Die steuerliche Begünstigung beträgt 0,38 €/l für Ethanol in ETBE, 0,37 €/l für Ethanol und 0,33 €/l für Biodiesel. Die Strafsteuer liegt bei ca. 0,60€/l.

Italien

Die italienische Regierung begünstigt alle Kraftstoffe biogenen Ursprungs. Dabei ist Biodiesel vollständig steuerbefreit, für Bioethanol und ETBE gelten verringerte Steuersätze (ca. 50% der aktuellen Steuersätze). Weiterhin existiert eine Kontingentierung der Begünstigten Kraftstoffe auf 200.000t Biodiesel pro Jahr und maximal 12.911.000 € Steuermindereinnahmen für Bioethanol und ETBE wegen Mineralölsteuerausfall.

Spanien

In Spanien besteht eine vollständige Steuerbefreiung für Biokraftstoffe bis Ende 2012.

Polen

Der aktuelle Bericht zu Polens Biokraftstoffrichtlinie existiert zur Zeit nur auf polnisch. Im vergangenen Jahr gab es eine Steuervergünstigung für Biokraftstoffbeimischungen von 2 – 5 % in Höhe von 0,38 €/l³. Zwischen 5 und 10 % wurden 0,45 €/l und darüber 0,56 €/l erlassen. Weiterreichende Pläne waren nicht bekannt.

³ Bei einem Umrechnungskurs von 3,5 PLN pro 1 €.

Österreich

In Österreich existiert eine Steuerbefreiung für reine Biokraftstoffe und eine Steuerbegünstigung für Beimischungen von Biokraftstoff von mindestens 4,4 %.

Weiterhin besteht eine Substitutionsverpflichtung. Diese schreibt den Anteil der Biokraftstoffe am gesamten Energiegehalt des von Mineralölsteuerpflichtigen in Verkehr gebrachten Otto- und Diesekraftstoffe vor. Der Anteil beträgt ab dem 1. Oktober 2005 mindestens 2,5 %, ab 1. Oktober 2007 mindestens 4,3 % und ab 1. Oktober 2008 mindestens 5,75%.

Fazit

Aus den obigen Ausführungen wird deutlich, dass vor allem nicht budgetierte Subventionen genutzt werden, um Biokraftstoffen den Markteintritt zu erleichtern. Dabei ist die Reduzierung der Mineralölsteuer die am häufigsten angewendete Vergünstigung. Bisher nicht aufgeführt ist, dass EU weit umfangreiche Pilotprojekte gefördert werden. Eine einheitliche Förderung alternativer Kraftstoffe ist in der EU nicht vorgesehen. Es gilt, die Biokraftstoffrichtlinie⁴ zu erfüllen, nach der bis 2010 5,75 % des Kraftstoffverbrauches mit Biokraftstoff gedeckt werden soll. Biokraftstoffe der zweiten Generation sind zur Zeit noch nicht auf dem Markt erhältlich.

Abkürzungen

CARB	California Air Resources Board
CO	Kohlenmonoxid
EPA	Environmental Protection Agency
ETBE	Ethyl-Tertiär-Butyl-Ester
GJ	Giga Joule, 10 ⁹ Joule
HC	Kohlenwasserstoffe
NMOG	Non-methane organic gases
NO _x	Stickoxide
PJ	Peta Joule, 10 ¹⁵ Joule
PM	particle matter, Partikelemissionen
Tier 1/2	engl. für Stufe 1/2

⁴ Richtlinie 2003/30/EG des europäischen Parlamentes und des Rates vom 8. Mai 2003 zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor.

Literatur

- [BOSCH] Bauer, H.: „Bosch Kraftfahrtechnisches Handbuch“, 25. Ausgabe, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2003.
- [BUND] Internetauftritt der Bundesregierung: http://www.bundesregierung.de/nn_774/Content/DE/Artikel/2006/08/2006-08-23-mehr-biokraftstoff-in-den-tank.htm, 23.08.2006.
- [CARB] California Air Resources Board: “Proposed Amendments to California's Low-Emission Vehicle Regulations LEV II”, Mobile Source Control Division, 07.11.1997.
- [EIA] Internetauftritt der Energy Information Administration: <http://www.eia.doe.gov/>, 29.08.2006.
- [EU] Internetauftritt der EU: www.ebb-eu.org/legis, 17.05.2006.
- [EUROSTAT] Statistisches Amt der Europäischen Gemeinschaften, <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>, Daten von 2006/2004.
- [EPA] Environmental Protection Agency: “Federal Certification Exhaust Emission Standards for Light-Duty Vehicles (Passenger Cars) and Light Light-Duty Trucks: Federal Test Procedure (FTP), Cold CO, and Highway & Idle Tests”, Office of Transportation and Air Quality, EPA420-B-00-001, February 2000.
- [FNR] Hrsg.: Fachagentur Nachwachsende (FNR): „Biokraftstoffe – eine vergleichende Analyse“, Gülzow, 2006.
- [VERKEHR] Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen „Verkehr in Zahlen“, Dt. Verkehrs-Verlag, Hamburg, 1972-2004/2005.

Fahrzeug- und Antriebskonzepte für den urbanen Gebrauch

Volker Schindler

Technische Universität Berlin

Gibt es besondere Anforderungen an Fahrzeuge für den urbanen Bereich?

Lokal wirksame Emissionen

Aufgrund der höheren Verkehrsdichte summieren sich lokal wirksame Emissionen von Gasen und anderen luftgetragenen Stoffen in Städten leichter zu relevanten Immissionen. Das gilt ganz besonders, wenn durch die Bebauung und mehr noch durch topologische Gegebenheiten der Austausch der Luft zeitweilig behindert ist. Eine zusätzliche Verschärfung kann sich ergeben, wenn starke Sonneneinstrahlung zusätzlich photochemische Reaktionen ermöglicht. Es nimmt demnach nicht Wunder, dass in Städten schon seit Langem immer wieder schlechte Luftqualität bemängelt wurde. So wurden denn auch zunächst in Kalifornien und dann sowohl in Japan als auch in Europa immer strengere Abgasgesetzgebungen durchgesetzt. In vielen Stufen haben sie inzwischen zu einem Emissionsniveau geführt, das eine Gefährdung auch empfindlicher Individuen praktisch ausschließt. Eine Ausnahme von dieser Feststellung gilt für den Feinstaub. Er steht im starken Verdacht, für zahlreiche Erkrankungen (mit-)verantwortlich zu sein. Ein Teil dieses Staubes geht auf den Betrieb von Kfz zurück, einmal auf die Emissionen mancher Dieselfahrzeuge, aber auch auf Abrieb von den Reifen, dem Straßenbelag, den Bremsen und Bremsbelägen.

Die heute gültigen Vorgaben zur Abgaszusammensetzung sind für alle Pkw und Nfz so streng, dass es nicht erforderlich erscheint, sie für Fahrzeuge, die sich ganz überwiegend in einer Stadt bewegen noch weiter zu verschärfen. In der Vergangenheit wurde immer wieder die Idee diskutiert, für bestimmte Innenstadtbereiche nur noch Elektrofahrzeuge oder andere ZEV zuzulassen; sie hat ihre Bedeutung verloren. Aus der Zielsetzung, die lokal wirksamen Emissionen zu minimieren, ergibt sich nicht die Notwendigkeit neuer, auf urbane Bedingungen angepasster Fahrzeugkonzepte.

Geräusche

Die Geräusche aus dem Betrieb von Kraftfahrzeugen sind in vielen dicht besiedelten Gebieten nicht nur ein „ästhetisches“ Problem sondern belasten die Gesundheit großer

Personengruppen. Die Herkunft der Geräusche kann im Wesentlichen auf drei Ursachen zurückgeführt werden:

1. Geräusche, die mit dem Öffnen und Schließen der Türen, mit dem Start des Motors und mit Manövrieren bei langsamer Geschwindigkeit zusammen hängen.
2. Motorgeräusche.
3. Rollgeräusche.

Geräusche durch das Öffnen und Schließen von Türen und Klappen sind von der messbaren Schallexposition her kein wesentliches Problem. Dennoch führen sie in an sich ruhigen Umgebungen zu erheblicher Belästigung. Das gilt auch für die erhöhte Schallemission von Motoren beim Warmlaufen, ganz besonders für das Nageln von Dieselmotoren nach dem Kaltstart.

Die Geräusche von fahrenden Pkw wurden durch die bestehende Gesetzgebung bereits relativ eng begrenzt. Motorgeräusche treten im Verkehr in der Regel nicht mehr dominant in Erscheinung. Ausnahmen sind Beschleunigungsphasen mit relativ hohem Gasdurchsatz durch die Ansaug- und Abgasanlagen. Sehr belästigend sind jedoch die Motorgeräusche von schwereren Lkw und auch Stadtbussen. Eine besondere Rolle spielen motorisierte Zweiräder; ihre frei liegenden Motoren, die zudem häufig hoch belastet werden, erzeugen erheblichen Lärm. Es scheint daher nahe liegend, speziell für diese Fahrzeugkategorien über weitere Möglichkeiten zur Minderung der Motorengeräusche nachzudenken.

Meistens sind die Rollgeräusche im Stadtverkehr dominant. Sie hängen wesentlich von der Wechselwirkung von Reifen und Fahrbahn ab und hängen auch vom Gewicht der Fahrzeuge ab. Besonders laut werden sie bei rauer Fahrbahn, z. B. bei Kopfsteinpflaster. Die Möglichkeiten zur Minderung dieser Geräusche liegen zu einem – leider eher geringen Teil – in der konstruktiven Gestaltung der Reifen und des Radhauses. Wenn man deutlich Verbesserungen erzielen will, muss man zusätzlich andere Straßenbeläge verwenden.

Fahrzeugseitig ergeben sich Potentiale für Geräuschminderungen, wenn man besser auf den Stadtverkehr optimierte Konzepte in Betracht zieht.

Beitrag zu den global wirksamen Emissionen

Pkw legen einen beträchtlichen Teil ihrer Fahrleistung in urbanen Gebieten zurück. Entsprechend ist der Anteil an den Emissionen von Treibhausgasen (THG). Wenn anspruchsvolle Minderungsziele erreicht werden sollen, muss daher auch hier nach Potentialen gesucht werden. Die Optimierung der Eigenschaften konventioneller Fahrzeuge schöpft nicht alle Potentiale aus, die dafür vorhanden sind. Es liegt nahe, über speziellere Lösungen nachzudenken.

Platz im fließenden und ruhenden Verkehr

Straßenfläche und Platz zum Abstellen von Fahrzeugen, sei es am Straßenrand, auf Parkplätzen oder in Garagen, ist in urbanen Gebieten ein knappes Gut. Fahrzeugkonzepte, die

dafür Lösungen bieten, ohne auf anderen Gebieten zu viele Nachteile aufzuweisen, wären sehr willkommen.

Besondere Anforderungen an die Fahrzeugsicherheit

Im Vergleich zu Landstraßen oder Autobahnen ist der urbane Verkehr im Mittel durch geringere Geschwindigkeiten charakterisiert; eine typische Stadtfahrt inkl. Anteilen auf übergeordneten Straße erreicht selten eine Durchschnittsgeschwindigkeit über 35 km/h. Zeitweilig kann im städtischen Umland auch schneller gefahren werden, aber selten legal über 120 km/h. Man kann daher die Auslegungsbedingungen für die Passive Sicherheit für Stadtfahrzeuge nicht lockern. Konfliktsituationen mit ungeschützten Verkehrsteilnehmern (Fußgänger, Radfahrer, Fahrer von motorisierten Zweirädern) werden sogar eher häufiger auftreten und müssen daher besonders beachtet werden.

Auf dem Gebiet der Aktiven Sicherheit kann auf die Auslegung der Fahrzeuge auf Geschwindigkeiten über 120 km/h verzichtet werden; eine ausreichende Standfestigkeit der Bremsen kann damit mit geringerem technischem Aufwand erreicht werden.

Antriebskonzepte

Das Konzept eines Fahrzeugs wird wesentlich durch die Randbedingungen mit bestimmt, die vom Antriebkonzept vorgegeben werden. Energiewandler und Kraftstoffversorgung müssen im Fahrzeug ihren Platz finden; dabei müssen vielfältige Anforderungen berücksichtigt werden, die teilweise in Form von verbindlichen Vorschriften gefasst sind, deren Erfüllung Voraussetzung für die Zulassung ist. Viele weitere Anforderungen ergeben sich aus dem Bemühen der Hersteller, die Bedürfnisse einer bestimmten Kundengruppe optimal zu erfüllen. Bei heutigen Fahrzeugen ist zudem immer zu beachten, dass sie praktisch nie für nur ein Gebrauchsmuster ausgelegt sind. Jeder Kunde erwartet heute, dass sein Fahrzeug zumindest grundsätzlich für alle relevanten Einsatzzwecke tauglich ist.

Die überwältigende Mehrheit aller motorisierten Fahrzeuge auf unseren Straßen verwenden Otto- oder Dieselmotoren als Energiewandler. Nur ein sehr kleiner Teil der Pkws verwendet CNG als Kraftstoff; eine kleine Zahl von Modellen wird ab Werk angeboten. Bei Motorrädern und LKR ist heute die Auswahl noch eingeschränkter; sie verwenden ausschließlich Benzin. LPG-Fahrzeuge sind in Deutschland sehr ungebräuchlich; es gibt keine Angebote ab Werk, aber die Umrüstung von Pkw und Nfz ist möglich und wird gelegentlich durchgeführt.

Wenn man von der Vorgabe der allgemeinen Verwendbarkeit für das Fahrzeug abweichen kann, ergeben sich neue Spielräume für die Auslegung des Antriebs. Einige werden hier stichpunktartig aufgezählt.

- Es werden nur kurzzeitig hohe Leistungen gefordert; die Dauerleistung kann so begrenzt werden, dass 120 km/h gehalten werden können. Damit ergeben sich bei konventionellen Antrieben z. B. Spielräume bezogen auf Dauerfestigkeit, Kühlung,

Getriebeauslegung usw. Noch viel größere Potentiale ergeben sich für Hybridfahrzeuge.

- Die Reichweite mit einer Tankfüllung ist als Auslegungskriterium nicht mehr wesentlich. Daher können gasförmige oder kryogene Kraftstoffe mit vergleichsweise geringer Energiedichte leichter eingesetzt werden. Im Prinzip gilt dies auch für Batterie-elektrische Fahrzeuge.
- Für sehr leichte Fahrzeuge kommen auch Antriebe mit Leistungs- und Energiedichten in Betracht, die für Universalfahrzeuge bzw. nur leicht angepasste Stadtfahrzeuge ungeeignet sind. Elektroantriebe mit Batterie oder mit Brennstoffzelle finden hier möglicherweise ihren ersten Markt. Ob dies auch für „Human Powered Vehicles“ – Fahrzeugen mit Pedalantrieb – Märkte jenseits des Fahrrades eröffnet, bleibt aber zweifelhaft; sie werden wohl eher Fahrzeuge für Enthusiasten bleiben. Das dürfte auch für Hybridlösungen in der Kombination Pedalantrieb mit Elektroantrieb gelten.

Fahrzeugkonzepte

Der gewählte Antrieb hat entscheidenden Einfluss auf das Fahrzeugkonzept und umgekehrt. Wenn man in einem ersten Schritt voraussetzt, dass weiter ein konventioneller Antrieb mit Verbrennungsmotor und mechanischem Getriebe verwendet werden soll, können Freiheitsgrade bei der Gestaltung des Fahrzeugs in Folgendem liegen:

- Aus einer Anpassung der konstruktiv realisierten Fahrleistungen an den Stadtbetrieb ergeben sich Vorteile bei Motorgröße, Getriebeabstimmung, Kühlung, ... (siehe oben).
- Wenn zusätzlich eine Anpassung der Transportkapazität des Fahrzeugs an den urbanen Betrieb erwogen wird, ergeben sich für Pkw Spielräume für neue Gestaltungen, wie sie im Smart serienmäßig angeboten werden und in zahlreichen Konzeptfahrzeugen (z. B. BMW Z13) vorgestellt wurden.



Abb. 1: BMW Z13. Versuch zur Darstellung eines „Personal Car“. Ein dreisitziges Fahrzeug mit Heckmotor, optimalem Komfort und Sicherheit für den Fahrer und stadt-adäquat-überlegenen Fahrleistungen, 1992

Obwohl bereits viele Anläufe gescheitert sind, „normal große“ Fahrzeuge mit Elektroantrieb marktfähig zu machen, werden weitere unternommen. Smart hat in Juni 2006 angekündigt, es werde in England im Rahmen eines Pilotprojektes 100 Kunden auf Leasingbasis als Elektrofahrzeug mit ZEBRA-Batterien anbieten.



GM EV 1

2-Sitzer

Pb- oder NiMH-Batterie

Produktion: 1.117 E

1996 - 1999



BMW E1

4-Sitzer

ZEBRA-Batterie (NaNiCl)

5 Versuchsfahrzeuge

1992



Ford Th!nk

2-Sitzer

NiCd-Batterien

30 kW

1998 - 2004

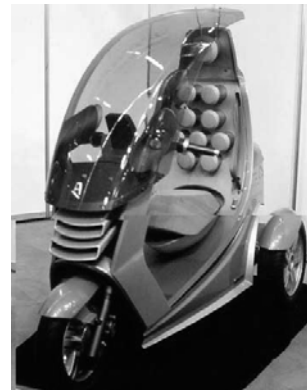
Auch für Einspurfahrzeuge können Weiterentwicklungen zu wesentlichen Veränderungen der Eigenschaften führen, die neue Kundengruppen anzusprechen vermögen. Ein Beispiel ist der BMW C1, ein Fahrzeug, das eine sehr gute Passive Sicherheit mit einem gewissen Wetterschutz und geringem Platzbedarf kombiniert. Es bietet allerdings nur Platz für eine Person und ist nicht leise. Ähnliche Konzepte sind mehrfach von anderen Firmen vorgestellt worden. Aber nur beim ZEDIS, einem von Piaggio geführten EU-Forschungsprojekt, wurden Passive Sicherheit und Wetterschutz in ähnlich konsequenter Weise kombiniert; leider ist das Fahrzeug nicht in Serie gegangen. Benelli und Honda haben Einspur- bzw. schmal kurvenneigende Dreiradfahrzeuge mit schmaler Spur auf den Markt gebracht, die einen gewissen Wetterschutz durch ein Dach ermöglichen, aber eher eine Verschlechterung der Passiven Sicherheit gegenüber Rollern ohne Karosserie bedeuten. Andere „rollerartige Dreiräder“ wie der Autostudio A-Trix oder der Renault Ublo sind reine Studien ohne Serienumsetzung geblieben.

BMW C1



Produktion: 1998 - 2002

Verbrauch	2,9 l/100 km (ECE-Stadt-Fahrzyklus)
Reichweite	ca. 250 km
Geschwindigkeit	max. 112 km/h
Beschleunigung	0 – 50 Km/h in 4 s
Motor	13 KW 1-Zylinder 176 ccm (Benzin)
Leer-Gewicht	185 kg
Karosserie	Aluminium Space Frame
Passagiere	1 + 1
Sicherheit	Sicherheitszelle 2- und 3-Punkt-Gurte Auslegung auf Kompatibilität ABS



Forschungsprojekt

ZEDIS

Elektro-Antrieb (regeneratives
Bremsen)

Li-Ionen-Batterie

Gewicht: 180 kg

2000

Konzeptfahrzeug

Renault Ublo

2001

Konzeptfahrzeug

Autostudio A-Trix

2002

In den USA hat sich ein kleiner Markt für NEVs – Neighbourhood Electric Vehicles – herausgebildet. Fahrzeuge dieser Art dürften unter den Bedingungen Europas kaum große Akzeptanz finden. Eine extreme Konstruktion ist der amerikanische Commuter Cars Tango, ein sehr schmales, zweispuriges Fahrzeug, das wegen seines hohen Gewichts und seiner niedrigen Schwerpunktlage dennoch hohe Querbeschleunigungen zulassen soll. Aber auch andere Konzepte wie verschiedene Leichtfahrzeuge mit Elektroantrieb blieben ohne dauerhaften Erfolg (Hotzenblitz, Esoro). Dasselbe Schicksal scheint dem SAM Cree nicht erspart zu bleiben.

Noch weiter abgespeckt im Gewicht, in der Größe und in der Erfüllung von Ansprüchen an Komfort und Sicherheit stellen sich Fahrzeuge wie der City El oder der Twike dar; sie sprechen eine kleine Klientel von Enthusiasten an, nicht jedoch den Bedarf der Mehrheit der Fahrzeugnutzer; entsprechend klein sind die verkauften Stückzahlen.



Commuter Cars Tango, 2006



NEV

GEM e2

Masse (leer): 490 kg

L x B: 251 x 140 cm

Leistung: 5/12 PS

Pb-Batterie

Vmax: 40 km/h

Reichweite: Ca. 50 km

NEV

GEM eS

Masse (leer): 518 kg

L x B: 274 x 140 cm

Leistung: 5/12 PS

Pb-Batterie

Vmax: 40 km/h

Reichweite: Ca. 50 km



Cree SAM

Höhe: 1583 mm, Breite: 1553 mm, Länge: 3162 mm

Verbrauch: 5 kWh pro 100

Masse: 545 kg (leer mit Batterien), 695 kg (zulässiges Gesamtgewicht)

Vmax:: Auf 85 km/h abgeregelt

Pb-Batterien

Verbrauch: 3,5 – 4,5 kWh für eine Batterieladung

Reichweite: Von 50 bis 70 km, je nach Fahrweise und Gelände.

Preis: 10.000 SFR angestrebt

Markteinführung ungewiss

FineMobile GmbH

Twike



Emission (CO ₂)	27 – 54 g/km
Verbrauch	4-8 kWh/100 km
Reichweite	40-90 km
Geschwindigkeit	max. 85 km/h
Beschleunigung	0 – 60 Km/h in 9 s



Motor	Elektromotor (3 – 5 kW) und Pedalantrieb
Leer-Gewicht	246 kg inkl. 2 Batteriepakete (NiCd), max. 450 kg
Rahmen	Aluminium Space Frame, Schale aus Thermoplast (Luran)
Passagiere	2
Sicherheit	3-Punkt-Gurt, keine Sicherheitszelle vorhanden

CityCom AG

City-EL



Verbrauch	4 - 5 kWh/100 km
Reichweite	50 km
Geschwindigkeit	45 km/h
Beschleunigung	0 – 45 Km/h in 6 s
Motor	Elektro-Antrieb (2,5 – 3,6 kW) Blei-Batterien
LxBxH	?x116x?
Leer-Gewicht	≤ 280 kg, max. 400 kg
Rahmen	Aluminium Space Frame, Sandwichboden und -seite
Passagiere	1 + Gepäck
Sicherheit	Sicherheitszelle, 3-Punkt-Gurt, Front-Airbag, Auslegung auf Kompatibilität

Es wurde also bereits vieles versucht und teilweise auch – zumindest probeweise – auch auf dem Markt angeboten. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob es noch weitere Möglichkeiten gibt, Fahrzeug- und Antriebskonzepte zu neuen Kombinationen zu verknüpfen, die tatsächlich Probleme lösen. Eine Übersicht über mögliche Kombinationen gibt die nachfolgende Grafik. Sie zeigt die Kombinationen, die bereits technisch umgesetzt wurden. Dabei wurden hier auch Versuchsträger aus Forschungs- und Vorentwicklungsprojekten berücksichtigt. Man erkennt, dass die meisten der Felder bisher unbesetzt geblieben sind. Die bei Weitem höchste Bedeutung haben die Felder oben links – normale Pkw –, unten links – Motorräder und Leichtkrafträder der verschiedenen Kategorien und unten rechts – Fahrräder –; fast alle anderen Felder sind in Europa nur ganz schwach besetzt.

Mit CLEVER wurde der Versuch unternommen, exemplarisch zu zeigen, dass neue Konzepte für urbane Fahrzeuge möglich sind. Es handelt sich um ein dreirädriges, kurvenneigendes Fahrzeug mit einer sehr robusten Sicherheitsstruktur. Es bietet Platz für zwei Personen, die durch Gurte und Airbags geschützt werden. Der Antrieb erfolgt durch einen 213 ccm 1-Zylindermotor, der monovalent auf Erdgas ausgelegt wurde. Die Gasversorgung erfolgt über

zwei Druckgasflaschen, die ausgetauscht werden können. Es wird ein CVT-Getriebe verwendet. Es wurde gezeigt, dass ein solches Fahrzeug bei einem Leergewicht von ca. 350 kg die Passive Sicherheit üblicher Kleinfahrzeuge haben kann. Es beansprucht nicht viel mehr Straßenraum als ein schweres Motorrad, verbraucht das Äquivalent von 2,4 l Benzin auf 100 km und fährt sich sehr gut.

Energiespeicher 1		konv. CET	altern. CET	CET	CET (H ₂)	Batterie	Mensch	Mensch
Energiespeicher 2		-	-	X	Batterie	-	X	-
Energiewandler 1		VKM	VKM	VKM	BZ	EM	Mensch	Mensch
Energiewandler 2		-	-	X	EM	-	X	-
2-Spur-Fahrzeug	Universalsauto	fast alle	CNG (LPG) H2 ?	Prius bis Lexus 450h				
	spezialisiertes Auto mit eingeschränkter Allgemeintauglichkeit	Smart Ligier Aixam			F-Cell			
	Stadtfahrzeug (RW < 200 km)					Smart EV NEV		
2-Spur-Fahrzeug 3-Rad-Fahrzeug 1-Spur-Fahrzeug	Leichtfahrzeug mit Karosserie (M < 350 kg)	BMW C1	CLEVER				Twike	
	Leichtfahrzeug ohne Karosserie (M < 350 kg)	MR						
2-Spur-Fahrzeug 3-Rad-Fahrzeug 1-Spur-Fahrzeug 1-Achs-Fahrzeug	Ultraleichtfahrzeug mit Karosserie (M < 150 kg)							Velomobil
	Ultraleichtfahrzeug ohne Karosserie (M < 150 kg)	Mofa LKR		Fahrrad mit Hilfsmotor		E-Bike Segway	Pedelec	Fahrrad

Geht man der Frage nach, warum viele der theoretisch möglichen Kombinationen in der Realität nicht vorkommen, kann man viele aus physikalisch-technischen Gründen ausschließen; sie lassen sich nicht realisieren. Ursache dafür kann die mangelnde Leistung sein, die über einen Pedalantrieb bereit gestellt werden kann oder auch die zu geringe Energiedichte einer Batterie. In anderen Fällen wäre eine Nutzungseinschränkung künstlich einzuführen, die von der Technik her nicht erforderlich ist (z. B. Beschränkung der Reichweite). In weiteren Fällen sind es eher praktisch-ökonomische Erwägungen, die eine Realisierung zweifelhaft erscheinen lassen. So ist z. B. ein Quad mit CNG oder Hybridantrieb durchaus möglich, aber wer würde es kaufen wollen?



CLEVER, 2006

Andere Kombinationen erscheinen aber durchaus sinnvoll. So könnten sicherlich auch Leichtfahrzeuge der verschiedenen Kategorien auf andere CET umgestellt werden. Im Falle von CLEVER wurde gezeigt, dass mit Erdgas eine hoch effiziente Lösung für den Antrieb möglich ist, wenn eine monovalente Auslegung erfolgt und damit die Kompromisse und die technischen Dopplungen, die mit bivalenten Auslegungen unvermeidlich verbunden sind, vermieden werden können. Zudem eröffnet der vergleichsweise geringe Energiebedarf solcher Fahrzeuge die Chance, wechselbare Druckflaschen zu verwenden; das könnte den Aufbau einer teuren Kraftstoffinfrastruktur zunächst entbehrlich machen bzw. die Lücken in einer sich entwickelnden Versorgung weniger schmerzhaft erscheinen lassen. Damit ergäbe sich auch die Chance, Wasserstoff, einen CET der besonders günstige Eigenschaften als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren hat, der aber auch hohe Anforderungen an die Infrastruktur stellt, in einen Markt einzuführen, der noch keine große Nachfrage entwickeln kann.

Energiespeicher 1		konv. CET	altern. CET	CET	CET (H ₂)	Batterie	Mensch	Mensch
Energiespeicher 2		-	-	X	Batterie	-	X	-
Energiewandler 1		VKM	VKM	VKM	BZ	EM	Mensch	Mensch
Energiewandler 2		-	-	X	EM	-	X	-
2-Spur-Fahrzeug	Universaliauto	Pkw	CNG (LPG) H2 ?	Prius bis Lexus 450h	?			
	spezialisiertes Auto mit eingeschränkter Allgemeintauglichkeit	Smart Ligier Abxam	Smart CNG	Smart Hybrid	F-Cell	?		
	Stadtfahrzeug (RW < 200 km)	nicht sinnvoll	CLEVER ++	nicht sinnvoll	?	Smart EV NEV		
2-Spur-Fahrzeug 3-Rad-Fahrzeug 1-Spur-Fahrzeug	Leichtfahrzeug mit Karosserie (M ≤ 350 kg)	BMW C1	CLEVER	CLEVER Hybrid	CLEVER BZ	CLEVER Batterie	Twike	
	Leichtfahrzeug ohne Karosserie (M ≤ 350 kg)	MR	?	MR Hybrid ?	MR BZ ?	Batterie MR ?	?	
2-Spur-Fahrzeug 3-Rad-Fahrzeug 1-Spur-Fahrzeug 1-Achse-Fahrzeug	Ultraleichtfahrzeug mit Karosserie (M ≤ 150 kg)	Leichtbau C1	nicht sinnvoll	Leichtbau C1 Hybrid	PAC-Car	Leichtbau C1 Batterie	verkl. Liegerad	Velomobil
	Ultraleichtfahrzeug ohne Karosserie (M ≤ 150 kg)	Mofa LKR	nicht sinnvoll	Honda Numa Scooter	ENV FC-me	E-Bike Segway	Pedelec	Fahrrad

Der Kraftstoffverbrauch von MR und LKR ließe sich auch durch einen Hybridantrieb sicher senken. Elektrische Antriebe können bei Einspurfahrzeugen die Geräuschemissionen ebenso günstig beeinflussen wie die von THG. Allerdings stellt sich in allen Fällen die Frage nach den vertretbaren Kosten. Sie kann aber möglicherweise in vielen Fällen leichter positiv beantwortet werden als bei universell verwendbaren Fahrzeugen, weil die Anforderungen an die Reichweite und damit den Energieinhalt der Batterie oder des Drucktanks viel einfacher zu erfüllen sind.

Bewertung und Ausblick

Mit der Entwicklung des CLEVER konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, attraktive, kleine Fahrzeuge zu entwickeln, die einen für den Zweck angepassten Gebrauchsnutzen mit ausreichendem Komfort, hoher Aktiver und Passiver Sicherheit, geringen THG-Emissionen und geringem Platzbedarf verbinden. Ausgehend von den Grundkonzepten sind zahlreiche Weiterentwicklungen möglich und sinnvoll:

CLEVER ++ bezeichnet hier ein zweispuriges Fahrzeug mit geringer Breite. Er ermöglicht ein konventionelles Aussehen und spricht dadurch möglicherweise mehr Kunden an. Die Zweispurigkeit führt jedoch auch zu erhöhtem Aufwand bei der Kurvenneigetechnik.

CLEVER Hybrid: Die Kombination eines Benzin- (oder Diesel-) Motors mit einem elektrischen Antrieb eröffnet ein zusätzliches Potential zu Verbrauchsminderung. Allerdings um den Preis erheblich höherer Kosten.

CLEVER kann als Elektrofahrzeug sowohl mit Brennstoffzelle als auch mit Batterie dargestellt werden. Angesichts der hohen Kosten, geringen Zuverlässigkeit und vielfältigen Nutzungseinschränkungen derzeitiger BZ scheint diese Variante zunächst weniger attraktiv.

Ein Fahrzeug mit Batterie könnte aber für Anwendungen eine Berechtigung haben, bei denen die ZEV-Eigenschaft wichtig ist (Kalifornien, London) oder bei denen es auf besonders geringe Geräuschemission ankommt.

CLEVER CH2 bezeichnet ein Konzept, bei dem die Auslegung von Motor auf monovalente Nutzungen von Wasserstoff erfolgt, der in wechselbaren Druckbehältern mitgeführt wird. Ein solches Konzept könnte viele der Vorbehalte, die die kalifornische Behörde CARB gegen bivalente Wasserstofffahrzeuge anführt, entkräften.

Glossar

BZ:	Brennstoffzelle
CARB:	California Air Resources Board
CET:	Chemischer Energieträger
CLEVER:	Compact Low Emission Vehicle for Urban Transport
CNG:	Compressed Natural Gas
E-Bike:	Mofa mit elektrischem Antrieb. Die gesamte Leistung wird vom Motor bereit gestellt; ein Mittreten ist nicht erforderlich.
LKR:	Leichtkraftrad
LPG:	Liquified Petroleum Gas
MR:	Motorrad
Pedelec:	Fahrrad mit elektrischem Hilfsmotor. Es unterliegt in Deutschland nicht der Versicherungspflicht.
THG:	Treibhausgase
ZEDIS:	Zero Emission Downsized Improved Safety Urban Vehicle

Effiziente Dynamik – Der BMW-Hybridansatz

Olaf Eckart

BMW AG

Effiziente Dynamik. Der BMW Hybridansatz.

Vortrag im Rahmen des Herbstseminars
„Energie 2006 –Kraftstoffe und Antriebe
für die Zukunft“an der TU Berlin

11.10.2006



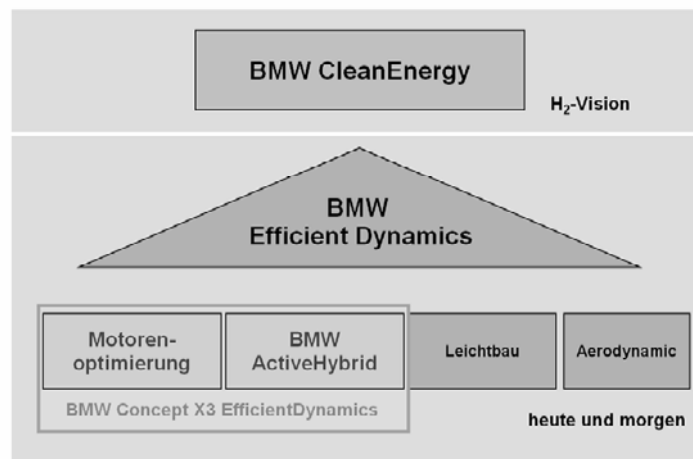
BMW Group



Das Auto der Zukunft ? Mein nächstes Auto ? Widersprüchliche Anforderungen...

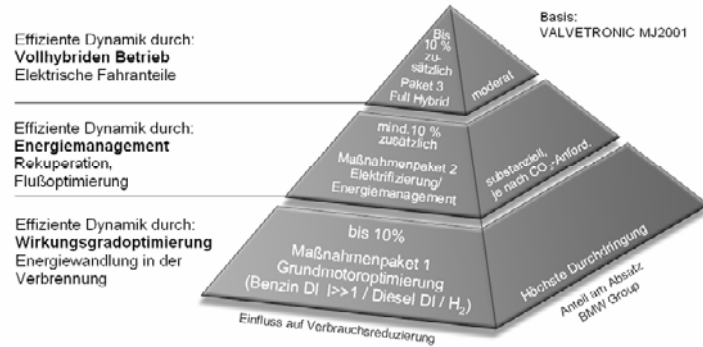
How I imagine the car of the future...	... and here is my own next car...
- Null-Emissionen - Null-Kraftstoffverbrauch - Umweltfreundlich - Nachhaltig	- Dynamisch - Sportlich - Sicher - Komfortabel

Hybrid bei BMW. BMW EfficientDynamics / BMW CleanEnergy



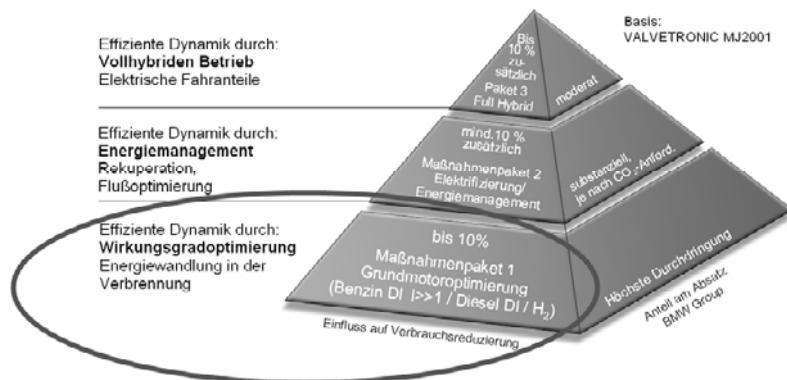
Hybrid bei BMW.

BMW Group Strategie Effiziente Dynamik.

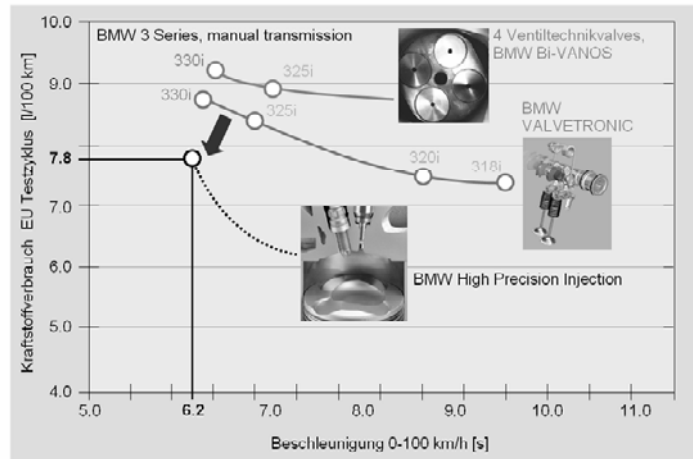


Hybrid bei BMW.

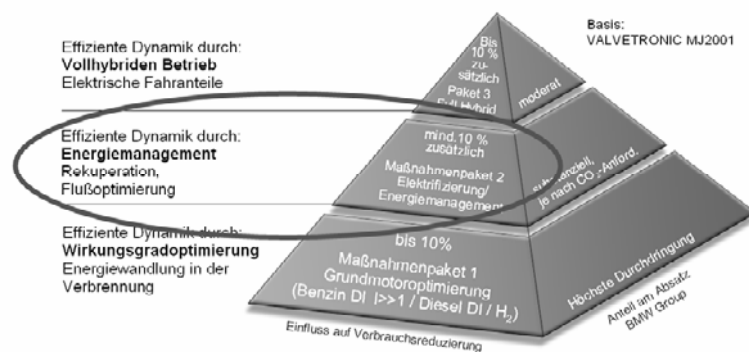
BMW Group Strategie Effiziente Dynamik.



Wirkungsgradverbesserung des Grundmotors. Substanzielle Beiträge zu geringerem Verbrauch durch bessere Verbrennung.

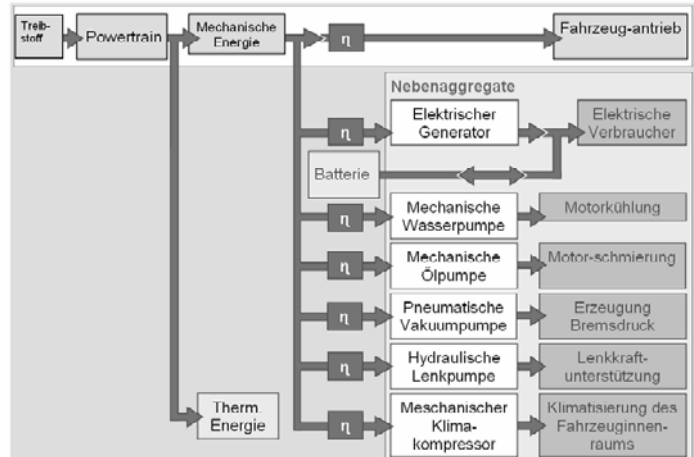


Hybrid bei BMW. BMW Group Strategie Effiziente Dynamik.



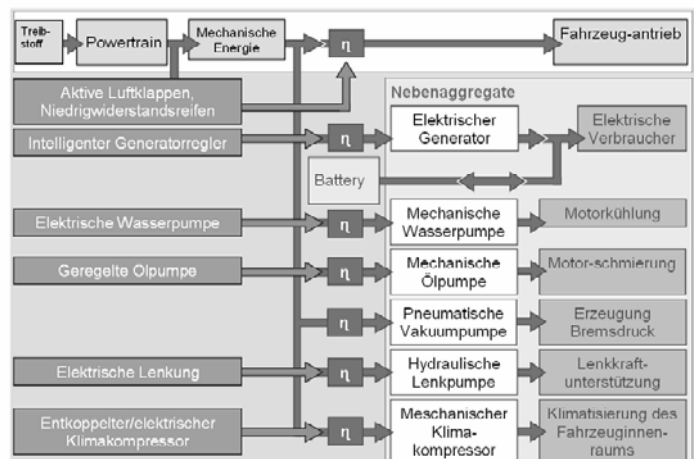
Energiemanagement.

Heute entstehen noch an vielen Stellen hohe Wirkungsgradverluste.



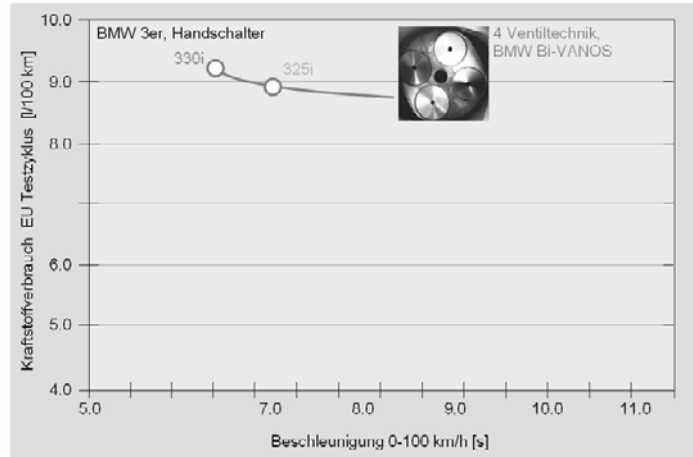
Energiemanagement.

Um hohen Wirkungsgrad zu erzielen müssen alle Energieströme betrachtet werden?



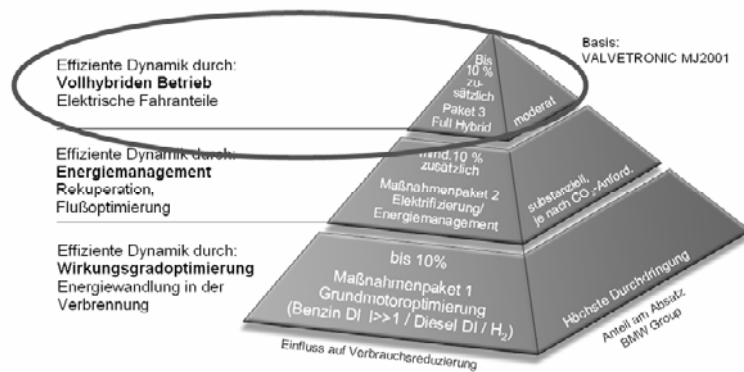
Energiemanagement.

Weitere Verbesserung durch Management aller Energieströme.



Hybrid bei BMW.

BMW Group Strategie Effiziente Dynamik.



Hybrid bei BMW.

Warum machen wir einen Hybrid?

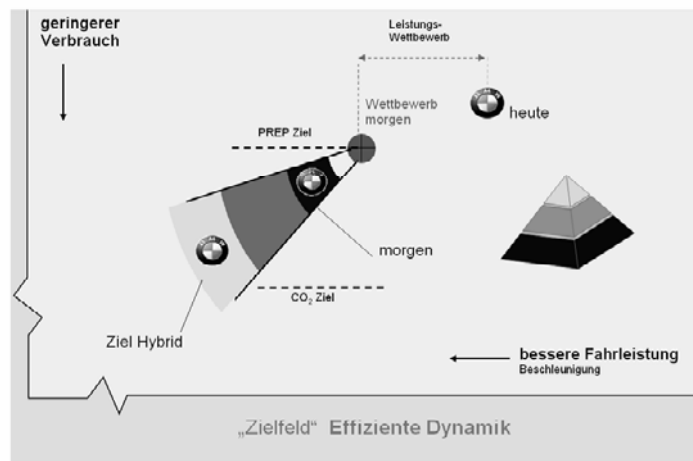
Weltweit hohe gesetzliche Anforderungen an Verbrauch (CO₂) und Emissionen:



Land	Anforderung	Erreichbar mit konventioneller Technik	Mit Hybrid erreichbar
Europa	CO ₂ -Flotte-Anforderungen EU-Kommission	Nein	wesentlicher Beitrag
USA	CO ₂ -Flotte-Anforderungen CARB	Nein	wesentlicher Beitrag
USA	AT-PZEV ZEV-Mandat	Nein	ja
Japan	ECL	Ja	ja
China	Verbrauchsgesetzgebung mit Zulassungsverbot	Nein	ja

Hybrid bei BMW.

Hybrid-Beitrag zu BMW EfficientDynamics.



Hybrid bei BMW.

Zielsetzung eines ersten BMW Full Hybrid.

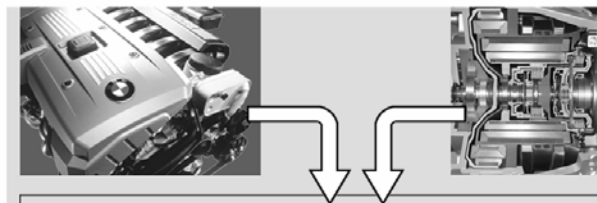


- Ziel:**
- Serieneinführung innerhalb der nächsten 3 Jahren.
 - beschränktes Produktions-Volumen
 - Modell in Entscheidung

- Aufgabe:**
- Technologiekompetenz der BMW Group
 - BMW Fahrfreude
 - Weiterentwicklung der Effizienten Dynamik

Hybrid bei BMW.

Was macht einen Hybrid aus?

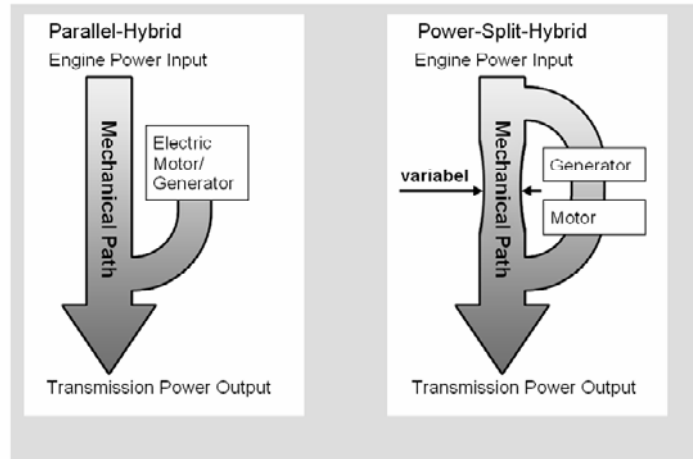


Hybrid-Funktionalitäten

Micro-Hybrid	• Motor Start-Stopp
Mild-Hybrid	+ Bremsenergie-Rückgewinnung + Boosten + Standklimakomfort (opt.)
Full-Hybrid	+ Elektrisches Manövrieren + Elektrische Fahranteile

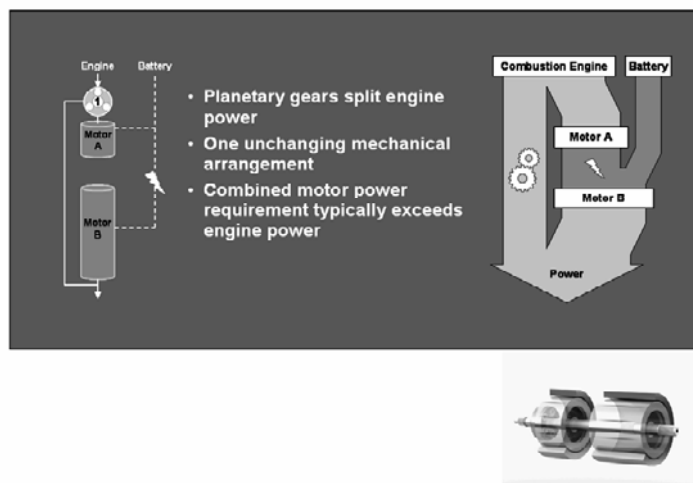
Hybrid bei BMW.

Systemvergleich Full Hybrid Systeme

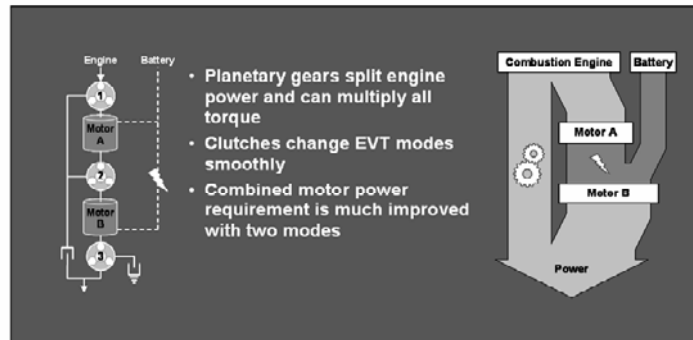


Vergleich verschiedener Hybridansätze.

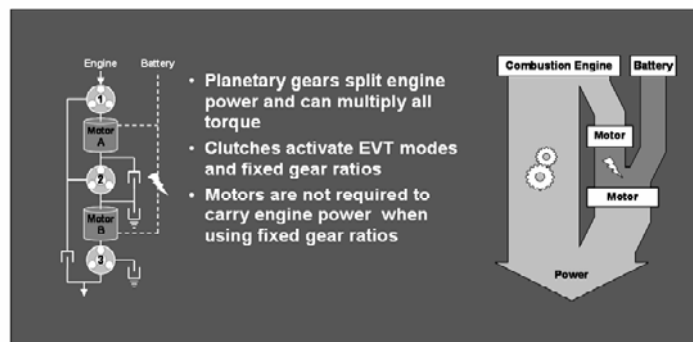
One-Mode Hybrid



Vergleich verschiedener Hybridansätze. Two-Mode Hybrid

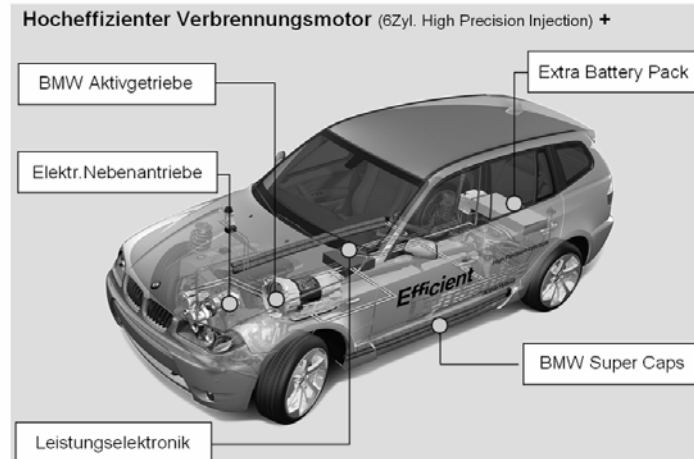


Vergleich verschiedener Hybridansätze. Two-Mode Hybrid + 4 feste Gänge



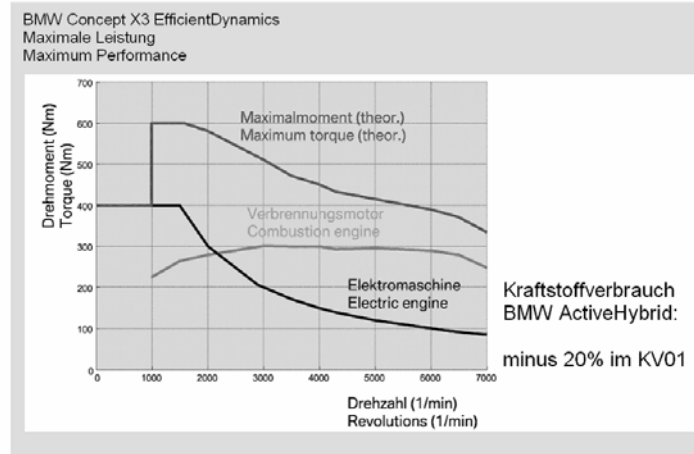
Hybrid bei BMW.

Hybridkomponenten BMW Concept X3 EfficientDynamics



Hybrid bei BMW.

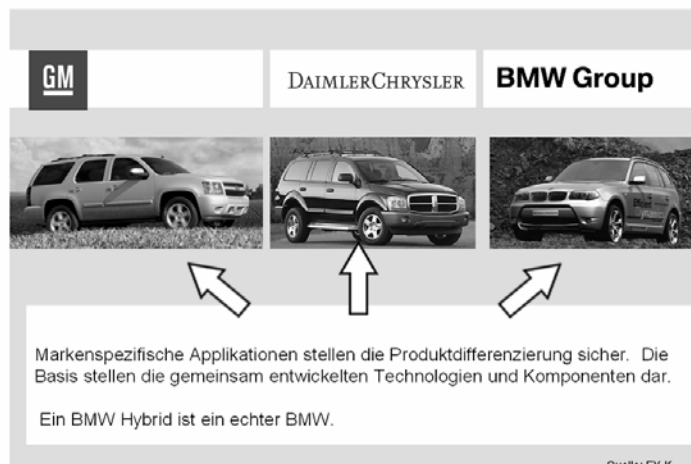
BMW ActiveHybrid: Gesteigerter Fahrleistung/ reduzierter Kraftstoffverbrauch



Hybrid bei BMW. Motivation zur Kooperation.



Hybrid bei BMW. Kooperation mit DaimlerChrysler und General Motors.



Hybrid bei BMW. Kooperation mit DaimlerChrysler und General Motors.

 Unterzeichnung MoU 06.09.2005	 BMW joins DaimlerChrysler, GM in hybrid car project FRANKFURT (Reuters) — German luxury carmaker BMW has joined DaimlerChrysler (DCE) and General Motors (GM) in an alliance to develop hybrid vehicle technology, DaimlerChrysler and GM said Wednesday. www.washingtonpost.com BMW joins DaimlerChrysler/GM hybrid project By Michael Shields, European Automotive Correspondent Reuters Wednesday, September 7, 2005: 9:04 AM BMW schließt sich Hybrid-Allianz von GM und DaimlerChrysler an BMW Joins GM, DaimlerChrysler to Develop Gas-Electric Engines Quelle: Hybrid Cooperation
--	--

Hybrid bei BMW. Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.



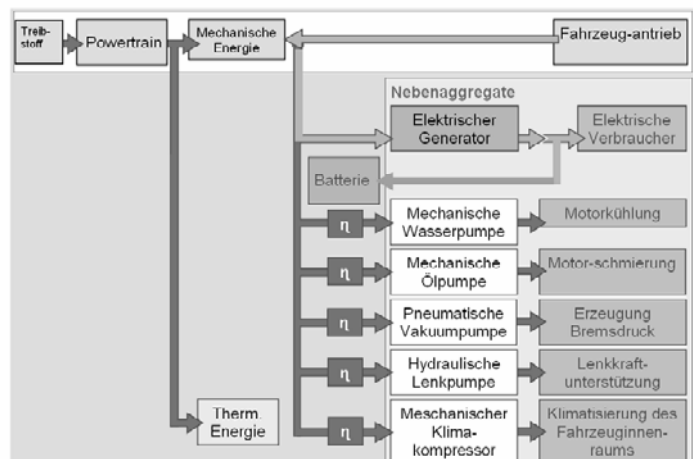
Energiemanagement.

Beispiel 1: Bremsenergieerückgewinnung (Rekuperation).



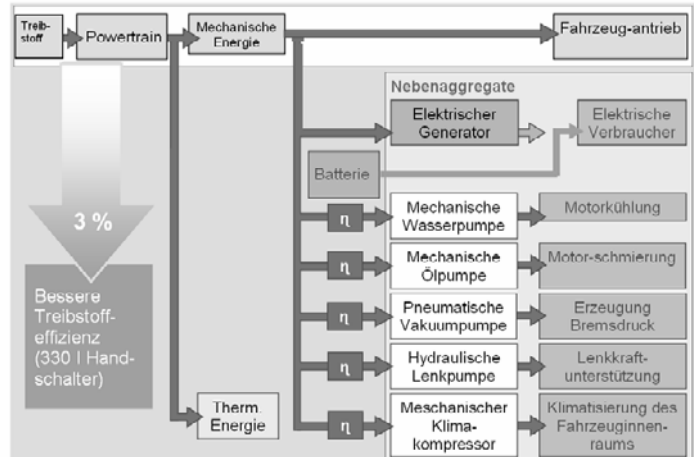
Energiemanagement.

Beispiel 1: Bremsenergieerückgewinnung (Rekuperation).



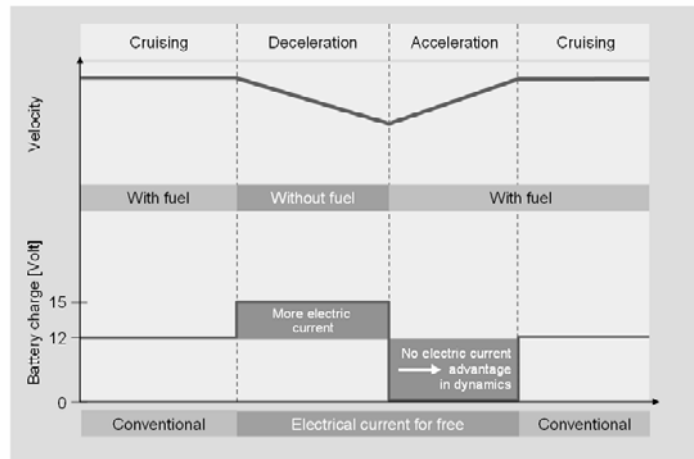
Energiemanagement.

Beispiel 1: Bremsenergieerückgewinnung (Rekuperation).



Energiemanagement.

Beispiel : Bremsenergieerückgewinnung (Rekuperation).



Energiemanagement in Kraftfahrzeugen

Stephan Raming

Technische Universität Berlin

Was heißt „Energiemanagement“?

Energiemanagement im KFZ bedeutet, die im Fahrzeug auftretenden Energieflüsse übergeordnet zu beobachten, Angebot und Bedarf zu bewerten und die Umwandlung von einer Energieform in eine andere zu steuern sowie die Speicherung effizient zu verwalten. Die Energien liegen im Fahrzeug als chemische, thermische, mechanische und elektrische Energie vor. Tab. zeigt die wichtigsten im Fahrzeug auftretenden Umwandlungen:

Tab. 1: Auftretende Energieumwandlungen im KFZ [TUB]

umgewandelt vorliegende in: Form:	chemisch	thermisch	mechanisch	elektrisch
chemisch	-	Verbrennungs- kraftmaschine (VKM)	-	Batterie (entladen)
thermisch	-	Wärmetauscher (Kühler, Heizung, Klima)	VKM	-
mechanisch	-	Bremsen Reibung allg.	Getriebe Reifen / Straße	Generator
elektrisch	Batterie (laden)	Heizung el. Verbraucher Zündkerzen	Anlasser Aktuatoren	Transformatoren (Zündspulen, Xenon-Licht)

Grundsätzlich wird Energie nicht verbraucht, sondern gespeichert oder umgewandelt. Sie gilt aber als verloren, wenn sie die Systemgrenzen des Fahrzeugs in Form von Wärme verlassen und sich der Umgebung angeglichen hat. Als „Verbraucher“ werden im Fahrzeug die Komponenten bezeichnet, die Energie aufnehmen und nicht in der Form abgeben, dass sie dem System erneut zur Verfügung steht.

Wie wird Energiemanagement im KFZ betrieben und was sind die Voraussetzungen dafür?

Elektrische Energie

Aktuell wird der Begriff „Energiemanagement“ überwiegend im Zusammenhang mit elektrischer Energie verwendet. Hierbei wird analog zur historischen Entwicklung zwischen Batteriemanagement, Verbraucher- bzw. Leistungsmanagement und Generatormanagement unterschieden.

Ziel des elektrischen Batteriemanagements ist es, die Haltbarkeit der Starterbatterie im KFZ zu verlängern und die Startfähigkeit der Antriebsmaschine zu gewährleisten. In den Pannenstatistiken der vergangenen Jahre taucht die entladene oder nicht mehr ausreichend ladefähige Batterie immer wieder an vorderster Stelle als Verursacher von Fahrzeugausfällen auf. Durch Batteriemanagement ist dem übergeordneten Controller jederzeit der Ladezustand der Batterie (engl. *State of Charge, SOC*) bekannt. Darüber hinaus ist der Controller in der Lage, anhand der mitgezählten Lade- und Entladezyklen auf den Lebensdauerzustand (engl. *State of Health, SOH*) zu schließen. Das so genannte Zyklisieren, also das wiederholende Entladen der Batterie bis zu einem niedrigen Ladezustand und das anschließende Laden reduziert die Kapazität der Batterie bis hin zum Totalausfall. Mit dem Wissen um den SOC kann somit vom Controller einer weiteren Entladung der Batterie, z.B. unter 50% der Kapazität, entgegen gewirkt werden. Abhängig vom ermittelten SOH kann die Skalierung des SOC an die aktuelle, verminderte Kapazität der Batterie angepasst werden. Stellt der Controller fest, dass bei dem ermittelten Lebensdauerzustand selbst bei 100% der verbleibenden Kapazität die vorhandene Energie nur noch knapp für den Motorstart ausreicht, kann der Fahrer rechtzeitig vor einem unkontrollierten Fahrzeugausfall zum Erneuern der Batterie aufgefordert werden. Die Voraussetzung für Batteriemanagement ist das Erfassen und Auswerten der elektrischen Ströme, die in die Batterie bzw. aus ihr heraus fließen. Dies geschieht mittels eines sog. Batteriesensors.

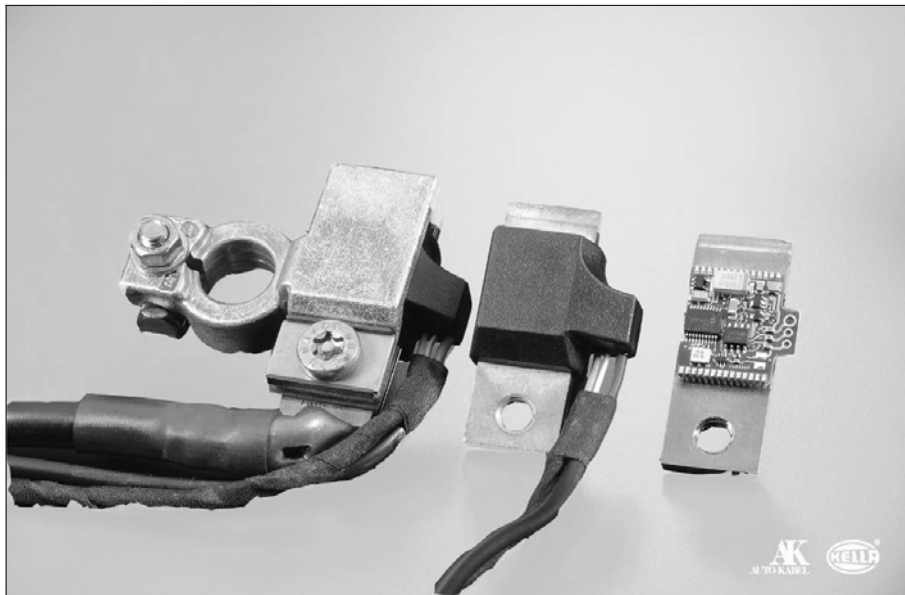


Abb. 1: Einzelteile des Batteriesensors [HELLA]

Dieser Sensor, der erst im Jahr 2003 bis zur Serienreife entwickelt wurde, besteht im Wesentlichen aus einem ohmschen Widerstand mit der Größenordnung von 50 bis 200 $\mu\Omega$ ($5 \cdot 10^{-5}$ bis $2 \cdot 10^{-4} \Omega$) und einer Microcontroller basierten Auswerteelektronik. Der Widerstand wird zwischen der Batterie und dem Bordnetz in Reihe geschaltet. Aus dem Spannungsabfall am Widerstand kann über die Beziehung $U = R \cdot I$ (Ohmsches Gesetz) der Strom berechnet werden.

Die steigende Zahl elektrischer Komponenten im Fahrzeug führte dann zur Entwicklung des elektrischen Verbrauchermanagements. Hierbei geht es darum, die Leistungsaufnahme der elektrischen Verbraucher zu steuern. In modernen Fahrzeugen übersteigt die Summe der Nennleistungen der einzelnen Komponenten die Leistungsfähigkeit des Generators teilweise um das Dreifache. Verantwortlich dafür sind vor allem die zunehmende Zahl von Steuergeräten und die Umstellung von hydraulischer auf elektrische Hilfskraftlenkung. Dazu kommen die zahlreichen Aktuatoren für die Fahrdynamik-Regelungssysteme (ABS, ESP, ASR). Aber auch der steigende Anspruch an den Komfort eines Fahrzeugs schlägt sich im Stromverbrauch nieder. Elektrische Fensterheber, Heckscheibenheizung und HiFi-Anlagen mit sechs oder mehr Lautsprechern sind Standard, Sitzheizung und elektrisch betätigte Klappen im Lüftungssystem keine Seltenheit mehr und auch der Federungskomfort wird heute in Fahrzeugen der Oberklasse serienmäßig elektrisch beeinflusst. In Zukunft ist mit der Einführung von elektrischen Bremssystemen (EWB), X-By-Wire sowie Multimedia-Anwendungen im Fahrzeug zu rechnen, was eine zusätzliche Belastung des elektrischen Bordnetzes mit sich bringen wird. Die Grenzen dieser elektrischen „Aufrüstung“ werden hier durch den Generator und die Batterie gesetzt. Bei der aktuellen Mercedes S-Klasse werden bereits serienmäßig flüssigkeitsgekühlte Generatoren verbaut, da sonst die anfallende Wärme

bei Volllast das Bauteil zerstören würde. Die Dimension des Generators lässt sich demnach nicht mehr beliebig erweitern, ohne das Kühlsystem des Antriebsmotors erheblich zu beeinflussen. Wird dennoch mehr Strom benötigt, als der Generator aktuell bereitstellen kann, so wird dieser der Batterie entnommen und später wieder nachgeladen. Da dieses Vorgehen wie angesprochen der Batterielebensdauer schadet, wird das Verbrauchermanagement eingesetzt, um übermäßige Lastspitzen im Bordnetz zu vermeiden. Dazu werden die Komponenten zum einen anhand ihrer Einschaltdauer unterteilt (z.B. kontinuierlich, lang, mittel, kurz) und zum anderen werden je nach Funktion Prioritäten (Sicherheit: hoch, Infotainment: mittel, Komfort: mittel - niedrig) vergeben. Bei aktuellen Bordnetzen wird das Ein- bzw. Ausschalten der Komponenten bereits über den CAN-Bus und entsprechende verbraucherseitige Controller gesteuert, um die Anzahl der Strom führenden Leitungen zu reduzieren. Statt die Verbraucher wie bisher per CAN-Botschaften nur ein oder aus zu schalten, überprüft das Bordnetz-Steuergerät (BSG) beim Verbrauchermanagement vorher die Verfügbarkeit der angefragten Energie. Im kritischen Fall werden ggf. Verbraucher mit niedriger Priorität zugunsten einer höheren abgeschaltet oder fordert diesen zu einem Moduswechsel mit geringerem Stromverbrauch auf.

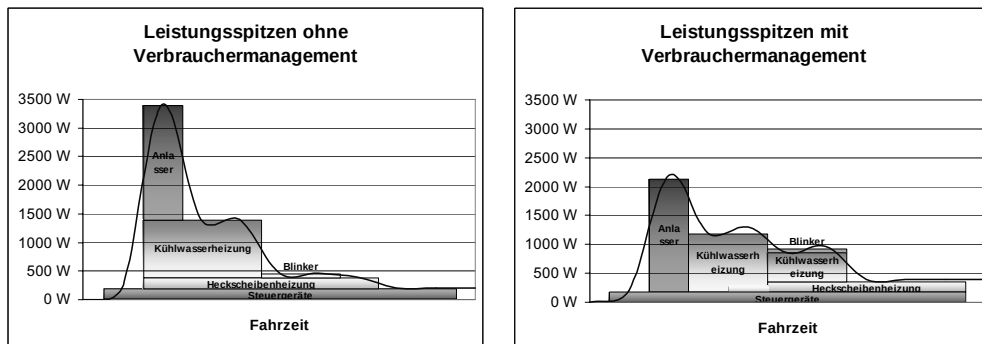


Abb. 2: Leistungsspitzen (Beispiele) im Fahrbetrieb mit und ohne Verbrauchermanagement [TUB]

Beispielsweise würde man wie in Abb. dargestellt die Heckscheiben- und Kühlwasserzusatzheizung verzögert einschalten, um ausreichend Energie für den Anlasser zur Verfügung zu stellen. Eine zwingende Voraussetzung für ein vollständiges elektrisches Verbrauchermanagement ist die konsequente Anbindung der Verbraucher über CAN-Controller, die als Schalter arbeiten. Damit würde allerdings eine Erweiterung des Bordnetzes jedes Mal ein Software-Update am BSG nach sich ziehen. Solange dies im Rahmen der üblichen Service-Intervalle geschieht, stellt es keine Hürde dar. Problematisch wird es allerdings bei Einbauten, die nicht durch den Fahrzeughersteller oder dessen autorisierten Servicepartner vorgenommen werden, wie z.B. Autoradios, HiFi-Verstärker oder Zubehörscheinwerfer. Darüber hinaus stellt das BSG einen zentralen Knoten dar, der bei einer Fehlfunktion den Ausfall aller elektrischen Verbraucher verursacht (Single Point of Failure). Einen Ausweg könnte das sich in der Entwicklung befindende „dezentrale“ Verbrauchermanagement schaffen. Hierbei kennen alle verbraucherseitigen CAN-Controller

den Zustand des gesamten Bordnetzes und entscheiden selbst, ob sie einschalten oder nicht. Das BSG übernimmt dabei die Überwachung und Konfliktbeseitigung. Bisher ungelöst ist auch hier der Umgang mit unsachgemäß hinzugefügten Komponenten. Mittelfristig Erfolg versprechend wäre eine Lösung, bei der die gleiche Technologie wie bei dem Batteriesensor eingesetzt würde, um einzelne Leitungsstränge zu überwachen und ggf. komplett abzuschalten, falls der detektierte Strom nicht den Angaben der Verbraucher-Steuergeräte entspricht.

Als Erweiterung des Verbrauchermanagements ist das elektrische Generatormanagement anzusehen. Während beim Verbrauchermanagement gewährleistet werden soll, dass die verfügbare elektrische Energie so verteilt wird, dass der sichere Betrieb des KFZ gewährleistet ist, versucht das Generatormanagement darüber hinaus noch den Kraftstoffverbrauch positiv zu beeinflussen. Die Wirkungsgrade der Generatoren im KFZ liegen je nach Drehzahl und Last zwischen unter 20% und max. 35% (siehe Abb.), was auf die Auslegung für ein großes Drehzahlband zurückzuführen ist.

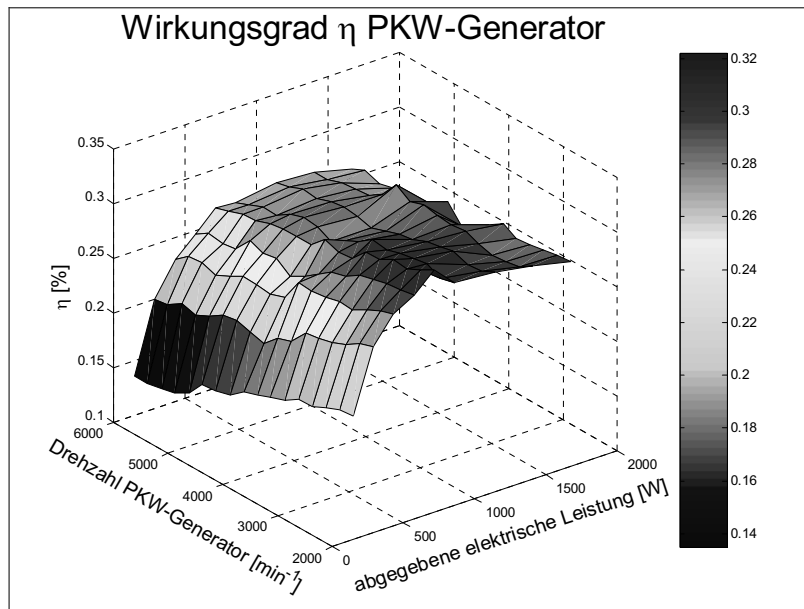


Abb. 3: Wirkungsgrade eines PKW-Generators in Abhängigkeit von Drehzahl und elektrischer Leistung [TUB]

Bei einem Strom von 120A bei 12,5V, was einer elektrischen Leistung von 1,5kW entspricht, fallen somit 3kW Wärmeleistung ab, während an der Kurbelwelle rund 4,5kW mechanische Leistung aufgenommen werden. Der Wirkungsgrad der Antriebsmaschine hängt ebenfalls von Drehzahl und Lastzustand ab. Anhand des Produktes der beiden Wirkungsgrade kann das BSG die Stromaufnahme der elektrischen Verbraucher so beeinflussen, dass sich der Einfluss der Stromerzeugung auf den Kraftstoffverbrauch minimiert, oder über den Generator ein Zusätzliches Moment aufbringen, um die Antriebsmaschine in einem günstigeren

Betriebspunkt zu betreiben. Dagegen kann in Schubphasen, bei denen die mechanische Energie der Antriebsmaschine aus der kinetischen Energie des Fahrzeugs gespeist wird, elektrische Energie „auf Vorrat“ erzeugt und in der Batterie gespeichert werden (Rekuperation). Wie groß die maximal erzielbaren Einsparungen sind, hängt von der Art und Weise der Fahrzeugnutzung ab. In Stadtzyklen beispielsweise ist der relative Verbrauchsvorteil, also der Vorteil gegenüber dem Fahrzeug ohne Generatormanagement und Rekuperation, größer, als bei konstanter Autobahnfahrt. Verschiedene Quellen geben hier Werte zwischen 3% und 10% relativem Verbrauchsvorteil an. Eine weiter entwickelte Form des Generatormanagements variiert die Ausgangsspannung am Generator (Multi-Voltage-Generator), um den Wirkungsgrad und vor allem die Leistungsdichte bei der Rekuperation zu erhöhen. Von dem gepufferten Zwischenkreis mit höherer Spannung (42V) wird dann der Strom über einen Gleichspannungswandler an das konventionelle Bordnetz verteilt. Verbraucher mit hoher Leistungsaufnahme könnten direkt mit der höheren Spannung versorgt werden, um so die Leitungsverluste zu reduzieren. Voraussetzung dafür ist ein Speicher, der die rekuperierte elektrische Energie um ein Vielfaches schneller aufnehmen kann, als es bei der konventionellen Batterie der Fall wäre. Weiter sollte der Speicher die prinzipbedingte permanente Zyklisierung unbeschadet überstehen. Untersuchungen haben die Kombination von einer konventionellen Batterie auf der niedrigen Spannungsebene und Super-Kondensatoren (SuperCaps) auf der höheren Spannungsebene als Erfolg versprechend identifiziert.

Eine Gemeinsamkeit der drei vorgestellten Management-Konzepte ist die teilweise Einschränkung der jeweils anderen. Zum Beispiel hat das einfache Generatormanagement zur Folge, dass die Batterie zyklisch belastet wird, beim Batteriemanagement müssen die Leitungsspitzen zulasten des Kraftstoffverbrauchs vom Generator abgefangen werden usw. Somit ist es nicht sinnvoll, jedes Management-Konzept für sich allein zu optimieren, sondern alle drei in einer gemeinsamen Kontrolleinheit zu vereinen und anzuwenden. Welches der Konzepte stärker verfolgt wird als das andere, bestimmt die Philosophie des jeweiligen Herstellers, analog zum Zielkonflikt bei der Auslegung von Fahrwerken

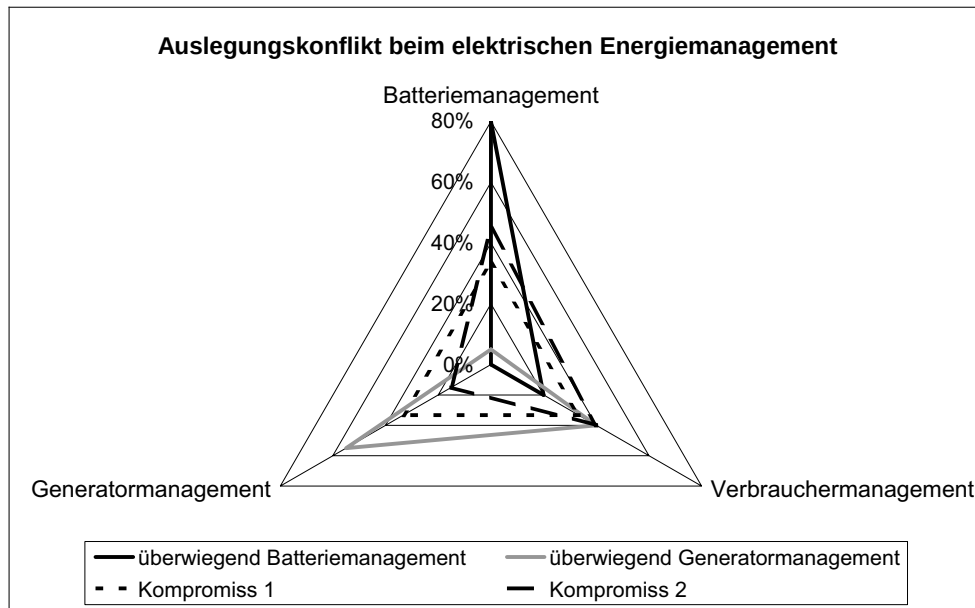


Abb. 4: Auslegungskonflikt beim elektrischen Energiemanagement [TUB]

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass der elektrische Energiebedarf in den kommenden Fahrzeuggenerationen noch stärker wachsen wird, so dass der Betrieb der Fahrzeuge ohne Energiemanagement nicht mehr realisierbar sein wird.

Mechanische Energie

Deutlich älter und verbreiteter sind die Maßnahmen für ein mechanisches Energiemanagement im KFZ. Anders als beim elektrischen Energiemanagement wird mechanische Energie nicht gespeichert, sondern bestenfalls gewandelt und verteilt. Die einfachste Form des mechanischen Energiemanagements stellt das Getriebe zwischen Antriebsmaschine und Antriebsrädern dar. Hier werden die Drehzahl und das Moment der Antriebsmaschine an den jeweiligen Fahrzustand angepasst. Was zuerst einmal banal erscheinen mag, birgt ein enormes Potential für Optimierungen. Im Falle eines stufenlosen Getriebes (CVT) ist bereits eine umfangreiche Strategie erforderlich, um für den jeweiligen Fahrzustand die Übersetzung zu finden, die den niedrigsten Kraftstoffverbrauch ermöglicht und gleichzeitig die Agilität des Fahrzeugs erhält. Damit entspricht diese Strategie der Definition des Energiemanagements. Die erste bewusste Energiemanagement-Maßnahme, bei dem die kinetische Energie des Fahrzeugs eingesetzt wurde, um Kraftstoff (chemische Energie) zu sparen, war die in den 80er Jahren eingeführte Schubabschaltung. Dabei wird im Schubbetrieb, also dem moderaten Verzögern des Fahrzeugs durch das Schleppmoment der Antriebsmaschine, die Kraftstoffzufuhr abgeschaltet und der Motor ausschließlich durch die kinetische Energie des Fahrzeugs in Bewegung gehalten. Eine Weiterentwicklung davon stellt die Bereits angesprochene Rekuperation von Bremsenergie dar. Hierbei kann die rekuperierte

Energie entweder direkt zum anschließenden Beschleunigen verwendet werden, oder aber den Bedarf anderer Komponenten decken. Erprobt wurden unter anderem Konzepte mit Schwungmassen- Feder- oder Druckspeichern. Im Fahrzeug hat sich aber nur die Umwandlung in elektrische Energie durchgesetzt. Die Speicherung erfolgt zum Teil in separaten elektrischen Speichern (SuperCaps) oder direkt in der Batterie des Bordnetzes. Die Rückumwandlung von kinetischer in elektrische Energie ist nur möglich, solange die Momentübertragung von der Straße bis zum Generator erhalten bleibt. Bei einer extremen Auslegung des Generatormanagements wäre Bordnetz ohne Rekuperation unterversorgt. In diesem Fall muss in den Rekuperationsphasen das Überbremsen der Reifen oder das Öffnen der Kupplung unbedingt verhindert werden.

Thermische Energie

Die Energieform, die im Fahrzeug am häufigsten auftritt, ist ohne Zweifel die thermische, denn wie in Tab. dargestellt wird jede andere Form der Energie zuletzt in Wärme umgewandelt. Im Falle der VKM liegt sie auf einem vergleichsweise hohen Niveau, so dass der nutzbare Anteil (Exergie) ebenfalls sehr hoch ist. Die Wärme allerdings, die durch die Bremsarbeit oder in elektrischen Verbrauchern entsteht, wird zurzeit nicht erneut gewandelt, sondern muss gegebenenfalls sogar über eine entsprechende Kühlung abgeführt werden. Das liegt zum einen daran, dass das Niveau, auf dem die Wärme vorliegt, so niedrig ist, dass der niedrige Wirkungsgrad des Umwandlungsprozesses den Aufwand nicht lohnt (Anergie), oder aber das Einbringen der Wärme in eine Arbeitsmaschine wie im Falle der Bremswärme ein bisher ungelöstes Problem darstellt. Dennoch lohnt es sich, über die sinnvolle Verteilung und effiziente Nutzung der Wärme nachzudenken, denn die Menge der thermischen Energie übersteigt die Summe der elektrischen und mechanischen Energien um mindestens das Zweifache. Zu Erklären ist das damit, dass die elektrische und mechanische Energie von der Antriebsmaschine erzeugt wird, dabei aber bei einem mechanischen Wirkungsgrad von max. 35% bereits rund 2/3 der chemischen Energie in Wärme umgewandelt werden. Weitgehend ungenutzt verlässt diese Wärme dann im Abgas bzw. im Kühlwasser über den Kühler das Fahrzeug. An kälteren Tagen wird die im Kühlwasser enthaltene Wärme noch zum Beheizen des Innenraums genutzt. Abgasturbolader nutzen zwar die kinetische Energie des strömenden Abgases, die darin enthaltene Wärme wird allerdings nur zum Aufheizen des Katalysators verwendet. Bei einzelnen Konzepten wurde versucht, die Abgas- oder Kühlwasserwärme nach dem Abschalten der VKM zu speichern und diese bei erneutem Motorstart zurückzuführen. Dadurch sollte die Warmlaufphase verkürzt und somit die schädlichen Emissionen und der Kraftstoffverbrauch vermindert werden. Das Kernproblem bestand in der Speicherung der thermischen Energie, die über einen genügend großen Zeitraum in die Umgebung entwich. Einige Systeme, die dieses Problem lösen konnten, wurden zwar in Serie gebaut, fanden aber keine flächendeckende Verbreitung. Stattdessen konnte sich überwiegend bei Dieselmotoren der Schadstoffklassen EURO3 und EURO4 die elektrische Zusatzheizung für Motoröl und Kühlwasser durchsetzen. Hierbei wird elektrische Energie verwendet, um schnell an verschiedenen Stellen Wärme zu erzeugen, mit der dann unter anderem Kraftstoff eingespart werden kann. Der Wirkungsgrad ist hierbei allerdings deutlich kleiner als eins, was bedeutet, dass mehr elektrische Energie aufgewendet wird, als chemische Energie in Form

von Kraftstoff eingespart wird. Der eigentliche Nutzen liegt hier in der Senkung der Emissionen. Eine weitere Wärmequelle im Fahrzeug ist der Kondensator der Klimaanlage. Die aus dem Innenraum entnommene Wärme liegt hier ebenfalls auf einem so niedrigen Niveau vor, dass eine weitere, effiziente Nutzung nicht lohnt.

Potentiale des integrierten Energiemanagements

Nach Ansicht der Automobilhersteller bzw. der Komponentenhersteller als dessen Zulieferer sind die Möglichkeiten zur Optimierung einzelner Komponenten wie Lichtmaschine, Klimakompressor, Hilfskraftlenkung und der VKM mit den herkömmlichen Methoden inzwischen weitgehend ausgeschöpft, oder das Erreichen des Maximums ist absehbar. Dazu kommt, dass sich Emissionssenkende Maßnahmen zunehmend negativ auf den Kraftstoffverbrauch auswirken. Zurzeit werden die teilweise vom Gesetzgeber geforderten Verbesserungen mit großem Entwicklungsaufwand, teuren, sehr speziellen Materialien und viel peripherer Technik rund um die VKM erkaufte. Ein Quantensprung wird allerdings nur durch die Einführung neuer Brennverfahren wie z.B. HCCI zusammen mit maßgeschneiderten Kraftstoffen erwartet. Kurzfristig Erfolg versprechend und deutlich weniger kostenintensiv scheint dagegen der Ansatz, nicht die Komponenten einzeln zu optimieren, sondern deren Zusammenwirken. Den Erfolg dieser Vorgehensweise bestätigen die zunehmend an Bedeutung gewinnenden Hybridfahrzeuge. Bei genauer Betrachtung finden sich in allen derzeitigen Hybridfahrzeugen alle Elemente des elektrischen und mechanischen Energiemanagements. Beim „Vollhybrid“ (z.B. TOYOTA Prius) stellt das Batteriemanagement den Zentralen Baustein für die Funktionsfähigkeit des Systems dar. Das stufenlose Getriebe wird hier über zwei durch ein Planetengetriebe verbundene elektrische Maschinen realisiert, die gleichzeitig auch als Generatoren arbeiten. Bei so genannten „Mild-Hybriden“ wird die rekuperierte Bremsenergie über den motorisch arbeitenden Generator wieder abgegeben, um den Kraftstoffverbrauch in Beschleunigungsphasen zu verringern. „Micro-Hybride“ beschränken sich auf die Rekuperation der Bremsenergie und das Wirkungsgrad optimierte Betreiben des Generators. Letztendlich sind Hybridfahrzeuge die konsequente Umsetzung der bisherigen Möglichkeiten des elektrischen und mechanischen Energiemanagements in verschiedenen Ausprägungen. Kennzeichnend für diese Fahrzeuge ist immer die Kombination eines vergleichsweise trägen Systems mit hoher Energiedichte mit einem sehr dynamischen System mit geringerer Energiedichte. Der Grund dafür ist recht trivial: Gäbe es ein einzelnes Antriebssystem mit der Zuverlässigkeit der VKM, der Dynamik und der Effizienz eines Elektromotors und gleichzeitig der Energiedichte von Kohlen-Wasserstoff basierten Kraftstoffen, wäre dieses sicherlich bereits in Verwendung. Somit lag es bei der Entwicklung der Hybridkonzepte auf der Hand, die hohe Leistung der VKM mit der Effizienz und der Dynamik einer elektrischen Maschine zu verknüpfen. Eine weitere Gemeinsamkeit bei der Entwicklung der Hybridfahrzeuge war die Bereitschaft, nicht stur an Traditionen fest zu halten, sondern unvoreingenommen die Variante zu verfolgen, die sich für die vorgesehene Betriebsweise als „Best of Benchmark“ herausstellt. Darüber hinaus müssen alle Erfolg versprechenden Konfigurationen in Betracht gezogen werden. So kam es beispielsweise dazu, dass zurzeit in PKWs eine Umstellung von direkt mechanisch

angetriebenen Nebenaggregaten auf elektrisch angetriebene stattfindet. Die elektrische Energie wird dabei aber nach wie vor über den Generator an der Kurbelwelle abgegriffen. Mithilfe so genannter „Auxiliary Power Units“ (APU) wäre man dagegen in der Lage, die benötigte Hilfsenergie unabhängig von der Antriebsmaschine zu erzeugen. Eine Brennstoffzelle beispielsweise könnte die elektrische Energie auch direkt aus der chemischen erzeugen. Solange allerdings das Tanken und Mitführen von Wasserstoff noch ein Problem darstellt, sind eher APU-Konzepte vorstellbar, bei denen ein zweiter, stationär betriebener Verbrennungsmotor den Generator und andere überwiegend stationär angetriebene Aggregate wie den Klimakompressor, die Lenkhilfepumpe oder den Luftpresser antreibt. Verwendet man für ein solches System eine Hubkolbenarbeitsmaschine, bei der die Wärme nicht durch interne Verbrennung erzeugt, sondern von außen zugeführt wird, kann man statt des notwendigen Kraftstoffs die Abgas- und Kühlwasserwärme der Antriebsmaschine sinnvoll verwenden. Dass ein solches System realisierbar ist, zeigt das Beispiel des „BMW-TurboSteamers“ (siehe Abb.).

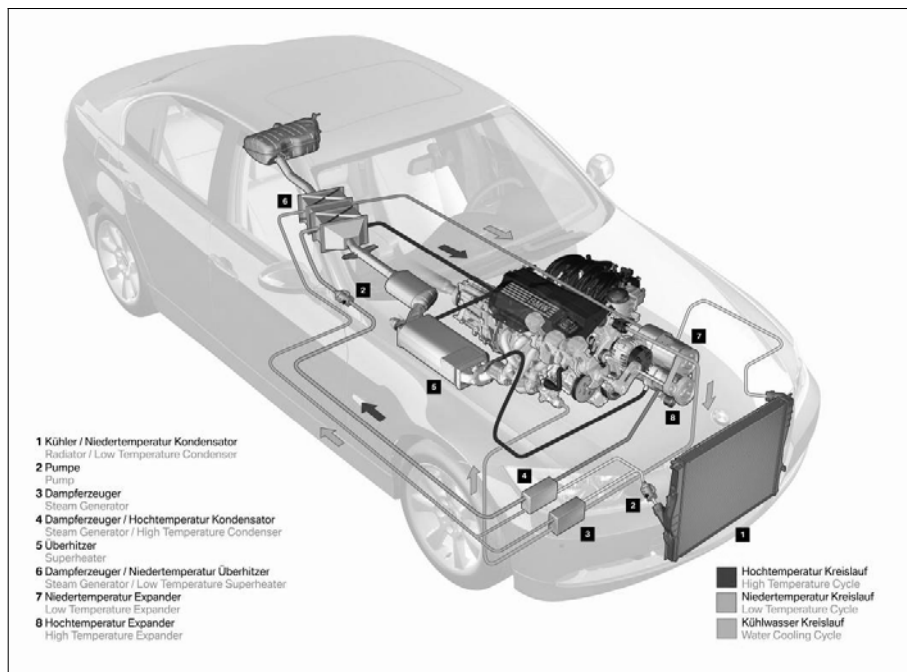


Abb. 5: Abwärmenutzung mit dem BMW-TurboSteamer [BMW]

Allerdings wird hierbei die rück gewonnene Wärmeenergie direkt an der Kurbelwelle eingekoppelt. Vorsichtige Schätzungen gehen bei diesem System von 10% Verbrauchssenkung (1,5l) oder 15% Mehrleistung (10kW) aus. Beim Einsatz einer APU würde die mechanische Energie der Expansionsmaschine zum Antrieb der oben aufgelisteten Nebenaggregate verwendet. Die dabei erzielbare Kraftstoffeinsparung hängt von den Rahmenbedingungen im Fahrzeug ab und kann nicht pauschal angegeben werden. Ein Dieselmotor beispielsweise gibt bei Last in der Regel weniger Wärme ab, als ein Ottomotor.

Darüber hinaus bewirkt die Erzeugung von Hilfsenergie aus Abwärme eine Entlastung der Antriebsmaschine, so dass von vornherein weniger Abwärme zur Verfügung steht. Dazu kommt der Umstand, dass zwischen den Komponenten im Fahrzeug inzwischen so komplexe Wechselwirkungen herrschen, dass das jeweilige Optimum nicht mehr durch einfaches Beobachten von außen zu finden ist. Die Gesamtheit aller zusammen wirkenden Systeme muss dazu in einer numerischen Simulation nachgebildet und durch umfassende Parametervariation optimiert werden. Die Ergebnisse dieser Simulation liefern dann noch immer nicht die „ultimative“ Fahrzeugkonfiguration für alle Betriebsweisen, sondern müssen immer im Zusammenhang mit dem jeweiligen Fahrzeugtyp und der Betriebsweise betrachtet werden. Unter „Betriebsweisen“ versteht man die Art und Weise WO und WIE das Fahrzeug eingesetzt wird. Das „WO“ bezieht sich auf die überwiegende Verwendung im städtischen Verkehr, auf Landstraßen oder auf Autobahnen. Beim „WIE“ wird zwischen Kurzstreckenbetrieb, z.B. Lieferverkehr oder Busse, und Langstreckenbetrieb wie Fernreisen oder Shuttle, unterschieden. Pauschal lässt sich nur sagen, dass Rekuperation im städtischen Verkehr am effektivsten eingesetzt werden kann, und dass LKW das größte Potential für eine Abwärmenutzung bieten.

Zusammenfassung und Ausblick

Der klassische Triebstrang mit einer Antriebsmaschine, die darüber hinaus sämtliche Nebenaggregate mit antreibt, hat hinsichtlich seiner Optimierung ein Maximum erreicht. Weitere Effektivitätssteigerungen sind nur Mithilfe zusätzlicher Komponenten zu erreichen, wobei deren eigener Energiebedarf den „Netto“-Gewinn schmälert. Das größte Verbesserungspotential versprechen die Systeme, die im Gegenzug den größten Eingriff in bestehende Fahrzeugarchitekturen erfordern, und somit auch die teuersten Varianten darstellen. Daher kann man zusammenfassend sagen, dass jeder Liter Kraftstoff, der weniger verbraucht wird, an anderer Stelle bezahlt werden muss. Ob sich die eine oder die andere Maßnahme rentiert, hängt also von der Verfügbarkeit und dem Preis des Kraftstoffes, aber auch von rechtlichen Rahmenbedingungen ab. Letztendlich wird sich immer das System durchsetzen, das für die meisten Anwendungsfälle den besten Kompromiss aus Kraftstoffeinsparung und Herstellungskosten darstellt.

Abkürzungen

ABS	Anti-Blockier System
APU	engl. <i>Auxiliary Power Unit</i> , hier: zusätzliche Energieversorgung
ASR	Antriebs-Schlupf Regelung
BSG	Bordnetz-Steuergerät
CAN	engl. <i>Controller Area Network</i> : Controller-Netzwerk mit Bustopologie
CVT	engl. <i>Continuous Variable Transmission</i> : stufenlos verstellbares Getriebe
ESP	Elektronisches Stabilitäts-Programm
EWB	engl. <i>Electronic Wedge Brake</i> : Bremssystem mit elektrischem Stellmotor und Keil
HCCI	engl. <i>Homogenous Charged Compression Ignition</i> : homogenisiertes Luft-Kraftstoffgemisch mit Kompressionszündung
SOC	engl. <i>State Of Charge</i> : Ladezustand
SOH	engl. <i>State Of Health</i> : Lebensdauerzustand
SuperCap	engl. <i>Super Capacitor</i> : Kondensator mit sehr großer Kapazität
VKM	Verbrennungs-Kraft-Maschine

Literatur

Hetzler, U.: Batterie- und Energiemanagement in PKW und LKW; ATZ 02/2006

Neudorfer, H.; Wicker, N.; Binder, A.: Rechnerrische Untersuchung von zwei Energiemanagements für Hybridfahrzeuge; ATZ 06/2006

Wagner, T.: Agentenorientiertes dezentrales Energie- und Funktionsmanagement für Kfz

Christ, T. Rekuperation in elektrischen Energiebordnetzen von Kraftfahrzeugen, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 623/2006

BMW-Pressemitteilung: Turbosteamer, Antrieb statt Verlustleistung, www.press.bmwgroup.com, 07. Dez. 2005

Brennstoffzellen

Ludger Blum

Forschungszentrum Jülich GmbH

Abstract

Elektrochemische Stromquellen sind als Energiespeicher in Form von Batterien und Akkumulatoren seit langer Zeit fester Bestandteil unserer technischen Welt. Die elektrochemischen Energiewandler, die Brennstoffzellen, waren dagegen bis vor wenigen Jahren nur Experten bekannt. Und dies obwohl sie die chemische Energie eines Brennstoffes ohne den Umweg über thermische und mechanische Zwischenschritte mit sehr hohem Wirkungsgrad bei minimaler Umweltbelastung direkt in elektrische Energie umwandeln können. Nach einer Erläuterung des Funktionsprinzips der Brennstoffzelle und der Funktion der einzelnen Brennstoffzellentypen wird auf den Stand bei der Anwendung in Fahrzeugen eingegangen.

Einleitung

Zwar wurde bereits in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts vor allem von Michael Faraday das theoretische Fundament der Elektrochemie erarbeitet und die Funktionsweise der Brennstoffzellen experimentell durch Sir William Grove nachgewiesen, der technische Durchbruch wurde jedoch nicht erreicht. Erst mit der bemannten Raumfahrt in den 60er Jahren schaffte die Brennstoffzelle zur Versorgung der Raumfahrer mit Elektrizität und Trinkwasser den Sprung in die Anwendung.

Welche Vorteile bieten nun die Brennstoffzellen (BZ) im Vergleich zu anderen Stromquellen?

Eine Brennstoffzelle ist ein elektrochemischer Energiewandler, in dem die chemische Energie eines Brennstoffes auf direktem Weg in elektrische Energie umgewandelt wird. Im Gegensatz zu den elektrochemischen Speichern, den Batterien, in denen die Energie in den Elektroden gespeichert ist, kann die Brennstoffzelle so lange Energie liefern, wie ihr Brennstoff und Oxidationsmittel aus einem separaten Speicher zugeführt werden. In der Zelle selbst läuft ein Prozess ab, welcher der Umkehrung der Elektrolyse entspricht: Brenngas, z. B. Wasserstoff, reagiert mit Sauerstoff entsprechend der Knallgasreaktion. Allerdings läuft dieser Prozess „gezähmt“ ab, d.h. die Reaktion findet in zwei Teilschritten an zwei getrennten Orten statt. Die Trennung der Reaktionspartner erfolgt durch den Elektrolyten. In diesem erfolgt der Ladungsaustausch zwischen Anodenseite und Kathodenseite mittels geladener Teilchen, den Ionen. An der Anode wird der Wasserstoff oxidiert und gibt seine Elektronen ab, die in einem äußeren Stromkreis Arbeit verrichten können. Am positiven Pol des

Elementes, der Kathode, wird der Sauerstoff unter Elektronenaufnahme aus dem äußeren Stromkreis zu O_2^- reduziert. Je nach Brennstoffzellentyp wandern Anionen (z.B. O_2^-) oder Kationen (z.B. H^+) durch den Elektrolyten und bilden mit dem Reaktionspartner an der gegenüberliegenden Elektrode Wasser. Ohne Stromfluss stellt sich auf Grund des unterschiedlichen Sauerstoffpartialdruckes auf den beiden Seiten des Elektrolyten eine Spannung zwischen den Elektroden von ca. 1 V ein. Damit diese Reaktionen mit technisch interessanter Stromdichte ablaufen, sind hochwirksame Katalysatoren mit sehr großer innerer Oberfläche erforderlich. Hierdurch sind über 1 A/cm² bei einer Zellspannung von 0,7 V realisierbar. Der Wasserstoffverbrauch pro erzeugte kWh beträgt ca. 0,5 m³, woraus ca. 0,4 l Wasser gebildet werden. Durch diesen Prozess der sog. „kalten Verbrennung“ kann die Brennstoffzelle deutlich höhere Wirkungsgrade als konventionelle thermische Verfahren erreichen bei gleichzeitig erheblich verringerter Umweltbelastung.

Brennstoffzellentypen

Übersicht

Abhängig vom verwendeten Elektrolyten unterscheidet man verschiedene Arten von Brennstoffzellen. Die unterschiedlichen Elektrolyte erfordern wiederum jeweils spezifische Betriebsbedingungen und Temperaturen. Die verschiedenen Typen fasst man zu Niedertemperatur-, Mitteltemperatur- und Hochtemperatur-Brennstoffzellen zusammen.

Die wichtigsten Vertreter der Niedertemperatur-Brennstoffzellen sind die Alkalische (AFC)- und die Polymerelektrolyt-BZ (PEFC). Die AFC wird wegen ihres besonders hohen Wirkungsgrades vorwiegend in der Raumfahrt eingesetzt. Einem breiteren Einsatz steht die Empfindlichkeit des Elektrolyten gegen das CO₂ aus der Luft entgegen. Dieses Handicap entfällt bei der PEFC, deren Elektrolyt aus einer wasserstoffionenleitenden Kunststoffmembran besteht. Dieser Brennstoffzellentyp wird zurzeit für die verschiedensten Anwendungen getestet. Im Blickpunkt des Interesses steht der Einsatz in Fahrzeugen als umweltfreundlicher und hocheffizienter Stromlieferant für den Elektromotor. Ein weiterer Anwendungsschwerpunkt für die PEFC ist der Bereich der Hausenergieversorgung. Hier wird an autarken und an netzgebundenen Systemen zur Strom- und Wärmeversorgung in Ein- und Mehrfamilienhäusern gearbeitet.

Der wesentliche Vertreter der Mitteltemperatur-Brennstoffzellen, die Phosphorsäure-BZ (PAFC), wird bei ca. 200°C betrieben. Aufgrund der höheren Betriebstemperatur ist dieser Zelltyp unempfindlicher gegen Verunreinigungen im Brenngas, was den Aufwand für die Gasreinigung (vor allem bei Verwendung von reformiertem Erdgas) reduziert. Weltweit wurden bereits mehr als 280 Anlagen des Marktführers UTC (USA) installiert. Die Leistung dieser als Blockheizkraftwerke eingesetzten Anlagen beträgt 200 kW.

Der Leistungsbereich von 100 kW bis zu einigen MW wird von den Hochtemperatur-Brennstoffzellen anvisiert. Die Karbonatschmelze-BZ (MCFC) wird bei ca. 650°C betrieben. Bei dieser Temperatur liegen die als Elektrolyt verwendeten Salzschnmelzen in flüssigem Zustand vor. Die hohe Betriebstemperatur erlaubt den direkten Einsatz von Erdgas ohne

aufwändige Gasaufbereitung, wodurch der elektrische Wirkungsgrad des Systems auf über 50% ansteigt, gegenüber ca. 40% bei PEFC und PAFC oder auch bei konventioneller Technik. Erste 250 kW Anlagen der Firma MTU werden zurzeit weltweit getestet. Entwicklungsaufwand muss noch in die Verbesserung der Langzeitstabilität der verwendeten Materialien in Verbindung mit der aggressiven Salzsäure und in die weitere Optimierung und Verbilligung der Anlage gesteckt werden.

Das System mit dem höchsten Wirkungsgradpotential, aber auch den höchsten Anforderungen an die Temperaturfestigkeit der Werkstoffe, ist die Oxidkeramische-BZ (SOFC). Diese wird bei 700 bis 1000°C betrieben. In diesem Temperaturbereich ist die Sauerstoffionenleitfähigkeit des keramischen Elektrolyten so hoch, dass Stromdichten erreicht werden können, die mit denen von Niedertemperatursystemen vergleichbar sind. Und dies ohne Verwendung von Edelmetallkatalysatoren, was einen wichtigen Beitrag zur Kostenreduktion leistet. Allerdings stellen die hohen Betriebstemperaturen entsprechende Anforderungen an die verwendeten Materialien. Am Forschungszentrum Jülich liegt der Entwicklungsschwerpunkt bei der Optimierung der SOFC für abgesenkte Betriebstemperaturen (< 800°C) bei gleichzeitiger Steigerung der Leistungsdichte. Beides dient der Reduktion der Kosten. Als weiterer Einsatzbereich für die SOFC wird die Hausenergieversorgung gesehen, wo ein deutlich einfacheres System möglich wäre als bei der PEFC, da die vor allem bei kleinen Anlagen aufwändige Gasaufbereitung weitgehend entfällt, weshalb auch die Anwendung als APU für Fahrzeuge untersucht wird.

Im Folgenden werden einige zusätzliche Details zu den für mobile Anwendungen besonders interessanten Brennstoffzellentypen dargestellt.

Polymerelektrolyt Brennstoffzelle PEFC

Der wichtigste Vertreter der Niedertemperatur BZ ist die PEFC. Hier ist im Vergleich zur immobilisierten AFC die elektrolytgetränkte Matrix durch eine feuchte protonenleitende Kunststoffmembran ersetzt. Diese Membrane wird zwischen zwei mit Platin imprägnierten porösen Elektroden eingebaut. Die Rückseite der Elektroden wird hydrophobiert durch eine Beschichtung mit einer geeigneten Substanz, wie beispielsweise Teflon™. Diese wasserabweisende Beschichtung ermöglicht die Gasdiffusion zur Katalysatorschicht.

Der eigentliche Entwickler dieses Typs Brennstoffzelle war GE (General Electric) zu Beginn der 60er Jahre. Zunächst wurde sulfoniertes Polystyrol als Membran verwendet.

Eine erste Anwendung fand diese BZ im Gemini-Projekt der NASA. Aber wegen Problemen mit dem Wassermanagement und unzureichender Langzeitstabilität (< 500h) bei gleichzeitig geringer Leistungsdichte wurde beschlossen, im Apollo-Programm zur AFC zu wechseln. Zurzeit ist geplant, bei der nächsten Shuttle Generation wieder eine PEFC einzusetzen, wofür entsprechende Entwicklungsaktivitäten laufen.

Seit 1967 ist ein sulfoniertes perfluoriertes Polymer namens Nafion™ verfügbar, das von DuPont für die Chlor-Elektrolyse entwickelt wurde. Dieses Material hat deutlich verbesserte Eigenschaften gegenüber Polystyrol.

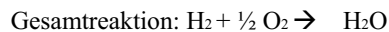
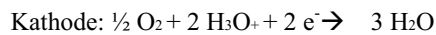
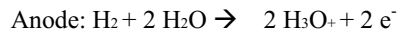
Trotzdem sank bis Ende der 70er Jahre das Interesse an der PEFC, da weiterhin massive Probleme mit dem Wassermanagement vorhanden waren. GE beendete seine Aktivitäten und vergab Lizenzen an andere Firmen, wie z. B. Siemens (1983).

Seit Ende der 80er erlebt die PEFC ein ständig steigendes Interesse, nicht zuletzt wegen der Aktivitäten von Ballard und Daimler Chrysler.

In dieser Zeit wurde die Leistungsdichte um einen Faktor 10 erhöht bei gleichzeitiger Reduktion der Katalysatorbelegung um den Faktor 100 (von 28 mg/cm² auf 0,2 mg/cm²).

Durch den „sauren“ Charakter des Elektrolyten findet die Wasserproduktion auf der Sauerstoffseite statt. Und zwar fällt das Reaktionswasser flüssig an, was die Wasserentsorgung vereinfacht, die Strömungsgleichverteilung durch die entstehende 2-Phasenströmung allerdings erschwert.

Der Reaktionsmechanismus bei der PEFC lautet:



Den internen Ladungstransport übernehmen H₃O⁺-Ionen. Die Reaktion verbraucht Wasser auf der Anodenseite und produziert Wasser auf der Kathodenseite. Der Verbrauch auf der Anodenseite muss durch Rückdiffusion durch den wasserhaltigen Elektrolyten ausgeglichen werden. Der damit verbundene Wasserhaushalt in der Membran stellt eines der wesentlichen Probleme beim Betrieb einer PEFC dar. Als Erfahrungswert gilt, dass unterhalb einer Betriebstemperatur von 60°C die Zelle ohne Befeuchtung der Gase betrieben werden kann (Leistungseinbuße bis 40%). Oberhalb 60°C transportiert die Luft mehr Wasser aus der Zelle ab, als produziert wird, was zu einem partiellen Austrocknen führt (Leistungseinbruch, Undichtigkeiten). Um ein Austrocknen der Membran zu vermeiden, muss bei größeren Leistungsdichten das Brenngas befeuchtet werden, was zusätzlichen Aufwand bedeutet.

Durch den sehr geringen Innenwiderstand des Elektrolyten (bedingt durch dessen geringe Dicke) sind sehr hohe Leistungsdichten realisierbar.

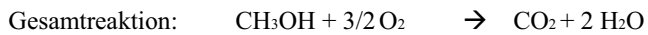
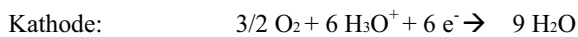
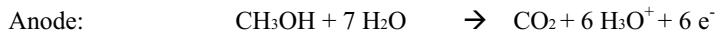
Der technische Entwicklungsstand der PEFC ist bereits sehr weit fortgeschritten, wenn auch Probleme wie Zuverlässigkeit, Langzeitstabilität und Kosten noch nicht zufrieden stellend gelöst sind.

Weltweit stellen zahlreiche Firmen Stack-Komponenten bzw. Stacks her oder verwenden Stacks namhafter Hersteller für ihre Anwendungen.

Direktmethanol Brennstoffzelle DMFC

Die DMFC ist von den verwendeten Materialien und vom Aufbau einer PEFC sehr ähnlich. Allerdings ist sie in der Lage an der Anode den flüssigen Brennstoff Methanol direkt umzusetzen wobei Wasserstoff und CO_2 erzeugt wird. Dies reduziert den verfahrenstechnischen Aufwand erheblich, da die Aufbereitung (Reformierung) des Brennstoffs wegfällt.

Der Reaktionsmechanismus bei der DMFC lautet:



Den internen Ladungstransport übernehmen wieder H_3O^+ -Ionen. Die Reaktion verbraucht Wasser auf der Anodenseite und produziert Wasser auf der Kathodenseite. Der Verbrauch auf der Anodenseite wird in diesem Fall auf einfache Weise durch die wässrige Methanollösung zur Verfügung gestellt, wodurch die Geschwindigkeit der Rückdiffusion durch Membran kein kritischer Parameter ist. Als wesentliche Probleme stellen sich folgende Punkte dar:

- mangelhafte Kinetik der elektrochemischen Prozesse, hohe Überspannungen
- Methanol- und Wasserpermeation durch die Membran (Brennstoffverluste)
- Mischpotentialbildung an der Kathode (Spannungsverluste)

Diese Probleme bedingen eine deutlich höhere Katalysatorbelegung als bei der PEFC (ca. Faktor 10) und führen zu einer deutlich geringeren Leistungsdichte ($< 20\%$).

Die DMFC ist vor allem für Leistungen im Watt bis Kilowatt-Bereich von Interesse, da bei diesen kleinen Systemen die Wasserstoffspeicherung bzw. die Brennstoffaufbereitung besonders kritisch ist.

Oxidkeramische Brennstoffzelle SOFC

Die oxidkeramische Brennstoffzelle SOFC wird in zwei unterschiedlichen Konzepten entwickelt. Die Entwicklung begann mit dem Röhrenkonzept, das vor allem von Siemens Westinghouse und auch von Mitsubishi Heavy Industry verfolgt wird und in Leistungsgrößen bis 200 kW demonstriert wurde. Diese Technologie beruht darauf, dass keramische Röhren durch Extrudieren und anschließendes Sintern und Beschichten hergestellt werden. Das Röhrendesign bietet den Vorteil guter mechanischer Stabilität, hat aber einen hohen Innenwiderstand. Dieser Nachteil wird beim planaren Konzept vermieden, wobei hier größeres Augenmerk auf die mechanische Festigkeit und die Abdichtung der Zellen gelegt werden muss. Obwohl Siemens Westinghouse die tubulare Technik bereits sehr weit entwickelt hat konzentrieren sich doch die meisten Entwickler weltweit auf das planare Design, da es höhere Leistungsdichten verspricht, verbunden mit dem Potential geringerer Fertigungskosten. Unterschiedliche planare Konzepte werden in Europa von Rolls-Royce und Sulzer sowie von verschiedenen Forschungseinrichtungen, wie dem FZJ, der DLR oder

Risoe/Dk verfolgt. Bei der SOFC besteht der feste Elektrolyt aus einer Oxidkeramik, vorzugsweise Zirkonoxid, das durch Ersatz von 16-20 At% des vierwertigen Zirkonium durch ein dreiwertiges Ion, meist Yttrium, sauerstoffionenleitend wird. Bei der SOFC werden in den meisten Fällen folgende Werkstoffe verwendet:

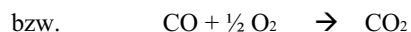
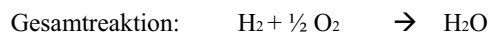
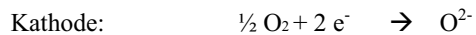
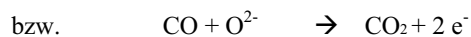
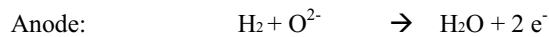
- Brennstoffelektrode (Anode) aus einem Nickel/Zirkonoxid-Cermet
- Elektrolyt aus dotiertem Zirkonoxid (YSZ)
- Lufterlektrode (Kathode) aus einem perowskitischen Lanthan-Strontium (Calcium) - Manganat (elektronenleitfähige Keramik)

Aus diesen Materialien ist prinzipiell jede SOFC, ob tubular oder planar, aufgebaut.

Es werden zahlreiche alternative Materialien untersucht, vor allem für den Betrieb bei abgesenkten Temperaturen. Allerdings kann hier noch kein Elektrolyt-Material konkurrenzfähige Kennwerte bieten.

Die Hochtemperatur-Brennstoffzelle (SOFC) hat den großen Vorteil, dass sie als Sauerstoff-Ionenleiter aufgrund der hohen Betriebstemperatur nicht auf Wasserstoff angewiesen ist, sondern im Prinzip (ähnlich wie die MCFC) alle oxidierbaren Brennstoffe verwerten kann; insbesondere stellt CO kein Problem dar. Bei den meisten Anlagen wird Erdgas für die Energiegewinnung eingesetzt, es ist aber auch nach entsprechender Vorreinigung Kohlegas oder Biogas verwendbar. Bei Verwendung von Erdgas ist eine teilweise Vorreformierung notwendig, um ein Cracken der höheren Kohlenwasserstoffe in der Brennstoffzelle und die damit verbundene Kohlenstoffabscheidung zu vermeiden.

Der Reaktionsmechanismus bei der SOFC lautet:



Die Reaktion verbraucht Sauerstoff auf der Kathodenseite und produziert die doppelte Anzahl Mole Wasserdampf auf der Anodenseite.

Bei der SOFC stellt die hohe Betriebstemperatur besondere Anforderungen an die Anlagentechnik, bietet aber auch besondere Möglichkeiten. Sie erlaubt im Vergleich zu Niedertemperatur-Brennstoffzellenanlagen sehr hohe elektrische Anlagenwirkungsgrade von 50 bis 60% und bei Anlagen größer 10 MW bei speziellen Hybridanordnungen sogar bis 70%.

Das in Jülich entwickelte Substratkonzept unterscheidet sich vom bisher üblichen planaren Konzept vor allem durch das Dickenverhältnis von Elektrolyt und Anode. Aufgrund der notwendigen mechanischen Stabilität muss eine der Schichten über eine gewisse Mindestdicke verfügen. Im klassischen Konzept ist die tragende Schicht der Elektrolyt mit

einer Stärke von etwa 150 bis 200 μm , die nur 50 μm dicken Elektroden sind auf beiden Seiten aufgebracht. Das Elektrolytmaterial weist einen im Vergleich zu den anderen Komponenten hohen spezifischen elektrischen Widerstand auf und ist deshalb zur Steigerung der spezifischen Leistung einer Brennstoffzelle möglichst dünn zu halten. Das Jülicher Konzept weist der ca. 1 mm dicken Anode die Rolle der mechanisch tragenden Schicht zu. Hierauf befindet sich die nur ca. 5 -10 μm dicke Elektrolytschicht, auf der wiederum die etwa 50 μm dicke Kathode aufgetragen wird.

Die durch die vergrößerte Substratdicke erhöhte mechanische Festigkeit gestattet die Produktion größerer Zellen. Die Fläche der im Forschungszentrum Jülich hergestellten Zellen konnte in den vergangenen Jahren von 5x5 cm^2 auf 25x25 cm^2 gesteigert werden, bei gleicher Qualität hinsichtlich der Leistungsdichte (0,9 A/ cm^2 bei 0,7 V und 800°C), der Gasdichtigkeit sowie der Ebenheit der Zellen. Die dünne Elektrolytschicht erlaubt den Betrieb bei niedrigerer Temperatur (< 800°C im Vergleich zu ca. 950°C bei herkömmlichen Systemen), was die Verwendung konventioneller - und damit kostengünstiger - Werkstoffe in der Anlage gestattet.

Die Einzelzellen werden durch Interkonnektoren miteinander verbunden und zu einem Stack zusammengebaut. Für den Betrieb bei sehr hohen Temperaturen werden keramische Interkonnektoren aus Lanthanchromat bevorzugt. Da diese keramischen Platten in der Größe beschränkt sind, hohe Sintertemperaturen erfordern, unterschiedliches thermisches Ausdehnungsverhalten in oxidierender und in reduzierender Atmosphäre haben und eine verhältnismäßig schlechte elektrische und thermische Leitfähigkeit besitzen, gibt es eine deutliche Tendenz zu metallischen Interkonnektoren. Der Vorteil der keramischen Platten ist die vernachlässigbare Korrosion und damit die geringe Alterung der Kontakte, was das Interesse an diesem Material aufrechterhält. Die metallischen Interkonnektoren erlauben (und verlangen auch) die Verringerung der Betriebstemperatur und ermöglichen die Herstellung größerer Interkonnektorplatten. Die gute Wärmeleitfähigkeit verringert die Temperaturgradienten im Stack und erlaubt größere Temperaturunterschiede zwischen Gaseingang und Ausgang, was die Luftmenge verringert, die für die Kühlung notwendig ist. Der Stackaufbau des FJ zeichnet sich durch die Verwendung großflächiger, ebener Anodensubstratzellen mit Zellabmessungen von 20x20 cm^2 , durch metallische Interkonnektoren sowie durch die Verwendung von Glaslot für die Abdichtung aus. Anfang November 2000 konnte in einem Stack (20x20 cm^2) mit 5 Zellen erstmalig eine elektrische Leistung von 1 kW (bei 900°C) gezeigt werden. Mit einem 60-Zeller wurde 2004 bei 800°C eine elektrische Leistung von 11,9 kW mit Methan und interner Reformierung bei einer Leistungsdichte von 0,55 W/ cm^2 bei 740 mV Zellspannung erreicht. Komplette Anlagen konnten bislang noch nicht betrieben werden; eine erste 20 kW Anlage soll Ende 2006 in Betrieb gehen.

Anforderungen an die Anlage

Um eine Brennstoffzelle betreiben zu können, müssen verschiedene Regelkreise und Steuerungen installiert werden:

- elektrische Leistung
- Brenngasfluss proportional zum Strom
- Luftdurchsatz proportional zum Strom
- Luftdurchsatz/Kühlmedium proportional zur max. Stacktemperatur
- Gastemperaturen am Stackeintritt
- Befeuchtung
- Produktwasserabtrennung
- Anfahren
- Aufwärmen
- Abschalten
- Sicherheitsmaßnahmen

Um diesen Anforderungen zu genügen, sind verschiedene Anlagenkomponenten erforderlich. Das Brenngas muss in einem Gasversorgungssystem den Anforderungen entsprechend, d.h. proportional dem produzierten elektrischen Strom, geregelt zugeführt werden. Hier ist auch die Mimik für Ein- und Abschalvorgänge untergebracht. Im nachfolgenden System erfolgen die Gasaufbereitung (z. B. die Entschwefelung und partielle Vorreformierung bei der SOFC oder bei der PEFC die komplette Reformierung, Shift, Nachoxidation und Befeuchtung) und die rekuperative Vorwärmung auf die erforderliche Eintrittstemperatur in den Stack. Ähnliches geschieht auf der Luftseite, wobei dort die Aufbereitung weniger aufwändig ist. Das in der Brennstoffzelle nicht genutzte Brenngas wird mit der Abluft nachverbrannt, was bei der SOFC aufgrund der hohen Temperatur der Abgase ohne zusätzlichen Katalysator erfolgen kann. Das entstehende heiße Abgas steht dann zur Abwärmenutzung zur Verfügung und kann z. B. für Heizzwecke oder zur Dampferzeugung verwendet werden. Der produzierte Gleichstrom muss mittels eines Inverters in netzkompatiblen Wechselstrom umgewandelt werden. Um diese Anlage zu steuern und zu regeln und um die zahlreichen Messdaten zu erfassen, sind entsprechende Komponenten erforderlich.

Anwendungsmöglichkeiten im Automobilbereich

Pkw Antrieb

Die treibende Kraft für die Weiterentwicklung der PEFC waren die Aktivitäten von Daimler Chrysler zum Einsatz der Brennstoffzelle als Antrieb im Pkw. Motivation hierfür waren aus technischer Sicht die folgenden Vorteile:

- Null-Emissions-Fahrzeuge (keine CO₂ und keine lokalen Emissionen)
- Geräuscharmer Fahrbetrieb
- Besserer Wirkungsgrad als Verbrennungsmotor
- Hohe Dynamik durch den Elektroantrieb
- Stromversorgung an Bord für interne/externe elektrische Verbraucher sowie zukünftig zur Integration zusätzlicher Komfort-Installationen (z.B. Standklimatisierung)
- Durch den Einsatz von Wasserstoff werden in Zukunft unterschiedliche Energiequellen in den Verkehrssektor eingeführt (Unabhängigkeit von Erdöl)

Diese Vorteile gelten in dieser Form allerdings nur beim direkten Einsatz von Wasserstoff im Fahrzeug. Versuche mit flüssigen Treibstoffen und “An-Bord-Reformierung“ haben deutlich gemacht, dass zum einen der verfahrenstechnische Aufwand (und damit Volumen, Gewicht und Kosten) den verfügbaren Rahmen sprengt und zum anderen die Vorteile beim Wirkungsgrad zumindest fraglich sind. Aus diesen Gründen werden seit einigen Jahren im Wesentlichen Demonstratoren gebaut und getestet, die direkt mit Wasserstoff betrieben werden. Hierdurch verschiebt sich der Entwicklungsschwerpunkt etwas hin zur Frage der geeigneten Speicherung des Wasserstoffs im Fahrzeug. Metallhydride scheiden auf Grund ihres hohen spezifischen Gewichts (zumindest zurzeit) aus. Der Schwerpunkt liegt auf Flüssigwasserstoff (Problem der Abdampfverluste und der Tankkosten) und auf Druckwasserstoff (Problem der Sicherheit und der Speicherdichte → Entwicklung von 700 bar Speichern). Insgesamt konzentriert sich die PEFC Entwicklung für Pkw auf folgende Punkte:

- Kosten des Brennstoffzellensystems
 - MEA: Pt Beladung < 0,3 mg/cm²
 - Stack: < 25 €/kW
 - System: < 45 €/kW
- Zuverlässigkeit und Dauerhaltbarkeit des Systems
 - 5.000 h, Kaltstartfähig: -30°C
 - Performance-Verluste: max. 10%
- Leistungsdichte Gesamtsystem > 2,5 kW/l
- Neue Entwicklungen im Bereich HT-Membran und HT-Katalysatoren > 120°C
- Leistungsfähige Wasserstoffspeichersysteme
- Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur

Fahrzeug APU

Der Stromverbrauch in Fahrzeugen hat in den letzten Jahren kontinuierlich zugenommen. Hierdurch stößt die konventionelle Technik an ihre Grenzen, weshalb die Brennstoffzelle auch für die Anwendung als APU (Auxiliary Power Unit) interessant wird. Allerdings gelten hier, was die Brennstoffbereitstellung angeht, die gleichen Probleme wie oben beschrieben. Sofern für den Antrieb bereits Wasserstoff an Bord vorhanden ist spricht alles für den Einsatz einer PEFC. Für Benzin- und Diesel- betriebene Fahrzeuge wird hier auch die SOFC interessant, da die Gasaufbereitung wesentlich einfacher wird. Vor allem BMW ist hier die treibende Kraft gewesen, was auch dazu geführt hat, dass in den USA im SECA Programm (Strategic Energy Conversion Alliance) ein Schwerpunkt auf die SOFC Entwicklung für APU Anwendungen gelegt wird. Ein wesentliches Problem für die SOFC in dieser Anwendung stellt die erforderliche schnelle Aufheizzeit dar, die im Extremfall bei 2 Minuten liegen kann. Hierzu müssen noch wesentliche Entwicklungsarbeiten bei der thermomechanischen Festigkeit und der Gewichtsreduktion durchgeführt werden. Insgesamt ergeben sich folgende Schwerpunkte der SOFC Entwicklung für Fahrzeug-APU:

- Verkürzung der Startzeit
- Verbesserung der Lebensdauer (Zyklusfestigkeit)
- Erhöhung der spezifischen Leistungsdichte
- Reduktion der Wärmeverluste
- Verbesserung der Brennstoffnutzung
- Verkleinerung der Hilfsenergie für Nebenaggregate
- Reduktion der Kosten

Portable und kleine mobile Anwendungen

Im Bereich kleiner portabler Systeme und kleiner Fahrzeuge mit einer Leistung unter 5 kW ist die DMFC von großem Interesse. Hier sind die Konkurrenz im Wesentlichen Batteriesysteme mit hohen spezifischen Kosten bei vergleichsweise geringen Wirkungsgraden und Speicherdichten. Der Bereich geht von Handys über Laptops bis zu Notstromversorgungen und Kleinfahrzeugen (Mofas, Gabelstapler, etc.). Hierfür ist die Versorgungslogistik für Methanol deutlich einfacher zu realisieren als für den Straßenverkehr. Allerdings krankt der Einsatz noch am Entwicklungsstand der DMFC. In der letzten Zeit sind hier allerdings deutliche Fortschritte erzielt worden. Verschiedene Entwickler haben erste Demonstratoren im Kleinfahrzeugbereich gezeigt (z. B. der Scooter des FZJ) und erste Systeme, wie das von Smart Fuel Cells, sind kommerziell verfügbar. Die Schwerpunkte der DMFC Entwicklung für portable und mobile Anwendungen sind:

- Reduzierung des Leistungsverlustes durch Alterung
- neuartige Membranen mit reduzierter MeOH/H₂O-Permeation
- neue Katalysatoren und optimierte Katalysatorschichtstrukturen
- weitere System- und Komponentenminiaturisierung

- geringere Katalysatorbeladung ($< 2 \text{ mg/cm}^2/\text{Zelle}$)

Schlussfolgerung/Zusammenfassung

Zusammenfassend kann folgendes festgehalten werden:

- Vor 2010, vielleicht 2015 wird es kaum Brennstoffzellen im automobilen Antriebsstrang geben; wenn, dann kommt nur ein reines Wasserstoffsystem in Frage.
- Die Brennstoffzellen-APU ist im Unterschied zu vielen anderen Konzepten ein Produkt mit einer klaren „Market Pull“ Situation.
- Für fossile, flüssige Brennstoffe ist die SOFC-Technologie die geeignete Lösung. Die technischen Herausforderungen sind allerdings hoch.
- Die DMFC ist ein viel versprechender Energiewandler im Bereich Watt bis Kilowatt mit einem breiten Optimierungsansatz.
- Vor einer Einführung der Brennstoffzellen im Automobilbereich müssen weitere technische Durchbrüche bei Materialien, Fertigungstechnologien, Systemkomponenten und Betriebskonzepten erfolgen.
- Nur technologische Innovationen können zur Lösung der Probleme beitragen.

Literatur

Weiterführende Literatur:

- 1) Hamann, C.H., Vielstich, W.: Elektrochemie I und II, VCH, 1995
- 2) VIK: Brennstoffzellen, VIK Berichte Nr. 214, 1999
- 3) Wendt H., Plzak V.: Brennstoffzellen, VDI Verlag, 1989
- 4) Ledjeff, K.: Brennstoffzellen, Heidelberg, Müller 1995/1998
- 5) Hirschenhofer et al: Fuel Cell Handbook, DOE/FETC-99/1076, 4th Edition, 1998
- 6) EG&G Services, Parsons Inc.: Fuel Cell Handbook, DE-AM26-99FT40575, 5th Edition, 2000; www.fuelcells.org/fchandbook.pdf
- 7) Kordesch K, Simander G.: Fuel Cells and their Applications, VCH Publishers, New York, 1996
- 8) Larminie/Dicks: Fuel Cell Systems explained, 2000

Der neue 12-Zylinder-Wasserstoffmotor für die 7er-Reihe: Das Wasserstoffzeitalter hat begonnen

Christian Bock

BMW AG

Zusammenfassung

Wegen seiner hohen spezifischen Leistung, seiner spontanen Leistungsentfaltung, seinem gutem Wirkungsgrad und der Nähe zu heutigen Antriebskonzepten wird der Wasserstoffmotor eine führende Rolle bei zukünftigen Antriebssystemen für automobiler Anwendungen spielen. Der neue bivalente 12-Zylinder-Wasserstoffmotor für die 7er-Reihe ist ein wichtiger Schritt in diese Richtung.

Dieser Beitrag beschreibt die Motorkonstruktion und die Entwicklung der Motorfunktionen des neuen H₂-12-Zylinders im Detail. Ein Schwerpunkt wird dabei auf die verwendeten Motorstrategien zur Erzielung hoher Effizienz und sehr niedriger Abgasemissionen gelegt. Zum Abschluss werden die Potenziale eines monovalenten Derivats aufgezeigt und ein Ausblick auf zukünftige Motorkonzepte gegeben.

Einführung

Für die BMW Group ist effiziente Dynamik ein zentrales Entwicklungsziel heutiger und zukünftiger Antriebe. Dabei wird allgemein erwartet, dass Benzin- und Dieselmotoren als zentrale Antriebskomponente kurz- und mittelfristig dominieren, aber langfristig durch Antriebe mit Wasserstoff als Kraftstoff ersetzt werden.

Effiziente Dynamik steht als Synonym für die Auflösung des Zielkonfliktes zwischen Verbrauch, Gewicht und Fahrleistung. Dieser scheinbare Zielkonflikt lässt sich nur durch Einsatz innovativer Lösungen auflösen (Bild 1). Ohne Aufgabe der markenspezifischen Werte wie Fahrdynamik und Komfort leistet die BMW Group hierdurch einen Beitrag zur Reduzierung der Umweltbelastung durch den Straßenverkehr.

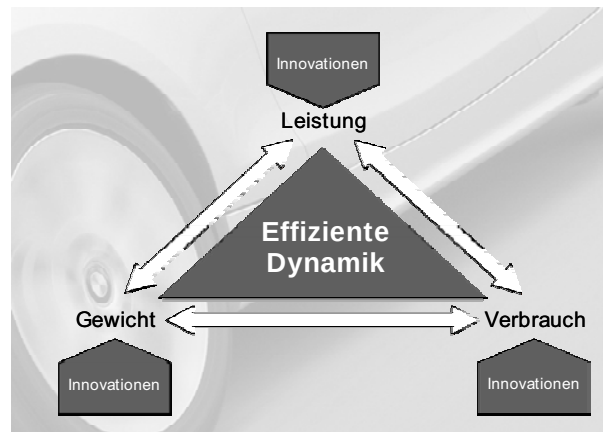


Bild 1: Effiziente Dynamik

Parallel zur Weiterentwicklung konventioneller Antriebe wird an der Darstellung effizienter Dynamik für H₂-Antriebe gearbeitet. Der H₂-Verbrennungsmotor ist dabei aufgrund hoher erzielbarer Leistungsdichten, spontanem Ansprechverhalten und guten Wirkungsgraden auch zukünftig die zentrale Komponente in Antriebssträngen der BMW Group. Genau wie bei Benzin- und Dieselmotoren können H₂-Verbrennungsmotoren sowohl mit äußerer als auch mit innerer Gemischbildung realisiert werden. Die spezifische Leistungsdichte lässt sich jeweils durch Aufladung erheblich steigern.

Die Stoffeigenschaften von H₂ bieten große Potenziale, stellen gleichzeitig aber auch eine Herausforderung an die Brennverfahrensentwicklung dar. Weite Zündgrenzen und hohe Flammgeschwindigkeiten ermöglichen eine stabile Verbrennung auch bei sehr mageren H₂-Luft-Gemischen. Das ermöglicht den drosselfreien Betrieb im unteren Lastbereich mit sehr guten Wirkungsgraden. Die im Vergleich zu Benzinmotoren sehr schnelle Umsetzung im stöchiometrischen Betrieb erlaubt eine Reduzierung der Verluste durch nicht ideale Verbrennung und damit gute Wirkungsgrade an der Volllast. Andererseits erhöht die geringe Zündenergie von H₂-Luftgemischen vor allem im stöchiometrischen Betrieb das Risiko von Glühzündungen, Frühzündungen und Klopfereignissen. Der stöchiometrische Betrieb ist aber der Schlüssel zur Erreichung von Leistungs- und Drehmomentdichten, wie man sie von Benzin- und Dieselmotoren her kennt. Zur Darstellung von konkurrenzfähigen H₂-Motorkonzepten ist daher die Realisierung des $\lambda=1$ -Betriebs unerlässlich.

Der neue 7er mit H₂-Antrieb

Fahrzeugbeschreibung

Seit 1979 entwickelt die BMW Group H₂-Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor in Verbindung mit flüssiger Wasserstoffspeicherung. Durch die Kombination hoher Leistungsdichte des

Verbrennungsmotors mit hohen Energiedichten der Flüssigwasserstoffspeicherung ist es möglich, in allen Fahrzeugklassen dynamische Fahrzeuge mit ausreichenden Reichweiten zu entwickeln.

Der neue H₂-7er wird das erste Serienfahrzeug mit einem H₂-Verbrennungsmotor sein. Die Entwicklung erfolgte entsprechend nach den verbindlichen Vorgaben eines regulären Serienentwicklungsprozesses. In Bild 2 werden die wesentlichen Entwicklungsschwerpunkte gezeigt. Ein Schwerpunkt ist die Entwicklung des Tanksystems und die Integration ins Fahrzeug. Die Verbindung zwischen Wasserstofftank und Motor erfolgt auf zwei Wegen. Neben der H₂-Versorgungsleitung verläuft eine Kühlmittleitung, um durch das heiße Motorkühlmittel über einen Wärmetauscher das tiefkalte Wasserstoff auf Umgebungstemperatur zu erwärmen.

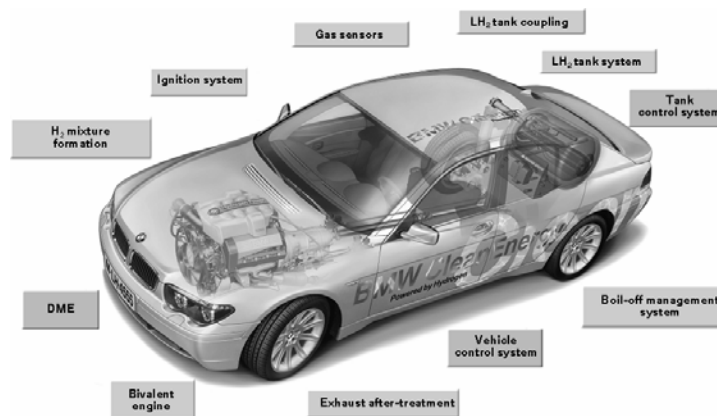


Bild 2: H₂ 7er mit den wichtigsten Entwicklungsschwerpunkten

Ein weiterer Schwerpunkt war die Entwicklung eines Sicherheitskonzepts einschließlich der erforderlichen Sensorik, z. B. der H₂-Sensoren. Im zentralen H₂-Steuergerät werden alle sicherheitsrelevanten Informationen des H₂-Systems (H₂-Tank, Motor, Wasserstoffzuleitungen) verarbeitet. Falls Fehler auftreten, werden diese vom Sicherheitssystem erkannt und entsprechende Maßnahmen ergriffen, um gefährliche Situationen auszuschließen.

H₂-Antrieb

Der bivalente 12-Zylinder-Wasserstoffmotor (Bild 3) basiert auf dem Serien-12-Zylinder-Ottomotor aus dem BMW 760i mit 500 cm³ Zylindervolumen, variabler Nockenwellensteuerung BIVANOS und Laststeuerung über die bekannte vollvariable Ventilhubverstellung VALVETRONIC. Im Benzinbetrieb wird der Motor mit Direkteinspritzung betrieben, im H₂-Modus arbeitet der Motor mit externer Gemischbildung durch Saugrohreinblasung. Die Motorleistung beträgt 191 kW bei einem maximalen Drehmoment von 390 Nm.

Die Bivalenz des 12-Zylinder-Motors bietet die Möglichkeit, die Vorteile des Wasserstoffeinsatzes zu nutzen, ohne auf eine voll entwickelte Wasserstoffinfrastruktur angewiesen zu sein. Mit der bivalenten Auslegung kann das Fahrzeug mit Benzin betrieben werden, falls keine Wasserstofftankstelle in Reichweite liegt.



Bild 3: Ansicht des neuen 12-Zylinder H2-Motors

Konstruktive Merkmale des 12-Zylinder-H₂-Motors

Tabelle 1 zeigt die Eckdaten des bivalenten Motors im Vergleich zum Benzin-Basismotor.

Motordaten	Benzin	Bivalent
Bauart	V-12 / 60°	
Zündfolge	1-7-5-11-3-9-6-12-2-8-4-10	
Hubraum	5972 cm ³	
Bohrung / Hub	89 / 80 mm	
Zylinderabstand	98 mm	
Anzahl Ventile	4	
Durchmesser Einlassventil	35 mm	
Durchmesser Auslassventil	29 mm	
Einlassventilhub	0,3 – 9,85 mm	
Auslassventilhub	10,3 mm	
D Hauptlager	70 mm	
D Pleuellager	54 mm	
Verdichtung	11,3 : 1	9,5 : 1
Pleuellänge	140 mm	138,5 mm
Kraftstoffqualität	ROZ 98	H ₂ ROZ 98

Tabelle 1: Motorkenndaten V12 Benzin und Bivalent (H₂ und Benzin)

Die Eingangs genannten Besonderheiten der stöchiometrischen Wasserstoffverbrennung, wie die höhere Brenngeschwindigkeit, das geringere „Flame Quenching“ und der intensivere Wärmeübergang führen jedoch lokal zu einer höheren thermischen Belastung des Motors als im Benzinbetrieb. Darüber hinaus muss die stärker ausgeprägte Neigung zu irregulären Verbrennungserscheinungen (Klopfen, Glühzündungen) bei der Spitzendruckauslegung des Kurbeltriebs berücksichtigt werden. Aus diesen Gründen waren zusätzliche konstruktive Maßnahmen umzusetzen, die diesen Besonderheiten Rechnung tragen und ausreichende mechanische Reserven entgegensetzen.

Die wesentlichen Modifikationen am Motor werden nachfolgend im Einzelnen vorgestellt.

Verdichtungsabsenkung

Ein primäres Erfordernis der Wasserstoffverbrennung mit äußerer Gemischbildung war die Anpassung des Verdichtungsverhältnisses. Durch die hieraus resultierende Absenkung der Verdichtungsendtemperaturen wird die Neigung zu irregulären Verbrennung im H₂-Betrieb deutlich reduziert. Als Kompromiss zwischen dem Benzin-DI-Betrieb und dem Wasserstoff-MPI-Betrieb wurde eine Absenkung von $\lambda = 11,3$ auf 9,5 vorgenommen. Die Umsetzung erfolgte durch die Verkürzung des Pleuels um 1,5 mm und eine Anpassung der Kolbenbodengeometrie.

Kolben und Ringpaket

Der Kolben verfügt im Unterschied zum Basismotor über einen Kühlkanal. Dadurch kann der Bereich der obersten Ringnut thermisch entlastet werden. Im Gegensatz zur herkömmlichen Spritzölkühlung des Kolbenbodens wird so auch wirksam Wärme aus den Bereichen oberhalb der Bolzenaugen abgeführt. Die erste Ringnut wird durch eine hart anodisierte Schicht geschützt. Eine Eisenbeschichtung ermöglicht die Kompatibilität zur Aluminiumlauffläche des Kurbelgehäuses.

Im stöchiometrischen Betrieb führt das geringe „Flame Quenching“ zu einem Vordringen der Flammenfronten in den Ringstegbereich bis unterhalb des 1. Verdichtungsringes. Um hier einer Störung des tribologischen Verhaltens wirksam zu begegnen, wurde das Ringpaket neu ausgelegt. Dabei standen auch die Minimierung der Blow-by-Menge und des Ölverbrauchs im Vordergrund.

Für den Top-Ring mit 1,2 mm Höhe wurde ein Kompromiss zwischen gutem Formfüllvermögen und mechanischer Robustheit gewählt. Zur Verbesserung der Brandspursicherheit wird eine Chrom-Keramik-Schicht (CKS) eingesetzt, die auch zunehmend im Dieselmotorenbau Verwendung findet. Bei der Ölingabstimmung wurde auf eine sorgfältige Optimierung des Ölangebotes geachtet. Zuviel Öl kann zu Selbstentflammungen und Ölkohleablagerungen mit den bekannten negativen Auswirkungen führen.

Öl und Ölkühlung

Die Ölzusammensetzung spielt eine wesentliche Rolle bei der Abstimmung der tribologischen Eigenschaften des Motors. Einerseits müssen die harten Anforderungen aus dem DI-Benzinbetrieb erfüllt werden, andererseits sind die Besonderheiten des Wasserstoffbetriebes (Ölkohlebildung, Frühzündung) zu beachten. Für den V12 H₂-Motor wurde ein aschearmes Öl der Qualität 0W30 gewählt. Um im Kolbenringbereich eine ausreichende Viskosität zu erhalten und über den Kühlkanal eine zusätzliche Wärmeabfuhr zu gewährleisten, werden die maximalen Motoröltemperaturen bei Vollastfahrten mittels eines zusätzlichen Öl-Luft-Wärmetauschers begrenzt.

Kurbelgehäuse

Das Kurbelgehäuse wurde mit nur geringen Änderungen vom Basismotor übernommen. Die buchsenlose Open-deck-Konstruktion aus übereutektischem ALUSIL ermöglicht die Realisierung guter mechanischer und thermischer Eigenschaften bei geringem Gewicht. Die Zylinderlaufbahn wird durch Freilegen der harten Siliziumkristalle erzeugt. Eine zusätzliche Beschichtung ist in Verbindung mit den eisenbeschichteten Kolben daher nicht erforderlich.

Um die Wärmeabfuhr im oberen Umkehrpunkt des Kolbens gleichmäßiger zu gestalten, wurden im Zwickelbereich zusätzlich Schlitze eingebracht, die einen kontrollierten Kühlmitteldurchfluss gewährleisten. Die Abdichtung zum Zylinderkopf übernimmt eine speziell entwickelte 4-Lagen-Metallabdichtung.

Zylinderkopf

Der Aluminium-Zylinderkopf entspricht im Wesentlichen der Basis-Konstruktion. Durch das Querstromprinzip erfüllt er schon hervorragend die Anforderungen an eine homogene Wärmeabfuhr. Modifikationen waren nur bezüglich der Ventile und der Ventilsitzringe erforderlich. Wie bei allen Gasmotoren muss auch beim Wasserstoffmotor wegen der fehlenden Benzin-Additive auf eine sorgfältige Auswahl der Ventilsitzringe und der Ventile geachtet werden. Beim H₂-Motor wurde nach mehreren Versuchen eine für Gasmotoren optimierte Legierung gewählt.

In Betriebsbereichen nahe der Klopfgrenze führen späte Zündwinkel als Reaktion der Klopfkennung zu hohen Abgastemperaturen und zu einer entsprechenden thermischen Belastung der Auslassventile. Diese werden aus einer hochwarmfesten Nimonic-Legierung gefertigt. Sowohl die Einlass- als auch die Auslassventile sind zur Verschleißminimierung gepanzert.

Gasversorgungsanlage

Wasserstoff besitzt von allen Gasen die kleinste Molekülgröße und stellt daher die höchsten Anforderungen an die Systemdichtheit der Kraftstoffanlage. Gleichzeitig müssen wegen der weiten Zündgrenzen und der geringen Zündenergie hohe Sicherheitsanforderungen gestellt werden.

Die Gemischbildung basiert im H₂-Betrieb auf einer zylinderindividuellen Saugrohrenblasung mit relativ geringem Druckgefälle von 1 bar. Der Überdruck wird ausschließlich durch das Verdampfen von kryogenem Wasserstoff im Tank erzeugt, wodurch eine zusätzliche Wasserstoffförderpumpe entfällt. Die erforderliche Wärmemenge wird aus dem Kühlmittel des Motors bereitgestellt und über eine elektrische Wasserpumpe geregelt.

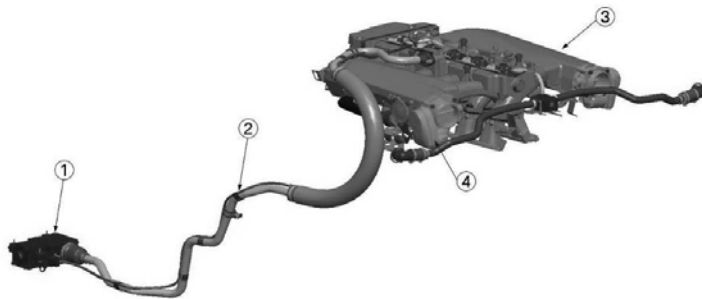


Bild 4: Wasserstoffversorgung des Motors

Bild 4 zeigt die wesentlichen Bestandteile der Gasversorgungsanlage. Der vom Tank kommende gasförmige Wasserstoff gelangt über ein Druckregelventil (1) und über die teilweise flexible Vorlaufleitung (2) zu einem motornahen Gassammler auf der Sauganlage (3), aus dem die Einblaseventile gespeist werden. Die Einblaseventile führen die erforderliche Wasserstoffmenge über ein Röhren der Ansaugluft zu.

Alle verwendeten Werkstoffe mit Gaskontakt sind hinsichtlich ihrer Kompatibilität zu Wasserstoff aufwändig geprüft worden, um das Risiko einer Wasserstoffversprödung oder Alterung auszuschließen. Alle lösbaren Verbindungen und Dichtflächen am Druckregler und an der Vorlaufleitung (Verschraubungen, O-Ring-Dichtungen usw.) sind doppelwandig ausgeführt. Eventuell auftretende Leckagen können so durch einen H_2 -Gassensor im Motorraum ((4) in Bild 5) rechtzeitig erkannt werden.

Die Regelung des Vordrucks im Rail auf einen möglichst konstanten Wert vereinfacht die kennfeldgesteuerte Gasdosierung durch die Einblaseventile. Das hier eingesetzte elektromagnetische Proportionaldruckregelventil wurde speziell entwickelt. In der Motorsteuerung wird über zwei Druck-Temperatursensoren (siehe (2) und (3) in Bild 5) permanent der Gaszustand im Rail bestimmt. Als Reaktion auf Druckänderungen wird der Ventilhub durch pulsweitenmodulierte Bestromung des Elektromagneten dynamisch variiert. Im stromlosen Fall erfüllt das Ventil eine zusätzliche Absperrfunktion.

Die Vorlaufleitung zum Motor wird aus Edelstahl gefertigt. Ein aus Edelstahl-Wellrohr eingefügter flexibler Anteil im Rohrbogen kompensiert die Relativbewegungen des Motors im Betrieb und sorgt im Crash-Fall dafür, dass die Vorlaufleitung nicht abreißen kann und das Gesamtsystem dicht bleibt.

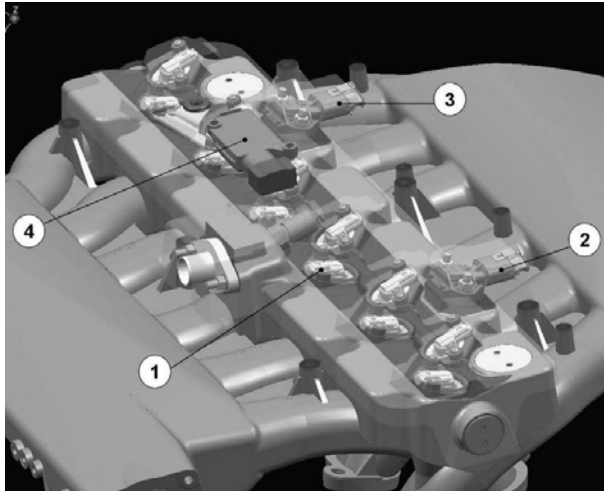


Bild 5: Sauganlage mit Wasserstoff-Sammler

Die Aluminium-Sauganlage mit dem Wasserstoffsammler wird im atmosphärischen Sandfeingussverfahren hergestellt. Das bietet den Vorteil einer kostengünstigen Fertigung bei geringem Gewicht und bester Ausnutzung des Bauraums. Gleichzeitig sinkt durch die monolithische, kompakte Bauweise mit versenkt angeordneten Einblaseventilen das Risiko von Leckagen im Crash-Fall auf ein Minimum. Die Herstellung des Rohteils stellt aufgrund der hohen Dichtigkeitsanforderungen höchste Ansprüche an die Gusstechnologie.

Die Einblaseventile wurden über mehrere Entwicklungsstufen zur Serienreife entwickelt. Ihre Qualität spielt eine zentrale Rolle für die Funktionalität des Gesamtmotors. Wegen der geringen Dichte von Wasserstoff müssen je Arbeitsspiel große Volumina in möglichst kurzer Zeit eingeblasen werden. Die Dosiergenauigkeit der Einblasung hat direkten Einfluss auf die Leerlaufqualität, die Laststeuerung, das Emissionsverhalten und die Neigung des Motors zu Rückzündungen.

Das Konstruktionsprinzip des Ventils mit radialem Gaseintritt und axialem Austritt bietet optimale Voraussetzungen zum Schalten großer Querschnittsflächen in möglichst kurzer Zeit. Zur Gaseinblasung wird über einen zweistufig bestromten Elektromagneten eine ringförmige Ventilplatte angehoben. Für den dabei freiwerdenden Ringspalt reicht ein Hub von nur 0,2 mm, um die erforderliche H₂-Menge zuzumessen.

Die Werkstoffpaarung von Ventilplatte aus Metall zu Ventilsitz aus Kunststoff ermöglicht lange Standzeiten bei dauerhaft geringen Leckageraten.

Funktionsentwicklung

Leistung und Drehmoment

Ziel der Funktionsentwicklung war es, bei niedrigsten Emissionen und guten Wirkungsgraden ein möglichst hohes Drehmoment- und Leistungsniveau zu erreichen. Um dieser Forderung gerecht zu werden, ist es zwingend notwendig, den Motor analog einem Benzinmotor mit stöchiometrischem Gemisch zu betreiben. Die Grundvoraussetzung hierfür ist die Beherrschung der Verbrennung eines stöchiometrischen H_2 -Luft-Gemisches.

Durch die Einblasung des gasförmigen Wasserstoffs in die Sauganlage ergibt sich allerdings ein erheblicher Füllungsverlust während des Ladungswechsels. Im Gegensatz zu Benzin, das flüssig eingespritzt nahezu kein Luftvolumen verdrängt und durch die Verdampfung sogar für eine Abkühlung der angesaugten Luft sorgt, verdrängt der eingeblasene Wasserstoff im stöchiometrischen Betrieb ca. 30 % der angesaugten Luft. Dieser Effekt ist charakteristisch für Motoren mit gasförmigen Kraftstoffen und Saugrohreinsaugung.

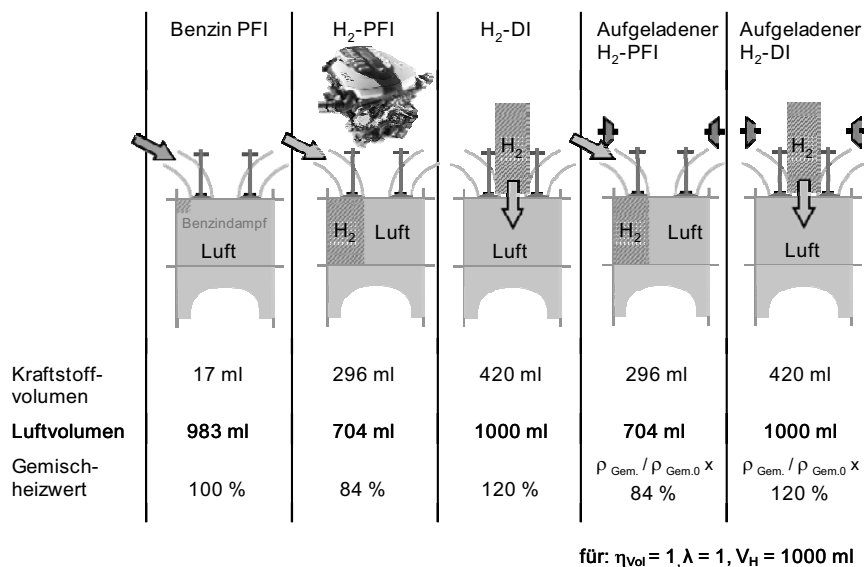


Bild 6: Leistungspotenziale verschiedener Motorkonzepte

Auch der Ladungswechsel wird bei der Einblasung von Wasserstoff ins Saugrohr durch die Stoffeigenschaften von H_2 gestört. Da Wasserstoff eine sehr geringe Masse besitzt und damit die Schallgeschwindigkeit in H_2 deutlich höher als in Luft ist, verändert sich die Saugrohrdynamik, die für eine optimale Füllung des Motors entscheidend ist. Generell verschieben sich bei gegebener Sauganlagegeometrie die Nennpunkte zu niedrigeren Drehzahlen (Einfluss Schallgeschwindigkeit), der Luftaufwand verschlechtert sich (niedrigere kinetische Energie der Gassäule durch geringere Masse). Dies kann durch

Optimierungsmaßnahmen teilweise kompensiert werden. Beim aktuellen V12 H₂-Motor musste so ein Kompromiss zwischen Benzin- und Wasserstoffbetrieb gefunden werden.

Die Charakteristik der H₂-Verbrennung hängt stark von der eingestellten Gemischzusammensetzung ab. Bei einem λ -Wert nahe 1 sinken die Zündenergie und der Vorzündbedarf rapide, die Brenngeschwindigkeit und der Gradient des Verbrennungsdruckes steigen stark an. Bei stöchiometrischem Gemisch sind Druckanstiegsgradient und Brenngeschwindigkeit im Vergleich zu einem benzinbetriebenen Motor deutlich höher. Der Zündzeitpunkt zur Erreichung einer optimalen Schwerpunktlage der Verbrennung liegt bei ca. 1° KW vor ZOT. Es sind nahezu keine Zyklenschwankungen erkennbar. Im stöchiometrischen Betrieb erreicht der V12-H₂-Motor Leistungen größer 170 kW und Drehmomente größer 340 Nm.

Emissionen

Im Kraftstoff H₂ selbst befindet sich kein Kohlenstoff, weshalb keine Emissionen wie unverbrannte Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid auftreten können. Durch den Ölverbrauch des Motors treten sehr geringe Mengen HC auf, außerdem muss bei einem bivalenten Fahrzeug der Benzintank auch im Wasserstoffbetrieb gespült und die abgesaugten Benzindämpfe dem Verbrennungsprozess zugeführt werden. Die dabei anfallenden HC-Rohemissionen werden im 3-Wege-Katalysator oxidiert, die Restkonzentration im Abgas nach Katalysator ist damit vernachlässigbar.

Allerdings können beim Wasserstoffmotor Stickoxidemissionen auftreten, da die bei der stöchiometrischen Wasserstoffverbrennung herrschenden Prozesstemperaturen ausreichen, um aus dem in der Luft enthaltenen Stickstoff und Sauerstoff NO_x zu bilden.

Ein mit Wasserstoff betriebener Motor ist in einem weiten λ -Bereich homogen betreibbar, die Zündgrenzen reichen von 4-76 Vol.-% in Luft. Dieser Bereich ist mehr als ausreichend, den gesamten Betriebsbereich eines DI-Ottomotors abzudecken. Es sind im Gegensatz zu Benzin-Motoren keinerlei Maßnahmen zur Ladungsschichtung notwendig, was völlig neue Perspektiven für die Abgasnachbehandlung eröffnet.

Im Bereich der maximalen Leistung, in dem etwas fetter als stöchiometrisch gefahren wird, ergibt sich die Möglichkeit, mit den geringen Mengen von unverbranntem Wasserstoff im Abgas (ca. 1%) im Drei-Wege-Katalysator die entstandenen Stickoxide zu reduzieren. Durch die hohe Reaktivität des Wasserstoffs erzielt man sehr hohe Konvertierungsraten von > 99,9 % und damit niedrigste NO_x-Restkonzentrationen nach Katalysator. Durch Entwicklung einer modifizierten Beschichtung für den Katalysator (Bevorzugung NO_x-Reduktion) wurde die Konvertierungsrate nochmals verbessert. Bei geeigneter Wahl des λ -Wertes von ca. 0,97 erhält man nach Katalysator ebenfalls nur noch eine geringe Restkonzentration von H₂ kleiner 0,1 %.

Andererseits kann der Motor auch sehr mager mit hohem Luftüberschuss betrieben werden. In diesem Betriebsbereich $\lambda > 1,8$ treten aufgrund niedriger Prozesstemperaturen nahezu keine Stickoxidemissionen auf.

Der Betriebsbereich mit einem λ -Wert zwischen 1 und 1,8 ist von der Emissionsseite her kritisch, da der 3-Wege-Katalysator aufgrund mangelnder Reaktionspartner für $\lambda > 1$ unwirksam ist. Hier kann ohne Zusatzstoffe keine wirksame Abgasnachbehandlung durchgeführt werden. Auch der Einsatz von NO_x-Speicherkatalysatoren hat sich aufgrund der sehr hohen Stickoxidemissionen und dem eingeschränkten Temperaturfenster in diesem λ -Bereich als nicht zielführend erwiesen.

Der Motorstart wird immer im mageren Betrieb durchgeführt. Der Motor bleibt in diesem Betriebszustand, bis der Katalysator seine Betriebsbereitschaft erreicht hat, erst dann ist eine Umschaltung in den stöchiometrischen Betriebsbereich zugelassen. Der Wasserstoffmotor ist deshalb im Gegensatz zum Benzinmotor (HC-Emissionen) nicht zwingend auf ein schnelles Anspringen des Katalysators angewiesen.

Für den Benzinbetrieb des bivalenten V12 Motors wird diese Vorgehensweise ebenfalls angewandt. Der Start erfolgt immer mit H₂, das heißt der Motor wird erst auf Benzinbetrieb umgeschaltet, wenn die Katalysator-Heizphase mit Wasserstoff im Magerbetrieb durchgeführt ist.

Betriebsstrategie

Aus der Forderung nach maximalem Drehmoment und Leistung sowie niedrigsten Emissionen ergibt sich die Betriebsstrategie für den Wasserstoffmotor (Bild 7):

Bereich 1: Im oberen Lastbereich wird der Motor mit $\lambda = 0,97$ betrieben. Abgasnachbehandlung im 3-Wege-Katalysator, Reduzierung der anfallenden Stickoxid-Rohemissionen mit unverbranntem Wasserstoff im Abgas.

Bereich 2: Bei niedrigen Lasten wird der Motor mit $\lambda > 1,8$ betrieben. Niedrigste Stickoxid-Rohemissionen erfordern keine Abgasnachbehandlung.

Bereich 3: Gebiet mit einem λ -Wert zwischen 0,97 und 1,8. Dieser Bereich wird für den Betrieb des H₂-Verbrennungsmotors ausgeschlossen, da keine wirkungsvolle Abgasnachbehandlung möglich ist.

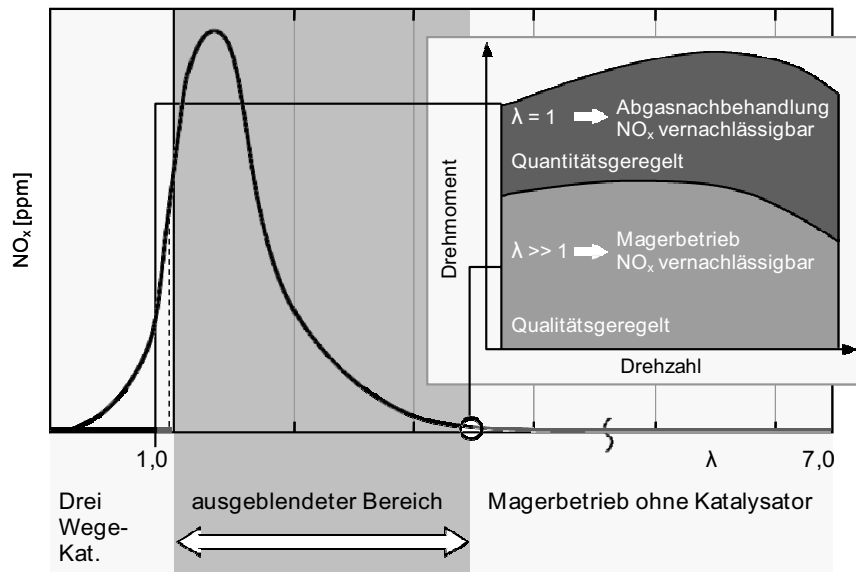


Bild 7: Betriebsstrategie mit λ -Sprung

Durch Anwendung dieser Betriebsstrategie können mit dem neuen H₂-7er die weltweit schärfsten momentan geltenden Emissionsgrenzen von SULEV deutlich unterschritten werden.

Die gewählte Betriebsstrategie macht es nötig, automatisch zwischen den einzelnen Betriebsbereichen umzuschalten, ohne dass die Umschaltvorgänge durch den Fahrer wahrgenommen werden. Dies stellt eine hohe Anforderung an die Funktionen der Motorsteuerung, da bei einem Umschaltvorgang zwischen den Betriebsbereichen bis zu 25 % Drehmoment kompensiert werden müssen. Bereits bei Annäherung des Betriebszustandes an die Umschaltgrenze werden die Laststeuerorgane (Drosselklappe, VVT) entsprechend der zu erwartenden Umschaltung positioniert. Wenn tatsächlich eine Umschaltung der Betriebsbereiche notwendig wird, schaltet die Motorsteuerung von einem auf das nächste Arbeitsspiel das Gemisch um, es erfolgt also kein Durchfahren des emissionskritischen λ -Bereiches sondern ein scharfes Umschalten. Zur Kompensation des Drehmomentsprunges wird zeitgleich zum λ -Wert der Zündwinkel verstellt, ebenso wird die Drosselklappe nachgeführt, die als mechanisches System langsamer als Gemisch- und Zündwinkelverstellung ist. Parallel zur Bewegung der Drosselklappe wird mit dem Zündwinkel das Drehmoment korrigiert, bis sich die Drosselklappe in der Sollposition befindet, der Zündwinkel ist dann ebenfalls wieder im Bereich der optimalen Verbrennungsschwerpunktlage.

Bivalenter Betrieb

Eine besondere Herausforderung stellt die Umschaltung zwischen den beiden Kraftstoffarten H_2 und Benzin dar. Der gleichzeitige Betrieb des Motors mit beiden Kraftstoffen muss in jedem Fall vermieden werden.

Es gibt mehrere Kriterien, die zu einer Umschaltung der Kraftstoffarten führen können:

- manuelles Umschalten durch den Fahrer
- automatisches Umschalten auf den jeweils anderen Kraftstoff bei „Tankleer-Erkennung“
- automatisches Umschalten nach Benzin bei einem möglichen Fehler im H_2 -System (Backup-Lösung).

Die Umschaltung der Kraftstoffsorte läuft prinzipiell wie folgt ab:

Bei einer Umschaltanforderung (manuell oder automatisch) wird vom System überprüft, ob Tankfüllstand und Kraftstoffdruck ausreichend sind. In diesem Fall schaltet die Motorsteuerung in Zündreihenfolge nacheinander die Zylinder einer Bank auf den gewählten Kraftstoff um. Anschließend wird eine Banksynchronisation (Drehmomentabgleich) durchgeführt, danach wird die zweite Zylinderbank analog der ersten umgeschaltet. Der Motor läuft jetzt mit dem anderen Kraftstoff.

Vermeidung irregulärer Verbrennung

Voraussetzung für die Beherrschung der Wasserstoffverbrennung, speziell im kritischen $\lambda=1$ -Bereich, ist die Möglichkeit, Ladungswechsel und Gemischbildung des Motors in weiten Grenzen steuern zu können. Mit dem 12-Zylindermotor mit seinen Ventiltriebsvariabilitäten BIVANOS und VALVETRONIC stand hier eine hervorragende Basis zur Verfügung, ohne den die hervorragenden Ergebnisse nicht möglich gewesen wären.

Da Wasserstoff-Luft-Gemische im stöchiometrischen Betrieb sehr leicht entzündlich sind, müssen mögliche Zündquellen vermieden werden. Grundlagenversuche haben gezeigt, dass heiße Bereiche im Motor, z. B. Hot-Spots und Restgas, die Hauptverursacher für unkontrollierte Verbrennungen und Rückzündungen sind.

Durch die Herabsetzung des Verdichtungsverhältnisses von 11,3 auf 9,5 wurden die Verdichtungsendtemperatur und damit die Klopf- und Frühzündungsneigung reduziert. Weiterhin werden beim H_2 -Motor deutlich kältere Zündkerzen als beim Benzin-Serienmotor eingesetzt. Die Mittelelektrode wird so möglichst kalt gehalten. Die Freibrenneigenschaften im Benzinbetrieb werden dadurch nur geringfügig beeinflusst. Zusätzlich wird eine Kerzenbauart mit besonderer Form der Masselektrode verwendet, um möglichst große Materialquerschnitte für die Wärmeableitung zu gewährleisten.

Die Position der Einblaseventile im Saugrohr ist mitentscheidend für die Beherrschung des Betriebsverhaltens des Motors. Der eingeblasene Wasserstoff muss so im Saugrohr positioniert werden, dass im Moment des Einlassventilöffnens kein brennbares Gemisch,

sondern nur Luft am Einlassventil ansteht, um eine Rückzündung (verursacht durch heißes Restgas) zu vermeiden. Der im Saugrohr befindliche Wasserstoff muss in der Ladungswechselphase vollständig in den Brennraum gesaugt werden, um für das nachfolgende Arbeitsspiel wieder die gleichen Ausgangsbedingungen zu schaffen.

Die Einblasung selbst muss überkritisch erfolgen, was durch einen ausreichend hohen Druck im H₂-Kraftstoffsystem sicherzustellen ist. Da die Druckrandbedingung im Saugrohr während des Einblasevorganges nur unzureichend bekannt ist, kann beim unterkritischen Strömungsfall die H₂-Menge nicht genau genug berechnet werden, die für einen bestimmten Kennfeldpunkt erforderlich ist. Durch Betriebszustände mit undefiniertem Gemisch können ebenfalls Rückzündungen ausgelöst werden, das Emissionsverhalten ist dann nicht mehr beherrschbar.

Klopfregelung und Bauteilschutzfunktionen

Die Grundfunktionen der Klopfregelung wurden vom Benzinmotor übernommen, die Funktionalität musste aber für die höheren Anforderungen des Wasserstoffbetriebes erweitert und angepasst werden:

Die Sensorik (Körperschallsensoren) konnte unverändert übernommen werden.

Die Geräuschsignatur einer klopfenden H₂-Verbrennung unterscheidet sich von den bekannten Größen im Benzinbetrieb. Die Filterfrequenzen der Motorsteuerung mussten daher angepasst werden.

Durch den großen λ -Bereich, in dem der Motor betrieben wird und die starke Abhängigkeit der Brenngeschwindigkeit und des Druckanstiegsgradienten vom Luftverhältnis variieren die Klopfkennungsparameter wie z. B. Filterfrequenz, Klopfmessfenster und Klopfintensität ebenfalls in einem großen Bereich.

Durch die sehr schnelle Verbrennung und den hohen Druckanstiegsgradienten bei stöchiometrischem Betrieb ist es notwendig, sehr schnelle Erkennungs- und Reaktionszeiten für ein Klopfereignis zu realisieren.

Bei extremen Umweltbedingungen und dadurch verursachter klopfender Verbrennung kann es notwendig sein, außer dem Zündwinkleingriff zusätzliche Maßnahmen einzusetzen (z. B. Magersprung), um Motorschäden zu vermeiden.

Bei hohen Abgastemperaturen, die die maximal zulässige Eintrittstemperatur am Katalysator überschreiten, ist eine Bauteilschutzfunktion notwendig. Üblicherweise wird diese Funktion durch eine Gemischanreicherung realisiert, um eine Schädigung des Katalysators zu verhindern. Dies funktioniert nur bei flüssigen Kraftstoffen, bei gasförmigen Kraftstoff-Luft-Gemischen ist diese Maßnahme wirkungslos.

Ein Abmagern des Gemisches bewirkt ebenfalls eine Abkühlung des Abgases. Eine ausreichende Temperaturabsenkung bei vertretbar geringem Leistungsverlust stellt sich aber bei einem Luftverhältnis ein, das im Stickoxid-kritischen λ -Bereich liegt und somit nicht angefahren werden kann. Bei einem Abmagern in den NO_x-unkritischen Bereich ($\lambda > 1,8$)

wäre der Leistungsverlust des Motors zu hoch und könnte im Kundenfahrbetrieb zu sicherheitskritischen Situationen führen.

Beim V12-H₂-Motor wurde daher folgende neue Bauteilschutzfunktion realisiert: Bei Erreichen der kritischen Abgastemperatur wird pro Bank in Zündreihenfolge umlaufend ein Zylinder in den Stickoxid-unkritischen Bereich umgeschaltet. Falls Bedarf nach einer weiteren Temperaturabsenkung besteht, wird ein weiterer Zylinder umlaufend abgemagert. Versuche haben gezeigt, dass zwei mager laufende Zylinder pro Bank in jedem Fall ausreichend sind. Der resultierende Leistungsabfall bewegt sich in der Größenordnung der Bauteilschutzfunktion im Benzinbetrieb.

Entwicklungswerkzeuge

Bei der Entwicklung von Wasserstoffverbrennungsmotoren kann prinzipiell auf das breite Know-how und die Erfahrungen aus der Entwicklung konventioneller Verbrennungsmotoren zurückgegriffen werden.

Bei BMW ist die Entwicklung von H₂-Motoren vollständig in die Entwicklungsprozesskette für konventionelle Ottomotoren integriert. Durch die gemeinsame Nutzung von Versuchseinrichtungen und Entwicklungswerkzeugen (Komponentenprüfstände, Motorenprüfstände, Simulationsprogramme) werden maximale Synergieeffekte erzielt.

Aufgrund der chemischen und physikalischen Stoffeigenschaften von Wasserstoff sind Simulationsprogramme nicht ohne weiteres für Wasserstoffanwendungen geeignet. Durch Anpassung bzw. Erweiterung der Stoffdaten und physikalischen Modelle können die Berechnungstools für H₂-Anwendungen erweitert werden. Dazu wurden Untersuchungen an einem optischen Motor durchgeführt, um die Berechnungswerkzeuge für die Simulation von Wasserstoffvorgängen weiterzuentwickeln. Die dabei verwendeten optisch zugänglichen Motoren sind mit Quarzglasfenstern in Zylinderkopf und Kolbenboden sowie einem Glasring ausgerüstet. Mittels der Methode der Laser-induzierten Fluoreszenz (LIF) kann der eingeblasene Wasserstoff visualisiert werden. Auf Basis dieser Grundlagenuntersuchungen ist es möglich, Vorausberechnungen der Gemischbildung unter geänderten Randbedingungen anzustellen.

Zusätzlich dazu wird eine thermodynamische Analyse des Motorprozesses mit Hoch- und Niederdruckindizierung, eine Erfassung der integralen Messdaten wie statischen Temperaturen und Drücken sowie eine Abgasmessung durchgeführt. Die gewonnenen Messwerte dienen als Grundlage für Prozessanalysen und als Basis numerischer Simulationen wie der eindimensionalen Strömungsrechnung. Auf Basis der Zylinderdruckverlaufsanalyse kann weiterhin eine Quantifizierung der Prozessverluste mit der Methode der thermodynamischen Verlustteilung durchgeführt werden.

Für eine tiefergehende Analyse grundlegender Vorgänge bei der Entflammung und des Klopfverhaltens von H₂-Luft-Gemischen wird zusätzlich das Visualisierungssystem VISIOLUTION der Firma AVL eingesetzt. Mit diesem System ist es durch den Einsatz von mit Lichtleitern bestückten Zündkerzen möglich, den Flammenfortschritt bzw. den Ort

eventuell auftretender Klopfherde und Glühzündungen ohne konstruktiven Eingriff in die Motor-Hardware zu bestimmen. Die VISIOKNOCK-Kerze „blickt“ mit 40 Kanälen kegelförmig entlang der Brennraumwand und eignet sich zur Untersuchung von Verbrennungsanomalien wie Klopfen oder Glühzündungen. Gemessen werden Lichtintensitäten mittels Photodioden. Wandert eine Flammenfront über das Sichtfeld eines Kanals, führt dies zu einer Steigerung der Lichtintensität. Durch Aufzeichnen der Lichtintensität als Funktion vom Kurbelwinkel und der Kanalnummer wird eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung erreicht.

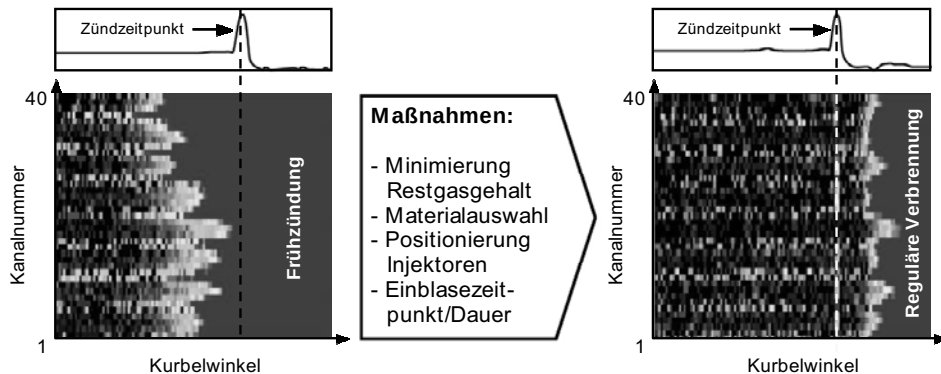


Bild 8: Beispiel einer Messung mit der AVL VISIOKNOCK-Kerze

Bei der Entwicklung des H2 Motorkonzepts wurden diese Methoden bei der Auslegung des Ladungswechsels, bei der Vermeidung von Rückzündung und bei der Vollastapplikation angewendet.

Verbrauch

Der Wasserstoffmotor bietet durch die besonderen Eigenschaften des H₂-Luft-Gemisches große Potenziale zur Verbrauchsreduzierung.

Im stöchiometrischen Betrieb kann man durch die extrem schnelle Verbrennung hohe thermodynamische Wirkungsgrade erzielen. Die Laststeuerung erfolgt verlustbehaftet durch Quantitätsreglung. Hier sind Verbesserungen durch den verstärkten Einsatz der VALVETRONIC zu erzielen, wobei auf die Beherrschung der Verbrennung besonders geachtet werden muss.

Im Magerbetrieb ($\lambda > 1,8$) kann drosselfrei gefahren werden. Die Laststeuerung erfolgt durch Qualitätsregelung. Allerdings sinken die Brenngeschwindigkeit und damit der thermodynamische Wirkungsgrad mit magerer werdendem Gemisch stark ab. Ab $\lambda \sim 4$ reicht ein Arbeitsspiel nicht mehr aus, um die Verbrennung vollständig zu beenden, was auch akustisch deutlich wahrnehmbar ist. Um im Magerbetrieb optimale Verbräuche zu erzielen, ist ab einem gewissen Luftüberschuss eine Kombination aus Qualitäts- und Quantitätsregelung notwendig.

Das Verbrauchspotenzial eines Wasserstoffmotors kann beim V12 noch nicht voll ausgeschöpft werden, da ein Kompromiss der Motorauslegung zwischen Wasserstoff und Benzin gefunden werden musste.

Weiterführende Motorkonzepte

MONOVALENTE ABLEITUNG

Mit einer monovalenten Ableitung ergeben sich neben einer Reduzierung der Systemkomplexität (nur noch ein Kraftstoffsystem) weitere Potenziale für eine H₂-spezifische Hardwareoptimierung wie z. B.:

Optimierung des Verdichtungsverhältnisses

Anpassung der Sauganlagegeometrie an die Stoffeigenschaften von H₂.

Optimierung der Zündkerzen für Wasserstoffbetrieb.

Optimierung von Abgasanlage und Katalysatorbeschichtung auf eine für H₂-Betrieb spezifische Abgaszusammensetzung.

Entfall der Benzin-Tankentlüftung.

Optimierung Brennraumgeometrie und Wärmeabfuhr aus dem Brennraum (Entfall DI-Injektoren, Kolben-Ring-Paket, Kühlmittelmantel).

Die Optimierung der Saugrohrdynamik und eine Reduzierung der Neigung zu irregulären Verbrennungen ergibt zusätzliche Freiräume zur Leistungssteigerung bzw. zur Effizienzsteigerung in manchen Kennfeldbereichen. Eine für den H₂-Betrieb angepasste Katalysatorbeschichtung zusammen mit einem auf Niedrigstemissionen optimierten Brennverfahren führt zu einer weiteren Emissionsreduzierung im Vergleich zum bivalenten V12. Ein monovalenter H₂-7er besitzt das Potenzial, die SULEV Grenzwerte um eine Größenordnung zu unterschreiten.

INNERE GEMISCHBILDUNG UND AUFLADUNG

Bei äußerer Gemischbildung ohne Aufladung liegen erzielbare theoretische Leistungsdichten bei ca. 80 % freisaugender Benzin-Motoren.

Die äußere Gemischbildung kann mit Aufladung (Kompressor- oder Abgasturboaufladung) zur Erhöhung der Leistungsdichte kombiniert werden. Der Gemischheizwert nimmt dabei proportional zum Aufladegrad (Ladedruck) zu.

Die innere Gemischbildung (Wasserstoff-Direkteinblasung) bietet eine Alternative zur Aufladung. Der Motor saugt dabei reine Luft an. Somit steht das gesamte Hubvolumen zur Füllung mit Luft zur Verfügung. Nach Schließen der Einlassventile wird Wasserstoff direkt in den Zylinder eingeblasen. Die Folge ist eine zusätzliche Steigerung der Zylinderfüllung. Durch den hohen massenspezifischen Energieinhalt wird der Gemischheizwert zusätzlich

angehoben. Diese Effekte führen zur Erhöhung des Gemischheizwertes um 41 % gegenüber der Basis eines gemischansaugenden Wasserstoffmotors.

In Kombination mit der inneren Gemischbildung mit $\lambda=1$ -Betrieb bietet eine Aufladung weiteres Potenzial zur Leistungssteigerung. Mit einem derartigen Konzept wird zusätzlich zur Steigerung des Gemischheizwertes mittels Direkteinblasung eine Steigerung der Ladungsdichte möglich.

Bild 9 zeigt zusammenfassend für verschiedene Kraftstoffe (Otto, Diesel, H_2) und Brennverfahren (MPI, DI, Aufladung) die Bereiche erzielbarer Leistungs- und Drehmomentdichten.

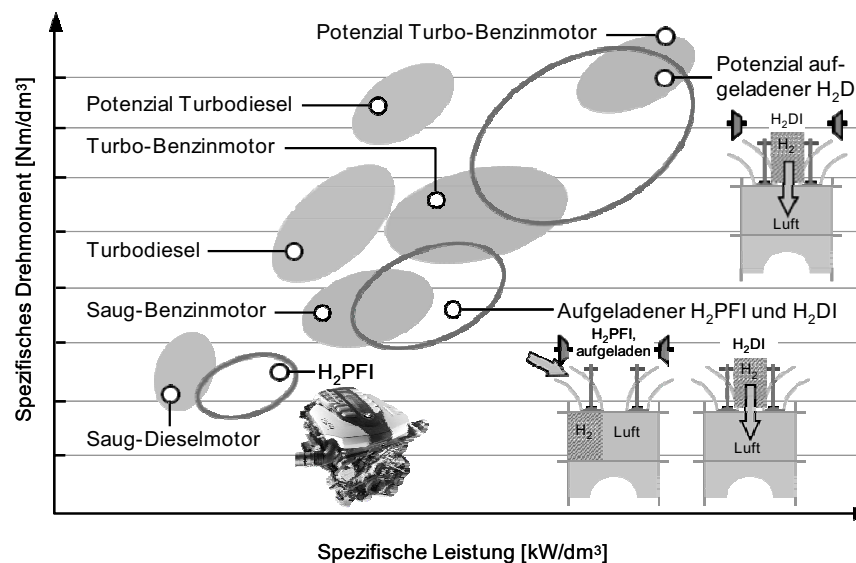


Bild 9: Potenzial unterschiedlicher Motorkonzepte bezüglich Drehmoment und Leistung

Zusammenfassung

Der neue H_2 -7er ist ein erster Schritt vom Experimentalfahrzeug hin zum Wasserstoff-Serienfahrzeug. Es ist das erste Wasserstoff-Fahrzeug von BMW, das in Kundenhand gehen wird.

Der 12-Zylinder- H_2 -Motor wird mit moderaten Hardware-Änderungen von der Benzinvariante abgeleitet. Die Bivalenz ermöglicht dabei, ein kundentaugliches H_2 -Fahrzeug anzubieten, solange noch kein flächendeckendes H_2 -Tankstellen-netz existiert.

Der beim V12 im gesamten Drehzahlbereich realisierte stöchiometrische Betrieb ist der Schlüssel zur Erreichung konkurrenzfähiger Leistungs- und Drehmomentdichten. Gleichzeitig können im stöchiometrischen Betrieb die dabei entstehenden NO_x -Rohemissionen in einem

gewöhnlichen 3-Wege-Katalysator reduziert werden. Durch die Beschränkung auf den stöchiometrischen Bereich und auf den Magerbetrieb mit $\lambda > 1,8$ werden im H₂-Modus alle weltweit gültigen Emissionsgrenzwerte deutlich unterschritten.

Durch eine monovalenten Ableitung des V12 im neuen H₂-7er mit einer für den H₂-Betrieb angepassten Hardware und einem auf Niedrigstemissionen optimierten Brennverfahren können die Emissionen auf ein praktisch vernachlässigbares Niveau reduziert werden (NZEV - Near Zero Emission Vehicle).

Durch äußere Gemischbildung mit Aufladung oder innere Gemischbildung kann bei zukünftigen H₂-Weiterentwicklungen das Leistungs- und Drehmomentniveau von Motoren mit konventionellen Kraftstoffen erreicht werden.

Mit dem H₂-Verbrennungsmotor können daher alle Vorteile des Wasserstoffs wie CO₂-Freiheit, Diversifikation der Energiequellen und Nachhaltigkeit bei Nutzung regenerativer Energiequellen ökonomisch umgesetzt werden. Gleichzeitig ermöglicht er die Umsetzung der BMW Zielsetzung nach effizienter Dynamik.

Der H₂-12-Zylinder im neuen H₂-7er ist ein wichtiger Schritt in diese Richtung. Das Wasserstoffzeitalter hat begonnen!

Biokraftstoffe

Bereitstellungsformen von Kraftstoffen aus Biomasse

Frank Behrendt, York Neubauer

Technische Universität Berlin

1 Motivation

Verbrennungsmotoren bieten weiterhin ein nicht zu unterschätzendes Innovationspotential und werden uns daher – wenn auch in z. T. erheblich weiter entwickelter Form - noch mehrere Jahrzehnte begleiten. Ein radikaler Systemwechsel ist angesichts der umfassenden Verbreitung dieser Technologie nicht wahrscheinlich. Eng daran gekoppelt sind flüssige Kraftstoffe gegenwärtig und auf absehbare Zeit das Lebenselixier entwickelter Gesellschaften. Mobilität ist eng mit Benzin, Diesel und Kerosin verbunden. Alleine ist Deutschland wurden im Jahre 2005 29 Mio. t Diesel- und 23 Mio. t Ottokraftstoff verläuft. Während in den nächsten Jahrzehnten eine nur schrittweise Einführung alternativer Antriebsformen zu erwarten ist, wird die Herkunft der flüssigen Kraftstoffe einer deutlichen Wandlung unterliegen. Ihre Herkunft wird sich weg vom Erdöl hin zur Synthese aus Ergas, Kohle und Biomasse verlagern. Hierbei werden schon lange bekannte technische Konzepte wie die Fischer-Tropsch-Synthese oder auch die Direktverflüssigung des Ausgangsmaterials wieder aufgegriffen werden, wenn auch in deutlich weiter entwickelter Form. Dieser Beitrag gibt einen Überblick zu den wichtigsten, heute diskutierten Substitutionsmöglichkeiten für die konventionellen, auf Rohöl basierenden Kraftstoffe.

An der Gewinnung von Kraftstoffen aus Biomasse wird schon seit einigen Jahren wieder verstärkt geforscht. War während und nach dem 2. Weltkrieg Holzgas ein alternativer Kraftstoff, dessen Nutzung aus einer Mangelsituation heraus gefordert wurde, waren in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts die Ölkrisen Auslöser für die Suche nach Alternativen zum Erdöl.

Das absehbare Erreichen der maximalen Förderung von Erdöl und der steigende Verbrauch insbesondere in Asien führen zur Verknappung und damit zu hohen und weiter steigenden Preisen. Ein Literpreis von „5 DM“ ist heute keine politische Utopie mehr, sondern entwickelt sich zu einer möglicherweise schon bald recht unerfreulichen Realität.

Der Übergang zur Gewinnung flüssiger Kraftstoffe aus anderen Quellen als Rohöl, wobei hier im Besonderen biogene Quellen von Interesse sind, wird durch eine Reihe von Gründen begünstigt und finanziell z. T. erheblich gefördert:

- Beeinflussung des Klimas durch CO₂ - Ausstoß aus fossilen Quellen,
- Mögliche Verminderung der Abhängigkeit von heutigen Rohstoffförderländern,

- EU-Direktive zur verstärkten energetischen Biomassenutzung,
- Schaffung neuer Einkommensquellen für heimische Land- und Forstwirtschaft und
- Überbrückung der Zeit bis zu einer umfassenden Verfügbarkeit einer Wasserstoff-basierten Energieversorgung.

Biomasse besitzt unter den erneuerbaren Energieträgern ein erhebliches, bislang aber nur wenig genutztes Potenzial. Die so genannte EU-Biokraftstoffrichtlinie forderte im Bereich der EU für das Jahr 2005 einen Anteil von 2 % an alternativen Kraftstoffen am Kraftstoffverbrauch. Für das Jahr 2010 wird ein Anteil von 5,75 % und für das Jahr von 8 % angestrebt. Biodiesel aus Ölsaaten kann konventionellem Diesel mit einem Anteil von bis zu 5 % beigemischt und unter bestimmten Bedingungen in einem höheren Mischungsverhältnis oder als Reinkraftstoff genutzt werden. Bioethanol auf Basis von zuckerhaltigen Pflanzen, Getreide, Stroh oder Holz kann konventionellem Ottokraftstoff ebenfalls beigemischt werden. Zu diesen „natürlichen“ Biokraftstoffen kommt eine zweite Kraftstoff-Generation, die Biomasse-basierte synthetische Kraftstoffe umfasst (Biomass-to-Liquid, BtL).

Biomasse wird den heutigen Verbrauch an Kraftstoffen nicht decken, aber über verschiedene Umwandlungspfade einen Beitrag zu CO₂-neutralen Kraftstoffen leisten können. Aufgrund ihres Aufkommens verteilt auf große Flächen sowie der geringen Energiedichte müssen sich Wandlungsverfahren für Biomassen anderen Herausforderungen stellen als z. B. bei Erdgas und Kohle.

2 Biomasse

2.1 Struktur und Bewirtschaftung

Die möglichen Pfade zur Nutzung von Biomasse werden durch die sie bildenden Strukturelemente entscheidend mit beeinflusst. Pflanzliche Biomasse besteht im Wesentlichen aus den Makromolekülen Cellulose, Hemicellulose und Lignin. Hinzu kommen noch Anteile an Extraktstoffen und mineralischen Bestandteilen, die sich bei der Verbrennung als Asche wieder finden.

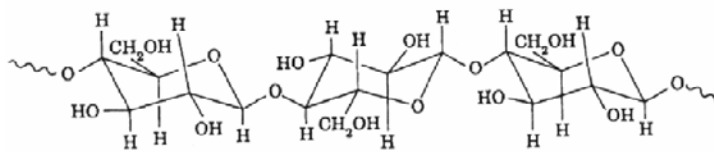


Bild 1: Strukturprinzip der Cellulose

Cellulose ist Grundbestandteil der pflanzlichen Substanz und ihre Produktion übersteigt die aller anderen Naturstoffe. Etwa die Hälfte der photosynthetisch erzeugten Biomasse besteht aus Cellulose. Deshalb nimmt Cellulose im Kohlenstoffkreislauf der Natur neben CO₂ eine zentrale Rolle ein. Cellulose besteht aus Ketten von 1-4-glykosidisch miteinander verknüpften β -D-Glykopyranose - Einheiten mit einem Polymerisationsgrad (Glucoseeinheiten pro Cellulosemolekül) von maximal 14000 für Pflanzen. Als strukturbezogene Elementareinheit ist nicht die Glucose, sondern das Disaccharid Cellobiose anzusehen.

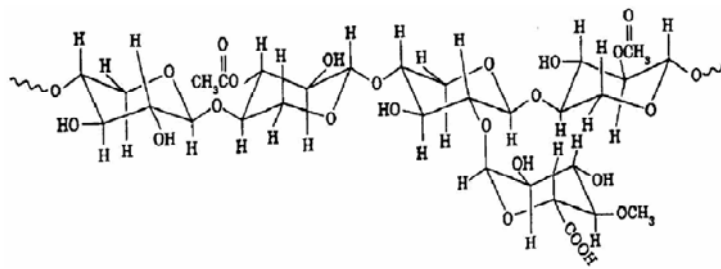


Bild 2: Strukturprinzip der Hemicellulose

Die hohe mechanische Festigkeit sowie die Wasserunlöslichkeit der Cellulose wird auf molekularer Ebene durch die Ausbildung inter- und intramolekularer H-Brückenbindungen erreicht. Erstere verbinden die Einzelketten miteinander, die Einzelketten selbst werden durch intramolekulare H-Brückenbindungen (pro Glucoseeinheit sind es zwei) stabilisiert. Es ergibt sich ein zweidimensionales Netzwerk von H-Brücken. Der feste Zusammenhalt der einzelnen Netzebenen beruht auf van-der-Waals Kräften. Daraus ergibt sich ein dreidimensionales H-Brückennetzwerk [Schlegel1992].

Nach der Cellulose ist **Hemicellulose** das mengenmäßig am weitesten verbreitete Kohlenhydrat in der Natur. Hemicellulosen bestehen aus Pentosen (Xylose, Arabinose) oder Hexosen (Glucose, Mannose, Galactose) sowie Uronsäuren. In der Pflanze haben sie die Funktion von Reserve- oder Stützsubstanzen. Ihr Polymerisationsgrad ist jedoch erheblich geringer (30-100).

Lignin ist nach der Cellulose und neben den Hemicellulosen der dritte mengenmäßig bedeutende Bestandteil der Pflanzen. Das Lignin ist im Pflanzengewebe inkrustiert; es liegt in den Sekundärlamellen der Zellwand vor. Den aus Lignin und Cellulose bestehenden Komplex bezeichnet man auch als Lignocellulose. Lignin ist dasjenige pflanzliche Massenprodukt, welches biologisch am langsamsten abgebaut wird. Es ist damit die Hauptquelle der sich nur langsam zersetzenden organischen Substanzen des Bodens, insbesondere der Huminsäuren [Schlegel1992].

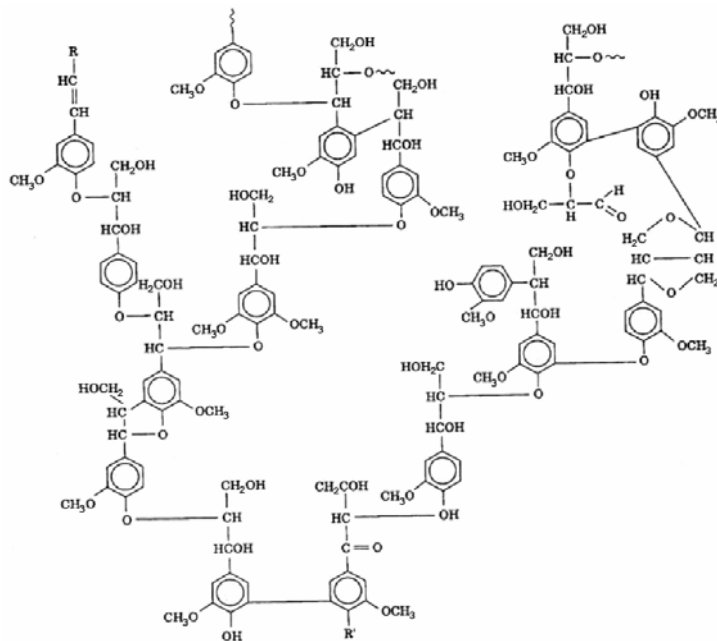


Bild 3: Strukturprinzip des Lignins

Lignin ist chemisch keine einheitliche sondern eine sehr komplexe Verbindung. Diese Komplexität beruht nicht auf einer großen Anzahl verschiedener monomerer Bausteine: Die Grundbausteine sind durchweg Phenylpropan-Abkömmlinge, überwiegend Coniferylalkohol.

Während Fichtenlignin vorwiegend aus Coniferylalkohol besteht, enthält das Laubholzlignin Coniferyl- und Sinpylalkohol und das Gramineenlignin (Gramineen – Süßgräser) außerdem noch Cumarylalkohol. Die Unterschiede in der Zusammensetzung kommen insbesondere im Gehalt an Methoxygruppen zum Ausdruck: Laubholzlignin 20,5 - 21 %, Fichtenholzlignin 15 - 16 % und Gramineenlignin 14-15 % vom Ligningehalt. Im Lignin sind die Phenylpropan-Bausteine durch Ether- und C-C-Bindungen in vielfältiger Form miteinander vernetzt. Diese Bindungen sind gegenüber dem enzymatischen Angriff außerordentlich resistent. In der Pflanze ist Lignin ein inertes Endprodukt des Stoffwechsels, das nicht wieder in den Stoffwechsel einbezogen wird und nur mechanische Funktionen erfüllt. [Schlegel1992].

Biomasse ist ein nachwachsender Rohstoff. Durch Flächenstilllegungen werden in Deutschland gegenwärtig ca. 7 % der landwirtschaftlichen Nutzflächen nicht genutzt. Hiermit stehen zumindest für die oben genannte Ausweitung der Herstellung von Biokraftstoffen prinzipiell genug Flächen zur Verfügung. Der Schwerpunkt des Anbaus wird neben geeigneten Feldfruchtfolgen (Raps, Getreide, Rüben) in Kurzumtriebsplantagen liegen. Die Holznutzung ist problematischer, da Holz zwar gut für Vergasung und Verbrennungsprozesse nutzbar ist, der biochemische Aufschluss aber wegen des Ligninanteils heute noch

Gegenstand der Forschung ist. Hinzu kommt ein zunehmender Wettbewerb um Holz, der zu einem insgesamt steigenden Preisniveau führt.

2.2 Potenziale

In vielen Quellen werden Aussagen über Potenziale für die energetische Nutzung von Biomassen gemacht. Zum einen wird das jährliche Gesamtaufkommen verschiedener Biomassen angegeben. Daraus wird z. B. abgeleitet, dass in Deutschland derzeit jährlich mehr Holz nachwächst als genutzt wird. Für die Bewertung von Prozessen zur Erzeugung von Kraftstoffen aus Biomasse ist es hingegen notwendig, die gesamte Prozesskette vom Acker über Brennstoffaufbereitung und Transport zur Konversionsanlage und weiter bis zur „Zapfsäule“, d. h. der bestehenden Kraftstoffinfrastruktur, zu betrachten. Der Standort einer Konversionsanlage für Biomasse ist ein sehr entscheidender Faktor, da Biomasse, wie schon erläutert, nicht weit transportiert werden sollte. Es kann prinzipiell ein Potenzial für bestimmte Biomassen und eine Region, ein Land oder einen Kontinent angegeben werden. Die Nutzbarkeit hingegen hängt ganz essentiell vom Konversionsweg, der Anlagengröße und den lokal wirklich verfügbaren und uneingeschränkt nutzbaren Ressourcen ab. So wurde z. B. für das „bioliq“-Verfahren (siehe Abschnitt 3.3.2) für zwei mögliche Standorte in Baden-Württemberg eine solche Studie erstellt [Leible2005, Leible2006b]. Für weitere Konversionswege z. B. für Bioethanol [Schmitz2005] oder Biogas [Ramesohl2006] existieren ähnliche Betrachtungen.

3 Nutzungskonzepte für Biomasse

3.1 Übersicht

Kraftstoffe können auf verschiedenen Wegen aus Biomasse erzeugt werden. Dabei ist zu unterscheiden, ob der Kraftstoff kompatibel zu heutigen Otto- und Dieselmotorkraftstoffen sein soll oder ob neuartige Antriebskonzepte hier wiederum bisher nicht gebräuchliche Treibstoffeigenschaften erforderlich machen. Dieses ist z. B. bei homogenen Dieselmotoren (HCCI – homogeneous charge compression ignition) der Fall. Weiter in die Zukunft gerichtet können derartige Konzepte auch die Nutzung von verdichtetem oder verflüssigtem methanhaltigen Gasen oder sogar Wasserstoff beinhalten. Neue Wege sind aber mit Folgekosten hinsichtlich der Infrastruktur verbunden. Im Bereich der Erd- und Flüssiggastankstellen lässt die zunehmende Verfügbarkeit eine sukzessive Substitution konventioneller Tankstellen als Möglichkeit erscheinen.

Die Wandlungsverfahren können nach physikalischen, thermochemischen oder biologischen/biochemischen Prozessen unterschieden werden. Die thermochemischen Verfahren können noch dahingehend unterteilt werden, ob der Kraftstoff aus CO und H₂ (Synthesegas) synthetisiert wird, oder ob Spaltprodukte der biomassestämmigen Makromoleküle soweit zur Reaktion gebracht werden, dass sie Kraftstoffeigenschaften aufweisen.

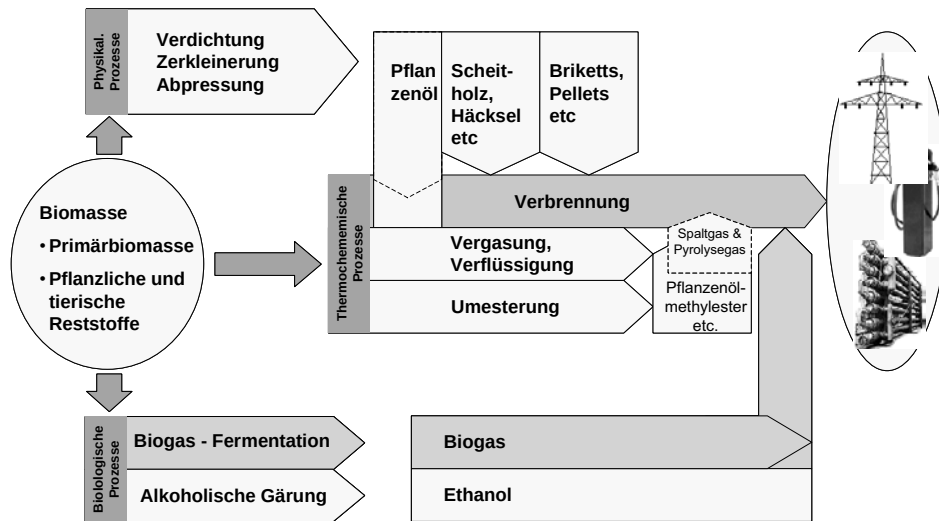


Bild 4: Pfade zur Energiegewinnung aus Biomasse

Darauf basierend können prinzipielle Prozessketten skizziert werden.

- Thermochemisch
 - o Biomasse: Ernte – Transport – Aufbereitung (Trocknung, Zerkleinerung, ggf. Pellettierung) – Transport - Wandlungsanlage
 - Direktverflüssigung: Aufschluss - Hydrierung - Produktaufbereitung
 - Fischer-Tropsch-Synthese: Pyrolyse – Vergasung - Synthese - Produktaufbereitung
 - Wasserstoff (hydrothermale Vergasung, neuartige Vergasungsverfahren wie AER (Adsorption Enhanced Reforming)) sowie Produktgasaufbereitung durch Membranverfahren)
- Biologisch
 - o Biomasse (stärkehaltig): Zuckervergärung – Ethanol/Butanol – ETBE
 - o Biomasse (lignozellulose): Aufschluss – Vergärung – Ethanol/Butanol – ETBE
 - o Biomasse: Fermentation - Biogas

Diese Prozessketten werden heute alle, wenn auch mit verschiedener Intensität, zur Gewinnung von Kraftstoffen aus Biomasse eingesetzt. Die folgenden Pfade dienen heute zur Erzeugung technisch normgerechter und damit technisch nutzbarer flüssiger Kraftstoffe aus Biomasse:

- Nutzung von Pflanzenölen - direkt oder nach chemischer Umwandlung

- Vollständige Zerlegung des Moleküls in die Elemente bzw. kleine Moleküle mittels Pyrolyse oder Vergasung und anschließende Totalsynthese neuer Verbindungen (Fischer-Tropsch-Synthese) verfolgt.
- Teilweise Zersetzung durch Pyrolyse unter Verwerfung aller nicht tauglicher Reaktionsprodukte
- Direktverflüssigung unter reduzierenden Bedingungen (d. h. Hydrierung). Dieser Ansatz geht auf die Arbeiten von Bergius zur Verflüssigung von Kohle zurück.

Diese möglichen Prozessketten werden in den folgenden Abschnitten detaillierter diskutiert.

3.2 Biochemische und biologische Nutzung von Biomasse

Kraftstoffe, die aus Biomasse durch biochemische oder biologische Prozesse gewonnen werden, zählen zu den Biokraftstoffen der ersten Generation. Hierzu zählen die weitgehend unbehandelten Pflanzenöle, der daraus durch chemische Umwandlung hergestellte Biodiesel, das Biogas als Erdgasersatz und diverse Alkohole bzw. Ether.

3.2.1 Pflanzenöle und Pflanzenöl-Methylester

In Deutschland fuhrn 2003 ca. 3000 – 4000 Personenkraftwagen, einige Lastkraftwagen und Busse sowie etwa 100 Schlepper mit reinem Pflanzenöl [Justinger2004]. Der mobile Einsatz im Falle der Verwendung spezieller Motoren (z. B. des Elsbett-Motors) für Sonderfälle ist ausgereift. Im Vergleich zum „Biodiesel“ schneidet reines Pflanzenöl schlechter ab, da die Umrüstungen konventioneller Motoren kostenintensiver sind. Unbehandelte Pflanzenöle sind darüber hinaus problematisch bzgl. ihrer Lagerfähigkeit über längere Zeiträume. Der spontane und nicht vermeidbare Zerfall von Pflanzenölen in ihre Komponenten Fettsäuren und Glycerin bewirkt ein erhebliches Korrosionspotenzial. Aufgrund dieser problematischen Eigenschaften werden unbehandelte Pflanzenöle eine Nischenanwendung biogener Kraftstoffe bleiben. Die Dichte von Pflanzenölen liegt bei 0,92 kg/l, der Brennwert liegt bei 37,6 MJ/kg und die Cetanzahl bei 40 – 44.

Die deutlich weiter verbreitete Variante bei der Nutzung von Pflanzenölen basiert auf der Umesterung des Ausgangsöls mit Methanol zum Methylester („Biodiesel“, im englischsprachigen Raum allgemein als FAME – fatty acid methyl ester bezeichnet). Das in Deutschland wichtigste Produkt ist der Rapsölmethylester (RME). Gegenüber dem Jahr 2000 hat sich in Deutschland die Produktionskapazität für Biodiesel nahezu verzehnfacht. Im Jahr 2005 lag sie bei rund 2,3 Mio. t [Leible2006a], für Ende des Jahres 2006 werden ca. 3 Mio. t erwartet.

Als ökonomisch problematisch hat sich das Nebenprodukt Glycerin erwiesen, bei dem durch die erheblichen Produktionssteigerungen im Bereich des Biodiesels die Marktpreise von ehemals ca. 1.100 auf ca. 250 EUR/t zurückgegangen sind. Die Dichte von Biodiesel liegt bei 0,88 kg/l, der Brennwert liegt bei 37,1 MJ/kg und die Cetanzahl bei 54 - 58.

3.2.2 *Bioethanol und -butanol*

Durch Aufschluss und anschließender Vergärung stärkehaltiger Stoffe (Kartoffeln, Getreidekörner, aber auch Cellulose und Hemicellulose) wird Ethanol erzeugt. Dieser kann mit einem Anteil von bis zu 5 % direkt oder als Ethyl-Tertiär-Butylether (ETBE) bis zu 15 % dem Ottokraftstoff beigemischt werden. Mit E85 gibt es darüber hinaus auch eine in einigen Ländern (z. B. Brasilien und Schweden) eingeführte Variante, die mit fast reinem Ethanol arbeitet (FFV – Flexible Fuel Vehicles). Die Dichte von Ethanol liegt bei 0,79 kg/l, der Brennwert liegt bei 26,8 MJ/kg und die Oktanzahl bei 111 (ROZ).

Alternativ zum Ethanol kann über Zwischenschritte auch Butanol erzeugt werden, der sich durch eine verglichen mit Ethanol um eine ca. 30 % höhere Energiedichte auszeichnet. Hinzu kommt eine wieder verglichen mit Ethanol bessere Mischbarkeit von Ethanol mit Ottokraftstoff.

Ein zukunftsweisender Ansatz ist in der Herstellung von Bioethanol aus Lignocellulosen [Kroner2006]. Hier existiert noch hoher Entwicklungsbedarf, da der enzymatische Abbau der Mischung aus Cellulose, Hemicellulose und Lignin, d. h. der gesamten Pflanze, ein technisch noch nicht gelöstes Problem darstellt. Die Ausweitung der Pflanzennutzung vom Korn auf die ganze Pflanze bzw. die generelle Ausweitung auf lignocellulose-haltiges Material stellt eine erhebliche Erweiterung der stofflichen Basis für Bioethanol und -butanol dar. Hinzu kommt eine insgesamt günstigere Energiebilanz.

3.2.3 *Biogas*

Biogas besteht zu ca. 50 – 75% aus Methan. Es ist daher prinzipiell möglich, Biogas nach entsprechender Aufbereitung für erdgasbetriebene Motoren bereitzustellen. Ob sich der Aufbereitungsaufwand gerade für mobile Anwendungen lohnt, ist fraglich. Ein direkter Einsatz in Feuerungsanlagen und Gasmotoren im Rahmen von Blockheizkraftwerken (BHKW) hat im Rahmen des Erneuerbare Energien Gesetzes (EEG) ein erhebliches Förderungspotenzial und ist daher vorzuziehen. Die Dichte von Biogas liegt bei 0,79 bis 0,83 kg/l, der Brennwert liegt bei 48,5 MJ/kg und die Oktanzahl bei 130 (ROZ). Die Hektarerträge sind beim Biogas verglichen mit ca. 3,5mal so groß (178 GJ/ha statt 51 GJ/ha).

3.3 *Synthetische Biokraftstoffe*

Den oben genannten Biokraftstoffen ist zu Eigen, dass sie unmittelbar aus der ursprünglichen Biomasse gewonnen wurden. Die Umwandlungsprozesse sind hierbei typischerweise rein biochemischer oder biologischer Natur. Bei den synthetischen Kraftstoffen der 2. Generation hingegen wird in einem ersten Verfahrensschritt Synthesegas, eine Mischung aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff, hergestellt. Von diesem Moment an ist nicht mehr zu unterscheiden, ob dieses Synthesegas aus Biomasse (Biomass-to-Liquid, BtL), Erdgas (Gas-to-Liquid, GtL) oder Kohle (Coal-to-Liquid) gewonnen wurde. Die gesamte Verfahrensgruppe wird auch unter dem Begriff „XtL“ zusammengefasst. Der anschließende Syntheseschritt unter Beteiligung so genannter Fischer-Tropsch-Katalysatoren, woraus ein Gemisch relativ langkettiger, unverzweigter Kohlenwasserstoffe entsteht. Dieser

Syntheseschritt wurde in den zwanziger Jahren des letzten Jahrhunderts von den Namensgebern des Verfahrens entwickelt und fand dann intensive Anwendung in Deutschland während des 2. Weltkrieges und später in Südafrika während des Apartheidregimes. In den letzten Jahren wird die Fischer-Tropsch-Synthese verstärkt in der GtL-Variante zur Nutzung von Begleiterdgasen der Erölförderung in Katar und Malaysia eingesetzt. Aus dem Primärprodukt der Fischer-Tropsch-Synthese werden anschließend in einem klassischen Raffinerieprozess hochwertige Kraftstoffe mit sehr gut kontrollierbaren Eigenschaften hergestellt. Die Dichte von BtL-Kraftstoffen (wie auch der anderen XtL-Varianten) liegt bei 0,76 bis 0,79 kg/l, der Brennwert liegt bei 43,9 MJ/kg und die Cetanzahl oberhalb von 70.

Ein weiterer Pfad zu Kraftstoffen stellt die Erzeugung von Methanol aus Synthesegas und der anschließenden Umwandlung des Methanols in Dimethylether (DME). DME kann als Ersatz für Dieselkraftstoff zum Einsatz kommen. Alternativ kann aus Methanol über einen katalytischen Prozess (methanol-to-gasoline, MTG) auch Ottokraftstoff mit hohen Oktanzahlen erzeugt werden. Die Dichte von Dimethylether liegt bei 1,97 kg/l, der Brennwert liegt bei 37,6 MJ/kg und die Cetanzahl bei 55 - 60.

3.3.1 Vergasung

Die umfangreichen Erfahrungen mit Kohle und Gas als Rohstoff können jetzt auf Biomasse als Ausgangsmaterial übertragen werden. Die Prozesselemente beginnend mit dem Synthesegas können hierbei übernommen werden. Problematisch ist hierbei, dass die Anlagengröße entscheidend auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses einwirkt. Hier kann es zu Konflikten zwischen dem relativ geringen Energiegehalt der Biomasse (grob gesprochen nur ein Zehntel des Energiegehaltes fossiler Energieträger) und den daraus resultierenden Einschränkungen im sinnvollen Transportbereich dieser Biomasse kommen. Hierarchische Verfahren mit einem vorgeschalteten Pyrolyseschritt können hier einen Ausweg bieten. Das im nächsten Abschnitt kurz vorgestellte bioliq-Verfahren des Forschungszentrums Karlsruhe gehört in diese Gruppe.

Für den Weg zum Synthesekraftstoff über die Vergasung von Biomassen werden derzeit vor allem Verfahren mit Wirbelschicht- und Flugstromvergasung diskutiert und erprobt. Ziel des Vergasungsprozesses ist die Erzeugung eines sauberen wasserstoffreichen Gases. Wirbelschichtvergaser sind sehr gut skalierbar und haben erlauben eine recht große Bandbreite an Partikelgrößen im Prozess. Durch allotherme Wasserdampfvergasung wird ein hoher Wasserstoffanteil im Gas erreicht und der Verdünnungseffekt durch Stickstoff vermieden. Die benötigte Prozesswärme kann über einen umlaufenden Wärmeträger [Aicherning2003, Mühlen2003] oder über Heatpipes [Karl2004] eingetragen werden. Das Bettmaterial kann auch aus aktiven Komponenten bestehen, welche die Teerbildung beeinflussen oder CO₂ binden und so die Reaktionsführung begünstigen [Specht2006]. Das den Wirbelschichtvergaser verlassende Produktgas muss gründlich entstaubt, von Teeren und anderen schwefel- und chlorhaltigen Spurengasen gereinigt werden, bevor es für die Kraftstoffsynthese eingesetzt werden kann. Nachteilig für die Vergasung von Biomassen im Wirbelschichtvergaser ist die Empfindlichkeit gegen niedrig schmelzende Aschen,

beispielsweise solche von Stroh. Diese können zur Agglomeration des umlaufenden Bettmaterials führen und schlimmstenfalls den Prozess zum Erliegen bringen.

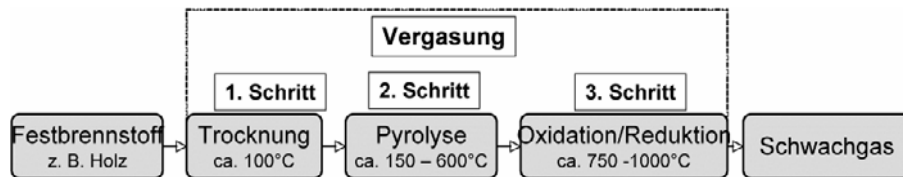


Bild 5: Schema eines Vergasungsprozesses – Das als Schwachgas bezeichnete Produkt kann als Synthesegas eines anschließenden Fischer-Tropsch-Prozesses dienen

In Flugstromvergasern wird reiner Sauerstoff als Vergasungsmittel eingesetzt. Damit werden sehr hohe Vergasungstemperaturen erreicht (1200-1600°C). Die Asche schmilzt in jedem Fall und wird flüssig abgezogen. Damit können quasi alle Biomassequalitäten vergast werden. Auch Teere werden bei den hohen Temperaturen nahezu vollständig umgesetzt. Allerdings muss der Brennstoff fein verstäubt in den Reaktor eingeblasen werden. Aus diesem Grund muss ein größerer Aufwand bei der Brennstoffkonditionierung betrieben werden.

3.3.2 Pyrolyse

Die gerade vorgestellten Vergasungsverfahren basieren auf der Umsetzung der Biomasse mit einer unterstöchiometrischen Sauerstoffmenge. Im Gegensatz hierzu werden die Pyrolyseverfahren unter Sauerstoffausschluss oder zumindest unter extremem Sauerstoffmangel betrieben. In Abhängigkeit von der Verweilzeit bei der entsprechenden Prozesstemperatur ergeben sich bei der Pyrolyse stark unterschiedliche Produktzusammensetzungen (siehe Bild 6 und 7).

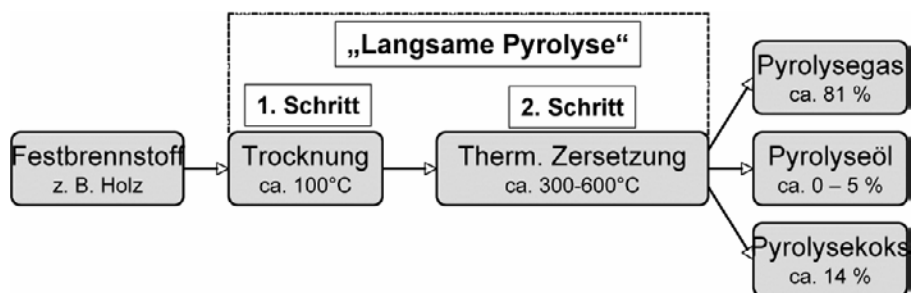


Bild 6: Konventionelle Pyrolyse

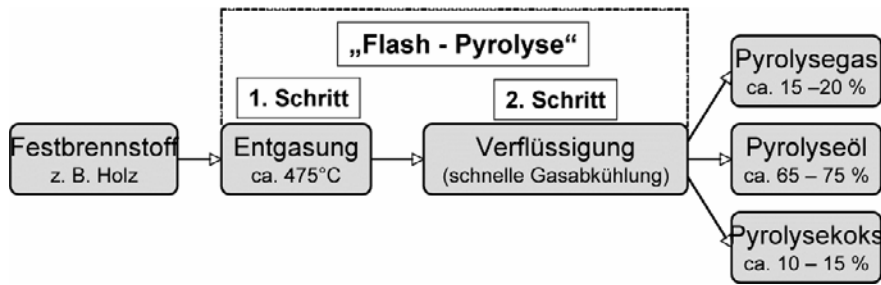


Bild 7: Schnell- bzw. Flash-Pyrolyse

Bei der konventionellen Pyrolyse entsteht überwiegend ein Schwachgas, dessen einzige sinnvolle Nutzung derzeit die direkte Verbrennung bzw. die unmittelbare Nutzung in einem Gasmotor eines KWK-Kraftwerks ist. Das Problem der geringen Energiedichte der Biomasse, die eine Nutzung in größeren, zentralen Anlage nicht sinnvoll macht, wird hierdurch nicht umgangen.

Anders sieht es aus, wenn die Biomasse im Pyrolyseprozess den hohen Temperaturen nur für wenige Sekunden ausgesetzt wird. Die primär gebildeten Pyrolyseöle werden unter diesen Bedingungen nicht weiter zersetzt und können bei einer schnellen Abkühlung des Produktgases als Hauptbestandteil gewonnen werden. Das BtL-Konzept des Forschungszentrums Karlsruhe („bioliq“) sieht eine derartige Schnellpyrolyse in Doppelschneckenreaktoren an dezentralen Standorten vor [Raffelt06]. Das gewonnene Pyrolyseöl wird mit dem Restkoks zu einem Schlamm (slurry) vermengt, der dann aufgrund der höheren Energiedichte zu einer großen zentralen Vergasungsanlage transportiert werden kann. Hier schließt sich dann eine klassische Fischer-Tropsch-Synthese an.

Die Fa. Choren verfolgt ein ähnliches Konzept, aber ohne die dezentrale Komponente. Hier soll in großen, zentralen Anlage in einem ersten Schritt eine Niedertemperaturpyrolyse durchgeführt werden, deren Hauptprodukt Koks, der sich mit weniger Aufwand mahlen lässt, als die Rohbiomasse. Die teerhaltigen Pyrolysegase werden unterstöchiometrisch mit Sauerstoff zu einem fast teerfreien Vergasungsmittel umgesetzt, das anschließend mit dem Koks in einem Flugstromvergaser zu Synthesegas umgesetzt wird. Problematisch bei diesem vor der Pilotphase stehenden Ansatz sind die großen Anlagen und die damit notwendigen weiten Transportwege der rohen Biomasse.

Die niederländische ECN setzt bei der großskaligen zentralen Vergasung ebenfalls auf Flugstromvergaser und plant „torrefaction“ als sanfte thermische Vorbehandlungsmethode zur Versprödung der Biomasse um den Energieaufwand für das Mahlen zu begrenzen. Hier gilt der gleiche prinzipielle Kritikpunkt, der auch der Fa. Choren angesprochen wurde.

Alle erwähnten Flugstromvergaser arbeiten mit Sauerstoff und benötigen somit eine Luftzerlegungsanlage für ihren Betrieb, was die Größe einer Anlage nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten nach unten begrenzt. Studien sprechen von 10-15 solcher Anlagen die das gesamte verfügbare Biomassepotenzial in Deutschland allein nutzen könnten.

Festbettvergaser werden wegen ihrer geringeren Baugrößen und erzielbaren Leistungen nicht für die Synthesegaserzeugung für die Kraftstoffgewinnung betrachtet. Ihr Potenzial liegt eher in der dezentralen Bereitstellung von Kraft, Wärme und Kälte.

3.4 Direktverflüssigung

Neben der Kraftstoffgewinnung über Synthesegas wurden in den 1930er Jahren Hydrierverfahren entwickelt, um Kraftstoffe aus Kohlen zu synthetisieren. Mit dem Aufkommen billigen Erdöls waren diese Prozesse nicht mehr wirtschaftlich durchführbar. Auf diesem Wege könnten prinzipiell auch Biomassen in Kraftstoffe überführt werden. Allerdings hat Biomasse einen hohen Anteil an gebundenem Sauerstoff, der unter Einsatz von Wasserstoff als Wasser oder CO₂ aus dem Prozess ausgeschleust werden muss. Prozesse dieser Art werden als Direktverflüssigung bezeichnet. Um auf diesem Weg aus Biomassen normgerechte Kraftstoffe zu gewinnen, muss erheblicher Aufwand betrieben werden. Daher erscheint die indirekte Verflüssigung über Vergasung und anschließender Synthese momentan viel versprechender. Ein etwas abgewandelter Weg ist die thermische Behandlung der Biomasse um ein so genanntes „Biocrude“ zu erzeugen, welches dann mittels Hydrierung zu Kraftstoffen weiterverarbeitet werden kann.

3.5 Wasserstoff

Für heutige technische Anwendungen wird Wasserstoff fast immer aus fossilen Energieträgern gewonnen (Weltproduktion rund 600 Mrd. m³ (ca. 45 Mio. t) – zu 48 % aus Erdgas mittels Dampfreformierung, zu 30 % aus Erdöl, zu 18 % aus der Vergasung von Kohle und nur zu 4 % aus mittels Elektrolyse aus Wasser). Ausser bei der letztgenannten Elektrolyse wird hierbei CO₂ freigesetzt, was, bezogen die Auswirkungen auf das Klima, die prinzipiell positive Anwendung des Wasserstoffs zumindest fragwürdig erscheinen lässt. Die Dichte des Wasserstoffs beträgt 0,09 kg/m³, sein Brennwert: 120 MJ/kg.

Alternative Zugänge zum Wasserstoff bestehen zum einen die Elektrolyse von Wasser, wobei der Strom hierbei wiederum ohne Freisetzung von CO₂ gewonnen werden muss. Zum anderen kann der Wasserstoff aus Pyrolyse- und Vergasungsprozessen von Biomasse gewonnen werden. Hierbei muss durch geeignete Verfahren der Wasserstoff vom restlichen Produktgas abgetrennt und gereinigt werden. Zum heutigen Zeitpunkt sind keine technisch ausgereiften und finanziell akzeptablen Lösungen verfügbar.

4 Ausblick

Die in diesem Beitrag beschriebenen Prozesse haben deutlich unterschiedliche technische Reifegrade erreicht. Die heute dominierenden Produkte Pflanzenöle, Biodiesel und Bioethanol werden mittelfristig von synthetischen Kraftstoffen abgelöst werden, wobei in diesem Bereich noch erhebliche Entwicklungsarbeiten zu leisten sind.

Prozesse wie die Fermentation zur Erzeugung von Bioethanol aus Stärke bzw. Zucker sind wohl etabliert, sind aber in Deutschland aufgrund der mit verglichen Brasilien (und potentiell

auch mit anderen Ländern, die Zugang zu Zuckerrohr anstelle der heimischen Zuckerrübe haben) vergleichsweise teuer. In diesem Bereich ist der zukunftsweisende Ansatz der enzymatische Aufschluss von Lignocellulose und die damit mögliche Nutzung der ganzen Pflanze. Die intensiven Forschungsaktivitäten in den USA und Kanada sollten auch in Deutschland zum Anlass genommen werden, diesen Bereich sehr intensiv in einer kooperativen Anstrengung von Gentechnikern, Mikrobiologen und Verfahrenstechnikern zu bearbeiten. In diesem Zusammenhang sind auch die laufenden Arbeiten, die statt des Bioethanols Biobutanol als Produkt anstreben, zu beachten.

Synthetische Kraftstoffe für mobile Anwendungen sind die große Herausforderung für Forschung und Entwicklung der nächsten Jahre. Dieses gilt sowohl für landgebundene Fahrzeuge wie auch für Luft- und Seefahrzeuge. Die prinzipielle Verfügbarkeit aller notwendigen Teilschritte muss jetzt um die verlässliche und durchgehend verfügbare technische Implementierung erweitert werden. Der Konflikt zwischen der geringen Energiedichte von Biomasse und der angestrebten – und bei der eingesetzten Technik auch nicht vermeidbaren – Anlagengröße ist ein noch nicht befriedigend gelöstes Problem.

Bleibt letztendlich die Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse – diese stellt, genau wie alle Prognosen zur flächendeckenden Einführung von Brennstoffzellen und andere Nutzungsmodelle des Wasserstoff, ein eher langfristiges Problem dar. Entlang der Prozesskette, die für die Etablierung dieses Ziels implementiert werden muss, sind zahlreiche Fragen noch offen, die noch erheblichen, auch grundlegenden Forschungsbedarf bedingen.

5 Literatur

[Aicherning2003] Aicherning, C., Hofbauer, H., Koch, R.: Das Güssing-Projekt. in: Biomasse-Vergasung – Der Königsweg für eine effiziente Strom- und Kraftstoffbereitstellung? Internationale Tagung Leipzig Oktober 2003, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“. Band 24. Münster. Landwirtschaftsverlag, 2004.

[Justinger04] Justinger, G., Honecker, H.: F&E – Strategien, Umsetzungsmaßnahmen und Kooperationen für die Erzeugung biogener Kraft- und Brennstoffe. DGMK Fachbereichstagung „Energetische Nutzung von Biomassen“ 19. bis 21. April 2004 Velen, S. 7-15.

[Karl2004] Karl, J., Karellas, S., Kuhn, S., Metz, T.: Erzeugung von Synthesegas mit dem Biomass Heatpipe Reformer – Betriebserfahrungen und Leistungsgrenzen. DGMK Fachbereichstagung „Energetische Nutzung von Biomassen“ 19. bis 21. April 2004 Velen, S. 55-64.

[Kroner2006] Kroner, T., Prechtel, S., Igelspacher, R., Schieder, D., Schwarz, W. H., Antoni, D., Faulstich, M.: Bioethanolproduktion aus Lignocellulose. Stand der Technik und Perspektiven. BWK, 58 (3) 2006, S. 50-58.

[Leible2005] Leible, L., Kälber, S., Kappler, G.: Entwicklungen von Szenarien über die Bereitstellung von land- und forstwirtschaftlicher Biomasse in zwei baden-

württembergischen Regionen zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen – Mengenszenarien zur Biomassebereitstellung – Studie im Auftrag der DaimlerChrysler AG, Abschlussbericht – Juni 2005 (www.itas.fzk.de/deu/lit/2005/leua05a.pdf).

[Leible2005] Leible, L., Kälber, S., Kappler, G.: Entwicklungen von Szenarien über die Bereitstellung von land- und forstwirtschaftlicher Biomasse in zwei baden-württembergischen Regionen zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen – Mengenszenarien zur Biomassebereitstellung – Studie im Auftrag der DaimlerChrysler AG, Abschlussbericht – Juni 2005 (www.itas.fzk.de/deu/lit/2005/leua05a.pdf)

[Leible2006a] Leible, L., Kälber, S., Nieke, E.: Biogene Kraftstoffe – Kraftstoffe der Zukunft?. Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 15 (1) 2006, S. 4-9

[Leible2006b] Leible, L., Kälber, S., Kappler, G., Lange, S., Nieke, E., Proplesch, P., Wintzer, D., Fürniß, B.: Synthesekraftstoff aus Stroh und Waldrestholz – ein Vergleich mit der Wärme- und Stromgewinnung. DGMK Fachbereichstagung „Energetische Nutzung von Biomassen“ 24. bis 26. April 2006 Velen, S. 23-30

[Mühlen2003] Mühlen, H.-J., Schmid, C.: Der blaue Turm – Wasserstoff aus Biomasse. in: Biomasse-Vergasung – Der Königsweg für eine effiziente Strom- und Kraftstoffbereitstellung? Internationale Tagung Leipzig Oktober 2003, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“. Band 24. Münster. Landwirtschaftsverlag, 2004

[Raffelt2006] Raffelt, K., Henrich, E., Renck, C., Stahl, R., Steinhardt, J., Dinjus, E.: Produktion von Synthesegase aus Schlämmen pyrolysierter Strohhäcksel. DGMK Fachbereichstagung „Energetische Nutzung von Biomassen“ 24. bis 26. April 2006 Velen, S. 121-128

[Ramesohl2006] Ramesohl, S.; Scholwin, F.; Hofmann, F.; Urban, W.; Burmeister, F.: Analyse und Bewertung der Nutzung von Biogas. Teil 1: Potenziale, Kosten und Emissionen BWK 58 (3), 2006 S. 45-49

[Schlegel1992] Schlegel, H. G.: Allgemeine Mikrobiologie. 7. Auflage. Stuttgart, New York : Georg Thieme Verlag, 1992

[Schmitz2005] Schmitz, N. (Hrsg.): Innovationen bei der Bioethanolerzeugung und ihre Auswirkungen auf Energie- und Treibhausgasbilanzen. Neue Verfahren, Optimierungspotenziale, internationale Erfahrungen und Marktentwicklungen. Münster, Landwirtschaftsverlag, 2005

[Specht2006] Specht, M., Dürrbeck, M., Marquard-Möllenstedt, T., Sichler, P., Zuberbühler, U.: Der AER Prozess: Neues thermochemisches Biomasse-Vergasungsverfahren mit flexiblen Edukt-und Produktströmen. DGMK Fachbereichstagung „Energetische Nutzung von Biomassen“ 24. bis 26. April 2006 Velen, S. 55-64

BTL-Kraftstoffe aus Biomasse – Das Karlsruher bioliq®-Verfahren

N. Dahmen, E. Dinjus, E. Heinrich

Forschungszentrum Karlsruhe

Einleitung

Lignocellulose in Form von Stroh, Heu oder Restholz ist mit Abstand die billigste und am häufigsten vorkommende Biomasse. Derzeit werden in Deutschland derzeit ca. 3 % des Primärenergiebedarfs gedeckt. Durch konsequente Nutzung aller biogenen Rest- und Abfallstoffe lässt sich dieser Anteil bis auf ca. 12 % steigern [1]. Da Biomasse die einzige erneuerbare Kohlenstoffquelle ist, kann sie langfristig einen Teil der fossilen Rohstoffquellen und Energieträger ersetzen. Dies wird sowohl in der Herstellung organischer Chemieprodukte, aber auch bei der Erzverhüttung (Reduktionsmittel) als auch in Hochtemperaturprozessen (Zement, Keramik) der Fall sein. Die Umstellung der organischen Chemieindustrie auf Biomasse als Rohstoff ist eine langfristige und umfangreiche Herausforderung an die chemische Forschung und Entwicklung. Abgesehen von der bereits heute praktizierten Verwertung von Naturstoffen ist der wirtschaftliche Anreiz zur intensiveren chemischen Biomassennutzung für Massenprodukte derzeit noch gering. Die rechtzeitige Entwicklung entsprechender Technologien ist jedoch eine Vorsorgemaßnahme, die schon heute unsere Ölabhängigkeit mindern und die Wettbewerbsfähigkeit verbessern kann. Der Nutzung dieser einzigartigen Eigenschaft von Biomasse zur Herstellung von Synthesekraftstoffen und organischen Chemikalien sollte daher Priorität vor einem Einsatz im Strom- oder Wärmemarkt eingeräumt werden.

Synthesekraftstoffe aus Biomasse (BTL, biomass to liquids) könnten schon kurzfristig einen Teil der fossilen Energieträger ersetzen und somit auch einen Beitrag zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes leisten. Weiterhin steigende Rohölpreise und Aspekte der Versorgungssicherheit tragen zusammen mit bereits vorhandenen Vorgaben dazu bei, dass die Suche nach Lösungen politisch und wirtschaftlich neue Impulse erhält. So will beispielsweise die EU den derzeitigen Anteil von 2 % Biokraftstoffen bis 2010 auf 5,75 % erhöhen. Mit Biodiesel, Pflanzenöl und Bioethanol wurde der für 2005 avisierte Biokraftstoffanteil von 2 % mit erreichten 3,75 % deutlich überschritten (entspricht 2,22 Mio.t von derzeit 53,5 Mio.t). Für den weiteren Ausbau des biogenen Kraftstoffanteils haben die BTL-Kraftstoffen nach Angabe der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe FNR jedoch das größere Mengen- und CO₂-Reduktionspotenzial.

Der Weg zur Herstellung von Synthesekraftstoffen aus fossilen Rohstoffen, vornehmlich aus Kohle und Erdgas (CTL bzw. GTL-Kraftstoffe), ist im Prinzip seit langem bekannt. Für biogene Festbrennstoffe ist für diesen Weg eine adäquate Technologie erst noch zu

entwickeln. Kohle oder Erdgas werden durch Reaktion mit Wasserdampf und Sauerstoff zunächst in ein Syntheserohgas umgewandelt und nach einer Reinigung und Konditionierung katalytisch bei erhöhten Drücken und Temperaturen zum gewünschten Produkt umgesetzt. Die bereits etablierten chemischen Hauptpfade zur Herstellung von Synthesekraftstoffen sind die Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) und die Methanolsynthese (siehe Abb.1) [2,3]. Das FT-Rohprodukt besteht aus einem großen Spektrum Kohlenwasserstoffen, die je nach gewünschtem Zielprodukt aufgetrennt und weiter verarbeitet werden. Methanol ist einerseits Zwischenprodukt für einen MtG-Prozess (Methanol to Gasoline), z. B. über das Lurgi MtS-Verfahren (Methanol to Synfuel). Es ist aber auch direkt in der Kraftstoffwirtschaft einsetzbar. Es findet Verwendung bei der Synthese des Antiklopfmittels MTBE (Methyl-tert.-Butylether), zur Herstellung von RME (Rapsmethylester, Biodiesel) durch Veresterung von Rapsöl und als Direktkraftstoff als Wasserstoffträger beim Einsatz in Hochtemperatur-Brennstoffzellen. Der Vorteil bei der Herstellung vollsynthetischer Kraftstoffe als Biokraftstoffen der 2. Generation ist, dass diese reiner und umweltverträglicher als erdölstämmige Kraftstoffe sind und sich auf spezifische Anforderungen, z. B. seitens der Automobilhersteller und der strenger werdenden Abgasnormen, hin maßschneidern lassen. Sie sind mit der heute vorhandenen Verteilungsinfrastruktur direkt nutzbar, erfordern keine neue Antriebstechnik und erlauben den gleichen Aktionsradius wie erdölstämmige Kraftstoffe.

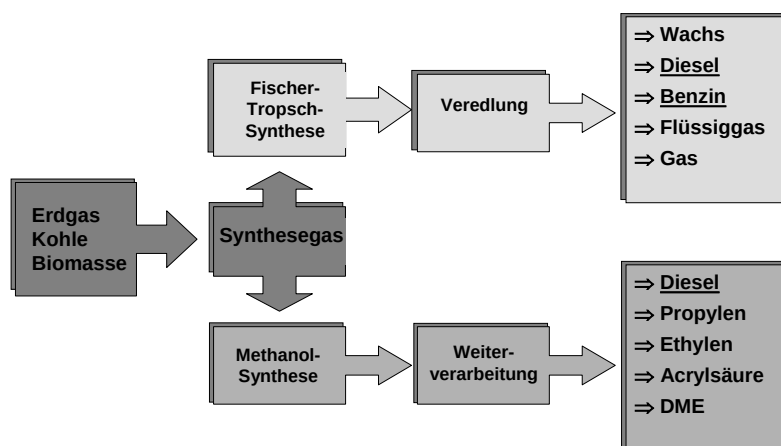


Abb.1: Nutzungspfade von Synthesegas

Problemstellung

Im Vergleich zum Einsatz fossiler Energieträger ist die Synthesegaserzeugung aus Biomasse komplexer und aufwändiger. Dabei lassen sich für eine großtechnische Nutzung vor allem folgende Problemstellungen identifizieren:

Biomasse fällt in einem regional verteilten Aufkommen an, d. h. sie muss großflächig eingesammelt und über entsprechend weite Wege transportiert werden.

Insbesondere die weniger wertvolle, aschereiche Biomasse weist eine niedrige volumetrische Energiedichte auf (Ballenstroh ca. 2 GJ/m^3). Auch hier stellt sich die Frage nach wirtschaftlich vertretbaren Transportstrecken.

Es existieren eine große Vielfalt einsetzbarer Biomassen. Es ist zu gewährleisten, dass die eingesetzten Verfahren eine möglichst große Bandbreite von Einsatzstoffen verarbeiten können.

Die Biomasse wird der Biosphäre entnommen; für eine langfristige Nutzung ist eine ökologisch verträgliche Entnahme des Rohstoffs zu gewährleisten.

Biomassen sind heterogene Festbrennstoffe mit teilweise unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung; Festbrennstoffe erfordern prinzipiell einen größeren verfahrenstechnischen Aufwand. Die Anlehnung an bereits bekannte, etwa bei der Verarbeitung fossiler Rohstoffe bewährte Technologien hilft, Entwicklungszeiten zu verkürzen und Risiken zu mindern.

Insbesondere die hohen Aschegehalte vieler Biomassen (Stroh, Heu aber auch Kronenholz) verursachen bei thermochemischen Prozessen Probleme durch Korrosion, Verklebung und Verstopfung in den technischen Apparaten.

Die Kraftstoffsynthesen erfordern ein teerfreies, methanarmes Synthesegas bei hohen Drücken (FTS bis 30 bar, Methanol- und DME bis 80 bar) und eine aufwändige Reinigung von Spurenstoffen, die als Katalysatorgifte wirken. Auf der anderen Seite erleichtert oder ermöglicht dies erst die Einhaltung strengerer Abgasnormen beim Einsatz des Kraftstoffs.

Biomasse mit ihrer durchschnittlichen chemischen Zusammensetzung $\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_4$ führt bei einer Vergasung zu einem für die Herstellung von Kohlenwasserstoffen ungenügenden C/H-Verhältnis um Eins. Die macht einen zusätzlichen Schritt, die Wassergas-Shift-Reaktion notwendig, bei der durch Zugabe von Wasser ein Teil des CO in Wasserstoff und CO_2 umgewandelt wird. Dies führt zu einer schlechten Kohlenstoffeffizienz; es ist langfristig sinnvoll, den zusätzlichen Wasserstoffbedarf aus anderen regenerativen Energiequellen zugänglich zu decken.

Darüber hinaus hat die Nutzung von Biomasse auch soziale Aspekte, da die Acker-, Grünland- und Forstwirtschaft in ihrer neuen Rolle als Lieferant oder Verarbeiter von Energie-Rohstoffen neue Logistik- Einkommens- und Arbeitsstrukturen aufbauen muss.

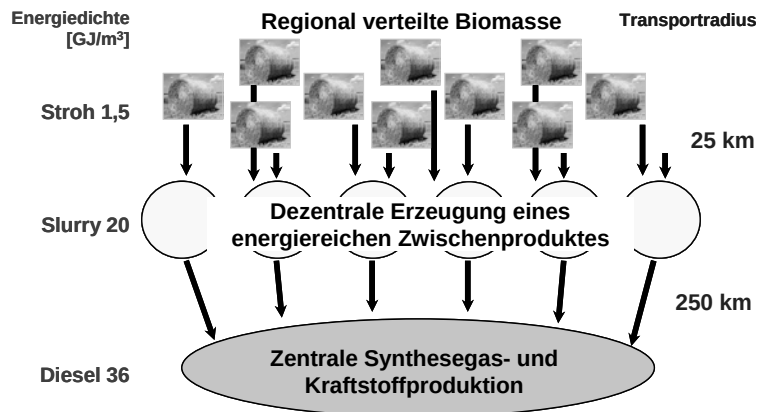


Abb.2: Das dezentral-zentral einsetzbare Bioslurry-Vergasungskonzept

Das Karlsruher BtL-Verfahren bioliq[®]

Das Karlsruher BtL-Konzept wurde entwickelt, um zumindest einen Teil der oben genannten logistischen und technischen Hürden mit Schwerpunkt auf die Nutzung von relativ preisgünstiger, bisher weitgehend ungenutzter Restbiomasse zu nehmen. Diese enthalten mehr Asche und Heteroatome als etwa rindenfreies Holz und bereiten bei der Verwertung als chemisch-technischer Rohstoff deshalb größere Schwierigkeiten. Der Karlsruher Synthesekraftstoff wird nach einem mehrstufigen Verfahren, dem bioliq[®]-Prozess hergestellt [4,5]. In einem ersten Schritt wird aus der dezentral anfallenden Biomasse durch Schnellpyrolyse Pyrolyseöl und -koks erzeugt (Abb.5). Die kalten Brennstoffpartikel werden im bewegten, heißen Sand rasch auf etwa 500°C aufgeheizt und im Gleichstrom durch den Reaktor gefördert, den die Pyrolysedämpfe im Kreuzstrom nach kurzer Kontaktzeit mit der Sandoberfläche innerhalb weniger Sekunden verlassen [6]. Der hierbei eingesetzte LR-(LURGI-RUHRGAS)-Mischreaktor wird seit etwa 40 Jahren industriell als „Sand-Cracker“ zur Schnellpyrolyse verschiedener Raffinerieprodukte eingesetzt [7]. Das entstehende Pyrolysegas lässt sich prozessintern zur Aufheizung des Wärmeträgers verwenden. Die entstehenden Pyrolysekokse und Pyrolyseölkondensate werden in einem Kolloidmischer zu einem transportstabilen, pumpbaren Bioslurry mit über zehnmal höherer Energiedichte vermischt.

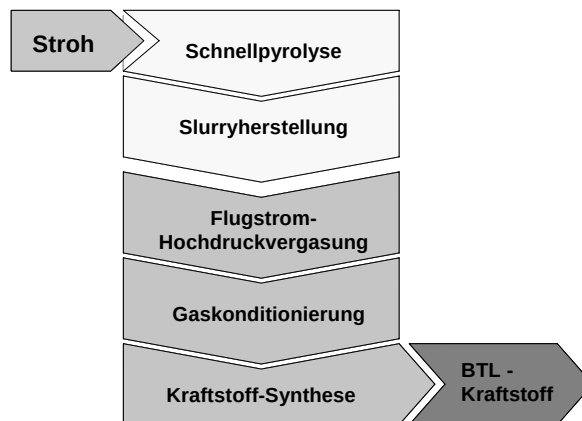


Abb.3: Verfahrensschritte des bioliq[®]-Verfahrens

Das besondere an diesen Bioslurrys ist, dass organischer Teer und wässriges Kondensat (siehe Abb. 4) mit über 30 Gew.% Koks in einer stabilen Mischung vorliegen, ohne dass sich die Phasen mit der Zeit trennen. Die Schnellpyrolyse ist an dieser Stelle notwendig, um das für eine Bioslurryherstellung ideale Mischverhältnis von Pyrolysekondensaten zu Pyrolysekoks zu erhalten, um eine vollständige Nutzung beider Komponenten ermöglichen [8,9]. In Abb. 4 sind einige Daten im aufgetragen, die an einer Laboranlage bei LURGI Frankfurt, mit einem Durchsatz von 3 kg/h für verschiedene Einsatzstoffe ermittelt wurden. Die Materialien 1 - 4 sind verschiedene Holzarten, Nr. 5 - 8 unterschiedliche Strohsorten. Sie zeigen deutlich, dass zwischen den verschiedenen Arten, aber auch innerhalb derselben Gruppe von Biomasse signifikante Abweichungen auftreten können, die in der weiteren Prozessführung zu berücksichtigen sind.

Der Bioslurry wird in einem zentralen Hochdruck-Flugstromvergaser mit heißem Sauerstoff zerstäubt und unterstöchiometrisch ($\lambda \approx 1/3$) bei Temperaturen über 1200 °C zu einem teerfreien und methanarmen Rohsynthesegas umgesetzt [10-12]. Die Vergasung findet dabei oberhalb des Drucks der nachgeschalteten Synthese statt, so dass eine aufwändige Zwischenkompression entfallen kann. Der Flugstromvergaser vom GSP-Typ (Gaskombinat „Schwarze Pumpe“) eignet sich besonders zur Vergasung aschereicher Biomassen, da er vom ehemaligen Deutschen Brennstoff Institut (DBI) in Freiberg (Sachsen) speziell zur Vergasung der mitteldeutschen Salzbraunkohle entwickelt wurde [13]. Dies macht der Einsatz eines Kühlschirmes möglich, an dem die Asche als flüssige Schlacke niederschlägt und aus dem Reaktor abläuft (Abb. 6). Die Eignung dieses Vergasertyps wurde in bisher vier Versuchskampagnen mit unterschiedlichen Bioslurrys und Betriebsparametern mit dem 3-5 MW Pilotvergaser bei FUTURE ENERGY, Freiberg, nachgewiesen. Dabei wurden Bioslurrys mit bis zu 40 Gew.% Koks eingesetzt, aus denen ein praktisch teerfreies, methanarmes (< 0,1 Vol.%) Synthesegas, bestehend aus 43-50 Vol.% Kohlenmonoxid, 20-30 Vol.% Wasserstoff und 15-18 Vol.% CO₂ erzeugt werden.

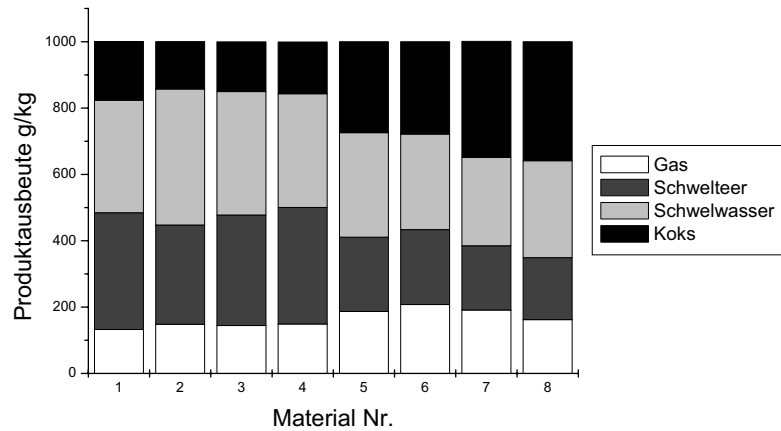


Abb.4: Ausbeuten bei der Pyrolyse von Holzmehl und Stroh durch Schnellpyrolyse

Das Synthesegas wird gereinigt, konditioniert und bereits unter Prozessdruck einer chemischen Synthese zugeführt. Die Herstellung von Synthesekraftstoffen im großen Maßstab ist Stand der Technik. Das zeigt beispielsweise die Firma SASOL, die mit ihren CTL-Anlagen aus Steinkohle mehr als 6 Mt/a an FT-Produkten hergestellt. Auf diese Weise können aus ca. 7,5 t lufttrockenem Stroh ca. 1,5 t Synthesekraftstoff erzeugt werden. Dabei verbleiben knapp 50 % der ursprünglich in der Biomassen enthaltenen Energie im flüssigen Produkt. Als Nebenprodukte werden Wärme und Strom erzeugt, mit denen sich der Energiebedarf des Gesamtprozesses vollständig decken lässt.

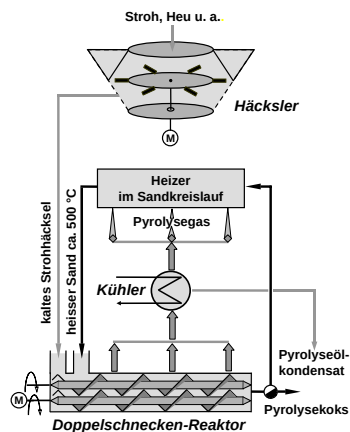


Abb. 5: Prinzip-Schema der Schnellpyrolyse mit Doppelschnecken-Mischreaktor

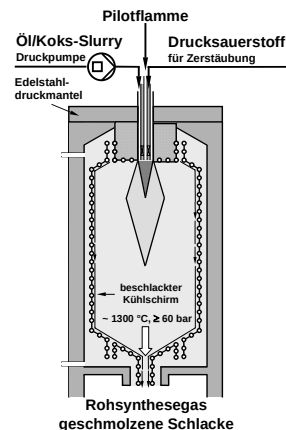


Abb. 6: Prinzip-Schema des GSP-Hochdruck-Flugstromvergasers

Die bisherigen Arbeiten zeigen erstmals, dass auch hoch mit Koks beladene Bioslurrys aus Biomasse-Pyrolyseprodukten mit reinem Sauerstoff in einem Flugstromvergaser bei hohen Drucken sicher und vollständig zu einem teerfreien Synthesegas umgesetzt werden können. Das Verfahren ist praktisch für alle Stoffe geeignet, die bei einer Schnellpyrolyse ein ausreichend stabiles Kondensat für die Suspension des Koks pulvers liefern: neben Stroh auch andere dünnwandige Restbiomasse, wie als Futter unbrauchbares Heu, aber auch Holz sowie Papier- und Pappeabfälle. Die Eignung von Energiepflanzen wird derzeit untersucht.

Nachdem nun die technische Machbarkeit des Prozesses mit dem Nachweis der Eignung seiner Verfahrensschritte abgesichert ist, kann jetzt das Gesamtverfahren mit Nachdruck weiter entwickelt werden. Dazu wird im Forschungszentrum im Rahmen eines vom BMELV bzw. der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) geförderten Vorhabens unter Industriebeteiligung eine Pilotanlage mit einem Biomassedurchsatz von 500 kg/h errichtet.



Abb.7: Prozessgebäude der entstehenden bioliq-Pilotanlage

Die Pilotanlage dient der Demonstration und Weiterentwicklung des Prozesses, dem Nachweis der Praktikabilität der eingesetzten Verfahren, der Vorbereitung einer Maßstabsvergrößerung in eine kommerziell relevante Größenordnung und der Erstellung einer verlässlicher Kostenschätzung. Der erste Bauabschnitt, der die Biomassezerkleinerung, die Schnellpyrolyse und die kontinuierliche Bioslurrymischung umfasst, wurde in 2005 bewilligt und begonnen. Die Arbeiten zur Errichtung des Gaserzeugers sollen im laufenden und eine Kraftstoffsynthese im Jahr 2007 begonnen werden. Abb. 7 vermittelt einen Eindruck des entstehenden Prozessgebäudes. In dem gut erkennbaren turmartigen Aufbau ist die Pyrolyseanlage untergebracht, die zusammen mit der LURGI AG, Frankfurt, in 2006 errichtet und ab 2007 betrieben wird.

Kostenbetrachtung und Potenzial

Das Karlsruher BTL-Verfahren wird insbesondere den Anforderungen des räumlich verteilten Biomasse-Aufkommens in der Landwirtschaft gerecht, indem die Schnellpyrolyse und Bioslurryherstellung mit ihrer Energieverdichtung des Ausgangsmaterials in einer größeren Zahl dezentral aufgestellter Anlagen erfolgen kann, während die Vergasung und nachfolgend die Gaskonditionierung und Synthese zentral in einer wirtschaftlich sinnvollen Großanlage abläuft, die per Bahn- oder Straßentransport mit dem Bioslurry versorgt werden. Betrachtet man ein Szenario, in dem aus etwa 40 Schnellpyrolyseanlagen mit einer Kapazität von je 200 Mt/a Bioslurrys für die Verarbeitung in einer zentralen Gaserzeugung und Kraftstoffherstellung mit einer Kapazität von 1 Mio.t Kraftstoff hergestellt werden, dann ergeben sich mit einem Preis von 70 Euro/t für das lufttrockene Einsatzgut Herstellungskosten von unter einem Euro je Kilogramm Kraftstoff. Die prozentuale Aufteilung der Kosten (Abb.8) zeigt, dass etwa die Hälfte dieser Kosten auf Bereitstellung der Biomasse zurückzuführen ist.

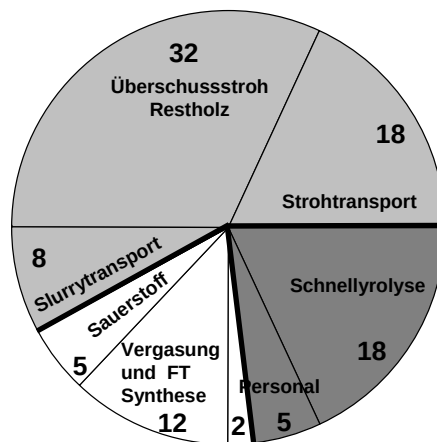


Abb.8: Prozentuale Verteilung der Erzeugungskosten von BTL-Synthesekraftstoff nach dem Karlsruher BTL-Verfahren

Die Kosten für die biogenen Einsatzstoffe liegen heute im Verhältnis zu denen für fossile Einsatzstoffe gleich oder höher. Allerdings ist der hohe spezifische Massendurchsatz, die Ein- und Ausschleusung von festem Rohstoff bzw. Rückstand aus Prozessräumen und die aufwändige Reinigung des Synthesegases prinzipiell für höhere Prozesskosten verantwortlich. Auch wenn für die Gaserzeugung und Synthese die Größenordnung von Raffineriebetrieben anzustreben ist, wird man hier eher an der unteren Grenze bleiben. Dadurch verursacht, werden auch die Anlagen der Kostendegression entsprechend teurer sein. Durch ein breiteres Spektrum von Einsatzstoffen kann die Flexibilität, Anlagenauslastung und Wirtschaftlichkeit verbessert werden. Die Einsatzstoffe sind dabei keineswegs auf reine Biomasse beschränkt. Prinzipiell sind alle Anmischungen aus Biomasse, fossilen Brennstoffen oder organischen Rückständen, sowie beliebige Mischungen mit Heizwerten über 10 MJ/kg geeignet. Durch Integration des Vergasers in einen Anlagenverbund der chemischen Industrie kann auch die Diversifikation der nutzbaren Produkte verbreitert werden. Neben der Option auf die langfristig notwendige Nutzung von Biomasse als Kohlenstoffquelle lassen sich so schon in absehbarer Zeit wirtschaftliche Verfahren realisieren.

Der Fokus bei der Verfahrensentwicklung liegt derzeit auf bisher wenig genutzter, minderwertiger Biomasse wie überschüssiges Getreidestroh, Pflegeheu oder Restholz. Die Nutzung von Vollholz wird langfristig nicht als tragende Lösung angesehen. Auch wenn mit diesem weniger problematischen Einsatzstoff eine technische Umsetzung möglicherweise früher erreicht werden kann, ist aber ein steigender Verbrauch als Bauholz, für die Celluloseherstellung und als Einsatzstoff für dezentrale und häusliche Kraft- und Wärmeerzeugung zu erwarten. Sinnvoller erscheint dann die Nutzung von Ganzpflanzen, etwa von Getreide oder speziell angebauten Energiepflanzen. Die systemanalytische Begleitforschung [1,14] lässt allein durch die Nutzung von Waldrestholz und Überschussstroh mit zusammen etwa

30 Mio.t Trockensubstanz die Produktion von ca. 5 Mio.t Synthesekraftstoff erwarten. Dies entspricht ca. 10 % des derzeitigen Verbrauchs an Otto- und Dieselskraftstoff in Deutschland [15]. Nach Schätzungen der FNR lassen ist bis zum Jahr 2015 ein Anteil biogener Kraftstoffe am Gesamtbedarf von 25 % prinzipiell möglich.

Der Einsatz von Biomasse für die Kraftstoffherstellung führt sowohl durch die Mobilisierung einer eigenen Rohstoffbasis als auch durch die Abkehr von fossilen Energieträgern unter wirtschaftlich vertretbaren Bedingungen zu einer abnehmenden Abhängigkeit und damit größerer Versorgungssicherheit von einem der wesentlichen Pfeiler unserer Wirtschaft und Kultur, nämlich der Mobilität von Gütern und Personen.

Danksagung

Für die Unterstützung und Förderung der Arbeiten danken wir dem Ministerium für Ernährung und ländlichen Raum Baden-Württemberg, MLR, dem Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, BMELV, der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, FNR, und der Europäischen Kommission durch Förderung des EU-Projekts RENEW.

Literaturverzeichnis

- [1] E. Henrich, L. Leible, L. Malcher, H.J. Wiemer; Gaserzeugung aus Biomasse, Abschlussbericht des MLR-geförderten Projektes „Gaserzeugung aus Biomasse“, Forschungszentrum Karlsruhe, 2005
- [2] R. L. Espinoza, A. P. Steynberg, B. Jager and A. C. Vosloo; Applied Catalysis A: General, Volume 186 (1999) 13-26 und 41-54
- [3] W. Liebner, M. Wagner; Erdöl Erdgas Kohle 120 (2004) 323-326
- [4] E. Henrich, E. Dinjus, D. Meier; DGMK-Tagungsbericht 2002-2, 95
- [5] E. Henrich, E. Dinjus; Schriftenreihe “Nachwachsende Rohstoffe” Band 24, Landwirtschaftsverlag Münster, 2004, 298-337
- [6] C. Kornmayer, E. Dinjus, E. Henrich, F. Weirich, R. Reimert, DGMK Tagungsbericht 2006-2, 185-192
- [7] R.W. Rammler; Oil & Gas Journal, Nov.9, 1981, S. 291
- [8] K. Raffelt, E. Henrich, J. Steinhardt; DGMK-Tagungsbericht 2004-1, 333-340
- [9] K. Raffelt, E. Henrich, C. Kornmayer, C. Renck, R. Stahl, J. Steinhard, E. Dinjus; DGMK Tagungsbericht 2006-2, 121-128
- [10] E. Henrich, E. Dinjus, D. Meier, DGMK-Tagungsbericht 2004-1, 105
- [11] M. Schingnitz, D. Volkmann; DGMK-Tagungsbericht 2004-1, 29-38

- [12] M. Schingnitz; Chemie-Ingenieur-Technik 74 (2002) 976-984
- [13] M. Schingnitz, H. Brandt, F. Berger, P. Göhler, H. Kretschmer;
Fuel Processing Technology, 16 (1987), 289-302
- [14] L. Leible, S. Kälber, G. Kappler, S. Lange, E. Nieke, P. Proplesch, D. Wintzer,
B. Fürniß; 23-30
- [15] S. Lange, R. Reimert, L. Leible; DGMK Tagungsbericht 2006-2, 107-114

Biomassearten, Logistik, Anbauflächen und Potenziale

Thomas Breuer

Universität Bonn



1. Berliner Herbstseminar: Energie 2006 – Kraftstoffe und Antriebe für die Zukunft

Biomassearten, Logistik, Anbauflächen und Potenziale



Dipl.-Geogr. Thomas Breuer,
Institut für Lebensmittel- und
Ressourcenökonomie
Ressourcen- und Umweltökonomie

12.10.2006





Gliederung des Vortrags

- 1) Biomassearten und Logistik
 - a) Agrarpolitische Rahmenbedingungen der Biomassebereitstellung
 - b) Welche Biomasse für welchen Kraftstoff?
- 2) Anbauflächen und Potenziale
 - a) Vom Technischen zum Ökonomischen Potenzial
 - b) Entwicklung der Biokraftstoffe und Potenziale in NRW
 - c) Energiepflanzenanbaufläche in Deutschland



Vielzahl von Förderungsgründen

Die Förderung der Biokraftstoffe wird mit einer Reihe von Vorteilen begründet:

- **Energiressourcenpolitische Aspekte**
 - Verringerung der Erdölnutzung → Reduktion der Importabhängigkeit (Rohölabhängigkeit)
 - Erhöhung der Energieversorgungssicherheit → Diversifizierung der Energiematrix
 - Schonung von nicht-erneuerbaren Ressourcen (z.B. Energiebilanz Biodiesel: 1: 3,5)
 - Speicherung von Energie: Biomasse ist speicherbar und grundlastfähig
- **Umweltpolitische Aspekte**
 - Reduktion von Treibhausgasemissionen (wie oben beschrieben stellen die Biokraftstoffe im Verkehrssektor kurz- bis mittelfristig den einzigen Lösungsansatz dar, z.B. spart jeder Liter Biodiesel 2,2kg CO₂-Äquivalente)
 - Kurze Transportwege der Energieträger
 - Erweiterung der engen Fruchtfolgen mit Energiepflanzen
- **Arbeitsmarkt- und wirtschaftspolitische Aspekte**
 - Beschäftigungseffekte beim Anlagenbau und bei der Produktion entlang der Produktionskette
 - Anstoß von Investitionen im Inland
 - Entstehung innovativer Technologie mit Exportchancen für die deutsche Wirtschaft
 - Wertschöpfung im Inland und in den Regionen
- **Agrar- und strukturpolitische Aspekte**
 - Sinnvolle Nutzung der landwirtschaftlichen Überproduktion
 - Schaffung einer neuen Veredelungsform für die Landwirtschaft (→ neue Einkommensalternative: Der Landwirt als Energiewirt)
 - Förderung des Ländlichen Raumes

Politische Ziele für die Bioenergie

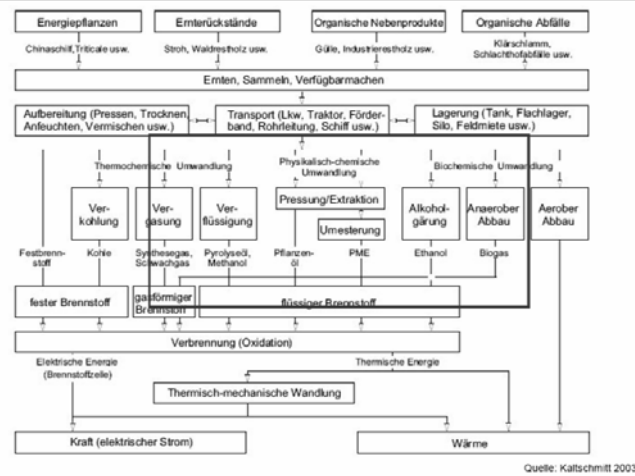
- EU-Biokraftstoff-Richtlinie (05/2003): bis 2010 5,75% biogene Kraftstoffe
 - bis 2015: 8%
 - Stand Deutschland 2005: 3,4% Biokraftstoffe (2,88% Biodiesel; 0,26%; Pflanzenöl; 0,26% BioEthanol (BMU 2006))
- EU-Strategie für Biokraftstoffe (2/2006)
- Strom: EU bis 2010: 12,5% Strom aus Erneuerbaren Energien (bis 2015: 15%)
 - Stand Deutschland 2005: 10,2% (BMU 2006)

Energiepolitische Rahmenbedingungen

Eigentlich: Steuerpolitisch

- **Beginn: Steuerbefreiung der Biokraftstoffe bis 2009 in Deutschland** (vom 27.11.2003)
 - Zu Beginn eine 100%ige Steuerermäßigung, die jährlich an die Marktbedingungen angepasst werden kann;
 - Schafft gute ökonomische Konkurrenzfähigkeit der Biokraftstoffe gegen die Mineralölkraftstoffe;
- **Heute: schrittweise Besteuerung der Reinbiokraftstoffe ab 08/2006 und Beimischungszwang von Biodiesel und Ethanol ab 01/2007**
 - Pflanzenöl bis Ende 07 steuerbefreit; dann schrittweise steigende Besteuerung bis 45ct/l in 2012
 - Biodiesel: schrittweise Besteuerung der Reinbiokraftstoffe ab 08/2006 bis 45ct/l in 2012
 - Beimischungsquoten: 4,4% Biodiesel und 2 bzw. 3% Ethanol
 - Volle Besteuerung der Biokraftstoffe in der Beimischung

Verfahren zur Bereitstellung aus Biomasse



Welchen wichtigen Biokraftstoffe in Deutschland gibt es?

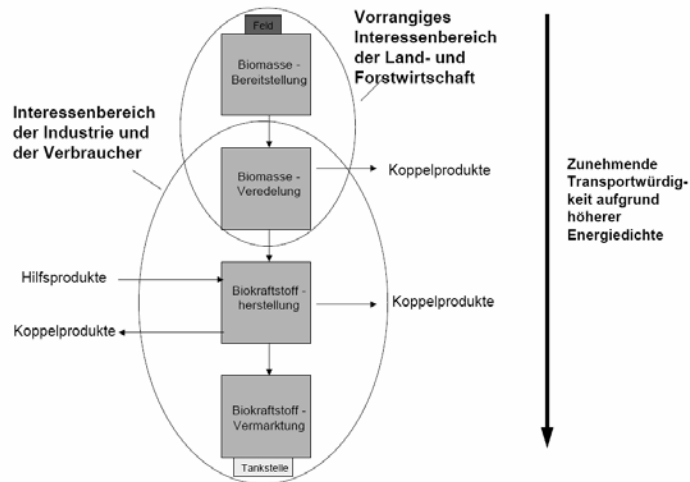
flüssig

- Pflanzenölbasierte Kraftstoffe
 - Reines Pflanzenöl
 - Biodiesel
- BioEthanol
- BioSynFuels, BtL (biomass to Liquid) (Sunfuel®, Biotrol®)

gasförmig

- Biogas

Produktionsketten-Ansatz



Koppelprodukte
Hilfsprodukte



Pflanzenölbasierte Treibstoffe				
Pflanzenöle	Biodiesel	BioEthanol	BioSynFuels (Biomass-to-Liquid)	Biogas
Raps (Sonnenblumen)	Raps (Sonnenblumen)	Weizen Roggen Zuckerrüben	Abfall- und Resthölzer Stroh, Energiepflanzen (z.B. Schnellw. Baumarten, Miscanthus)	Gülle Biogene Abfälle Mais GPS Getreide
Rapsöl	Rapsöl		Biokoks/ Pyrolyseöl Biomasseveredelungsanlage Wasserstoff Schweißgas	Biogas
Dezentrale Ölmühle (ca. 10% der deutschen Verarbeitung) Presskuchen	Zentrale Ölmühlen Rapsextraktionsschrott			Biogas-Anlagen landw. Betriebe
	Veresterung Methanol Glycerin	Landwirtschaftl. Brennereien Gr. Ethanol-Anlagen Vergärung Schlempe, (DDGS)	Vergasung (Synthesegas) Fischer-Tropsch-Synthese	Biogas-Aufbereitung auf Erdgas-Qualität
Pflanzenöl	Biodiesel	E-5-Blends, ETBE (->Benzin)	Sundiesel	Greengas (Einleitung in Erdgas-Netze)
Umbau des Motors	Umrüstungspaket (-> 1900 Biodiesel-Tankstellen)		Blending (-> Mineraldiesel)	
Regionale Pflanzenöl-Tankstellen	B-5-Blends (-> Mineraldiesel)	E-85 (-> Flexible-Fuel-Vehicle)		Einsatz in Erdgas-Kfz (Flächenkonkurrenz)

Wachstumsbranche Biokraftstoffe in Deutschland

Biologisches Wachstum

Biodiesel-Produktionskapazität in Deutschland 1998 – 2006 in Tonnen

Anteil der Biokraftstoffe am Gesamt-Kraftstoffmarkt:

1998: 0,1% (Biodiesel)

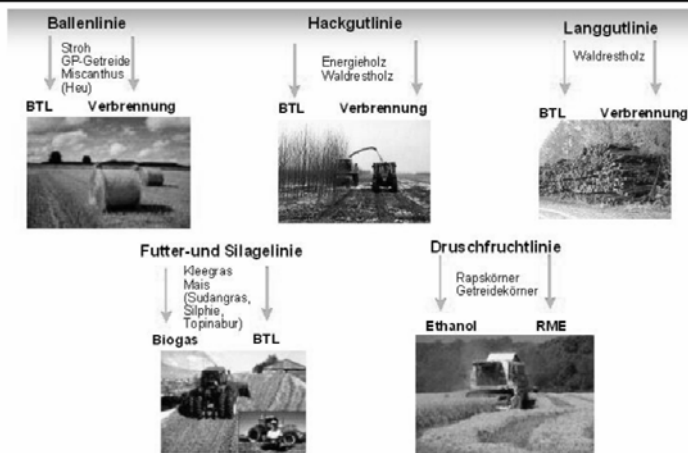
2004: 1,6% (1,54% Biodiesel)

2006: 3,6% (2,99% Biodiesel; 0,33% Pflanzenöl; 0,27% BioEthanol) Quelle: BMU 2006

- BtL-Kraftstoffe: F+E-Stadium
- Biomethan (Bio-Erdgas): erste NaWaRo-Anlagen mit Gasaufbereitung (-> Verstromung); erste Biogas-Tankstelle im Wendland



Logistik der Biomasse-Bereitstellung



Transportwürdigkeit von Energiepflanzen

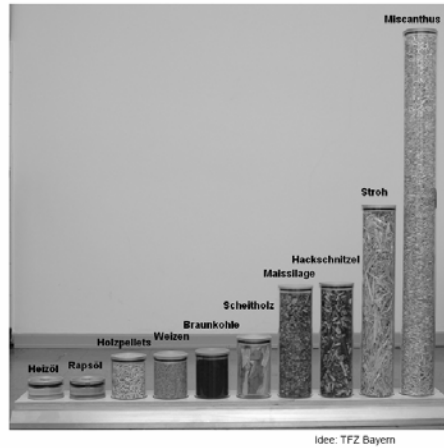
Unterscheidung in transportwürdige und – unwürdige Biomasse

Transportwürdige Biomasse:
Getreide (Korn) und Raps

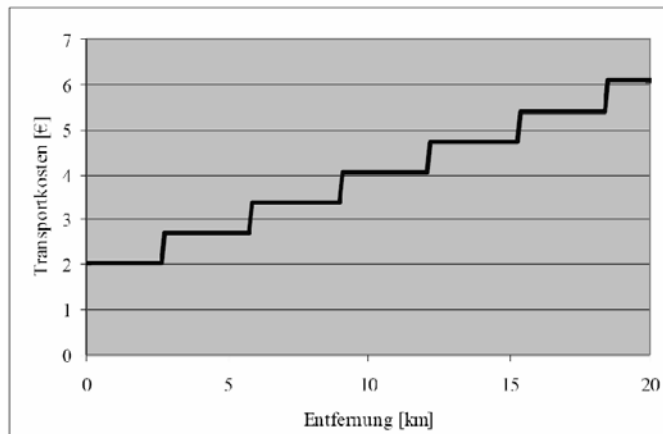
- Eignen sich für zentrale und dezentrale Anlagen
- Raps: momentan dezentral und zentral verarbeitet
- Weizen: Momentan nur zentral

Transportunwürdige Biomasse:
Gülle, Maissilage, GPS, Pappeln, Miscanthus

- Müssen in dezentralen Anlagen verarbeitet werden

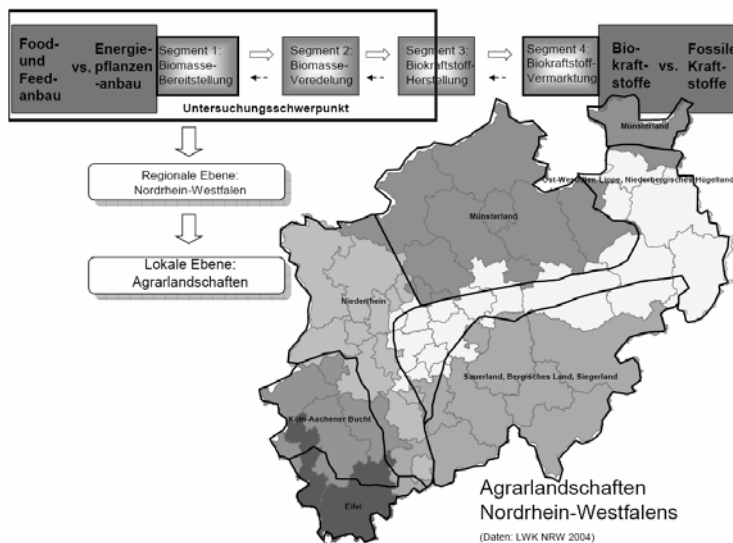
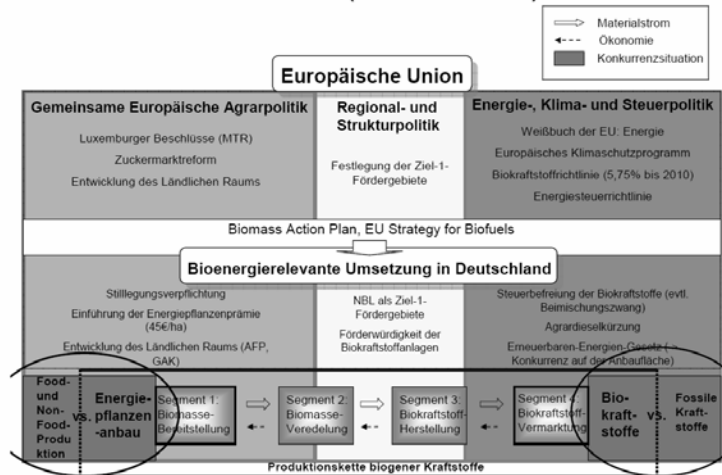


Energiemais - Transportkosten



Quelle: Breuer & Schmitz 2006

Ökonomisches Potential wird auf der Fläche entschieden (Rohstoffkosten)



Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) für Biomasse

Gesetz seit 1.8.2004 in Kraft

Grundvergütung für Anlagen	Vergütungshöhe in Cent/kWh
bis 150 kW	11,5
bis 500 kW	9,9
bis 5 MW	8,9
ab 5 MW bis 20 MW und für den Einsatz von Altholz der Kategorie AIII/ATV	8,4 3,9
Biomasse-Bonus für Anlagen	
bis 500kW	6
ab 500 kW bis 5 MW	4
ab 500 kW bis 5 MW bei Einsatz von Holz	2,5
Kraft-Wärme-Kopplungs-Bonus	2
Technologie-Bonus	2

Boni gelten kumulativ und unterliegen nicht der Degression.
Vergütungszeitraum: 20 Jahre.
Ab 2005: Degression um 1,5% der im Vorjahr gewährten Vergütung.
Technologie-Bonus bei innovativen Technologien bei gleichzeitiger Nutzung von KWK.

NaWaRo-Bonus ermöglicht den Anbau von Energiepflanzen für Biogas-Anlagen

NaWaRo-Bonus -> „reine“ NaWaRo-Anlagen in den Ackerbaugebieten (Innovationen)

KWK-Bonus: -> Anreiz zur Abwärmenutzung (-> EVU,...)

Tech-Bonus: -> Anreiz zur Gaseinspeisung

Schafft die Rentabilität von Energiemais für Biogas - Flächenkonkurrenz zu Rohstoffen für Biokraftstoffen

Agrarpolitische Förderung

Agrarpolitische Entscheidungen verbessern die Wettbewerbsfähigkeit des Energiepflanzenbaues gegenüber einer anderen Landnutzung und Reduzieren die Rohstoffpreise (z.B. Pflichtstilllegung -> geringe Opportunitätskosten -> niedrige Rohstoffpreise)

EU-Agrarreform 2005: Luxemburger Beschlüsse (seit 1.1.2005 in Kraft)

- Anbau NaWaRo's auf Stilllegungsflächen (seit 1992) ist weiterhin erlaubt; Regionalisierte Stilllegungssätze in Deutschland
 - Einführung der Energiepflanzenprämie von 45€/ha (limitiert auf 1,5 Mio. ha) auf nicht stillgelegten Flächen (Basisflächen)
- Anreiz zum Anbau von nachwachsenden Rohstoffen in der Landwirtschaft (allerdings hohe Transaktionskosten)

Auf dem Weg zum Ökonomischen Potential

- Technisches Potential:
 - > unter der heutigen Technik nutzbares Potential
- Alle aktuellen Potentialbetrachtung gehen vom technischen Potential aus
- Zur Abschätzung der verfügbaren Flächen zum Anbau von Energiepflanzen wird oft folgender Umweg gemacht:
 - Abschätzung des Flächenverbrauchs für Siedlungsfläche, Naturschutz, Lebensmittelproduktion, Non-Food-Produktion (Stoffliche Nutzung) [Stilllegungsfläche]
 - > verbleibende Fläche = Potential für die Bioenergie

Vom technischen zum ökonomischen Potenzial

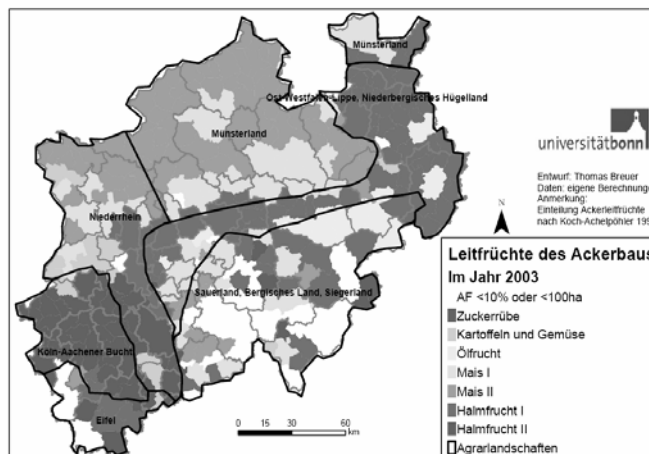
Letztlich entscheidet die Ökonomie der Flächennutzung über die Potenziale der Bioenergienutzung

- > **entscheidend: das ökonomische Potential**
 - > Welche Biomasse könnte unter den momentanen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zur Verfügung gestellt werden?
 - > Flächenverfügbarkeit entscheidet sich auf der Fläche (Deckungsbeitrag und Fruchtfolge)
 - > ökonomisches Potenzial berücksichtigt auch die Flächenkonkurrenzen (Biokraftstoffe vs Biogas vs ...)
 - > sollte Grundlage für politische Entscheidungen sein
- > **ökonomisches Angebotspotential unter den gegebenen agrar- und energiepolitischen Rahmenbedingungen mit Hilfe des Agrarsektormodells RAUMIS der FAL**

Einschätzung der Entwicklung der Biokraftstoff- Verarbeitungskapazitäten in NRW

- **Pflanzenölbasierte Treibstoffe**
 - Weiterer Ausbau des Biodiesels (zentral)
 - Erhöhung der Schlagkraft der Ölmühlen in NRW
 - Biodieselausbau in den letzten Jahren (400.000t Kapazität NRW)
 - Mainz und Mannheim (Cargill und Bunge)
 - Entwicklungen im Bereich der dezentralen Biodieselproduktion?
 - Ausbau dezentraler Ölmühlen (Pflanzenöl)
- **BioEthanol**
 - Keine zentrale BioEthanol-Anlage im Rheinland, allerdings Ethanolweizenanbau (Äquivalenzverfahren)
 - Wenig Chancen für landwirtschaftliche Brennereien (Wirtschaftlichkeit)
- **BioSynFuels**
 - keine Bedeutung bis 2015
 - Wenig Wertschöpfungspotential für die Landwirtschaft
- **Konkurrenz auf der Fläche durch Biogas**
 - Biogas-Boom aufgrund des EEG (Gaseinspeisung,...)

Generell hohe Opportunitätskosten für den Energiepflanzenbau



Energiepflanzenbau auf Stilllegungsflächen im Rheinland

Energiepflanzenproduktion auf Stilllegungsflächen

	Stilllegung	Energieweizen	Silomais	Energiemais	Non-Food-Raps
Ertrag dt/ha		85	500	700	40
Erzeugerpreis €/dt		8 (9)	2,3	2	21
Markterlös €/ha		680	1150	1400	840
variable Kosten €/ha	150	445	770	940	450
Deckungsbeitrag €/ha	-150	235 (320)	380	460	390

Quelle: LZ 2005

Maissilage ist nicht transportwürdig -> Lokaler Markt

Anbaumöglichkeit für Mais ist abhängig von der Anlagenkapazität
(Lieferrecht)

Anbau von Non-Food-Raps limitiert durch Zuckerrübenanteil im Betrieb

Maisanbau zur Verstromung wird auf lange Sicht den Anbau von
Ethanolweizen im Rheinland verdrängen, momentan fehlen die Biogas-
Anlagenkapazitäten

Energiepflanzenbau auf Basisflächen im Rheinland

Energiepflanzenproduktion auf Basisflächen

	Weizen	Energieweizen	Silomais	Energiemais	Raps	Non-Food-Raps
Ertrag dt/ha	85	85	500	700	40	40
Erzeugerpreis €/dt	10,5	10	2,3	2	22	21
Markterlös €/ha	892,5	850	1150	1400	880	840
variable Kosten €/ha	445	445	770	940	450	450
Energiepflanzenprämie (25€/ha)		45	45	45		45
Deckungsbeitrag €/ha	447,5	450	425	505	430	435

Quelle: LZ 2005

Weizenanbau ist im Rheinland die Standardproduktion

Raps: Vorfruchtwert für Weizen berücksichtigen (bis 100€/ha)

Zuckerrübenanteil in der Fruchtfolge limitiert den Rapsanbau

-> relative Vorzüglichkeit der NaWaRo's auf Basisflächen gegeben

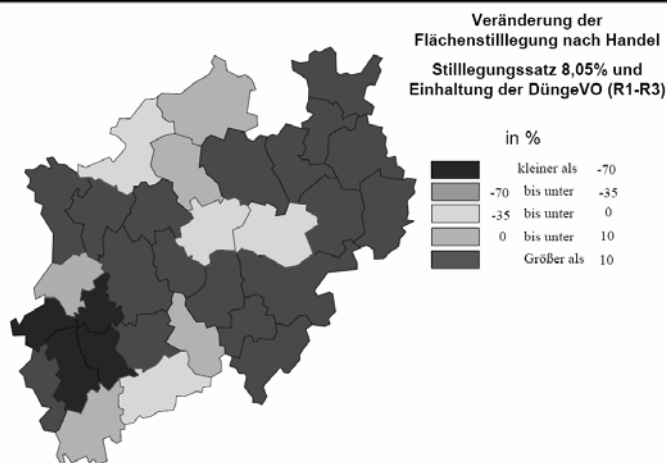
Größere Biogas-Anlagen orientieren sich am Weizenverdrängungspreis

RAUMIS-Berechnungen: Referenzbestimmung NRW

Luxemburger Beschlüsse:

- Markt- und Preispolitik
 - Milch (25ct/l Milchauszahlungspreis in 2010)
 - Energiepflanzenprämie (45€/ha)
- Entkopplung
 - einheitliche Flächenprämie (ca. 350 €/ha)
- Handelbarkeit der Flächenstilllegungsverpflichtung
- Zuckermarktreform
 - Preissenkung
 - Quotenkürzung um 13%

RAUMIS-Berechnungen: Referenzsituation



RAUMIS-Berechnungen: Szenarioannahmen

- Energiemaisertrag rund 75 t/ha, regionale Differenzierung entsprechend Futtermais;
- Erzeugerpreisfächer für Energiemais 20 – 23 €/t, (völlig preiselastische Nachfrage);
- Erzeugerpreisvariation für Raps ± 2 €/dt;
- Keine Berücksichtigung des Ethanolweizens

RAUMIS-Berechnungen: Ergebnis für NRW

		Referenz	Energiemais			Energiemais (23 €/t)	
			20 €/t	21,5 €/t	23 €/t	Raps (-20€/t)	Raps (-20€/t)
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Nettowertschöpfung	Mrd. €	1,4	1.446	1.452	1.460	1.459	1.462
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Getreide	1000 ha	649,1	584,2	569,0	553,6	559,3	548,4
			(-10)	(-12)	(-15)	(-14)	(-16)
Hülsenfrüchte	1000 ha	4,9	4,1	3,9	3,7	3,8	3,6
			(-17)	(-20)	(-24)	(-23)	(-26)
Ölsaaten	1000 ha	51,6	43,2	41,3	39,3	31,7	46,7
			(-16)	(-20)	(-24)	(-39)	(-9)
Nachwachsende Rohstoffe (Ölsaaten)	1000 ha	16,0	15,5	15,2	14,7	13,0	15,6
			(-3)	(-5)	(-8)	(-19)	(-3)
Kartoffeln	1000 ha	32,4	32,0	31,9	31,9	31,9	31,8
			(-1)	(-1)	(-2)	(-2)	(-2)
Zuckerrüben	1000 ha	64,8	64,8	64,8	64,8	64,8	64,8
			(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
Stilllegung	1000 ha	87,5	33,0	29,7	26,6	27,6	26,0
			(-62)	(-66)	(-70)	(-69)	(-70)
Energiemais	1000 ha	/	135,0	157,9	180,8	182,7	179,0
Silomais	1000 ha	94,4	92,6	91,9	91,3	91,5	91,1
			(-2)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)
Sonst. Ackerfutter	1000 ha	32,9	28,3	26,3	25,0	25,4	24,5
			(-14)	(-20)	(-24)	(-23)	(-25)

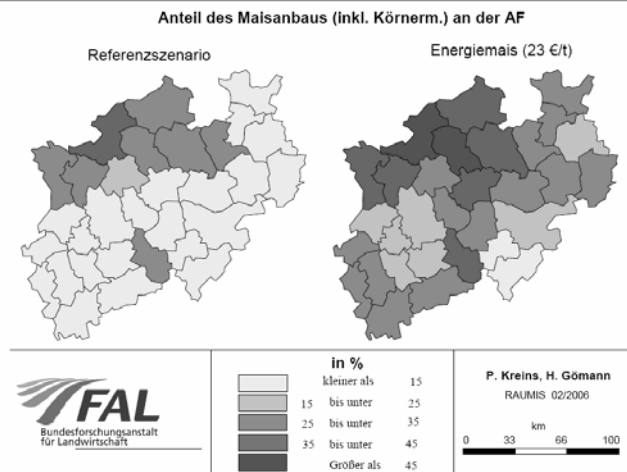
Werte in Klammern () sind prozentuale Veränderungen gegenüber der Referenzsituation.

Quelle: Kreins & Goemann 05/06

RAUMIS-Berechnungen: Ergebnis für NRW

- Referenzsituation:
 - Ausdehnung des Rapsanbaues (Fruchtfolgegrenze)
 - Szenario: Energiemais-Preis (23€/t; Rapspreis +2€/dt)
 - Energiemaisanbau von ca. 180.000ha
 - Reduktion der Stilllegung um ca. 60.000ha (70%)
 - Geringfügige Reduktion des Rapsanbaues
 - Reduktion des Getreideanbaus um 100.000ha (16%)
 - Nettowertschöpfung steigt um 3%
- > größte Wertschöpfung liegt in der Veredelung der landwirtschaftlichen Rohstoffe zu Bioenergie

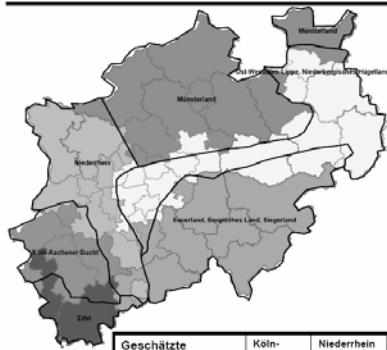
RAUMIS-Berechnungen: Ergebnis



Anbaubedingungen und Wirtschaftlichkeit forstlicher Schnellwuchsplantagen:

- Pappelanbau in Deutschland
- Wirtschaftlicher Anbau ist bei einer Vergütung von 60€ t atro nicht gegeben
- Transportunwürdigkeit der Biomasse
- Erntetechnik

Regionalisierte Erträge: Zellulosehaltige Biomasse

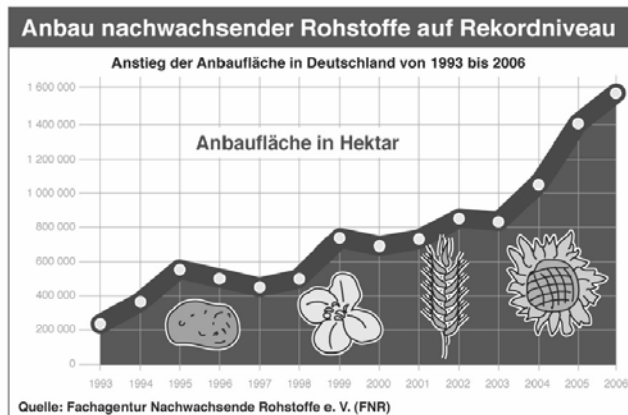


- Wenn Einsatz von zellulosehaltiger Biomasse: dann Miscanthus
- Die Kinderkrankheiten sind auskuriert
- Schlechtes Image in Deutschland (Vergangenheit)
- höhere Hektarerträge und bessere Wirtschaftlichkeit (Deckungsbeiträge)
- Vorteile bei der Erntetechnik, Lagerung und Transport

Geschätzte Durchschnitts-erträge in t atro/ha	Köln-Aachener Bucht	Niederrhein	Münsterland	Ost-Westfalen-Lippe, Haardt/Hunsrück, Hügelland	Sauerland, Bergisches Land, Siegerland	Eifel
Schnellwachsende Baumarten (Pappeln)	10,6	10,8	7,8	10,3	10,4	9
Miscanthus	21	19	18	19	17	16

*Angaben entsprechen der Schätzung des Durchschnittlichen jährlichen Zuwachses in t atro/ha bezogen auf eine Gesamtkulturdauer von ca. 20 Jahren

Entwicklung des Anbaus von Nachwachsenden Rohstoffen in Deutschland



Quelle: FNR 2006

Entwicklung des Anbaus von Nachwachsenden Rohstoffen in Deutschland

Nachwachsende Rohstoffe: Anbau in Deutschland in ha						
Rohstoff	2003		2004		2005	
	Basis- fläche	Still- fläche	Basis- fläche	Still- fläche	Basis- fläche	Still- fläche
Stärke	125.000		125.000		128.000	
Zucker	7.000		7.000		18.000	
Rapsöl	340.000	328.753	650.000	209.907	739.876	322.047
Sonnenblumenöl	15.000	3.185	10.000	747	10.855	1.899
Leinöl	5.000	365	3.000	96	3.100	229
Faserpflanzen	1.500		1.500		1.500	75
Heilstoffe	4.000	693	4.000	465	10.000	182
Sonstiges		5.051		3.902		
Energiepflanzen			27.000		120.746	46.069
Summe	497.500	338.047	827.500	215.117	1.032.077	370.501
Anbauinsgesamt	835.547		1.042.617		1.402.578	

Quelle: FNR 2006

Anbau von Nachwachsenden Rohstoffen im Jahr 2006

Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland (2006)				
Anbau in Hektar	Basisfläche*		Stilllegung	gesamt
Rohstoffe	ohne Energiepflanzen-prämie	mit Energiepflanzen-prämie		
Ölpflanzen				
Raps	610.000	172.000	318.000	1.100.000
Öllein	3.000			3.000
Sonnenblumen	4.000		1.000	5.000
Energiepflanzen	30.000	188.000	77.000	295.000
Stärke	128.000			128.000
Zucker	18.000			18.000
Naturfasern	2.000			2.000
Arznei- und Gewürzpflanzen	10.000			10.000
Summe	805.000	360.000	396.000	1.561.000

*geschätzt, da Datengrundlagen im Detail nicht zur Verfügung stehen und Außenhandelsbilanzen nicht exakt erfasst werden können

Quelle: FNR 2006

Insgesamt: 1,56 Mio. ha -> 13% der deutschen Ackerfläche

Alternative Antriebe für die Zukunft?

**Vielen Dank für
ihre
Aufmerksamkeit!!!!**



Systemanalytische Bewertung verschiedener Kraftstoffoptionen

Jochen Linßen, Manfred Walbeck

Forschungszentrum Jülich GmbH

I Die Rolle der Kraftstoffversorgung im Energiesystem

Verkehr entsteht aus der Umsetzung des Grundbedürfnisses der Individuen nach Mobilität - der Fähigkeit einen Ortswechsel vorzunehmen. Er hat einen wesentlichen sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Stellenwert und ermöglicht zum Beispiel die Teilnahme am öffentlichen Leben und den Zugang zu weiter entfernten Arbeitsstätten. Weiterhin ist in einer hoch entwickelten Industrienation die Mobilität, z. B. bei dem Transport von Gütern, eine unabdingbare Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit der Wirtschaft.

Für die Bereitstellung der Mobilität ist die Aufwendung von Energie notwendig. Die mobile Versorgung mit Energie basiert auf einer Energiespeichereinheit und einer entsprechenden Wandlereinheit zur Bereitstellung der mechanischen Energie für den Vortrieb. Bei der maschinellen Fortbewegung wird die Energie über Kraftstoffe bereitgestellt. Mineralölprodukte sind seit Beginn der Verbrennungsmotor-Fahrzeugnutzung als Kraftstoff genutzt worden und die zugehörige, über Jahrzehnte entwickelte Versorgungsinfrastruktur hat inzwischen ein hohes Maß an Effizienz, Wirtschaftlichkeit, Komfort und Sicherheit erlangt. Sie setzt deshalb auch Maßstäbe, die es im Sinne eines verantwortlichen Umgangs mit Kraftstoffen auch bei neuen Kraftstoffen zu erreichen, zu halten und zu übertreffen gilt.

Die Versorgung des Verkehrsbereiches mit Endenergieträgern ist einen wesentlichen Teil des Energieversorgungssystems. Ausgehend von den Primärenergieträgern über den Transport- und Umwandlungsbereich wird die Energienachfrage in den Endenergiesektoren befriedigt.

Eine schematische Übersicht des Energiesystems in Deutschland zeigt Abbildung 1. Unter den Endenergie-Sektoren nimmt der gesamte Verkehrsbereich mit einem Bedarf von 89,3 Mio. t SKE (~2,6 EJ) im Jahr 2004 Rang 2 mit über 28 % des gesamten Endenergiebedarfs nach den Haushalten ein, wobei 85 % des Endenergiebedarfs auf den Straßenverkehr entfallen. Der Verkehrsbereich verbraucht dabei über 60 % der Mineralölprodukte im gesamten Energiesystem (vgl. [AGEB 2004]). Der Straßen- und Luftverkehr ist derzeit zu über 95 % abhängig von flüssigen Kohlenwasserstoffen aus Erdöl [VIZ 2005]. Weltweit liegt der Energieträgerverbrauch im Verkehrsbereich mit etwa 20 % unter dem deutschen Anteil jedoch mit steigender Tendenz mit Blick auf die steigenden Mobilitätsnachfragen in China und Indien (vgl. [IEA 2004]).

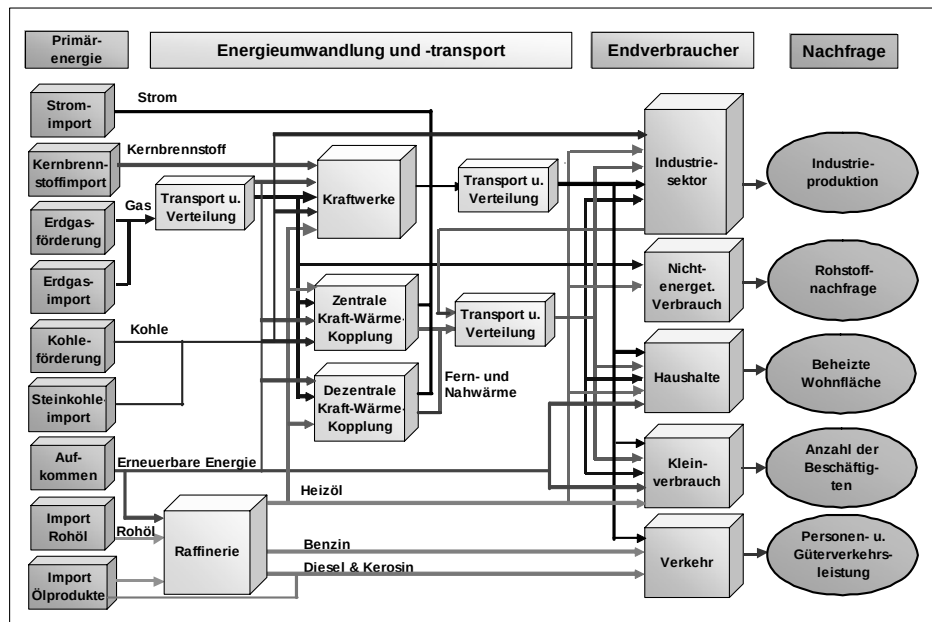


Abb. 1: Schematische Darstellung des deutschen Energiesystems

Die Gründe für die weite Verbreitung der Mineralölkraftstoffe im Verkehrsbereich – insbesondere im motorisierten Individualverkehr – sind aus technischer Sicht die einfache Handhabbarkeit und die hohen gravimetrischen als auch volumetrischen Energieinhalte der Mineralöl-Kraftstoffe. Abbildung 2 zeigt eine Einordnung von gravimetrischen und volumetrischen Energiedichten von kompletten Tank- und Energiespeichersystemen. Die Tanksysteme für Diesel und Benzinfahrzeuge weisen hierbei die höchsten Energiedichten bei gleichzeitig geringen Bauvolumen und Kosten auf.

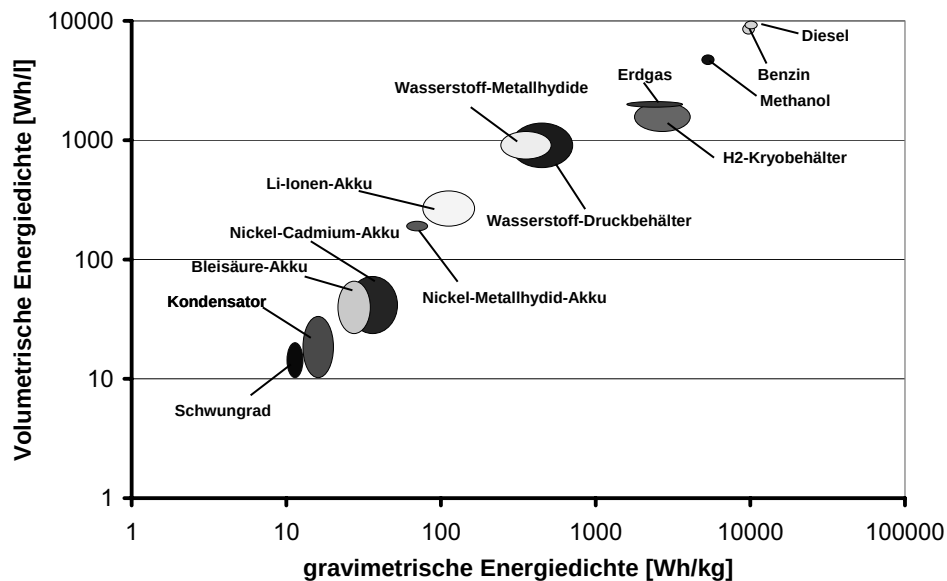


Abb. 2: Vergleich der gravimetrischen/ volumetrischen Energiedichten von Speichersystemen

Aus der energiewirtschaftlicher Perspektive sind die Preise (ohne Steuer) für mineralische Kraftstoffe bei der derzeitigen Ölfördersituation trotz der derzeit hohen Rohölpreise und starken Volatilität als mäßig anzusehen. Es existieren eine großtechnisch umgesetzten Exploration, ein weltweites Markt- und Handelssystem (sowohl für Erdöl als auch für die Produkte), ausreichende Raffineriekapazitäten zur Erzeugung von Mineralölprodukten und etablierte Infrastrukturen einschließlich der Verteilungsnetze und Tankstellen. Zusammengekommen resultiert daraus die derzeit hohe Verbreitung der mineralischen Kraftstoffe.

Neben dem durch den Verkehr erzielten Nutzen für die Gesellschaft gehen mit der Verbrennung der fossilen Kraftstoffe Beeinträchtigungen der Umwelt sowie die hohe Inanspruchnahme der Ressourcen einher. Zu den wesentlichen Problemen der derzeit fossil dominierten Kraftstoffnutzung im Verkehr gehören daher

- der Verbrauch begrenzter Ressourcen und
- die Emission von Luftschadstoffen und klimawirksamen Gasen.

Derzeit liegt die statische Reichweite der sicher bestätigten Erdölreserven bei ca. fünf Dekaden [BGR 2004]. Die Reichweite der Mineralölvorräte kann durch die Exploration von Schwerstölen, Ölsanden und Ölschiefer verlängert werden (vgl. Abbildung 3). Diese Techniken führen jedoch zu höheren Kosten bei der Erdölgewinnung. Die stark steigende Mineralölnachfrage in Indien und China kann die Reichweite verkürzen und langfristig zu einer verschärften Verteilungsproblematik führen. Insgesamt bleibt aber anzumerken, dass

Mineralöl auch für die nächsten Dekaden verfügbar sein wird, wenn auch bei steigenden Explorationskosten. Die Abbildung 3 zeigt eine Zusammenstellung der weltweiten Reserven (zu heutigen Preisen und mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnbare Mengen einer Energierohstoff-Lagerstätte) und Ressourcen (nachgewiesene, aber derzeit technisch und/oder wirtschaftlich nicht gewinnbare sowie nicht nachgewiesene Mengen an Energierohstoffen) nicht erneuerbarer Energierohstoffe für das Jahr 2004. Die größten Reserven und Ressourcen weisen die Kohlen weltweit auf.

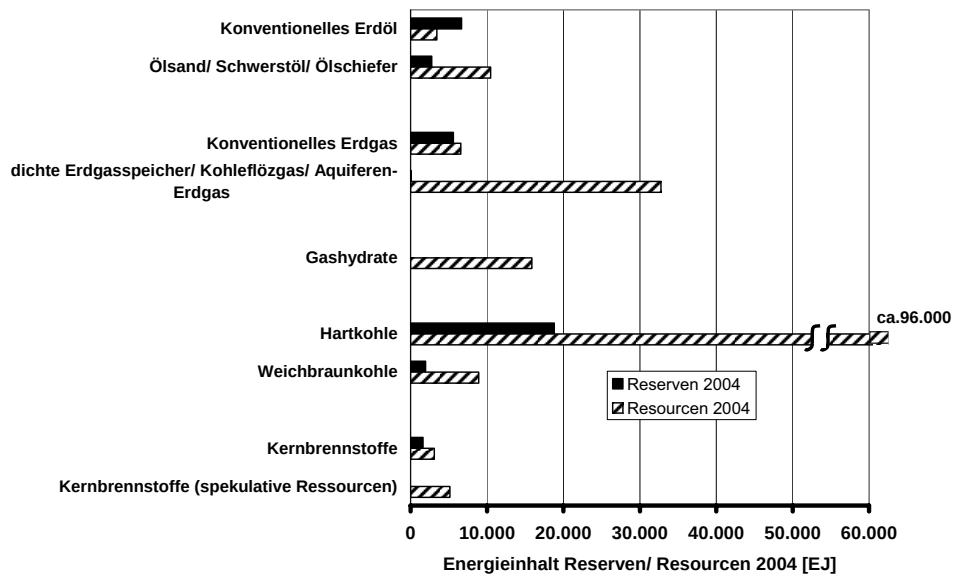


Abb. 3: Übersicht Reserven/ Ressourcen Primärenergieträger weltweit [BGR 2004]

Bei der Verbrennung von Mineralölprodukten oder anderen kohlenstoffhaltigen Kraftstoffen entstehen neben den mengenmäßig größten Reaktionsprodukten Wasser und Kohlendioxid eine Reihe weiterer Schadstoffe, die mit dem Abgas in die Umgebungsluft freigesetzt werden, jedoch durch inner- und außermotorische technische Maßnahmen vermindert werden können. Ausgehend von der historischen Entwicklung bei den Luftschadstoffen (vgl. [VIZ 2005]) wird in Zukunft weiterhin von einer deutlichen Entlastung bei den Luftschadstoffen ausgegangen. Dies gilt für die CO₂ Emissionen nicht im gleichen Ausmaß.

Von den vorgestellten Problemfeldern der Auswirkungen des Verkehrs wird die Emission von klimawirksamen Gasen insbesondere Kohlendioxid als noch zu lösender zentraler Konflikt einer nachhaltigen Verkehrsentwicklung angesehen. Das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung im Verkehrsbereich fordert die Minderung der negativen ökologischen Auswirkungen durch unerwünschte Stoffeinträge und den Verbrauch an Ressourcen. Hierbei müssen aber die Funktionsfähigkeit der Wirtschaft und der soziale Wohlstand auch zukünftig erhalten bleiben.

Neben der Erhöhung der Effizienz der Antriebssysteme ist ein weiterer wichtiger Baustein zur Minderung der CO₂-Emissionen die Implementierung neuer Kraftstoffe im Verkehr. Bei der Bewertung neuer Kraftstoffe sind auch die Kraftstoffbereitstellungswege mit in die Bilanz einzubeziehen. Als Beispiel sei hier angeführt, dass bei einem verstärkten Stromeinsatz bzw. auch Wasserstoffeinsatz als Mineralölproduktsubstitut der eigentliche Fahrzeugbetrieb CO₂-frei ist. Es fallen dann jedoch in Abhängigkeit von der Art der Bereitstellung des Substitutionsenergieträgers vergleichbar hohe Emissionen im Umwandlungsbereich an. De Fakto werden somit keine oder nur geringe CO₂-Einsparungen erreicht. Es erfolgt nur eine Emissionsverlagerung vom eigentlichen Fahrzeugbetrieb in die vorgelagerte Kraftstoffbereitstellung. Dies gilt für den derzeitigen Betrachtungszeitraum, kann aber langfristig durch den Aufbau einer Kohlenstoff-armen oder -freien Energierohstoffbasis verbessert werden.

II Mögliche Entwicklungstrends bei Kraftstoffen

Neben den Maßnahmen zur Effizienzsteigerung ist zur Reduktion der CO₂-Emissionen aus dem Verkehrsbereich langfristig der Kohlenstoffanteil der Primärenergieträger zu senken. Im Jahr 2005 wurden in Deutschland gut 30 Mio. t Dieselmotorkraftstoff und gut 24 Mio. t Ottomotorkraftstoff verbraucht. Der steigende Anteil an Diesel-Pkw im Bestand und steigende Transportleistungen im Straßengüterverkehr bescheren dem Diesel steigende Absätze zu Lasten des Ottomotorkraftstoffes. Der Anteil biogener Kraftstoffe lag im Jahr 2005 bei über 5 % (im wesentlichen Rapsmethylester- RME) im Dieselmotorbereich und ca. 1 % beim Benzin.

Die Abbildung 4 zeigt mögliche Entwicklungstrends bei den Kraftstoffen auf. Von den derzeitigen Mineralölkraftstoffen könnte auch Erdgas als fossiler Energieträger einen Beitrag zur Kraftstoffversorgung leisten. Neben der Verwendung von komprimierten Erdgas (Compressed Natural Gas: CNG) ist auch der Einsatz von Gas to Liquid (GtL)-Kraftstoffen mit sehr guten Eigenschaften denkbar. Zudem ist durch den GtL-Prozeß die Erschließung von weit entfernten und/ oder derzeit nicht wirtschaftlich erschließbaren Erdgas-Vorkommen möglich. Zur Reduktion von CO₂-Emissionen trägt Erdgas aufgrund des höheren H/C-Verhältnis ebenfalls bei.

Die derzeit bereits beigemischten Biokraftstoffe der ersten Generation könnten in der weiteren Entwicklungsstufe (zweite Generation) höhere Beiträge zu einer nachhaltigen Kraftstoffversorgung leisten. Durch effiziente Verfahren kann der CO₂-Kreislauf der biogenen Kraftstoffe weiter geschlossen werden.

Als langfristiges Ziel ist die Versorgung des Verkehrs mit erneuerbaren oder Kohlenstoff-freien Kraftstoffen zu sehen. Die Energieträger Wasserstoff und Strom bietet sich hierbei durch ihre Emissionsfreiheit bei der Energieumwandlung im Fahrzeug an.

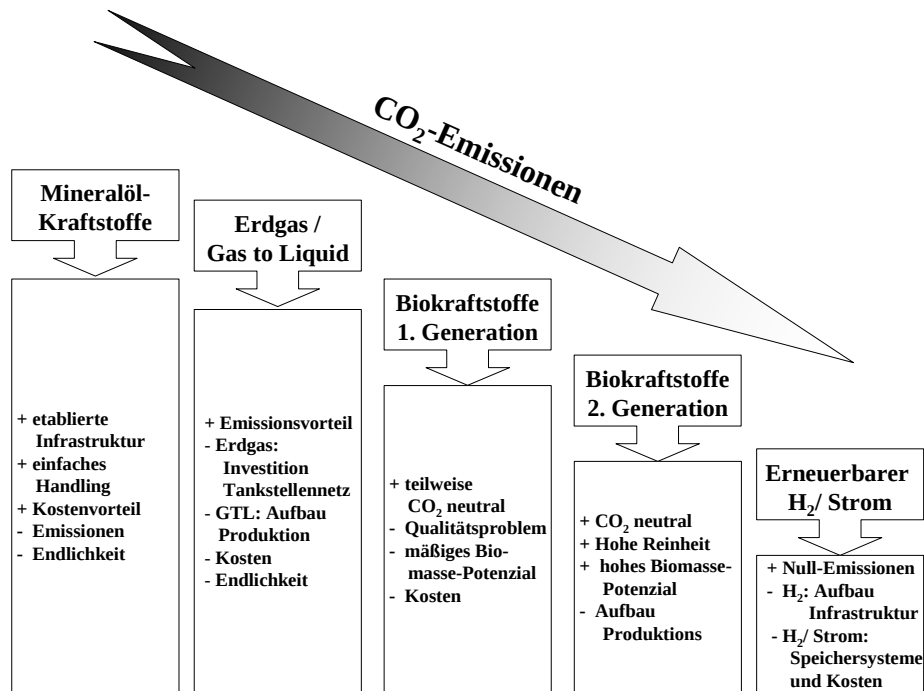


Abb. 4: Möglicher Entwicklungstrend hin zu kohlenstoffarmen- bzw. -freien Kraftstoffen

Folgend werden einige Stärken und Schwächen der möglichen Kraftstoffoptionen sowie Anforderungen an die Verteilungsinfrastruktur angeführt:

Mineralölbasierte Kraftstoff

Obwohl sich die Anforderungen an die Qualitäten von Otto- und Dieselmotorkraftstoff in der Vergangenheit laufend erhöhten, musste die bestehende Versorgungsinfrastruktur mit den in ihr eingebundenen Elementen nicht grundlegend verändert, sondern allenfalls modifiziert werden. Das galt z.B. für die Umstellung auf bleifreies Benzin oder auch auf schwefelärmeren Dieselmotorkraftstoff.

Die Veränderungen, von denen die Verteilungsinfrastruktur in den letzten Jahren betroffen war und die einen hohen Investitionsaufwand erforderten, betrafen im wesentlichen bauliche sowie technische Maßnahmen im Tankstellenbereich, die zur Erfüllung verbesserter und vorsorgender Umweltauflagen bei Betankungseinrichtungen ergriffen werden mussten/ müssen.

Erdgas/ GTL

Die Nutzung von Erdgas als Kraftstoff für den Verkehr führt zu einem dazu, dass geringere Schadstoffmengen emittiert werden als bei Benzin- oder Dieselfahrzeuge. Damit kann insbesondere im innerstädtischen Verkehr zu einer Verringerung der lokalen, verkehrsbedingten Emissionsbelastung beitragen werden. Außerdem werden die CO₂-Emissionen gesenkt, da ein Teil der gewonnenen Energie aus der Verbrennung des im Erdgas enthaltenen Wasserstoffs stammt. Es ist jedoch darauf zu achten, dass im Betrieb und in der vorgelagerten Versorgungskette keine oder nur geringste Methanfreisetzungen auftreten, da die Klimawirksamkeit von CH₄ um ein Vielfaches höher ist als die von CO₂.

Der volumetrische Energiegehalt von Erdgas bei Normaldruck ist zu gering, um mit PKW-üblichen Tankvolumina akzeptable Fahrzeugreichweiten zu realisieren. Eine Steigerung der Energiedichte kann durch Kompression erreicht werden, bei der Erdgas auf 200 – 250 bar verdichtet wird. Die Verteilungsinfrastruktur kann über das etablierte Erdgas-Pipelinennetz erfolgen. Die Kompression auf den notwendigen Speicherdruck erfolgt End of Pipe an den jeweiligen Tankstellen.

Die Erzeugung von GtL-Kraftstoffen macht die Nutzung des Primärenergieträgers Erdgas bei Nutzung der bestehenden Infrastruktur für flüssige Kohlenwasserstoffe möglich. Hierzu wird Erdgas durch einen Reformerschnitt in Synthesegas umgewandelt und anschließend durch Fischer-Tropsch- oder Methanol-Synthese flüssige Kohlenwasserstoffe erzeugt. Die GtL-Kraftstoffe zeichnen sich durch ihre guten Verbrennungseigenschaften bei hohen Reinheitsgraden aus. Die bestehende Verteilungsinfrastruktur für Mineralölkraftstoffe kann hierfür genutzt werden.

Biokraftstoffe der 1. Generation

Bei den Biokraftstoffen ist der in ihnen enthaltene Kohlenstoff von den Pflanzen aus der Atmosphäre entnommen worden und daher das bei der Verbrennung emittierte CO₂ klimaneutral. Zu den Biokraftstoffen der 1. Generation gehören im Wesentlichen reine Pflanzenöle, Pflanzenölmethylester (PME) und Ethanol bzw. Ethanolprodukte (z.B. Ethyltertiärbutylether (ETBE)). Bei den Pflanzenölen werden die Ausgangsprodukte durch Pressen/ Extraktion der Pflanze bzw. der Frucht gewonnen. Die Erzeugung von Ethanol erfolgt aus der Vergärung von Stärke- oder Zuckerhaltigen Pflanzen bzw. Früchten.

Bei einer Beimischung zum Dieselmotorkraftstoff von maximal 5 % PME treten keine technischen oder logistischen Probleme auf. Für den Fahrzeugbetrieb mit reinem PME sind Freigaben der Motorenhersteller notwendig. Für die Verwendung von reinen Pflanzenölen müssen die Motoren durch Änderung von Tank- und Einspritzsystem angepasst werden.

Auch die Beimischung von Ethanol ist bis zu 5 % laut DIN-Norm erlaubt. Probleme können die Wasseraffinität von Ethanol und die Verschiebung des Dampfdruckes bereiten. Ethanol kann auch in Form von ETBE bis 15 % dem Ottokraftstoff zugemischt werden.

Die Biokraftstoffe der 1. Generation insbesondere reine Pflanzenöle weisen produktionsbedingt Schwankungen in den Kraftstoffeigenschaften auf. Da bei der Erzeugung der

Energiepflanzen als auch bei der weiteren Verarbeitung fossile Energieträger eingesetzt werden müssen, ist die CO₂-Bilanz der Biokraftstoffe nicht zu Null ausgeglichen, jedoch sind wesentliche CO₂-Einsparungen möglich. Die CO₂-Emissionsbilanz der Biokraftstoffe variiert je nach Biomasseart und Konversionsschritten erheblich.

Aufgrund der derzeit in Deutschland verfolgten Beimischungsstrategie für Biokraftstoffe sind die Anforderung an die Verteilungsinfrastruktur als gering einzustufen. Für den Vertrieb von reinem Pflanzenöl oder PME sind eigene Verteilstrukturen vorzusehen, die jedoch dem Stand der Technik entsprechen und auf dem Markt realisiert sind.

Biokraftstoffe der 2. Generation

Als Biokraftstoffe der zweiten Generation werden Kraftstoffe bezeichnet, die aus zellulosehaltigen Materialien wie zum Beispiel Stroh, Holz und verschiedene Rest- und Abfallprodukte erzeugt werden. Zur Erzeugung von Ethanol muss hierzu Zellulose in Zucker umgewandelt werden. Dieses Verfahren befindet sich derzeit noch im F&E-Stadium. Die Erzeugung von BtL-Kraftstoffen erfolgt über die Zwischenschritte Synthesegaserzeugung und nachgeschaltete Fischer-Tropsch oder Methanol-Synthese. Als Endprodukt entsteht Methanol oder ein flüssiges Kohlenwasserstoffprodukt. Die Anlagen befinden sich derzeit in der Demonstrationsphase.

Die breitere Rohstoffbasis wirkt sich bei den Verfahren positiv auf die Kosten des Kraftstoffes aus. Durch höhere Energieausbeuten ist auch eine weitere Einsparung von CO₂ zu erwarten. Jedoch entstehen auch hier im Vorfeld noch geringe Mengen nicht biogenen Kohlendioxids, ähnlich wie bei den Biokraftstoffen der 1. Generation.

Die erzeugten Kraftstoffe besitzen hohe Reinheitsgrade und definierte Verbrennungseigenschaften. Aufgrund dieser Eigenschaften können Verbrauchs- und Emissionsvorteile bei der motorischen Verbrennung erwartet werden, wenn die Motoren auf diese Kraftstoffe hin weiter entwickelt werden.

Die Verteilungsinfrastruktur der Biokraftstoffe entspricht denen der Biokraftstoffe der ersten Generation. Die Logistik für den Transport der Biomassen zu großskaligen Anlagen muss hierbei besondere Beachtung finden.

Wasserstoff/ Strom

Der Wechsel hin zu kohlenstoffarmen oder freien Primärenergieträgern wie Windenergie kann den Einsatz von Wasserstoff und/ oder Strom im Verkehrsbereich als sinnvoll erscheinen lassen. Wasserstoff kann aus Kohlenwasserstoffen durch Reformierung als auch über die Elektrolyse von Wasser erzeugt werden. Die eingesetzten Primärenergieträger sind daher entscheidend für die CO₂-Bilanz des Wasserstoffs bzw. des Stroms.

Beim Wasserstoff erfolgt die Bereitstellung der mechanischen Energie im Fahrzeug entweder durch einen Wasserstoff-Verbrennungsmotor oder eine Kombination aus Brennstoffzelle (elektrochemischer Wandler) und Elektromotor. Beim Elektrofahrzeug wird der mechanische Vortrieb durch eine Kombination aus Akkumulator und Elektromotor geleistet. Problematisch

ist noch die Mitführung des Wasserstoffs im Fahrzeug, da aufgrund der schlechten volumetrischen und gravimetrischen Speichereigenschaften (vgl. Abbildung 2) des Wasserstoffs Nutzraum- und Nutzgewichtverlust in Kauf genommen werden müssen, die nicht zuletzt auch die Fahrzeugreichweite negativ beeinflussen. Die Speicherfrage ist auch zurzeit das eigentliche K.O.-Kriterium der Akkumulator-Fahrzeuge und ihrer geringen Reichweite. Für die Zukunft bleibt abzuwarten, ob technische Weiterentwicklungen bei beiden Konzepten, die mobile Speicherung besser ermöglichen werden.

Nach den heutigen Erwartungen wird sich eine zukünftige Wasserstoffinfrastruktur nicht wesentlich von der der Gasversorgung unterscheiden. In ihren Grundzügen sind die Systeme, Rohrleitungen und stationäre wie mobile Druckspeicher, nicht nur bekannt und technisch erprobt, sondern auch seit Jahrzehnten im sicheren Einsatz. In verschiedenen Demonstrationsprojekten werden derzeit in Hamburg, München und Berlin Wasserstoffbetankungsanlagen im Großversuch getestet, um einen sicheren sowie gefahrlosen Umgang nachzuweisen.

Die Verteilung von elektrischer Energie erfolgt über das etablierte Stromverteilungsnetz. Die Betankung erfolgt analog zu bisherigen Verbrauchsstellen im elektrischen Netz. Die Integration der Elektrofahrzeuge mit Akkumulatoren in ein auf Erneuerbare Energiequellen ausgerichteten Energieversorgungssystem mit fluktuierender Einspeisungscharakteristik bietet auch neue Optionen für ein Netzmanagement.

III Kraftstoffbereitstellungspfade und Energieumwandlungsketten

Die Abbildung 5 zeigt eine Übersicht verschiedener Endenergieträger für den mobilen Bereich. Es werden sowohl Bandbreiten für die Kraftstoffkosten ohne Steuern und die jeweiligen Klimagasemissionen in CO₂-Äquivalenten angeben. Die CO₂-Emissionen enthalten die Emissionen entlang der Gewinnungs- und Erzeugungskette und die Nutzung der Kraftstoffe im Fahrbetrieb. Bei der Stromerzeugung wurde vom Strom-Mix in Deutschland ausgegangen. Die Erzeugung von Wasserstoff aus Kohle wurde ohne und mit Berücksichtigung einer möglichen Abscheidung und Speicherung von CO₂ untersucht. Bei diesem Verfahren wird die Kohle über einen Vergasungsschritt in ein Synthesegas überführt, das anschließend weiter zu Wasserstoff und Kohlendioxid konvertiert wird. Durch geeignete Abscheidungsverfahren kann das CO₂ aus dem Brenngas abgetrennt und einer Speicherung unter Abschluss von der Atmosphäre unterzogen.

Insgesamt sind die fossilen Kraftstoffe durch moderate Kosten bei gleichzeitig hohen CO₂-Emissionen gekennzeichnet. Eine Dekarbonisierung der Kraftstoffe kann erst bei Übergang zu Erdgas (höheres H/C-Verhältnis) und erneuerbaren Primärenergieträgerquellen erwartet werden. Der Übergang zu Wasserstoff als Kraftstoff lässt emissionsseitig erst Vorteile beim Übergang von fossilen Primärenergieträgern zu regenerativen Energien erkennen. Die Einführung einer CO₂-Abscheidestrategie und langfristig gesicherten Speicheroptionen für das CO₂ könnten diesen Nachteil zum Teil kompensieren, jedoch bei höheren Erzeugungskosten.

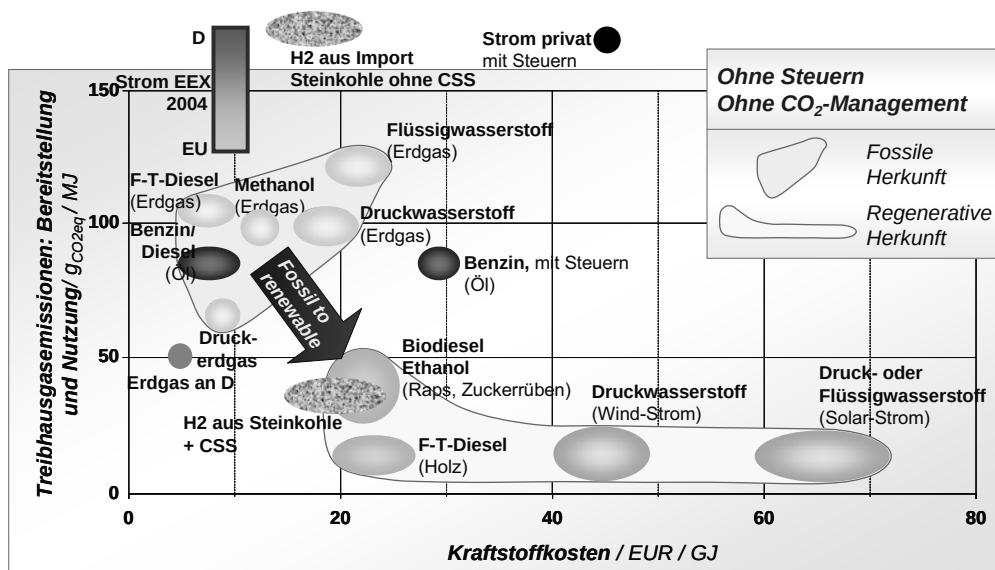


Abb. 5: CO₂-Emissionen und Kraftstoffkosten ausgewählter Kraftstoffbereitstellungspfade [BWK 2004], eigene Berechnungen

Für eine vollständige Bewertung der Emissionen und des Primärenergieaufwands ist das Zusammenspiel der verschiedenen Kraftstoffbereitstellungswege und geeigneter Antriebssysteme zu beachten. Die Energieumwandlung im Fahrzeug kann zum Beispiel durch Verbrennungsmotoren, Elektromotoren in Kombination mit Energiespeichern oder elektrochemischer Umwandlung von Wasserstoff mittels Brennstoffzellen erfolgen. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über wichtige Kenngrößen der Kraftstoffbereitstellung und Fahrzeugantriebe sowie den resultierenden CO₂-Emissionen und den Primärenergieaufwand. Die Werte wurden für den Europäischen Fahrzyklus errechnet und entsprechen nicht dem realen Verbrauchsverhalten auf der Straße. Für die Kraftstoffbereitstellung wurden verschiedene Produktions- und Transport-Wege hinterlegt, die durch Fern (Erzeugung in Großanlagen am Bohrloch), Regional (Erzeugung in regional verteilten Anlagen) und Lokal (Erzeugung vor Ort z.B. Dampfreforming von Erdgas) gekennzeichnet wurden.

	Benzin (Rohöl)	Diesel (Rohöl)	FT-D (Erdgas)	CNG (Erdgas)	C.H ₂ (Erdgas)	IMFC (Erdgas)	DMFC (Erdgas)	FT-D (Erdgas)	Strom Mix
	VM	VM	VM	VM	BZ	BZ	BZ	BZ	Bat
	Reg.	Reg.	Fern	Lokal	Reg.	Fern	Fern	Fern	Reg.
η_{KK} in %	84	92	62	81	64	64	64	62	32
m_{Pkw} in kg	1 064	1 062	1 062	1 064	1 164	1 257	1 202	1 251	k.A.
E_{Pkw} in MJ/100km	153	132	132	145	91	125	111	136	51
η_{Pkw} in %	22	25	25	23	39	30	31	27	59
E_{EUK} in MJ/100km	182	144	213	180	141	194	173	219	160
η_{EUK} in %	18	23	16	19	25	19	20	17	19
CO ₂ in kg/100km	13,1	10,6	14,5	10,4	8,3	11,9	10,5	15,0	10,0
Bat	E-Antrieb mit Batterie				FTD	Fischer-Tropsch-Diesel			
BZ	E-Antrieb mit Brennstoffzelle (PEFC)				IMFC	Indirekte Methanol Brennstoffzelle			
C.H ₂	Druck-Wasserstoff				(mit Reformier)				
CNG	Druck-Erdgas				KK	Kraftstoffkette			
DMFC	Direkt-Methanol-Brennstoffzelle				Lokal	Lokale Erzeugung des			
	(ohne Reformier)					Endenergieträgers			
EUK	Energieumwandlungskette				Reg.	Regionale Erzeugung des			
	Pkw + Kraftstoff					Endenergieträgers			
Fern	Erzeugung des Endenergieträgers				VM	Verbrennungsmotor			
	am Bohrloch (z.B. Übersee)								

Tab. 1: Vergleich von Energieumwandlungsketten (Kraftstoffbereitstellung und Pkw-Nutzung) [VDI 2002]

IV Fazit

Derzeit weisen mineralölbasierte Kraftstoffe inklusive der motorischen Nutzung einen sehr hohen Entwicklungsstand auf. Da insbesondere der hohe Energieinhalt dieser Kraftstoffe und das einfache Handling wichtige Faktoren für die mobile Nutzung sind, sollte die Erdölnutzung auf den Transportbereich fokussiert werden und zunächst CO₂-Einsparung über den Wechsel der Energieträgerbasis in den stationären Anwendungen vorgenommen werden. Mittelfristig kann eine Beimischung von biogenen Kraftstoffen mit zum Teil reduzierten CO₂-Emissionen über der gesamten Umwandlungskette einen Beitrag zur Senkung der CO₂-Emissionen im Verkehr liefern. Die Implementierung der Biokraftstoffe der zweiten Generation bietet zusätzlich die Möglichkeit, das Potenzial zu erweitern bei gleichzeitiger Verbesserung der CO₂-Bilanz und der Kraftstoffeigenschaften.

Langfristig gesehen kann nur ein Übergang zu kohlenstoffarmen oder -freien Primärenergieträgern eine weitere wesentliche Entlastung bei den verkehrlichen CO₂-Emissionen bringen. Eine Verlagerung der Emissionen in die vorgelagerte Kette führt nicht zwangsläufig zur Vermeidung von Emissionen.

Die Endenergieträger Wasserstoff und elektrische Energie ermöglichen die Nutzung von sauberen Primärenergien im Verkehrsbereich. Derzeit weisen jedoch sowohl Wasserstoff als auch Strom Probleme bei der mobilen Speicherung als auch im Handling auf. Lange Umwandlungsketten und damit verbundene Verluste entlang der gesamten Energiewandlungskette, die bei der derzeitigen Primärenergieträger-Struktur einer Erhöhung der CO₂-Emissionen entsprechen, sind zu vermeiden.

Für die Implementierung neuer Kraftstoffe werden gründlich überdachte Übergangsstrategien von der fossilen Kraftstoffversorgung hin zur CO₂-armen Versorgung benötigt, die „Stranded Investments“ vermeiden und das langsame Wachstum von Infrastrukturen berücksichtigen und eine möglichst flächendeckende Versorgung garantieren.

V Literatur

- [AGEB 2004] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Energieflussbild 2004;
www.ag-energiebilanzen.de
- [BGR 2004] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2004; Kurzstudie; 2004
- [BWK 2004] B. Höhle; Th. Grube; D. Stolten: Brennstoffzellensysteme und Wasserstoff als Energieträger; BWK Bd. 56 Nr. 1/2; 2004
- [IEA 2004] International Energy Agency: World Energy Outlook 2004; IEA/ OECD 2004;
www.iea.org
- [VDI 2002] Höhle, B.; Dolls, A.; Grube, Th.; Menzer, R.; Birnbaum, U.; Linssen, J.; Walbeck, M.: Vergleich von Kraftstoff-Fahrzeug-Systemen: Umwelt- und Kostenanalyse; VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik; VDI-Berichte 1704; Düsseldorf, 2002
- [VIZ 2005] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): Verkehr in Zahlen 2005/ 2006; 2005

Das Proálcool-Programm - Alkohol als Treibstoff für Kraftfahrzeuge in Brasilien

Fabian Weber, Carolin Funk

Technische Universität Berlin

1. Einleitung

Verbrennungsmotoren bilden den Grundstein für den Güter- und Personentransport auf dem Landweg. Dabei werden heutzutage vor allem fossile Brennstoffe zum Betreiben von Otto- und Dieselmotoren verwendet. Da deren Endlichkeit jedoch abzusehen ist, wird weltweit nach alternativen Antriebskonzepten und Brennstoffen für bestehende (oder leicht veränderte) Verbrennungsmotoren gesucht. Dabei müssen neben der technischen Kompatibilität für die zu betreibenden Motoren auch andere Aspekte wie Versorgungssicherheit, wirtschaftliche Machbarkeit und soziale Gesichtspunkte untersucht und berücksichtigt werden. Solche Untersuchungen sind oft kompliziert, da sie sich auf neue Technologien und Umstände beziehen, zu denen es es meist keine Erfahrungsdaten gibt. Gerade in den führenden Industrieländern in Europa, Nordamerika und Japan fehlt eine solche Erfahrung.

Ein Blick auf andere Regionen kann bei der Einschätzung von Möglichkeiten, Gefahren und Potentialen behilflich sein. So wird beispielsweise seit mehr als 30 Jahren in Brasilien Ethanol in großem Ausmaß als Treibstoff für Kraftfahrzeuge mit Ottomotor genutzt.

2. Proálcool 1975-86: Planung und Aufbau

Die Situation

Der Ölpreisschock zu Beginn der 70er Jahre traf in Brasilien auf eine Volkswirtschaft, die sich gerade im Aufschwung befand. Die Industrialisierung schritt schnell voran, die Bevölkerungsmobilität – und damit auch die Anzahl der Fahrzeuge auf Brasiliens Straßen – nahm stark zu. Die Militärregierung befand sich in einer Zwangslage, da durch den immer höher werdenden Energiekonsum und die Tatsache, dass das Land 80% seines Rohölverbrauchs importierte, die Auslandsverschuldung dramatisch zunahm. Die Ausgaben für Rohölimporte 1974 vervierachten sich im Vergleich zum Vorjahr, die Inflationsrate stieg im gleichen Zeitraum von 15,5% auf 34,5%.¹ Besonders im Güter- und Personentransport stieg die Nachfrage nach Öl, was zum einen auf die großen Distanzen und zum anderen auf die Inexistenz eines Schienennetzes zurückzuführen war. Es wurde nach einem alternativen Brennstoff gesucht, mit dem der heimische Wirtschaftsaufschwung angetrieben und

¹ Vgl. <http://www.biodieselecooleo.com.br/proalcool/historia-verdadeira.htm> vom 25.02.2006.

gleichzeitig die Importkosten reduziert werden konnten. Schnell stieß man bei diesen Überlegungen auf aus Zuckerrohr gewonnenes Ethanol. Bereits seit dem 2. Weltkrieg als Überlaufventil für die Zuckerrohrproduktion zur Beimischung zu Benzinkraftstoff genutzt, war sein Vorteil, dass der Rohstoff in großem Maße in Brasilien verfügbar war und die Beimischung zu Benzin schon seit Jahrzehnten praktiziert wurde.

Erste Schritte des Programms

Am 14.11.1975 wurde das „Programa Nacional do Alcool“, auch „Proálcool“ genannt, in Brasília beschlossen. Ziel war zunächst die Erhöhung der Beimischung von Ethanol zu Benzin. Dazu wurde in einer ersten Phase versucht, die Produktion von Ethanol zu erhöhen. Eine Förderung des Zuckerrohranbaus von staatlicher Seite fand durch finanzielle Anreize in Form von günstigen Krediten und Abnahmegarantien zu festgelegten Preisen statt. Darüber hinaus wurden die Produktionskapazitäten für Ethanol durch die Vergrößerung von Destillieren in den Zuckerfabriken und den Bau eigenständiger Anlagen erhöht. Das Geld für diese Investitionen stammte aus den hohen Gewinnen, die die brasilianische Regierung durch den Verkauf des erzeugten Zuckers zu den zur damaligen Zeit hohen Weltmarktpreisen erzielte. Durch diese Maßnahmen konnte die jährliche Produktion von rund 550 Millionen Liter bei Programmbeginn innerhalb von 4 Jahren auf 3,4 Milliarden Liter erhöht werden. In Abbildung 1 sind die Produktionsmengen für Zuckerrohr und Ethanol dargestellt.

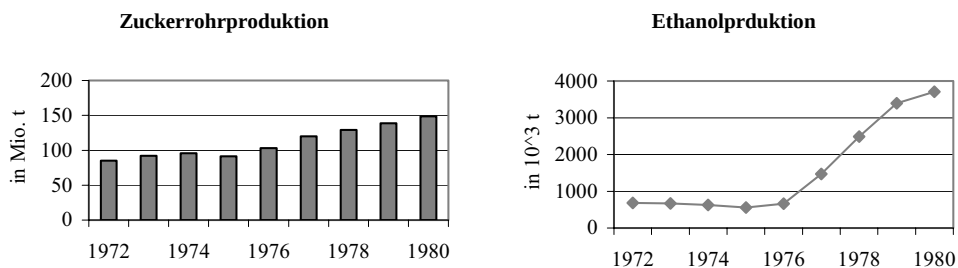


Abb. 1: Zuckerrohr- und Alkoholproduktion in Brasilien 1972-80²

Mit Hilfe dieser Angebotssteigerung wurde die erste Substitution von Benzin durchgeführt, indem die Beimischung von Ethanol zu „normalem“ Benzinkraftstoff bis 1978 schrittweise von 5% auf 25% angehoben wurde. Diese Maßnahme erforderte keine größeren Investitionen, da weder neue Zapfsäulen, noch andere Transporte notwendig waren. Durch eine Steuerbefreiung von Alkohol konnte der an der Tankstelle verlangte Preis zudem konstant gehalten werden.

² Quelle: <http://faostat.fao.org/faostat/servlet> vom 22.02.2006.

Die Einführung des Alkoholautos

Die durch den Sturz des Schahregimes im Iran 1979 ausgelöste zweite Ölkrise sorgte für eine Erhöhung der Ölpreise. Wieder stiegen die staatlichen Ausgaben für Rohölimporte in Brasilien stark an. Neben der Ethanolbeimischung wurde nun auch über den Versuch nachgedacht, Benzin im Straßenverkehr komplett durch Alkohol zu ersetzen. Dieser Schritt war allerdings mit größeren technischen Veränderungen verbunden. Es mussten Autos angeboten werden, die mit reinem Alkohol betankt werden konnten. Durch das bestehende Angebot an Treibstoff und die Ankündigung der Regierung in Brasília, neben dem Kraftstoff selbst auch alkoholbetriebene Autos mit günstigen Krediten und Steuererleichterungen zu subventionieren, konnten die Autohersteller davon überzeugt werden, die Entwicklung solcher Modelle voranzutreiben.

Das erste alkoholbetriebene Serienmodell auf dem brasilianischen Markt wurde im Juli 1979³ mit dem Fiat 147, einem Kleinwagen mit moderatem Verbrauch, vorgestellt.⁴ Sein Motor entsprach weitestgehend dem benzingetriebenen Vierzylinder mit 1297 ccm.⁵ Kurze Zeit darauf folgten die anderen drei Hersteller auf dem brasilianischen Markt mit ihren alkoholbetriebenen Modellen des VW Käfer, Chevrolet Chevette und Ford Corcell II.⁶

Ein anderes Problem bei der Einführung der Alkoholautos konnte auf elegante Weise gelöst werden: Durch die vergleichsweise hohe Beimischung von Alkohol zu Normalbenzin konnte die Klopfestigkeit des Kraftstoffs derart erhöht werden, dass Superbenzin nicht mehr zwingend notwendig war. 1980 wurde Superbenzin an brasilianischen Tankstellen abgeschafft. Diese Zapfsäulen konnten für den neuen Alkoholkraftstoff genutzt werden. Für die Tankstellen entstanden daher nur geringfügige Umbaukosten. Offizielle Organe, wie der CNAL (conselho nacional do álcool) und der CENAL (comissão executiva nacional do álcool) legten in der Folgezeit die Kraftstoffpreise und Subventionen stetig fest.

Die ersten Alkoholmodelle zeigten, verglichen mit ihren Schwestermodellen mit Benzinbetrieb, wenig technische Veränderungen. Bauteile wie Tank, Vergaser, sowie alle Leitungen und Dichtungen, die mit Alkohol in Kontakt kamen, wurden lediglich durch chemische Behandlung rostbeständiger gemacht. Zusätzlich erhielten die Motoren eine größere Kraftstoffpumpe, die einen höheren Durchfluss ermöglichte. Des Weiteren wurden andere Einspritzpumpen mit gerader Oberfläche zur Druckerhöhung und spezielle Zündkerzen eingesetzt. Aufgrund der durch die größere Verdichtung notwendige Erhöhung der Leistung erhielten die Triebwerke außerdem eine Batterie mit höherer Ampèrezahl. Da Alkohol zündunwilliger als Benzin ist, wurde für den Kaltstart schließlich noch eine Vorrichtung zur Einspritzung einer geringen Benzinmenge eingebaut.

Seit der Einführung der ersten alkoholbetriebenen Autos ranken sich Gerüchte über deren Vor- und Nachteile gegenüber benzinbetriebenen Modellen. Einige begründen sich

³ Vgl.: Scaramucci, "Proálcool – 30 anos" www.unicamp.br/unicamp vom 01.02.2006.

⁴ Vgl.: <http://almanaque.folha.uol.com.br/dinheiro70.htm> vom 22.02.2006.

⁵ Vgl.: <http://www.vita.com.br/galeria2/index.asp> vom 01.02.2006.

⁶ Vgl.: <http://www.automotivebusiness.com.br/abnovoboletim35.htm> vom 22.02.2006.

tatsächlich aus den unterschiedlichen Eigenschaften der Kraftstoffe. Andere ergeben sich jedoch lediglich aus der Realisierung der alkoholbetriebenen Motoren zu jener Zeit. So lässt sich der höhere Verbrauch nur teilweise aus der geringeren Leistungsdichte des Ethanol ableiten. Ein großer Teil des Verbrauchsunterschiedes, welcher je nach Modell bei ca. 33% lag, erklärt sich aus der Tatsache, dass die Alkoholmotoren aus Kostengründen sehr stark den benzinbetriebenen Triebwerken entsprachen und damit durch fehlende Anpassungen Effizienz verschenkt wurde. So wurden bei den ersten Alkoholmodellen nur Kleinteile, wie Dichtungen oder kraftstoffleitende Bauteile, ausgetauscht, Zylinder und Kolben jedoch nicht verstärkt, was zumeist finanzielle Gründe hatte. Die mögliche, weit höhere Verdichtung bei Alkoholbetrieb konnte dadurch nur teilweise realisiert werden, was den maximalen Wirkungsgrad natürlich verringerte. Dieser Zusammenhang erklärt auch das Vorurteil, dass Alkoholmotoren eine kürzere Lebensdauer haben. Aufgrund der verglichen mit dem Benzinbetrieb effektiveren Verbrennung bei Verwendung von Ethanol kann mit Alkoholmotoren ein höheres Drehmoment erzielt werden, was dazu führt, dass die Materialien im Brennraum höheren Belastungen ausgesetzt sind. Da die notwendigen Materialverstärkungen aus Kostengründen nicht oder nur teilweise durchgeführt wurden, konnte dies bei manchen Modellen in der Tat zu einer geringeren Laufleistung führen.

Verglichen mit Benzinmodellen zeichneten sich bereits die ersten Alkoholmotoren durch günstigere Abgaswerte aus, da etwas höheren Kohlenwasserstoff-Emissionen deutlich geringere Kohlenmonoxid- und Kohlendioxid-Werte gegenüberstanden. Der Grund, der in Brasilien allerdings für den Verkaufserfolg der Alkoholmodelle ausschlaggebend war, lag jedoch im ökonomischen Vorteil der Kunden. Der Anschaffungspreis war praktisch identisch, die Preise für Alkohol an den Tankstellen lag jedoch erheblich unter dem von Benzin. Dabei spielten staatliche Subventionen eine große Rolle, da diese den eigentlich höheren Anschaffungspreis durch Steuervorteile und subventionierte Ethanolpreise in einen Preisvorteil für das Alkoholmodell umkehrten. So konnte trotz Mehrverbrauch an Kraftstoff mit einem Alkoholauto Geld gespart werden.

Alkoholboom 1979-86

Durch die ökonomischen Vorteile gestaltete sich die Nachfrage nach den ethanolbetriebenen Autos sehr positiv. Der Anstieg verlief sehr steil. Lag der Anteil 1979 noch bei 0,5%, so waren es im Folgejahr schon 26,8%. 1986 wurden schließlich 88,6% aller in Brasilien verkauften KFZ mit Alkoholmotoren betrieben.⁷

Die große Nachfrage ließ in ähnlichem Maße die Alkoholproduktion ansteigen, was das Verbrauchsprofil des Landes nach Energiequellen erheblich veränderte und schließlich auch eine Reduktion der Rohölimporte zur Folge hatte. Damit war ein Großziel der Regierung erreicht. Mitte der 80er Jahre konnte das Programm also als Erfolg gewertet werden.

⁷ Vgl.: ANFAVEA, www.anfavea.com.br vom 12.01.2006.

3. Krise – Zucker oder Alkohol?

Betrachtet man die Absatzzahlen der alkoholbetriebenen Autos (vergleiche Abbildung 2), so ist ab Mitte der 80er Jahre ein starker Rückgang zu verzeichnen. Während sich das totale Volumen 1997 auf fast 2 Mio. Fahrzeuge erhöhte, nahm der Verkauf von Alkoholfahrzeugen rapide ab.

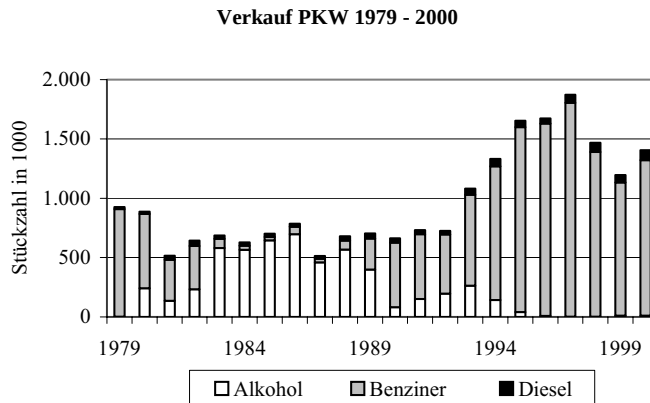


Abb. 2: Verkaufszahlen 1979-2000⁸

Eine stetig steigende Nachfrage traf auf ein stagnierendes bis sinkendes Angebot, was zu einem Versorgungsengpass führte. Seitens der Konsumenten endete das Problem in einem Vertrauensverlust und führte zu einem drastischen Rückgang der Nachfrage nach alkoholbetriebenen Autos. Die einzelnen Gründe, die zu den Angebots- und Nachfragebewegungen führten, sollen im folgenden näher erklärt werden.

Sinkendes Angebot

Grund dafür ist eine externe Entwicklung: Mitte der 80er Jahre wurden neue Ölquellen entdeckt und die Versorgung der Industrieländer wieder gesichert, was eine erhebliche Reduktion der Bezugspreise zur Folge hatte. Ab 1986 fiel der Preis pro Barrel von 40 \$ auf bis zu 12 \$. Da in Brasilien die Preise, die von staatlicher Stelle an die Zuckerproduzenten für Ethanol gezahlt wurden, an die Ölpreise gekoppelt waren, wurde die Alkoholproduktion nicht stimuliert, was sich in stagnierenden Produktionszahlen bemerkbar machte. Zusätzlich sorgte eine anhaltende Wirtschaftskrise für leere Staatskassen, was sich ab 1988 in einem Rückgang der Subventionen auch für die Zucker- und Alkoholproduktion bemerkbar machte. Ab 1989 international steigende Preise für Zucker bewirkten somit, dass für die Zuckerrohrproduzenten der Export von Zucker lukrativer wurde, als Brasilien selbst mit Ethanolkraftstoff zu versorgen.

⁸ Quelle: ANFAVEA, www.anfavea.com.br vom 12.01.2006.

Steigende Nachfrage

Durch die Beibehaltung der günstigeren Steuersätze für Alkoholautomobile und der Subventionierung des Ethanols, um es im Vergleich zu Benzin weiterhin konkurrenzfähig zu halten, wurde die Nachfrage in diesem Zeitraum weiterhin stimuliert. Im Jahre 1985 wurden über 90% aller verkauften PKW mit Ottomotor mit Alkohol betrieben.

Versorgungsengpass

Der zu erwartende Versorgungsengpass stellte sich zur Ernte 1989-90 ein (vergleiche Abbildung 3). Die Zuckerrohrproduzenten wollten höhere Abnahmepreise durch die staatlichen Organe erreichen und drohten mit der Reduzierung der Alkoholproduktion. Diese Drohung wurde 1989 realisiert, was eine landesweite Alkoholversorgungskrise an brasilianischen Tankstellen zur Folge hatte. Diese dauerte rund zwei Wochen – ein relativ kurzer Zeitraum -, der jedoch dazu ausreichte, das Vertrauen der Konsumenten in die Versorgungssicherheit nachhaltig zu zerstören. Die Versorgung konnte erst wieder gesichert werden, als das hydratisierte Ethanol an den Zapfsäulen durch eine Mischung namens MEG, bestehend aus 60% Ethanol, 34% Methanol und 6% Benzin, ersetzt wurde. Dafür mussten zwischen 1989 und 1995 über sechs Million Liter Ethanol und Methanol importiert werden.

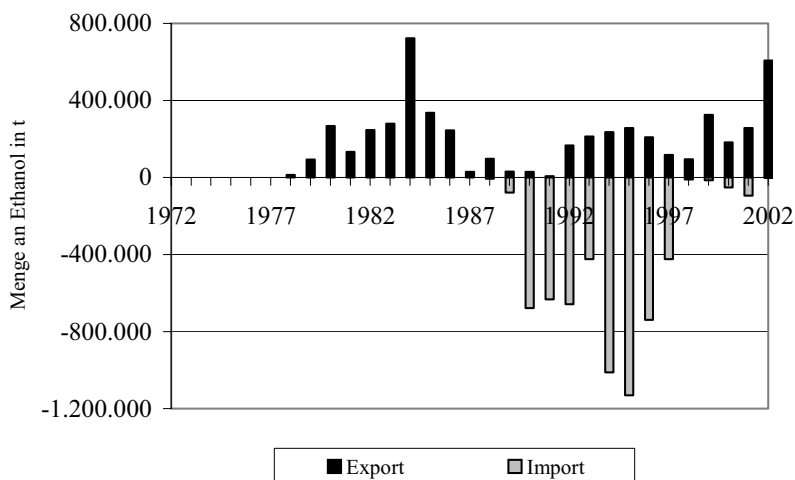


Abb. 3: Export-und Import von Ethanol⁹

⁹ Quelle: FAO, <http://faostat.fao.org/faostat/servlet> vom 12.01.2006.

Auswirkungen

Der Vertrauensverlust der potentiellen Käufer machte sich zunächst in einem drastischen Rückgang des Wiederverkaufswertes von alkoholbetriebenen Autos bemerkbar. Das wiederum bedeutet einen starken Absatzrückgang für Alkoholneuwagen. Ein weiterer Grund für den Rückgang der Verkaufszahlen der Alkoholautos lag in der Liberalisierung des brasilianischen Automobilmarktes, der zu Beginn der 90er Jahre für Autoimporte geöffnet wurde. Der günstige Erdölpreis bewegte zudem die ansässigen Automobilproduzenten, weltweit vermarktbare benzinbetriebene PKW herzustellen. Ein ähnlich starker Rückgang der Nachfrage nach Ethanol wurde durch die hohe Beimischung zu Benzinkraftstoff und die relativ lange Nutzungsdauer von Automobilen in Brasilien verhindert. Durch mehrere Bestimmungen, die staatliche und öffentliche PKW-Flotte mit Alkoholautos auszustatten, wurde versucht, dem sinkenden Absatz entgegenzutreten, jedoch mit nur kurzem Erfolg. Im Jahr 2000 sank der Marktanteil ethanolbetriebener PKW auf unter ein Prozent.¹⁰

4. Wiedergeburt des Alkoholautos: Der Flexfuel-Motor

Auch während der Krise blieb Ethanol als Kraftstoff günstiger als Benzin. Das einzige Problem stellte die Versorgungsunsicherheit bei den Kunden dar. Ein Auto, welches sowohl mit Alkohol als auch mit Benzin betrieben werden kann, vermochte so, ein Ende der Krise herbeizuführen. Beleg dafür waren weitverbreitete Versuche von Fahrern benzinbetriebener Automobile, bei günstigen Ethanolpreisen selbst den Alkohol mit Benzin zu mischen. Da die Motoren jedoch nicht für solche Gemische ausgelegt waren, hatte der Betrieb negative Auswirkungen in Form von Startschwierigkeiten, hohem Verbrauch und Motorschäden zur Folge. Um die Entwicklung eines Fahrzeuges, welches mit beiden Kraftstoffarten betrieben werden kann, voranzutreiben, senkte die brasilianische Regierung 2002 die Industrieproduktsteuer für die sogenannten Flexfuel-Motoren. Die Autoindustrie reagierte: Das erste Modell wurde im März 2003 in Brasilien von VW vorgestellt.

Die Technik

Zentrale Probleme bei der Entwicklung waren die motorseitige Identifizierung des im Tank befindlichen Kraftstoffs und die Motorsteuerung. Bereits Mitte der 90er Jahre wurden in den USA Motoren entwickelt, die mit Methanol oder Benzin betrieben werden konnten. Die zur Kraftstofferkennung verwendeten Sensoren waren jedoch zu teuer, um ein solches Fahrzeug zu marktfähigen Preisen anbieten zu können. So kam das erste FFV (flexible fuel vehicle) erst 2003 auf den Markt. Es handelte sich hierbei um einen VW Gol 1.6 mit einem von Bosch entwickelten System. Der verwendete Sensor erkennt den Sauerstoffgehalt im Kraftstoff und leitet daraus den Alkoholgehalt im Gemisch ab. Diese Information wird an die Steuereinheit übertragen, die ihrerseits automatisch alle Funktionen an den Kraftstoff anpasst. Die Kosten für diese Technik lagen deutlich unter denen amerikanischer Systeme, wodurch die FFV-

¹⁰ Vgl.: www.anfavea.com.br vom 12.01.2006.

Version zu einem nur geringfügig höheren Preis als der Benzinmotor angeboten werden konnte. Für den Ethanolbetrieb mussten die aus der Konzeption für reine Alkoholmotoren bereits bekannten motorseitigen Änderungen durchgeführt werden. Darüber hinaus ersetzte nun eine effektive Zylinderblockvorwärmung die vorher notwendige Benzineinspritzung bei niedrigen Außentemperaturen. Der Vorteil der beliebigen Mischbarkeit der beiden Kraftstoffe brachte auch einen Nachteil mit sich: Um den Motor für beide Kraftstoffe betriebsfähig zu halten, mussten Kompromisse geschlossen werden. Der Motor konnte nur optimal für ein bestimmtes Mischverhältnis eingestellt werden. So war beispielsweise die Höhe des Verdichtungsverhältnisses, die einen effektiveren Alkoholbetrieb ermöglicht hätte, durch die Klopfgrenze des Benzins limitiert.

Marktresonanz

Aufgrund der auch bei höherem Verbrauch weiterhin existierenden Preisvorteile von Ethanol konnten sich die FFV seit ihrer Einführung im Mai 2003 sehr gut auf dem brasilianischen Markt behaupten.

Bereits im November 2004 verfügten 25% aller neu zugelassenen Autos über einen Flexfuel-Motor. Die Marktentwicklung der ersten Monate überzeugte auch andere Hersteller. Mit Ausnahme von Toyota und Honda bieten heute alle in Brasilien angebotenen Marken ihre Modelle auch mit einem Flexfuel-Motor an; einige sogar ausschließlich. Im November 2005 stieg der Marktanteil der Flexfuelmodelle auf knapp 71%. Ende 2005 lag der Bestand in Brasilien bei 700.000 FFV neben immerhin noch 2.000.000 zirkulierenden reinen Alkoholmodellen. Für 2006 wird allgemein ein Marktanteil von 75% vorausgesagt. Im Hinblick auf steigende Erdölpreise wird im allgemeinen davon ausgegangen, dass in zwei Jahren nahezu 100% der Neuzulassungen in Brasilien auf FFV fallen wird. Dahingehende Studien sehen damit in 4 Jahren einen Bestand von ca. 5.000.000 FFV in Brasilien voraus.

Mit dem Erfolg der Flexfuel-Fahrzeuge konnte auch der alkoholproduzierende Sektor wiederbelebt werden. Die Produktion hydratisierten Alkohols stagnierte seit dem Ende der 90er Jahre. Für die Produktionszahlen des Jahres 2004 ergab sich aber wieder eine deutliche Steigerung der Ethanolproduktion.

5. Investitionen in Proálcool

Staatliche Subventionen und Anreize für die Nachfrage nach Alkohol haben die Ethanolproduktion in Brasilien konkurrenzfähig werden lassen. Dabei wurde Geld aus Steuern auf Diesel und Benzin dazu verwendet, für Investitionen in Modernisierungsmaßnahmen zur Senkung der Kosten der Alkoholproduktion. Durch staatlich garantierte und relativ zu Zucker vorteilhafte Abnahmepreise für Alkohol sowie weiteren finanziellen Anreizen für Landwirtschaft und Industrie konnte die Produktion Ende der 70er Jahre stark angehoben werden. Die Investitionen sind in Abbildung 4 dargestellt und betrugen zwischen 1976 und 1989 insgesamt fast 400 Millionen US\$ - auf die einzelnen Jahre verteilt, lassen sie sich wie folgt darstellen.

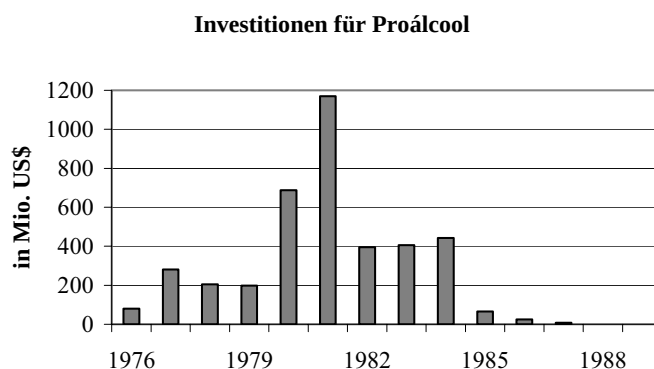


Abb. 4: Investitionen in das Proálcool-Programm¹¹

6. Auswirkungen auf Zuckerrohranbau und Alkoholproduktion

Die durch die Investitionen finanzierten Maßnahmen zur Produktionserweiterung und –intensivierung hatten bedeutende Auswirkungen sowohl auf den Rohstoffanbau und –ernte, als auch auf die industrielle Weiterverarbeitung.

Entwicklung Zuckerrohranbau:

Lag der durchschnittliche jährliche Ertrag bei Zuckerrohr in Brasilien im Jahr 1975 noch bei 46 t/ha, so betrug er 2004 bereits knapp 74 t/ha. Damit konnte der Ertrag in dieser Zeit um 60% gesteigert werden. Gründe dafür liegen in einer genaueren Auswahl der angebauten Zuckerrohrsorten und dem Einsatz neuer Techniken, wie z. B. Satellitenbildern zur

¹¹ Quelle: Tribunal de Contas da União, « Proálcool – Relatório de auditorio operacional » Brazilian Government Publication, Dezember 1990.

Wachstumskontrolle. Des Weiteren kann durch den Einsatz modernerer Maschinen bei der Ernte die Verschmutzung des geernteten Zuckerrohrs vermieden werden, wodurch die Wäsche, bei der bis zu 2% des Saftes mit ausgewaschen wurden, überflüssig wird. Mit dieser Produktivität muss sich Brasilien im internationalen Vergleich nur Australien geschlagen geben, wo absolut allerdings weniger als ein Zehntel der brasilianischen Produktion erreicht werden, wie in Abbildung 5 erkennbar ist.

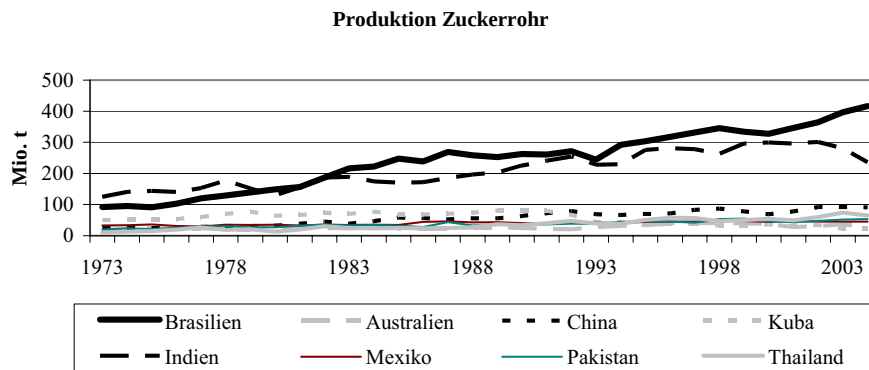


Abb. 5: Zuckerrohrproduktion weltweit¹²

Entwicklung Alkoholproduktion

Zu Beginn der 70er Jahre existierten in Brasilien rund einhundert Zuckerfabriken, die jeweils kleine Anlagen zur Alkoholproduktion besaßen. Sie waren ausnahmslos in den historischen Anbaugebieten im Nordosten des Landes und im Bundesstaat Sao Paulo angesiedelt.

Durch das Proálcool-Programm erhielten diese Fabriken Finanzierungen für größere Destillieranlagen. Gleichzeitig wurden im ganzen Land autonome Destillieren erbaut. Insgesamt entstanden in der Folgezeit 180 solcher autonomer Destillieren. Dabei wurde versucht, die Produktion zu dezentralisieren und die Alkoholproduktion näher an die Regionen mit größerem Konsum, also den um ein vielfaches stärker industrialisierten und bevölkerten Süden und Südosten des Landes, zu bringen. So stieg der Bundesstaat Paraná, der zuvor praktisch keine Zucker- oder Alkoholproduktion besaß, innerhalb einiger Jahre zum zweitgrößten nationalen Alkoholproduzenten auf.

Die neuen Anlagen hatten eine Kapazität von 120.000 bis 180.000 Liter Alkohol pro Tag. Heute erreichen sie mit 450.000 Litern pro Tag die zweieinhalbfache Kapazität. Dabei wird in allen Anlagen zuerst hydratisierter Alkohol hergestellt, von dem bei Bedarf ein Teil entnommen und durch einen weiteren Destillationsschritt der verbleibende Wasseranteil zur Produktion von wasserfreiem Ethanol verwendet werden kann. Darüber hinaus sind die

¹² Quelle: FAO, <http://faostat.fao.org/faostat/servlet> vom 12.01.2006.

Fabriken zumeist flexibel für die Produktion von Alkohol und Zucker, was für die Betreiber ein großer Vorteil bezüglich der Reaktionsfähigkeit auf die Nachfragesituation der jeweiligen Märkte bedeutet.

Bei der Umwandlung von Zuckerrohr in Alkohol konnte zwischen 1985 und 2002 eine Steigerung von 70 l/t auf durchschnittlich 80 l/t erzielt werden. Dies wurde vor allem durch eine verbesserte Saftauspressung und eine Optimierung der Fermentierung und Destillierung erreicht. Im internationalen Vergleich führt Brasilien die Alkoholproduktion an.

Land	Produktion (in 10 ⁶ m ³)	%
Brasilien	15,2	36
USA	13,9	33
China	3,8	9
EU	2,5	6
Indien	2,1	5
Andere	4,6	11
GESAMT	42,2	100

Tab. 1: Weltweite Alkoholproduktion im Jahr 2004¹³

Durch eine Reduktion des Energieverbrauchs bei der Ernte und eine großteils erreichte Selbstversorgung der Produktionsstätten mit Energie durch Nutzung der anfallenden Bagasse über Methangasvergärung konnten die proportionalen Produktionskosten innerhalb der ersten 20 Jahre des Programms halbiert werden. Dabei blieb der agrarseitige Kostenanteil mit ca. 60% konstant. Wie Tabelle 1 zeigt ist Brasilien weltweit die Nummer 1 in der Alkoholproduktion.

Die Effizienz der modernen Destillieren und die Skalenerträge, die aus den großen Zuckererträgen resultierten, machten aus Brasilien das einzige Land, in dem Ethanol billiger als Methanol (ein Großprodukt der petrochemischen Industrie) war. In den 80er Jahren konnte das Land sogar eine erhebliche Menge seiner Produktion zu konkurrenzfähigen Preisen exportieren. Die steil ansteigende Inlandsnachfrage bei gleichbleibender Produktion ließen die Exportkapazitäten bis zum Ende der 80er Jahre jedoch verschwinden und machten sogar Importe notwendig (vergleiche Abbildung 3).

1995 wurde der Zuckermarkt in Brasilien liberalisiert. Durch die geringen Anreize zur Herstellung von Alkohol wurde Zuckerrohr vermehrt wieder zu Zucker verarbeitet. Dies war in dem Sinne leicht umsetzbar, als sich die Produktion von Ethanol und Zucker erst ab dem Erhalt des Saftes unterscheidet. Zur Zuckerproduktion müsste er in einer Zentrifuge bearbeitet

¹³ Quelle: www.datagro.com.br vom 15.03.2006.

werden. Für die Herstellung von Alkohol wird der Saft fermentiert. Da es nun keine staatlichen Restriktionen mehr gab, konnte der Zucker auch auf den internationalen Märkten angeboten werden. Der brasilianische Export stieg so von 1,7 Mio. t (1990) auf über 12 Mio t im Jahr 1999¹⁴. Da Brasilien einer der führenden Zuckerproduzenten weltweit ist, ließ das erhöhte Angebot die international erzielbaren Preise schnell fallen.

Um die Produktion vom Zucker wieder vermehrt auf Alkohol zu lenken bestimmte die Regierung 1998 eine gesetzliche Mindestbeimischung von 22% zu Normalbenzin. Somit konnte zumindest die Produktion anhydrierten Alkohols leicht gesteigert werden. Mit der Einführung der FFV erlebte auch der hydratisierte Alkohol einen neuen Produktionsanstieg. Die Produktions- und Exportverläufe sind in den Abbildungen 6 und 7 dargestellt.

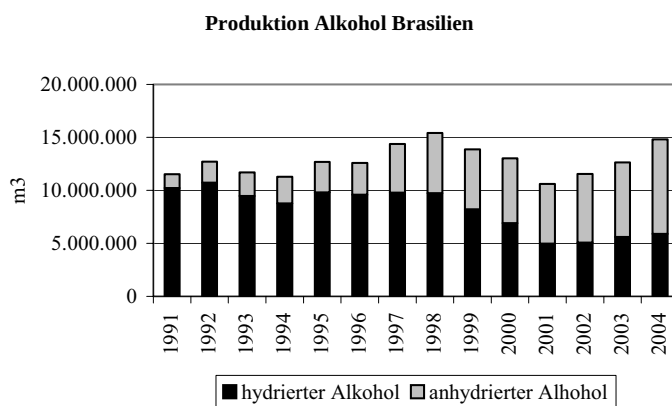


Abb. 6: Produktion Alkohol hydratisiert/ anhydratisiert 1991-2004¹⁵

¹⁴ Vgl. www.faostat.fao.org/faostat/servlet vom 12.01.2006.

¹⁵ Quelle: UNICA (Uniao da Agroindustria Canavieira de SP)
<http://www.portalunica.com.br/referencia/estatisticas.jsp> vom 20.12.2005.

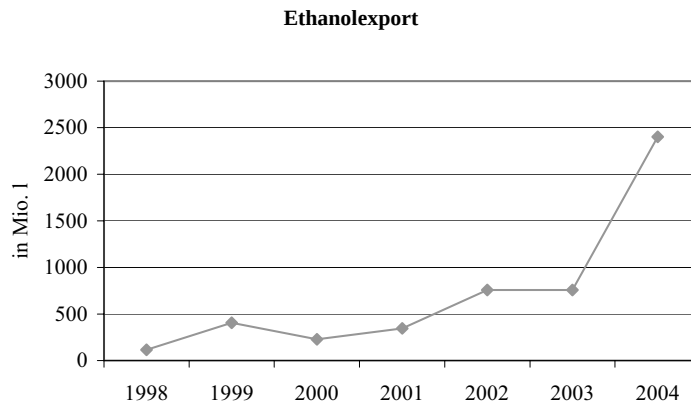


Abb. 7: Ethanollexport 1998-2004¹⁶

Anbauggebiete und regionale Produktivitätsunterschiede:

Die traditionellen brasilianischen Zuckerrohranbauggebiete sind im Nordosten des Landes angesiedelt. Sie verfügen über große Flächen mit konstant hohen Temperaturen und partiell ausreichenden Niederschlägen. Die Produktionsmethoden sind jedoch seit langem veraltet und sehr arbeitsintensiv. Das wirtschaftliche Überleben der Großbetriebe konnte lange Zeit nur durch die sehr geringen Löhne gesichert werden. Die fortschreitende Industrialisierung vor allem im Südosten des Landes ließ andere Zuckerproduzenten an diesen traditionellen Betrieben vorbeiziehen. So überholte im nationalen Vergleich der Bundesstaat São Paulo in den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts den historischen Zuckerproduzenten Pernambuco.

Seitdem klaffen Produktivität und Produktion zwischen dem Südosten und dem Nordosten des Landes immer weiter auseinander. Wie in Abbildung 8 dargestellt wird im Südosten ein Vielfaches an Zuckerrohr und Alkohol produziert, im Nordosten stagniert der Sektor. Auch bezüglich der Herstellkosten pro produzierter Einheit sind die Unterschiede deutlich. Bis heute existieren daher staatliche Subventionen in Brasilien, um die höheren Produktionskosten im Nordosten des Landes auszugleichen.

So erreicht etwa die Produktivität im Anbau im Südosten Werte von 81 bis 83 t/ha, im Norden und Nordosten des Landes liegt sie mit 60 t/ha deutlich darunter.¹⁷ Die Produktion einer Tonne Zucker in São Paulo kostet derzeit ca. 160\$, im Nordosten hingegen ca. 300\$. Daher ist es nicht verwunderlich, dass der Anstieg, der seit 2000 bei der Zuckerrohrproduktion in Brasilien zu verzeichnen ist, hauptsächlich auf den erhöhten Ertrag im Südosten des Landes zurückzuführen ist.

¹⁶ Quelle: SECEX www.secex.com.br vom 17.01.2006.

¹⁷ Vgl. www.bndes.gov.br vom 24.04.2006.

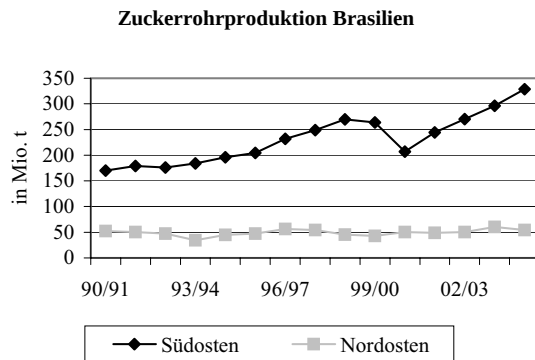


Abb. 8: Zuckerrohrproduktion nach Regionen¹⁸

In der industriellen Verarbeitung von Zuckerrohr zu Alkohol ist eine ähnliche Entwicklung zu beobachten. Seit 2000 kann die Alkoholproduktion in Brasilien große Steigerungsraten verzeichnen. Wie schon im Zuckerrohranbau wird diese Steigerung allerdings hauptsächlich durch die Produktionserhöhung im Süden und Zentrum des Landes realisiert. Die Produktionszahlen im Norden und Nordosten – ohnehin auf einem relativ niedrigen Niveau – stagnieren. Zudem bestehen, wie auch bei der Zuckerrohrgewinnung, große Unterschiede in der Produktivität. So werden z.B. die Destillerien im Zentrum und im Süden mit 83 l/t (im Staat Sao Paulo sogar 85 l/t) effizienter betrieben als die Anlagen im Norden und Nordosten, wo nur 70 l/t erzeugt werden.

75% der 284 Destillieren in Brasilien stehen in der Region Zentrum-Süden. Die dortigen Anlagen sind zudem größer und effizienter und tragen so zu fast 90% der 2002 insgesamt in Brasilien produzierten 12,6 Millionen Liter Alkohol bei (vergleiche Abbildung 9). Der Norden und Nordosten des Landes vereint mit 72 Anlagen die restlichen 10% der Produktion auf sich.¹⁹

¹⁸ Quelle: UNICA www.portalunica.com.br/referencia/estatisticas.jsp vom 20.12.2005.

¹⁹ Vgl. UNICA www.portalunica.com.br/referencia/estatisticas.jsp vom 05.04.2006.

Ethanolproduktion in Brasilien (2002 in Mrd.l)

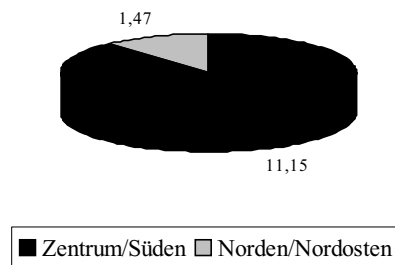


Abb. 9: Anlagen zur Ethanolproduktion 2002²⁰

Aktueller Produktionsstand

Heute werden jährlich rund 20 Mio t Zucker und 12,5 Milliarden l Ethanol in Brasilien produziert. Vor allem durch die positive Markteinführung der FFV erlebt die Alkoholindustrie einen neuen Boom. Im Gegensatz zur Einführung des staatlichen Programmes „Proálcool“ 1975 wird dieser Boom vor allem durch private Initiative gefördert, was ein Indiz dafür ist, dass man sich in der brasilianischen Wirtschaft der Marktchancen sicher ist.

7. Wirtschaftlicher Nutzen und Chancen

Bisherige Einsparungen und Auswirkungen

Zwischen 1975 und 2000 wurden ca. 5.600.000 alkoholbetriebene Autos produziert. Darüber hinaus konnte der Benzin beigemischte Alkoholanteil landesweit auf bis zu 25% erhöht werden, womit eine nationaler Fuhrpark von über 10 Millionen Benzinfahrzeugen betrieben wurde. Seit dem Beginn des Proálcoolprogramms konnten so in CO₂ gebundene Kohlenstoffemissionen von 110 Millionen Tonnen verhindert werden. Des Weiteren konnten 550 Millionen Barrel Öl eingespart werden, welche sich in der Handelsbilanz mit ca. 61 Milliarden US\$ geäußert hätten (unter Einbeziehung von Kreditzinsen sogar 121 Milliarden US\$). Seit 2005 entsprechen sich die Exporte und Importe von Rohöl in Brasilien – das Land ist also unabhängig von Ölimporten.

Auf Brasiliens Straßen fahren heute 50% aller PKW mit E85- Treibstoff, Normalbenzin enthält zwischen 22 und 25% Ethanol. Damit basieren 40% der durch Transport verbrauchten Energie in Brasilien auf Alkohol. In den USA liegt dieser Wert bei nur 2%.

²⁰ Quelle: www.bndes.gov.br vom 24.04.2006.

Technischer Vorsprung durch Erfahrung

Weltweit ist Brasilien das einzige Land, in dem alkoholbetriebene Autos in großen Stückzahlen produziert und vom Markt angenommen wurden. Daraus ergibt sich ein erheblicher Erfahrungsvorteil, der sich aktuell auch im Bereich der FFV bemerkbar macht.

Dank der langjährigen Erfahrung und der großvolumigen Herstellung ist Brasilien außerdem heute in der Lage, Alkoholtreibstoff zu einem günstigeren Preis als Benzin zu produzieren. Die durchschnittlichen Herstellkosten lagen 2004 bei 0,19\$/l. Im Vergleich dazu mussten in den USA zur Herstellung von Ethanol aus Mais mit 0,33\$/l, in der sogar mit 0,55\$/l für die Produktion von Alkohol aus Zuckerrüben kalkuliert werden.²¹

So hat sich die Alkoholproduktion in Brasilien zu einem auch international wettbewerbsfähigen Sektor entwickelt, der direkt für eine Million und indirekt für vier Millionen Arbeitsplätze verantwortlich ist.

Markchancen in Brasilien

Die freie Wahlmöglichkeit von Benzin oder Ethanol als Treibstoff bei unsicheren Bezugspreisen für Rohöl hat Flexfuelfahrzeuge in Brasilien zu einem Erfolg werden lassen. In 10 Jahren wird mit einem Fuhrpark von 8.000.000 FFV²² gerechnet. Um deren Versorgung zu gewährleisten, muss die Ethanolproduktion in diesem Zeitraum von 14 auf 26 Milliarden Liter angehoben werden. Moderne Anlagen zur Alkoholproduktion besitzen eine Kapazität von 80 Millionen Litern pro Jahr und erfordern Investitionen von 15 Mio. US\$ im landwirtschaftlichen Bereich und zwischen 30 und 45 Mio. US\$ für die industrielle Anlage.²³ Die Deckung der steigenden Nachfrage würde somit den Bau von 150 solcher Anlagen und damit Investitionen in Höhe von ca. 6,7 Mrd. US\$ notwendig machen.

Markchancen im Ausland

Weltweit beträgt momentan der Anteil von Ethanol am im Straßenverkehr verbrauchten Kraftstoff 2,6%. Schärfere CO- und CO₂-Emissionsvorschriften, steigende Bezugspreise für Rohöl bei gleichzeitiger Stärkung des Bewusstseins über dessen Endlichkeit lassen alternative Kraftstoffquellen jedoch immer weiter an Bedeutung gewinnen. Dabei rückt auch Bio-Ethanol immer mehr ins internationale Blickfeld. In Europa wurden 2004 die ersten FFV vorgestellt; Schweden propagiert durch staatliche Anreize deren Absatz. Mit Kolumbien hat nun auch ein südamerikanisches Nachbarland seit November 2005 damit begonnen, Normalbenzin Ethanol beizumischen. Somit ist ein starker Anstieg im Export von Ethanol zu erwarten.

Nach dem - trotz einiger Krisen - positiven Fazit der Einführung von Alkohol als Kraftstoff für PKW in Brasilien stellt sich die Frage, wieso ein solches Programm nicht auch in

²¹ Vgl. www.wikipedia.org/wiki/ethanol vom 24.04.2006.

²² Vgl. www.anfavea.com.br vom 17.01.2006.

²³ Vgl. www.bndes.gov.br vom 24.04.2006.

anderswo präsentiert wurde. Dies liegt zu einem großen Teil daran, dass die Erzeugung von Bioethanol im Vergleich zu Benzin in einem Großteil der Welt immer noch relativ teuer ist, was an der fehlenden Erfahrung, aber auch an der Art der Produktion liegt. Auch mit einer auf Alkohol umgestellten Infrastruktur und einer hochproduktiven Herstellung, wie man sie in Brasilien findet, lässt sich Alkohol zum Beispiel in Deutschland aus Zuckerrüben nicht zu solchen konkurrenzfähigen Preisen herstellen.

Ein weiterer Grund ist in den unterschiedlichen Emissionsvorschriften zu suchen. Diese sind in Europa bezüglich des HC-Ausstoßes strenger als in Brasilien und damit durch herkömmliche Alkoholfahrzeuge oft nicht zu erreichen. Alkohol kann auch in Form von ETBE (Ethyl-Tertiär-Buthyl-Ether) als alternativer Kraftstoffzusatz zur Erhöhung der Oktanzahl an Stelle des bisher verwendeten MTBE (Methyl-Tertiär-Buthyl-Ether) angeboten werden.

Expansion und Investitionen

Zur Befriedigung der ansteigenden internen und externen Alkoholnachfrage müssen in Brasilien weitere Kapazitäten geschaffen werden. Falls in den nächsten 10 Jahren - wie prognostiziert - der Bedarf an Zuckerrohr um 180 auf 580 Millionen Tonnen wächst, werden für dessen Anbau weitere 2,5 Millionen Hektar Ackerland notwendig. Die aktuelle in Brasilien noch unbebaute potentielle Anbaufläche von 90 Mio ha²⁴ erscheint für solche Pläne mehr als ausreichend. Ökologische Gesichtspunkte müssen dabei allerdings noch genauer betrachtet werden. Um der prognostizierten Nachfrage entsprechen zu können, müssten noch weitere 90 Anlagen in den nächsten 10 Jahren entstehen. Obwohl dem brasilianischen Alkohol preislich international eine hohe Konkurrenzfähigkeit beschieden ist, muss der Staat weitere Investitionen auch im Bereich der Infrastruktur tätigen, will er den Export diesen alternativen Kraftstoffes weiter vorantreiben.²⁵ Auch für den Ausbau der Produktion zur Befriedigung der wachsenden Nachfrage muss in die Produktionsanlagen weiterhin investiert werden. Dabei gehen Schätzungen in den nächsten 7 Jahren von Beträgen in Höhe von 10 Milliarden US\$ aus.²⁶

²⁴ Vgl. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) www.embrapa.com.br vom 23.01.2006.

²⁵ Vgl. <http://www.agorasertaozinho.com.br/negocios-03.htm> vom 02.12.2005.

²⁶ Vgl. União de Agroindústria Canavieira de São Paulo (Unica) www.portaunica.com.br vom 20.12.2005.

8. Ausblick

Nach dem großen Erfolg der FFV in Brasilien strebt die brasilianische Regierung nach einer Versorgung des einheimischen Transportes mit Kraftstoff gänzlich ohne fossilen Anteil. Wenn sich die positiven Marktaussichten für die flexiblen Fahrzeuge bewahrheiten und die interne Ethanolproduktion die Nachfrage zu bewältigen im Stande ist, kann an eine Abschaffung des Benzinkraftstoffes in Brasilien gedacht werden.

Mit einem aktuellen Bundesprogramm widmet sich die Regierung nun dem Dieseltreibstoff. Obwohl der Anteil an Diesel-PKW auf dem brasilianischen Markt verschwindend gering ist, so macht Dieseldieselkraftstoff doch ca. 35% verbrauchten Volumens im Land aus. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass in Brasilien Güter- und Personenverkehr hauptsächlich mit dieselbetriebenen LKW und Bussen realisiert wird. Der Plan legt zunächst eine Beimischung von 2% Biodiesel zum Diesel fest. Ab 2008 werden 5% Pflicht, dann 20% und schließlich ab 2020 sollen keine Kraftstoffe auf fossiler Basis mehr im Land verkauft werden. Biodiesel basiert in Brasilien auf Soja, der Rizinusfrucht, Sonnenblumen und Frittierölabfällen. Diesem Plan scheint eine optimistische Einstellung zugrunde zu liegen, denn oft wurden in der brasilianischen Geschichte langfristige Programme nicht verwirklicht. Doch scheint die Erfahrung aus 30 Jahren Proálcool den Brasilianern zumindest teilweise Recht zu geben.

Referentinnen und Referenten

Name, Vorname Titel	Unternehmen, Institution	Kontakt
Behrendt, Frank Professor Dr. rer. nat.	Technische Universität Berlin, Fachgebiet Energieverfahrenstechnik und Umwandlungstechniken regenerativer Energien	TU Berlin Fachgebiet Energieverfahrenstechnik und Umwandlungstechniken regenerativer Energien Fasanenstrasse 89 10623 Berlin Tel.: (030) 314 - 79724 Fax: (30) 314 - 22157 Mobil: (0171) 5064911 eMail: Frank.Behrendt@tu-berlin.de
Bock, Christian	BMW	BMW AG EA - 23 80788 München Tel.: (089) 382 - 32920 eMail: Christian.Bock@bmw.de
Bonaldo, Frank	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie Scharnhorststr. 34 - 37 10115 Berlin Tel.: (030) 2014 - 7398 Fax: (030) 2014 - 5412 eMail: Frank.Bonaldo@bmwi.bund.de
Breuer, Thomas	Universität Bonn	Universität Bonn Institut für Agrarpolitik, Marktforschung und Wirtschaftssoziologie Nußallee 21 53115 Bonn Tel.: (0228) 73 - 2325 Fax: (0228) 73 - 5923 eMail: Breuer@agp.uni-bonn.de

Dinjus, Eckhard Professor Dr.	Forschungszentrum Karlsruhe	Forschungszentrum Karlsruhe GmbH Institut für Technische Chemie Bereich Chemisch-Physikalische Verfahren Postfach 3640 76021 Karlsruhe Tel.: (07247) 82 - 2401 Fax: (07247) 82 - 2244 eMail: Eckhard.Dinjus@itc-cpv.fzk.de
Eckart, Olaf	BMW	BMW AG ES - 20 80788 München Tel.: (089) 382 - 41088 eMail: Olaf.Eckart@bmw.de
Friedrich, Axel Dr.	Umweltbundesamt	Umweltbundesamt Abteilung Verkehr, Lärm Wörlitzer Platz 1 06884 Dessau Tel.: (0340) 2103 - 2562 Fax: (0340) 2104 - 2562 eMail Axel.Friedrich@uba.de
Funk, Carolin	Technische Universität Berlin, ILS Kraftfahrzeuge	TU Berlin ILS - Kraftfahrzeuge Skr. TIB 13 Gustav-Meyer-Allee 25 13355 Berlin Tel.: (030) 314 - 72966 Fax: (030) 314 - 72505 eMail Carolin.Funk@kfz.tu-berlin.de
Grube, Thomas	Forschungszentrum Jülich, Energieverfahrenstechnik	Forschungszentrum Jülich GmbH IWV3 52425 Jülich Tel.: (02461) 61 - 5398 Fax: (02461) 61 - 5398 eMail: Th.Grube@fz-juelich.de

Hansen, Frank	Institut für Mobilitätsforschung (IFMO)	Institut für Mobilitätsforschung Kurfürstendamm 31 10719 Berlin Tel.: (030) 203004 - 14 Fax: (030) 203004 - 29 Mobil: (0179) 4951183 eMail: Frank.Hansen@ifmo.de
Kortenkamp, Ralf	DaimlerChrysler AG, Werk Berlin	DaimlerChrysler AG, Werk Berlin M/M4, HPC N714 Daimlerstr. 143 12277 Berlin Tel.: (030) 7491 - 2626 Fax: (030) 7491 - 3950 eMail: ralf.kortenkamp@daimlerchrysler.com
Leonards, Stefan	Iser und Schmidt	iserundschmidt Kreativagentur für PublicRelations GmbH Reinhardtstraße 15-17 10117 Berlin Tel.: (030) 308 78 09 0 Fax: (030) 308 78 09 20 eMail: s.leonards@iserundschmidt.de
Linßen, Jochen	Forschungszentrum Jülich, Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE)	Forschungszentrum Jülich GmbH Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE) 52425 Jülich Tel.: (02461) 61 - 3581 Fax: (02461) 61 - 2496 eMail: J.Linssen@fz-juelich.de
Myliadakis, Eftsratios	Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr (IAV)	IAV GmbH Carnotstraße 1 10587 Berlin Tel.: (030) 39978 - 9858 Fax: (030) 39978 9766 eMail: efstratios.myliadakis@iav.de

Prütz, Gernot Dr.	Institut Technik-Theologie- Naturwissenschaften (TTN)	Institut Technik Theologie Naturwissenschaften an der Ludwig- Maximilians-Universität München Marsstr. 19 80335 München Tel.: (0921) 5304046 (Mo und Fr) Tel.: (089) 5595 - 604 (Di bis Do) Fax: (089) 5595 - 608 eMail: Gernot.Pruetz@elkb.de
Pucher, Helmut Professor Dr.-Ing.	Technische Universität Berlin, ILS Verbrennungskraftmaschinen	TU Berlin - Fachgebiet Verbrennungskraftmaschinen Sekretariat CAR-B 1 Carnotstr. 1 A 10587 Berlin Tel.: (030) 314 - 23353 Fax: (030) 314 - 26105 eMail: H.Pucher@tu-berlin.de
Raming, Stephan.	Technische Universität Berlin, ILS Kraftfahrzeuge	TU Berlin ILS - Kraftfahrzeuge Schr. TIB 13 Gustav-Meyer-Allee 25 13355 Berlin Tel.: (030) 314 - 72986 Fax: (030) 314 - 72505 eMail: Stephan.Raming@tu-berlin.de
Schindler, Volker Professor Dr. rer. nat.	Technische Universität Berlin, ILS Kraftfahrzeuge	TU Berlin ILS - Kraftfahrzeuge Schr. TIB 13 Gustav-Meyer-Allee 25 13355 Berlin Tel: (030) 314 - 72970 Fax: (030) 314 - 72505 eMail: Volker.Schindler@tu-berlin.de

Schult-Bornemann, Karl	ExxonMobil Central Europe Holding	ExxonMobil Central Europe Holding GmbH Esso Deutschland GmbH Kapstadtring 2 22297 Hamburg Tel.: (040) 6393 - 3330 Fax: (040) 6393 - 2211 eMail: Karl.Schult- Bornemann@exxonmobil.com
Wäser, Ulrike	Total Deutschland	TOTAL Deutschland GmbH HSEQ / Nachhaltige Entwicklung - Neue Energien Schützenstraße 25 10117 Berlin Tel.: (030) 2027 - 6154 Fax: (030) 2027 - 9420 eMail: Ulrike.Waaser@Total.de

1. **Fusion Theory**
Proceedings of the Seventh European Fusion Theory Conference
edited by A. Rogister (1998); X, 306 pages
ISBN: 3-89336-219-3
2. **Radioactive Waste Products 1997**
Proceedings of the 3rd International Seminar on Radioactive Waste Products
held in Würzburg (Germany) from 23 to 26 June 1997
edited by R. Odoj, J. Baier, P. Brennecke et al. (1998), XXIV, 506 pages
ISBN: 3-89336-225-8
3. **Energieforschung 1998**
Vorlesungsmanuskripte des 4. Ferienkurs „Energieforschung“
vom 20. bis 26. September 1998 im Congressentrum Rolduc und
im Forschungszentrum Jülich
herausgegeben von J.-Fr. Hake, W. Kuckshinrichs, K. Kugeler u. a. (1998),
500 Seiten
ISBN: 3-89336-226-6
4. **Materials for Advances Power Engineering 1998**
Abstracts of the 6th Liège Conference
edited by J. Lecomte-Beckers, F. Schubert, P. J. Ennis (1998), 184 pages
ISBN: 3-89336-227-4
5. **Materials for Advances Power Engineering 1998**
Proceedings of the 6th Liège Conference
edited by J. Lecomte-Beckers, F. Schubert, P. J. Ennis (1998),
Part I XXIV, 646, X pages; Part II XXIV, 567, X pages; Part III XXIV, 623, X
pages
ISBN: 3-89336-228-2
6. **Schule und Energie**
1. Seminar Energiesparen, Solarenergie, Windenergie. Jülich, 03. und
04.06.1998
herausgegeben von P. Mann, W. Welz, D. Brandt, B. Holz (1998), 112 Seiten
ISBN: 3-89336-231-2
7. **Energieforschung**
Vorlesungsmanuskripte des 3. Ferienkurses „Energieforschung“
vom 22. bis 30. September 1997 im Forschungszentrum Jülich
herausgegeben von J.-Fr. Hake, W. Kuckshinrichs, K. Kugeler u. a. (1997),
505 Seiten
ISBN: 3-89336-211-8

8. **Liberalisierung des Energiemarktes**
Vortragsmanuskripte des 5. Ferienkurs „Energieforschung“
vom 27. September bis 1. Oktober 1999 im Congressentrum Rolduc und
im Forschungszentrum Jülich
herausgegeben von J.-Fr. Hake, A. Kraft, K. Kugeler u. a. (1999), 350 Seiten
ISBN: 3-89336-248-7

9. **Models and Criteria for Prediction of Deflagration-to-Detonation Transition (DDT) in Hydrogen-Air-Steam-Systems under Severe Accident Conditions**
edited by R. Klein, W. Rehm (2000), 178 pages
ISBN: 3-89336-258-4

10. **High Temperature Materials Chemistry**
Abstracts of the 10th International IUPAC Conference, April 10 - 14 2000, Jülich
edited by K. Hilpert, F. W. Froben, L. Singheiser (2000), 292 pages
ISBN: 3-89336-259-2

11. **Investigation of the Effectiveness of Innovative Passive Safety Systems for Boiling Water Reactors**
edited by E. F. Hicken, K. Verfondern (2000), X, 287 pages
ISBN: 3-89336-263-0

12. **Zukunft unserer Energieversorgung**
Vortragsmanuskripte des 6. Ferienkurs „Energieforschung“
vom 18. September bis 22. September 2000 im Congressentrum Rolduc und
im Forschungszentrum Jülich
herausgegeben von J.-Fr. Hake, S. Vögele, K. Kugeler u. a. (2000),
IV, 298 Seiten
ISBN: 3-89336-268-1

13. **Implementing Agreement 026**
For a Programme of Research, Development and Demonstration on Advanced
Fuel Cells: Fuel Cell Systems for Transportation. Annex X. Final Report 1997 -
1999
edited by B. Höhle; compiled by P. Biedermann (2000), 206 pages
ISBN: 3-89336-275-4

14. **Vorgespannte Guß-Druckbehälter (VGD) als berstsichere Druckbehälter für innovative Anwendungen in der Kerntechnik**
Prestressed Cast Iron Pressure Vessels as Burst-Proof Pressure Vessels for
Innovative Nuclear Applications
von W. Fröhling, D. Bounin, W. Steinwarz u. a. (2000) XIII, 223 Seiten
ISBN: 3-89336-276-2

15. **High Temperature Materials Chemistry**
Proceedings of the 10th International IUPAC Conference
held from 10 to 14 April 2000 at the Forschungszentrum Jülich, Germany
Part I and II
edited by K. Hilpert, F. W. Froben, L. Singheiser (2000), xvi, 778, VII pages
ISBN: 3-89336-259-2
16. **Technische Auslegungskriterien und Kostendeterminanten von SOFC- und PEMFC-Systemen in ausgewählten Wohn- und Hotelobjekten**
von S. König (2001), XII, 194 Seiten
ISBN: 3-89336-284-3
17. **Systemvergleich: Einsatz von Brennstoffzellen in Straßenfahrzeugen**
von P. Biedermann, K. U. Birnbaum, Th. Grube u. a. (2001), 185 Seiten
ISBN: 3-89336-285-1
18. **Energie und Mobilität**
Vorlesungsmanuskripte des 7. Ferienkurs „Energieforschung“
vom 24. September bis 28. September 2001 im Congressentrum Rolduc und
im Forschungszentrum Jülich
herausgegeben von J.-Fr. Hake, J. Linßen, W. Pfaffenberger u. a. (2001),
205 Seiten
ISBN: 3-89336-291-6
19. **Brennstoffzellensysteme für mobile Anwendungen**
von P. Biedermann, K. U. Birnbaum, Th. Grube u. a. (2002)
PDF-Datei auf CD
ISBN: 3-89336-310-6
20. **Materials for Advances Power Engineering 2002**
Abstracts of the 7th Liège Conference
edited by J. Lecomte-Beckers, M. Carton, F. Schubert, P. J. Ennis (2002),
c. 200 pages
ISBN: 3-89336-311-4
21. **Materials for Advanced Power Engineering 2002**
Proceedings of the 7th Liège Conference
Part I, II and III
edited by J. Lecomte-Beckers, M. Carton, F. Schubert, P. J. Ennis (2002),
XXIV, 1814, XII pages
ISBN: 3-89336-312-2
22. **Erneuerbare Energien: Ein Weg zu einer Nachhaltigen Entwicklung?**
Vorlesungsmanuskripte des 8. Ferienkurs „Energieforschung“
vom 23. bis 27. September 2002 in der Jakob-Kaiser-Stiftung, Königswinter
herausgegeben von J.-Fr. Hake, R. Eich, W. Pfaffenberger u. a. (2002),
IV, 230 Seiten
ISBN: 3-89336-313-0

23. **Einsparpotenziale bei der Energieversorgung von Wohngebäuden durch Informationstechnologien**
von A. Kraft (2002), XII, 213 Seiten
ISBN: 3-89336-315-7

24. **Energieforschung in Deutschland**
Aktueller Entwicklungsstand und Potentiale ausgewählter nichtnuklearer Energietechniken
herausgegeben von M. Sachse, S. Semke u. a. (2002), II, 158 Seiten, zahlreiche farb. Abb.
ISBN: 3-89336-317-3

25. **Lebensdaueranalysen von Kraftwerken der deutschen Elektrizitätswirtschaft**
von A. Nollen (2003), ca. 190 Seiten
ISBN: 3-89336-322-X

26. **Technical Session: Fuel Cell Systems of the World Renewable Energy Congress VII**
Proceedings
edited by D. Stolten and B. Emonts (2003), VI, 248 pages
ISBN: 3-89336-332-7

27. **Radioactive Waste Products 2002 (RADWAP 2002)**
Proceedings
edited by R. Odoj, J. Baier, P. Brennecke and K. Kühn (2003), VI, 420 pages
ISBN: 3-89336-335-1

28. **Methanol als Energieträger**
von B. Höhle, T. Grube, P. Biedermann u. a. (2003), XI, 109 Seiten
ISBN: 3-89336-338-6

29. **Hochselektive Extraktionssysteme auf Basis der Dithiophosphinsäuren: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Actinoiden(III)-Abtrennung**
von S. A. H. Nabet (2004), VI, 198 Seiten
ISBN: 3-89336-351-3

30. **Benchmarking-Methodik für Komponenten in Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen**
von Matthias Gebert (2004), 194 Seiten
ISBN: 3-89336-355-6

31. **Katalytische und elektrochemische Eigenschaften von eisen- und kobalthaltigen Perowskiten als Kathoden für die oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)**
von Andreas Mai (2004), 100 Seiten
ISBN: 3-89336-356-4

32. **Energy Systems Analysis for Political Decision-Making**
edited by J.-Fr. Hake, W. Kuckshinrichs, R. Eich (2004), 180 pages
ISBN: 3-89336-365-3
33. **Entwicklung neuer oxidischer Wärmedämmschichten für Anwendungen in stationären und Flug-Gasturbinen**
von R. Vaßen (2004), 141 Seiten
ISBN: 3-89336-367-X
34. **Neue Verfahren zur Analyse des Verformungs- und Schädigungsverhaltens von MCrAlY-Schichten im Wärmedämmschichtsystem**
von P. Majerus (2004), 157 Seiten
ISBN: 3-89336-372-6
35. **Einfluss der Oberflächenstrukturierung auf die optischen Eigenschaften der Dünnschichtsolarzellen auf der Basis von a-Si:H und μ c-Si:H**
von N. Senoussaoui (2004), 120 Seiten
ISBN: 3-89336-378-5
36. **Entwicklung und Untersuchung von Katalysatorelementen für innovative Wasserstoff-Rekombinatoren**
von I.M. Tragsdorf (2005), 119 Seiten
ISBN: 3-89336-384-X
37. **Bruchmechanische Untersuchungen an Werkstoffen für Dampfkraftwerke mit Frischdampftemperaturen von 500 bis 650°C**
von L. Mikulová (2005), 149 Seiten
ISBN: 3-89336-391-2
38. **Untersuchungen der Strukturstabilität von Ni-(Fe)-Basislegierungen für Rotorwellen in Dampfturbinen mit Arbeitstemperaturen über 700 °C**
von T. Seliga (2005), 106 Seiten
ISBN: 3-89336-392-0
39. **IWV-3 Report 2005. Zukunft als Herausforderung**
(2005), 115 Seiten
ISBN: 3-89336-393-9
40. **Integrierter Photodetektor zur Längenmessung**
von E. Bunte (2005), XI, 110 Seiten
ISBN: 3-89336-397-1
41. **Microcrystalline Silicon Films and Solar Cells Investigated by Photoluminescence Spectroscopy**
by T. Merdzhanova (2005), X, 137 pages
ISBN: 3-89336-401-3

42. **IWV-3 Report 2005. Future as a challenge**
(2005), 115 pages
ISBN: 3-89336-405-6
43. **Electron Spin Resonance and Transient Photocurrent Measurements on Microcrystalline Silicon**
by T. Dylla (2005), X, 138 pages
ISBN: 3-89336-410-2
44. **Simulation und Analyse des dynamischen Verhaltens von Kraftwerken mit oxidkeramischer Brennstoffzelle (SOFC)**
von M. Finkenrath (2005), IV, 155 Seiten
ISBN: 3-89336-414-5
45. **The structure of magnetic field in the TEXTOR-DED**
by K.H. Finken, S.S. Abdullaev, M. Jakubowski, M. Lehnen, A. Nicolai, K.H. Spatschek (2005), 113 pages
ISBN: 3-89336-418-8
46. **Entwicklung und Modellierung eines Polymerelektrolyt-Brennstoffzellenstapels der 5 kW Klasse**
von T. Wüster (2005), 211 Seiten
ISBN: 3-89336-422-6
47. **Die Normal-Wasserstoffelektrode als Bezugs elektrode in der Direkt-Methanol-Brennstoffzelle**
von M. Stähler (2006), VI, 96 Seiten
ISBN: 3-89336-428-5
48. **Stabilitäts- und Strukturmodifikationen in Katalysatordispersionen der Direktmethanolbrennstoffzelle**
von C. Schlumbohm (2006), II, 211 Seiten
ISBN: 3-89336-429-3
49. **Eduktvorbereitung und Gemischbildung in Reaktionsapparaten zur autothermen Reformierung von dieselähnlichen Kraftstoffen**
von Z. Porš (2006), XX, 182, XII Seiten
ISBN: 3-89336-432-2
50. **Spektroskopische Untersuchung der poloidalen Plasmarotation unter dem Einfluß statischer und dynamischer Ergodisierung am Tokamak TEXTOR**
von C. Busch (2006), IV, 81 Seiten
ISBN: 3-89336-433-1
51. **Entwicklung und Optimierung von Direktmethanol-Brennstoffzellstapeln**
von M. J. Müller (2006), 167 Seiten
ISBN: 3-89336-434-X

52. **Untersuchung des reaktiven Sputterprozesses zur Herstellung von aluminiumdotierten Zinkoxid-Schichten für Silizium-Dünnschichtsolarzellen**
von J. Hüpkens (2006), XIV, 170 Seiten
ISBN: 3-89336-435-8
53. **Materials for Advanced Power Engineering 2006**
Proceedings of the 8th Liège Conference
Part I, II and III
edited by J. Lecomte-Beckers, M. Carton, F. Schubert, P. J. Ennis (2006),
Getr. Pag.
ISBN: 3-89336-436-6
54. **Verdampfung von Werkstoffen beim Betrieb von Hochtemperaturbrennstoffzellen (SOFC)**
von M. Stanislawski (2006), IV, 154 Seiten
ISBN: 3-89336-438-2
55. **Methanol as an Energy Carrier**
edited by P. Biedermann, Th. Grube, B. Höhle (2006), XVII, 186 Seiten
ISBN: 3-89336-446-3
56. **Kraftstoffe und Antriebe für die Zukunft**
Vorlesungsmanuskripte des 1. Herbstseminars „Kraftstoffe und Antriebe für die Zukunft“ vom 9.-13. Oktober 2006 an der TU Berlin
herausgegeben von V. Schindler, C. Funk, J.-Fr. Hake, J. Linßen (2006), 221
Seiten
ISBN: 3-89336-452-8

Dieser Band enthält die Vorlesungsmanuskripte des
1. Herbstseminars „Kraftstoffe und Antriebe für die
Zukunft“ vom 9. – 13. Oktober 2006 an der TU Berlin.

Forschungszentrum Jülich
in der Helmholtz-Gemeinschaft



Band / Volume 56
ISBN 3-89336-452-8

Energietechnik
Energy Technology