



L B S T
Ludwig Bolkow
Systemtechnik



**Vergleich verschiedener Antriebskonzepte im
Individualverkehr im Hinblick auf Energie- und
Kraftstoffeinsparung**

Endbericht April 2002

PROJECTS
AND
STUDIES

Vergleich verschiedener Antriebskonzepte im Individualverkehr im Hinblick auf Energie- und Kraftstoffeinsparung

Studie im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen

Endbericht

April 2002



L-B-Systemtechnik GmbH, 85521 Ottobrunn, www.lbst.de

M. Altmann, V. Blandow, Dr. P. Niebauer, J. Schindler,
V. Schurig, W. Weindorf, R. Wurster, Dr. W. Zittel

Abkürzungsverzeichnis

- AAU – Assigned Amount Unit
- ACEA – Europäischer Verband der Automobilhersteller
- BAM – Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
- BAPA – Buenos Aires Plan of Action
- BMBF – Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie
- BZ – Brennstoffzelle
- CDM – Clean Development Mechanism
- CER – Certified Emission Reduction
- CGH₂ – Druckwasserstoff
- CH₄ – Methan
- CNG – Druckerdgas
- CO – Kohlenmonoxid
- CO₂ – Kohlendioxid
- COP – Conference of Parties
- CPE – ehemals zentralplanende Ostblockstaaten
- DI – Direct Injection
- DMC – Direct Microbial Conversion
- DWV – Deutscher Wasserstoff-Verband
- EIHP – European Integrated Hydrogen Project
- EQHHPP – Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Project
- ERU – Emission Reduction Unit
- EST – Environmentally Sustainable Transport
- ET – Emission Trading

EtOH – Ethanol

EU – Europäische Union

EUDC – Extra Urban Driving Cycle

EWEA – European Wind Energy Association

F&E – Forschung und Entwicklung

FT – Fischer-Tropsch

FTP75 – Federal Test Procedure 75

GEMIS – Globales Emissions-Modell integrierter Systeme

GuD – Gas- und Dampfturbinenkraftwerk

H₂ – Wasserstoff

HDO – HydroDeOxygenation

HEW – Hamburgische Electricitätswerke

HGÜ – Hochspannungsgleichstromübertragung

HTU – Hydro Thermal Upgrading

HWFET – Highway Fuel Economy Test

HYZEM – Hybrid Technology Approaching Efficient Zero Emission Mobility

ICAO – International Civil Aviation Organization

ICE – Verbrennungsmotor (Internal Combustion Engine)

IDI – Indirect Injection

IEA – International Energy Agency

IMO – International Maritime Organization

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

ISO – International Organization for Standardization

JI – Joint Implementation

KEA – kumulierter Energieaufwand

KfW – Kreditanstalt für Wiederaufbau

Inhalt

LBST – L-B-Systemtechnik GmbH

LH₂ – Flüssigwasserstoff

LKW – Lastkraftwagen

LMU – Ludwig-Maximilian-Universität München

LNG – Flüssigerdgas

LPG – Flüssiggas (Liquefied Petroleum Gas)

LULUCF – Land Use, Land Use Change and Forestry

MATADOR – Management Tool for the Assessment of Driveline Technologies and
Research

MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell

MeOH – Methanol

MODEM – Modelling of Emissions and Fuel Consumption in Urban Areas

N – Stickstoff

N₂O – Lachgas

NO_x – Stickoxide

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NEFZ – Neuer Europäischer Fahrzyklus

NG – Erdgas (Natural Gas)

OPEC – Organization of Petroleum Exporting Countries

PEM – Proton Exchange Membrane

PKW – Personenkraftwagen

PNGV – Partnership for a New Generation of Vehicles

REG – Regenerative Energie

RFZy – Referenz-Fahrzyklus

SBI – Subsidiary Board of Implementation

SBSTA – Subsidiary Board of Scientific and Technical Assistance

SC03 – Start Control
SF₆ – Schwefelhexafluorid
SFTP 75 – Supplemental Federal Test Procedure 75
SHF – Separate Hydrolysis and Fermentation
SMDS – Shell Middle Distillate Synthesis
SO₂ – Schwefeldioxid
SOFC – Solid Oxide Fuel Cell
SSCF – Simultaneous Sacchridification and Co-Fermentation
SSF – Simultaneous Sacchridification and Fermentation
SWATH – Small Waterplane Area Twin Hull
TC – Technical Committee
UDDC – Urban Dynanometer Driving Schedule
UN-ECE – United Nations Economic Commission for Europe
UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change
UNO – United Nations Organization
USA – United States of America
VCD – Verkehrsclub Deutschland
VDA – Verband der Automobilindustrie
VES – Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie
VM – Verbrennungsmotor
WEC – World Energy Council

Zusammenfassung

0 ZUSAMMENFASSUNG

Zielsetzung der vorliegenden Studie ist es, die Reduktionspotenziale der Klimagasemissionen des PKW-Verkehrs in Deutschland durch Einsatz fortschrittlicher konventioneller und alternativer Kraftstoffe und Antriebe abzuschätzen. Klimarelevante Gase sind allen voran das Kohlendioxid (CO_2) sowie Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O). Die Klimawirksamkeit wird nach CO_2 -Äquivalenten bewertet.

Folgende Antriebs/Kraftstoff-Kombinationen werden untersucht:

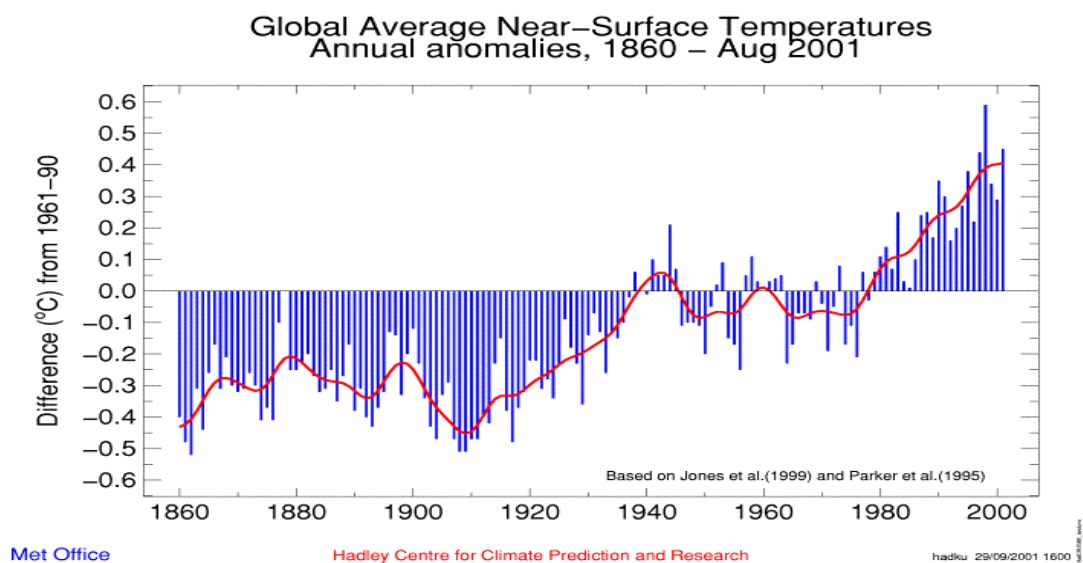
- Benzin-Verbrennungsmotor
- Benzin-Brennstoffzelle
- Diesel-Verbrennungsmotor
- Ethanol-Verbrennungsmotor
- Ethanol-Brennstoffzelle
- Methanol-Verbrennungsmotor
- Methanol-Brennstoffzelle
- Erdgas-Verbrennungsmotor
- Wasserstoff-Verbrennungsmotor
- Wasserstoff-Brennstoffzelle
- Batterie

Es werden die Kraftstoffverbräuche im Fahrzeugbetrieb („Well-to-Tank“) und die Klimagasemissionen der Kraftstoffbereitstellung an der Tankstelle (inklusive Erzeugung, Transport und Verteilung) ermittelt. Daraus werden die Klimagasemissionen pro gefahrenem Kilometer errechnet („Well-to-Wheel“). Außerdem werden die Klimagasemissionen der Herstellung der PKWs ermittelt und zu den Emissionen aus Kraftstoffbereitstellung und Fahrzeugbetrieb addiert.

0.1 Klimaveränderung

Heute ist es unstrittig, dass sich sowohl das Klima als auch die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre in zunehmendem Maße verändern (siehe Abbildung 0-1). So hat sich z.B. die weltweite Durchschnittstemperatur über die letzten 100 Jahre um fast ein Grad Celsius erhöht, wobei die Temperaturzunahme in den letzten 20 Jahren genauso groß war wie in den 80 vorhergehenden Jahren. Vor allem aber auch die beschleunigte Veränderung anderer Klimaparameter wie Windgeschwindigkeiten (Luftdruck), plötzliche Niederschläge und ungewöhnliche Trockenheiten bietet Anlass zur Sorge. Bedeutet doch die Zunahme des Mittelwertes eine überproportionale Zunahme der Extremwerte – diese sind vor allem für große Schäden (Stürme, Überschwemmungen etc.) ausschlaggebend.

Abbildung 0-1: Entwicklung der globalen Durchschnittstemperatur von 1860 bis August 2001



Für diese Entwicklungen können weitgehend menschliche Aktivitäten als Ursache identifiziert werden, wobei nur nicht ganz geklärt ist, wie stark natürliche Prozesse die anthropogenen Effekte überlagern.

Aktuelle Berechnungen der weltweit anerkanntesten Wissenschaftler, die im Auftrag der Weltmeteorologischen Organisation und der UNO durchgeführt und analysiert wurden, zeigen, dass bei Anhalten der bestehenden Trends die Durchschnittstemperatur bis zum

Zusammenfassung

Ende dieses Jahrhunderts um weitere 1,5-6°C ansteigen wird mit starken Veränderungen anderer Klimaparameter und weitreichenden Folgen für die Weltwirtschaft.

Diese Befürchtungen werden von der internationalen Politik und auch von Teilen der Industrie zunehmend ernst genommen. Im Jahr 1992 fand in Rio de Janeiro der erste sogenannte „Erdgipfel“ statt. Dort wurde unter anderem die Klimarahmenkonvention (UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change) unterzeichnet.

Wesentliche Eckpunkte der Klimarahmenkonvention waren einerseits ein sofortiger – allerdings nicht völkerrechtlich verbindlicher – Beschluss, die Kohlendioxidemissionen der Industriestaaten bis zum Jahr 2000 auf das Niveau von 1990 zurückzuführen sowie andererseits die Einrichtung eines Klimasekretariats unter UN-Aufsicht mit dem Auftrag der Organisation von Klimakonferenzen, die angemessene weitergehende Maßnahmen beschließen sollten.

Den bisherigen Höhepunkt internationaler Klimapolitik bildet die Formulierung und Akzeptanz des Kiotoprotokolls. Dort wurde vereinbart, dass die Industriestaaten bis zum Ende der ersten Vertragsperiode im Zeitraum 2008 – 2012 die Emissionen der sechs wichtigsten Treibhausgase im Mittel um 5,2% gegenüber dem Wert von 1990 reduzieren müssen. Angesichts der historischen Verantwortung der Industriestaaten haben die Entwicklungsländer für die erste Vertragsphase keine verbindlichen Reduktionsziele.

Nachdem man sich auf den beiden Klimakonferenzen des Jahres 2001 in Bonn und Marrakesch auf wesentliche Durchführungsmodalitäten zur Implementierung des Kiotoprotokolls einigen konnte, signalisieren zunehmend mehr Staaten ihre Bereitschaft zur Ratifizierung, so dass das Inkrafttreten des Protokolls auch ohne die Zustimmung der derzeitigen US-amerikanischen Regierung im kommenden Jahr angenommen werden kann.

Wichtige Instrumente zur Umsetzung des Kiotoprotokolls bilden dabei marktorientierte Mechanismen wie der internationale Handel von Emissionszertifikaten oder der finanziell unterstützte Transfer moderner Energietechnologien in Entwicklungsländer.

Auch wenn der Wert des Kiotoprotokolls in der Öffentlichkeit oft auf Grund der Aufweichung der ursprünglichen Zielsetzungen kritisiert wird, so kann nicht oft genug betont werden, dass damit erstmals in der Menschheitsgeschichte in einem globalen Umweltabkommen die Problematik des Treibhauseffekts akzeptiert und gemeinsame politische Maßnahmen als notwendig erachtet werden.

0.2 Verfügbarkeit fossiler Energieressourcen

Die künftige Verfügbarkeit fossiler Energieträger ist durchaus nicht so selbstverständlich, wie es die öffentliche Wahrnehmung nahelegt.

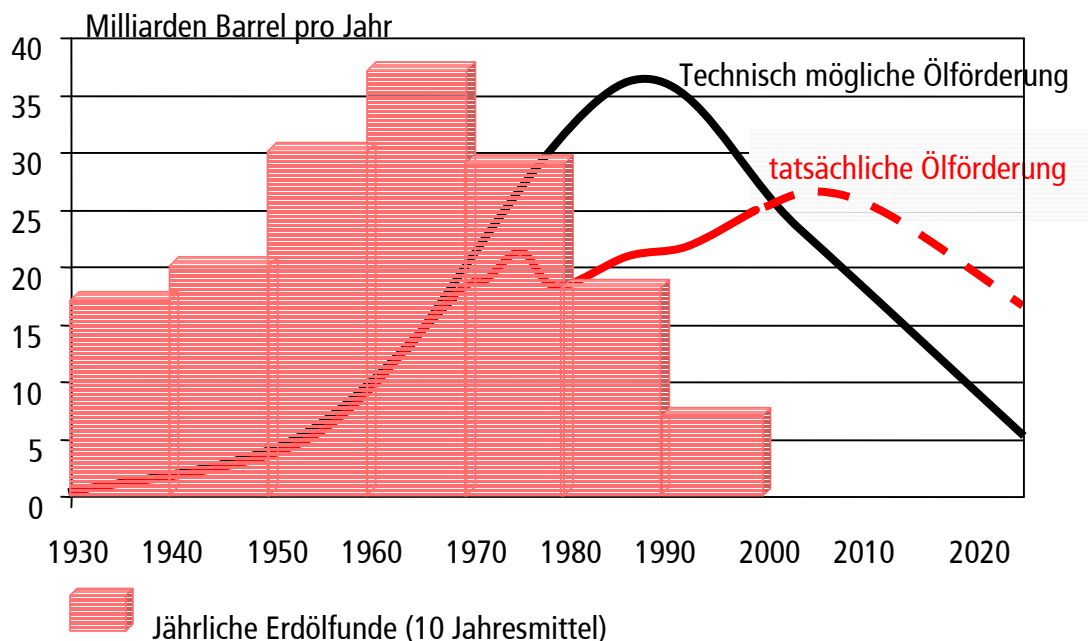
Entscheidend für strukturelle Änderungen ist nicht die Reichweite der Reserven, also die Frage „Wie lange reicht das gefundene Öl bei vorgegebener jährlicher Förderquote?“, sondern einzig der Zeitpunkt, ab dem die Ölproduktion aus geologischen, technischen und ökonomischen Gründen nicht mehr erhöht werden kann, sondern tendenziell nur noch abnimmt. Der Übergang von tendenziell zunehmender zu tendenziell abnehmender Produktion ist der Zeitpunkt, an dem sich die Endlichkeit der Ressourcen auch auf den Märkten spiegelt. Dies ist gleichzeitig das „Ende des billigen Öls“, sofern nicht die Nachfrage im notwendigen Umfang zurückgeht.

Dies wird zu einer breiten und dauerhaften Veränderung des Investitionsverhaltens führen, weg vom Öl und hin zu den möglichen Alternativen in der Energieversorgung. Das Erreichen des weltweiten Fördermaximums ist der wesentliche Indikator für kommende Strukturbrüche und nicht die Reichweite von Ölreserven.

Abbildung 0-2: Ölfunde und Ölproduktion.

In 5-10 Jahren werden die weltweiten Ölreserven zur Hälfte verbraucht sein

Dann wird die weltweite Ölförderung zurückgehen



Weltweit befinden wir uns heute auf dem Höhepunkt der Ölnutzung und damit auch der Abhängigkeit vom Öl. Im vergangenen Jahr sind die Ölpreise deutlich gestiegen. Dies hängt mit einer zunehmenden Marktmacht der OPEC-Staaten zusammen, welche die Pro-

Zusammenfassung

duktion drosselten und so bei steigendem Bedarf für eine Verknappung von Rohöl sorgen.

Dem Maximum der Ölfunde in den sechziger Jahren folgt notwendigerweise das Maximum der Ölproduktion.

Auch übersteigt der Verbrauch die Funde seit nunmehr fast 20 Jahren. Weltweit schrumpfen die Ölreserven.

Dass die der Öffentlichkeit berichteten Reserven seit mehr als 10 Jahren trotz hohen Verbrauchs annähernd konstant bleiben, ist nicht auf neue Funde zurückzuführen, sondern auf die nachträgliche Höherbewertung längst bekannter und produzierender Ölfelder.

Die vielen Zusammenschlüsse großer Ölfirmen markieren etwas verdeckt eine Marktberingung durch den Abbau von Überkapazitäten.

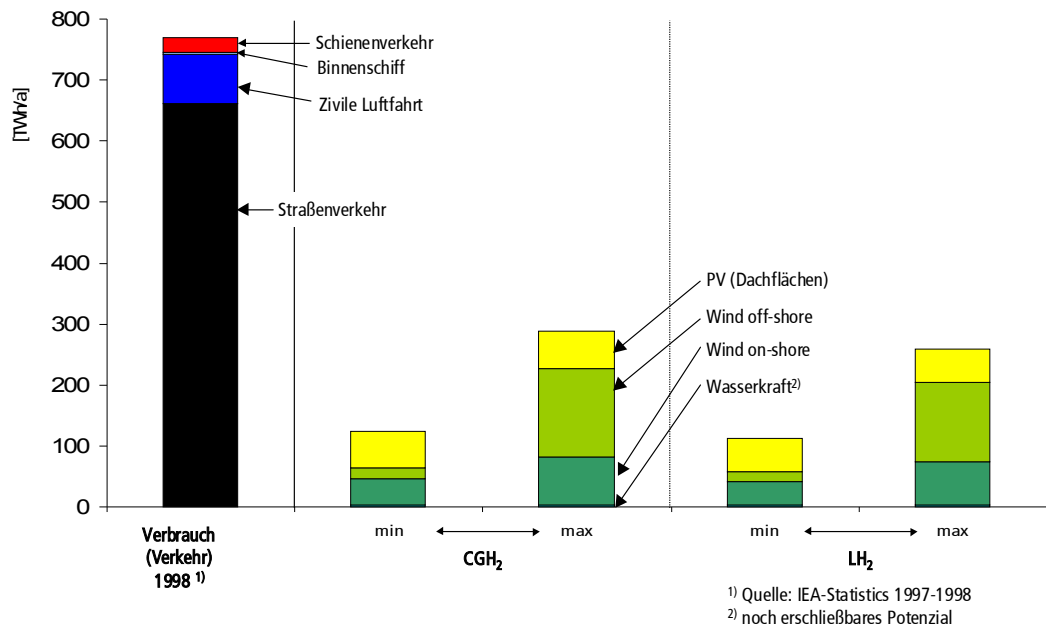
Es ist sehr wahrscheinlich, dass die scheinbare gegenwärtige Entspannung auf den Ölmärkten nicht von Dauer sein wird. Sobald die weltweite Wirtschaft sich erholt und die Nachfrage nach Öl wieder deutlich zunimmt, werden die Preise wieder ansteigen und das Verbrauchswachstum dämpfen.

Das Öl wird nicht von heute auf morgen fehlen, sondern die Produktion wird nach Überschreiten des weltweiten Produktionsmaximums langsam aber stetig zurückgehen. Ob diese Phase bereits begonnen hat oder ob wir noch ein paar Jahre Verschnaufpause haben, hängt vor allem von den nur unzureichend bekannten Möglichkeiten einer künftigen Produktionsausweitung im Nahen Osten ab.

0.3 Potenziale Erneuerbarer Energien für die Kraftstofferzeugung

In diesem Abschnitt werden die Potenziale der Nutzung erneuerbarer Energien zur Herstellung von Fahrzeugkraftstoffen diskutiert. Abbildung 0-3 zeigt das Ergebnis der Potenzialabschätzung für Deutschland.

Abbildung 0-3: Technische Potenziale der Erzeugung von Wasserstoff via Elektrolyse mit Strom aus regenerativen Energiequellen in Deutschland



Unter der Annahme, dass die Hälfte des regenerativen Stromerzeugungspotenzials für den Verkehr zur Verfügung steht, könnten in Deutschland 9 – 22% des heutigen Kraftstoffbedarfs im Straßenverkehr durch CGH_2 oder 8 – 20% durch LH_2 via Elektrolyse mit regenerativem Strom gedeckt werden.

Unter der gleichen Annahme könnten in der EU im Fall von Druckwasserstoff 29 – 60% des Kraftstoffbedarfs des Straßenverkehrs im Jahr 1998 gedeckt werden. Im Fall von Flüssigwasserstoff wären es zwischen 27% und 54%.

Solarenergie in Nordafrika stellt ein weiteres, eventuell für Europa verfügbares Potenzial erneuerbarer Energien dar. Kostengünstiger als Photovoltaik wird auf absehbare Zeit die Stromproduktion in solarthermischen Kraftwerken sein.

Die Potenzialabschätzung ergibt eine elektrische Leistung von ca. 11.000 GW und ein Stromerzeugungspotenzial von etwa 39.000 TWh pro Jahr. Damit wäre eine jährliche Wasserstoffbereitstellung von rund 19.500 TWh_{H_2} in Deutschland möglich. Dies entspricht etwa dem 36-fachen Kraftstoffabsatz, der für das Jahr 2020 vom Mineralölwirtschaftsverband prognostiziert wird. Unter der Annahme, dass rund 10% des Potenzials für den Einsatz im Verkehr erschlossen wird, bleibt ein Wasserstofferzeugungspotenzial von 1.950 $\text{TWh}_{\text{LH}_2}/\text{a}$. Dies entspricht dem 3,6-fachen des für 2020 prognostizierten Kraftstoffabsatzes in Deutschland oder mehr als der Hälfte des Kraftstoffverbrauchs in der EU im Jahr 1998.

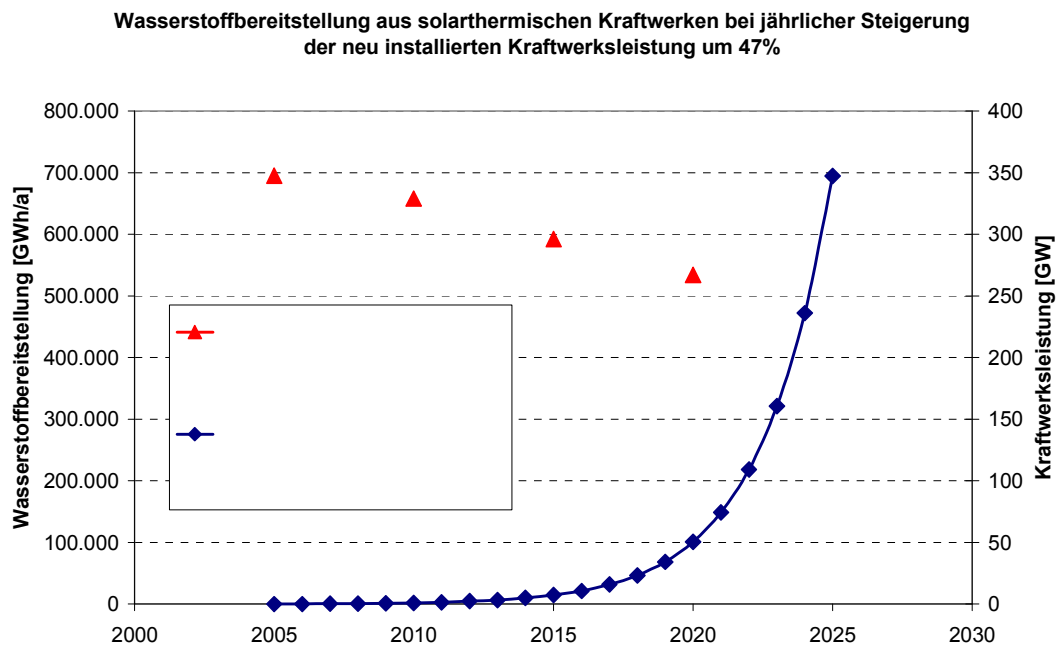
Zusammenfassung

Unter der Annahme, dass Brennstoffzellen-PKW's im Jahr 2020 im Durchschnitt 0,3 kWh/km verbrauchen (entspricht einem 3-Liter-Diesel-PKW) und eine jährliche Fahrleistung von 12.000 km haben, kann damit gut die zweieinhalbfache PKW-Flotte (rund 200 Millionen PKW's) in ganz Europa betrieben werden.

Die zweite wichtige Frage betrifft die Geschwindigkeit, mit der die notwendigen Erzeugungskapazitäten aufgebaut werden können. Als Analogie soll hier die Entwicklung der Windenergie in Deutschland herangezogen werden.

Nimmt man an, dass im Jahr 2005 das erste solarthermische Kraftwerk den Betrieb aufnimmt und die jedes Jahr zusätzlich installierte Leistung um 47% zunimmt (analog zur Entwicklung der Windkraft in Deutschland zwischen 1990 und 2000), könnten im Jahr 2020 rund 17% des prognostizierten Kraftstoffabsatzes durch Wasserstoff aus solarthermischen Kraftwerken abgedeckt werden. Im Jahr 2025 wäre dann eine 100%ige Deckung möglich (siehe Abbildung 0-4). Dabei ist noch nicht berücksichtigt, dass Wasserstoff-Brennstoffzellen-PKW's einen geringeren Verbrauch haben und daher eine 100%ige Deckung schon (geringfügig) früher möglich ist.

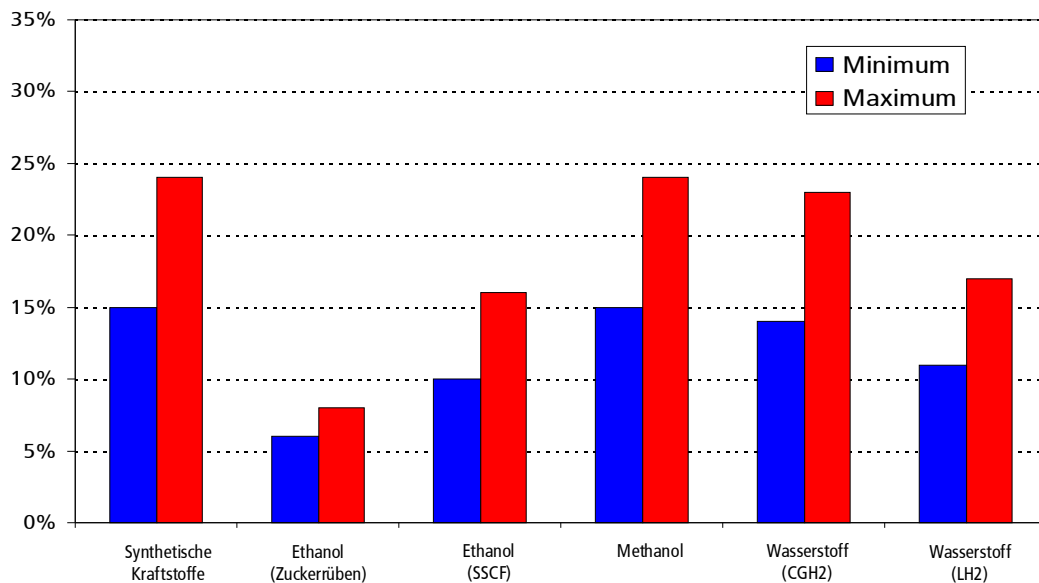
Abbildung 0-4: Mögliche Entwicklung der installierten Leistung solarthermischer Kraftwerke; Prognose des Kraftstoffabsatzes für die Jahre 2005, 2010, 2015 und 2020 des Mineralölwirtschaftsverbands



Diese Abschätzung zeigt, dass eine 100%ige Versorgung mit regenerativen Kraftstoffen innerhalb von rund 25 Jahren erreichbar ist, wenn die Rahmenbedingungen richtig gesetzt werden.

Biokraftstoffe wie Ethanol (und auch Pflanzenöl) können nur aus Biomasse hergestellt werden. Bezogen auf den heutigen Kraftstoffverbrauch des Straßenverkehrs kann in Deutschland maximal 16% durch Bio-Ethanol gedeckt werden (EU: 22%), wenn die für den Anbau von Energiepflanzen verfügbare Fläche mit 1,5 Mio ha (EU: 7,2 Mio ha) angenommen wird. Andere Kraftstoffe (synthetische Kohlenwasserstoffe, Methanol und Wasserstoff) können auf der Basis von Biomasse zwischen 11% und 24% des Kraftstoffbedarfs in Deutschland bzw. zwischen 12% und 33% des Kraftstoffbedarfs in der EU decken (Bezugsjahr: 1998). Die Werte für die verschiedenen Kraftstoffe sind nicht kumulierbar (siehe Abbildung 0-5).

Abbildung 0-5: Bandbreite der realistischen Deckungsanteile unterschiedlicher Kraftstoffe aus Biomasse in Deutschland



Zu beachten ist, dass nicht das gesamte Biomassepotenzial für den Straßenverkehr zur Verfügung steht. Unter der Annahme, dass nur die Hälfte des Potenzials für den Straßenverkehr zur Verfügung steht, könnten mit Bio-Ethanol 3-8% des heutigen Kraftstoffbedarfs in Deutschland bzw. 3-11% des Kraftstoffbedarfs in der EU gedeckt werden. Mit aus Biomasse erzeugtem Wasserstoff könnten zwischen 5 und 12% des heutigen Kraftstoffbedarfs in Deutschland gedeckt werden (EU: 6 – 15%).

Zusammenfassung

Wasserstoff kann nicht nur aus Biomasse sondern auch via Elektrolyse mit regenerativem Strom erzeugt werden. Dadurch ist bei Einsatz von Wasserstoff als Kraftstoff langfristig eine vollständige Substitution konventioneller Kraftstoffe möglich.

Die Erzeugung von Methanol und Ethanol aus erneuerbaren Energien ist praktisch auf die Nutzung von Biomasse beschränkt. Die Erzeugung von Methanol aus Strom und der Luft entzogenem Kohlendioxid ist zwar im Labormaßstab demonstriert worden, eine Machbarkeit in großen Maßstab muss allerdings erst noch nachgewiesen werden. Damit sind die Klimagas-Reduktionspotenziale von Methanol und Ethanol beschränkt.

0.4 Kraftstoffbereitstellung

Folgende Kraftstoff-Bereitstellungspfade werden untersucht:

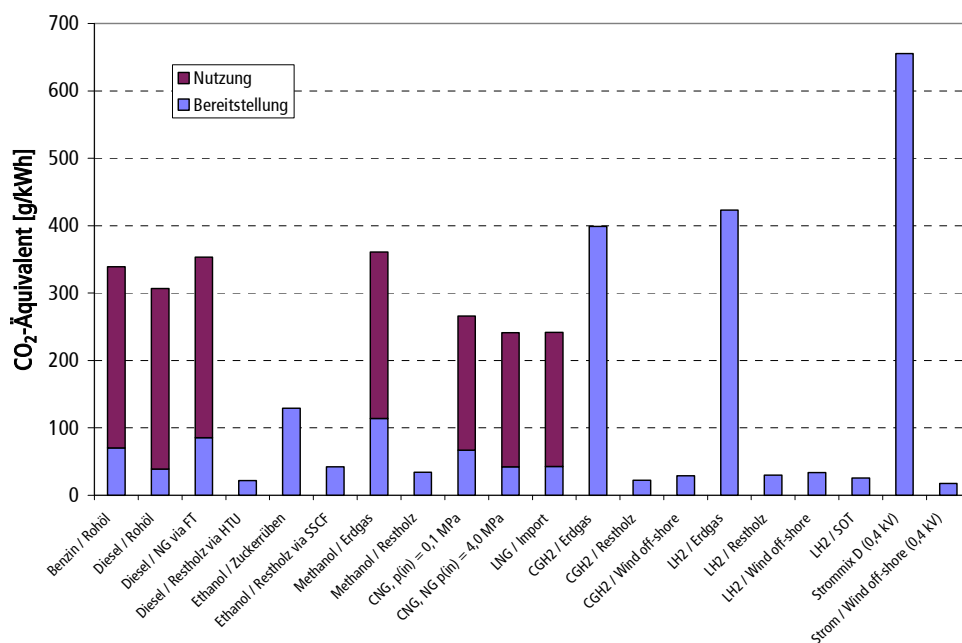
- Benzin aus Rohöl
- Diesel aus Rohöl
- Diesel aus Erdgas via Fischer-Tropsch-Synthese
- Diesel aus Restholz via HTU-Prozess
- Ethanol aus Zuckerrüben
- Ethanol aus Restholz via SSCF-Prozess
- Methanol aus Erdgas
- Methanol aus Restholz
- Druckerdgas aus deutschem Erdgasmix; betrachtet werden die zwei Varianten „Anschluss der Tankstelle an das Erdgas-Hochdrucknetz“ und „Anschluss an das Niederdrucknetz“.
- Flüssigerdgas importiert aus Algerien
- Druckwasserstoff aus Erdgas via Reformierung an der Tankstelle
- Druckwasserstoff aus Restholz in der Nähe der Tankstelle
- Druckwasserstoff via Elektrolyse mit Strom aus offshore Windkraft an der Tankstelle
- Flüssigwasserstoff aus Erdgas

- Flüssigwasserstoff aus Restholz
- Flüssigwasserstoff via Elektrolyse mit Strom aus offshore Windkraft
- Flüssigwasserstoff via Elektrolyse mit Strom aus solarthermischen Kraftwerken in Nordafrika
- Strommix Deutschland (0,4 kV-Ebene).

Es sind noch mehr Bereitstellungspfade vorstellbar. Mit dieser Auswahl wird jedoch die gesamte Bandbreite möglicher sinnvoller Pfade aufgespannt.

In der folgenden Abbildung 0-6 werden die Klimagasemissionen der Kraftstoffbereitstellung sowie der späteren Nutzung (Verbrennung oder Umwandlung im Reformer) dargestellt. Bei Kraftstoffen aus Biomasse ist die Nutzung CO_2 -neutral, da bei der Verbrennung so viel CO_2 frei gesetzt wird, wie die Pflanze durch Fotosynthese aus der Luft entnommen hat.

Abbildung 0-6: Klimagasemissionen (CO_2 -Äquivalent) der Kraftstoffbereitstellung und der Nutzung



Bei den regenerativen Kraftstoffbereitstellungspfadern fallen die relativ hohen kumulierten Treibhausgasemissionen bei der Bereitstellung von Ethanol aus Zuckerrüben auf. Der Grund liegt in den hohen Lachgas-Emissionen, die durch den Anbau der Zuckerrüben verursacht werden.

Zusammenfassung

Die Klimagasemissionen der regenerativen Pfade liegen bei etwa 10% der Werte der fossilen Pfade. Wasserstoff aus Erdgas liegt bei den CO₂-Emissionen pro Energieeinheit rund 15 – 20% über Benzin. In Verbindung mit dem höheren Wirkungsgrad eines Brennstoffzellen-PKW kehrt sich das Verhältnis um. Daher ist eine sinnvolle Bewertung erst in der Verbindung von Kraftstoffbereitstellung und Kraftstoffverbrauch im PKW möglich (siehe Abschnitt 0.5).

0.5 Kraftstoffverbrauch im PKW

Die konventionellen Antriebe Benzin- und Diesel-Verbrennungsmotor weisen auch nach 100 Jahren noch Verbrauchsreduktionspotenziale auf. Hier werden die heute absehbaren ultimativen Verbrauchsreduktionen dieser Antriebe abgeschätzt. Dabei wird vom heute bestmöglichen Stand ausgegangen. Für die alternativen Antriebe wird abgeschätzt, welche Potenziale sie zur Minderung des Kraftstoffverbrauchs im Vergleich zu Benzin-Verbrennungsmotoren haben. Damit lassen sich die Kraftstoffverbrauchswerte („Tank-to-Wheel“) aller hier betrachteten Antriebe für den Zeithorizont 2010 bis 2020 abschätzen.

Optimale Kraftstoffverbräuche werden in der Realität aus verschiedenen Gründen nur selten angetroffen. Ganz wesentlich beeinflusst die Motornennleistung relativ zur Fahrzeugmasse Wirkungsgrad und Verbrauch. Je stärker das Fahrzeug übermotorisiert ist, desto geringer ist der Wirkungsgrad beziehungsweise desto höher ist der Verbrauch, da der stärkere Motor in ungünstigeren Leistungs- und Drehzahlbereichen betrieben wird.

Nach Angaben des Verbands der europäischen Automobilhersteller ACEA haben sich zwischen 1995 und 2000 die CO₂-Emissionen der neu in den Verkauf gekommenen europäischen PKW-Flotte von 186 g/km auf 169 g/km vermindert. Der Anteil der Diesel-PKWs stieg von rund 22% auf 35,8%. Gleichzeitig stiegen die durchschnittliche Fahrzeugmasse um 7,9%, der durchschnittliche Hubraum um 3,8% und die durchschnittliche Motorleistung um 14,3%. Je nach Annahmen über Luft- und Rollwiderstand bedeuten die durchschnittlichen Fahrzeugmassen von 1118 kg (Benzin) bzw. 1308 kg (Diesel) durchschnittliche Wirkungsgrade zwischen 13,4% und 14,7% (Benzin) bzw. zwischen 16,8% und 17,7% (Diesel). Damit sind die verkauften Neufahrzeuge rund ein Drittel schlechter als technisch realisierbar wäre: rund 21% Wirkungsgrad (Benzin) bzw. 24% (Diesel).

Die Betrachtung erreichbarer technischer Standards gibt also kein korrektes Bild der Wirklichkeit. Größter „Feind“ des technisch Machbaren sind Kundenanforderungen an Komfort, die sich in steigender Fahrzeugmasse ausdrücken, und an Fahrleistung, die sich in immer stärker übermotorisierten PKWs ausdrücken. Beides erhöht den Kraftstoffverbrauch.

Daher wird hier davon ausgegangen, dass der Durchschnitt der verkauften PKWs auch in Zukunft, wie heute, rund 40% bis 50% höhere Kraftstoffverbräuche aufweist als das bestmögliche Fahrzeug. Ein zusätzliches großes Reduktionspotenzial liegt also insbesondere darin, PKWs zu verkaufen, die besser an die tatsächlichen Leistungsanforderungen angepasst sind. Dies bedeutet eine Reduktion der Übermotorisierung, also ein Downsizing der Motorleistungen.

Der derzeitige Trend zu immer höherer Motorleistung, größerem Hubraum und schwereren Fahrzeugen ist ungebrochen.

Außerdem ist zu beachten, dass in den hier diskutierten Verbräuchen die durch Nebenaggregate verursachten Verbräuche nicht berücksichtigt sind. Dies betrifft Klimaanlage, Multimediaeinrichtungen etc. Der Verbrauch dieser Nebenaggregate ist in einem stetigen Anstieg begriffen.

Tabelle 0-1: Kraftstoffverbrauch konventioneller Antriebe in den vier Fahrzeugklassen

Heute	Lupo-Klasse		Golf-Klasse		5er-Klasse		Van-Klasse	
	Median	+/- Bandbreite	Median	+/- Bandbreite	Median	+/- Bandbreite	Median	+/- Bandbreite
	[kWh/km]		[kWh/km]		[kWh/km]		[kWh/km]	
Benzin-ICE	0,515	0,084	0,752	0,216	0,955	0,277	0,955	0,260
Diesel-ICE	0,370	0,070	0,570	0,130	0,715	0,175	0,715	0,085

Tabelle 0-2 und Tabelle 0-3 geben eine Übersicht über die zukünftig möglichen Verbrauchswerte im Durchschnitt der neu verkauften PKWs. Hier wurde keine Gewichtsreduktion der Fahrzeuge angenommen.

Tabelle 0-2: Zukünftige Verbesserung der konventionellen Antriebe gegenüber heute und Verbrauchsvorteile der alternativen Antriebe gegenüber Benzin-Verbrennungsmotor-PKWs

2010-2020	Verbesserung gegenüber heute				Verbesserung gegenüber Benziner 2010/20			
	von	bis	Mittelwert	+/- Bandbreite	von	bis	Mittelwert	+/- Bandbreite
Benzin-ICE	25,6%	36,3%	30,9%	5,3%				
Benzin-BZ					0%	20%	10%	10%
Diesel-ICE	8%	20%	14%	6%				
EtOH-BZ					17%	33%	25%	8%
MeOH-BZ					18%	35%	26,5%	8,5%
CNG/LNG-ICE					0%	0%	0%	0%
LH ₂ -ICE					0%	0%	0%	0%
LH ₂ /CGH ₂ -BZ					34%	45%	39,5%	5,5%
Batterie					63%	63%	63%	0%

Zusammenfassung

Tabelle 0-3: Zukünftige Kraftstoffverbräuche der verschiedenen Antriebe

2010-2020	Lupo-Klasse		Golf-Klasse		5er-Klasse		Van-Klasse	
	Median	+/- Bandbreite	Median	+/- Bandbreite	Median	+/- Bandbreite	Median	+/- Bandbreite
	[kWh/km]		[kWh/km]		[kWh/km]		[kWh/km]	
Benzin-ICE	0,356	0,064	0,520	0,154	0,659	0,198	0,659	0,186
Benzin-BZ	0,320	0,068	0,468	0,148	0,593	0,190	0,593	0,180
Diesel-ICE	0,318	0,064	0,490	0,117	0,615	0,156	0,615	0,085
EtOH-BZ	0,267	0,056	0,390	0,123	0,495	0,158	0,495	0,149
MeOH-BZ	0,261	0,056	0,382	0,122	0,485	0,156	0,485	0,148
CNG/LNG-ICE	0,356	0,064	0,520	0,154	0,659	0,198	0,659	0,186
LH ₂ -ICE	0,356	0,064	0,520	0,154	0,659	0,198	0,659	0,186
LH ₂ /CGH ₂ -BZ	0,215	0,043	0,314	0,098	0,399	0,125	0,399	0,118
Batterie	0,132	0,024	0,192	0,057	0,244	0,073	0,244	0,069

Weitere Verbrauchsminderungen lassen sich durch eine Reduktion des Fahrzeuggewichts erreichen. Beim Übergang von der Stahlkarosserie zu einer Aluminiumkarosserie lassen sich rund 11% bis 13% des Fahrzeug-Gesamtgewichts einsparen. Bei Einsatz einer Karosserie aus Faserverbundmaterialien ist eine Gewichtsreduktion um bis zu 17% möglich.

Unter Ausschöpfung aller Leichtbaupotenziale im ganzen Fahrzeug mit einem Materialmix aus Magnesium, Aluminium und Faserverbundmaterialien sind Gewichtsreduktionen von 30% bis 35% möglich.

Dadurch lassen sich folgende Kraftstoffeinsparungen im Fahrzeugbetrieb sowohl im Benzin-Verbrennungsmotor-PKW als auch im Wasserstoff-Brennstoffzellen-PKW realisieren:

Tabelle 0-4: Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch Gewichtsreduktion

[kWh/km]	Lupo-Klasse	Golf-Klasse	5er-Klasse
Verbrauchseinsparung durch Aluminiumkarosserie	0,020 ± 0,006	0,026 ± 0,08	0,034 ± 0,011
Verbrauchseinsparung durch Faserverbundkarosserie	0,026 ± 0,08	0,035 ± 0,011	0,042 ± 0,013
Maximale Verbrauchseinsparung durch Materialmix im Gesamtfahrzeug	0,048 ± 0,015	0,075 ± 0,023	0,112 ± 0,034

Vielfach werden Fahrzeuge in Ultraleichtbauweise, sogenannte Hypercars, diskutiert. Dabei kombinieren Hypercars alle fortschrittlichen Konzepte zur Minderung des Kraftstoffverbrauchs.

Während die eher konventionellen Fahrzeugkonzepte von VW Lupo 3L, Audi A2 oder Greenpeace Smile eine Weiterentwicklung bestehender Technologien darstellen, kommt das Hypercar aus der Richtung der extremen Prototypen-Fahrzeuge. In den Verbrauchsdaten haben sich die Fahrzeuge etwa getroffen, zumindest wenn die konventionellen Fahrzeuge alle Potenziale realisieren und die Motorkonzepte anpassen. Mit einem Brennstoffzellenantrieb könnten beide Konzepte die Verbrauchswerte nochmals nahezu halbieren. Das Hypercar steht allerdings ebenso wenig am Ende seiner Entwicklung wie das derzeit absehbare konventionelle Fahrzeug auf Leichtbaubasis.

Alle Kraftstoffverbrauchsangaben beziehen sich auf den offiziellen, zur Verbrauchsmessung vorgeschriebenen Neuen Europäischen Fahrzyklus.

Obwohl der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) verschiedene Nachteile aufweist, die ihn für einen Vergleich von konventionellen und fortgeschrittenen Antriebskonzepten (Hybrid- bzw. rein elektrischer Antrieb mit Brennstoffzelle oder/und Batterie) als wenig geeignet erscheinen lassen, wird er in der Literatur – da er den offiziellen Prüfzyklus darstellt – immer wieder zum Vergleich verschiedener Antriebssysteme herangezogen. Die im NEFZ erzielten Ergebnisse können als Grundlage für einen Vergleich von unterschiedlichen Antriebskonzepten herangezogen werden; allerdings sind die im folgenden genannten Gesichtspunkte zu berücksichtigen.

In Fahrzyklen, die das europäische Verkehrsgeschehen im PKW-Bereich besser als der NEFZ abbilden, zeigen sich folgende Tendenzen:

- Die Verbrauchseinsparungen durch den Einsatz von Brennstoffzellen-Antrieben im PKW-Sektor werden im realen Verkehrsgeschehen geringer ausfallen als im NEFZ gemessen bzw. simuliert (anstatt 30-45% im NEFZ „nur noch“ 10-30% im HYZEM-Zyklus).
- Auch in den realitätsnahen Fahrzyklen MODEM und HYZEM werden – analog zum NEFZ – durch Brennstoffzellen-Antriebe sehr hohe Verbrauchsreduktionen in den Teilzyklen erzielt, welche das städtische Verkehrsgeschehen beschreiben (40-50% Verbrauchsreduktion).
- Unabhängig vom Fahrzyklus lassen sich mit dem Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb die größten Kraftstoffeinsparungen im Vergleich zu konventionellen Antrieben erzielen.
- In den realitätsnahen Fahrzyklen MODEM und HYZEM ist die Tendenz, dass der Einsatz von Brennstoffzellenantrieben bei schweren Fahrzeugen zu größeren Kraftstoffeinsparungen führt, wesentlich ausgeprägter als im NEFZ.

Zusammenfassung

0.6 Klimagasemissionen pro gefahrenem Kilometer

Die Kraftstoffverbräuche der verschiedenen Antriebs/Kraftstoff-Kombinationen lassen sich direkt in CO₂-Emissionen pro gefahrenem Kilometer umrechnen. Dabei handelt es sich rein um die Emissionen aus dem Fahrzeugbetrieb („Tank-to-Wheel“).

Die Klimagasemissionen durch die Bereitstellung der Kraftstoffe („Well-to-Tank“) lassen sich dann mit den Kraftstoffverbräuchen („Tank-to-Wheel“) zu Klimagasemissionen pro gefahrenem Kilometer („Well-to-Wheel“) verknüpfen.

Das ACEA-Ziel von 140 g/km bis 2008, das sich rein auf die CO₂-Emissionen aus dem Fahrbetrieb bezieht, scheint durch Maßnahmen im Antriebsstrang erreichbar. Beim Benzin-Verbrennungsmotor-PKW liegen die Verbesserungspotenziale insbesondere in der Einführung des Direkteinspritzermotors, der schwefelfreies Benzin erfordert. Bei Verbrennungsmotorantrieben allgemein sind zu erwähnen: Starter/Generator-Einheit, 42 V Bordnetz, optimiert schaltende Automatgetriebe etc.

Das EU-Ziel von 120 g/km bis 2012 scheint mit diesen Maßnahmen kaum erreichbar. Durch Ausnutzung aller Leichtbaupotenziale ist aber auch dieses Ziel erreichbar. Ultimativ scheinen 110 g/km erreichbar. Derzeit ist jedoch der Trend zu immer schweren PKWs ungebrochen.

Bei diesen Abschätzungen wird davon ausgegangen, dass der Durchschnitt der verkauften PKWs auch in Zukunft, wie heute, rund 40% bis 50% höhere Kraftstoffverbräuche aufweist als das beste Fahrzeug. Ein zusätzliches großes Reduktionspotenzial liegt also insbesondere darin, PKWs zu verkaufen, die besser an die tatsächlichen Leistungsanforderungen angepasst sind. Dies bedeutet eine Reduktion der Übermotorisierung, also ein Downsizing der Motorleistungen.

Außerdem ist zu beachten, dass in den hier diskutierten Verbräuchen die durch Nebenaggregate verursachten Verbräuche nicht berücksichtigt sind. Dies betrifft Klimaanlage, Multimediaeinrichtungen etc. Der Verbrauch dieser Nebenaggregate ist ein einem stetigen Anstieg begriffen.

Abbildung 0-7 zeigt die Klimagasemissionen der gesamten Kraftstoffkette („Well-to-Wheel“). Zusätzlich sind die Emissionen aus der Herstellung der Fahrzeuge eingezeichnet.

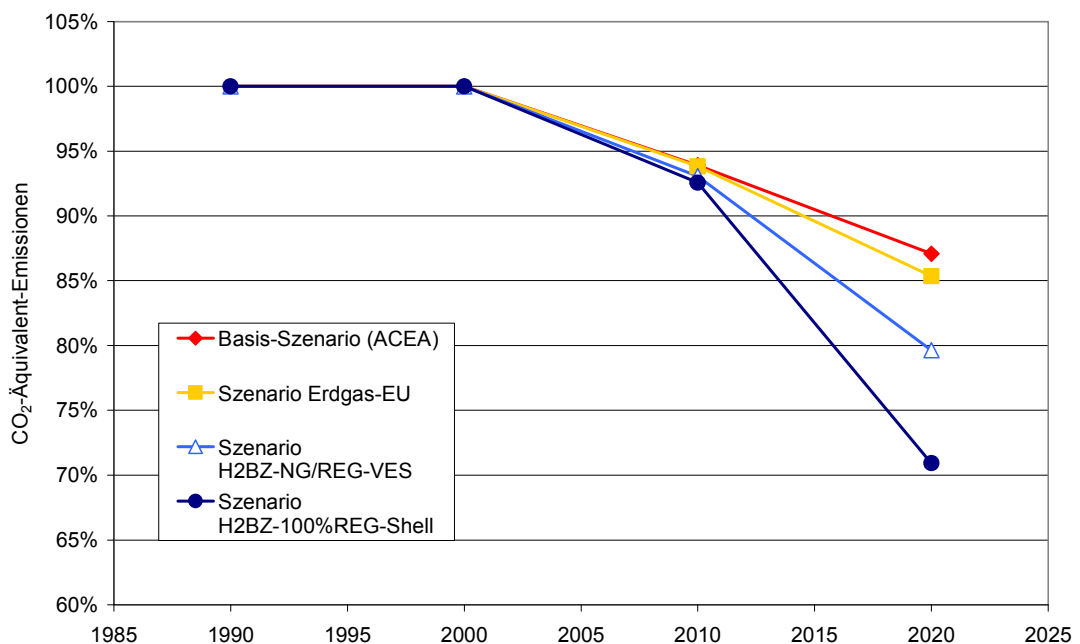
Zusammenfassung

Auf der Basis der Ergebnisse des Intergovernmental Panel on Climate Change werden in Deutschland als weitere Ziele Reduktionen um 40% bis 2025 und um 80% bis 2050 diskutiert.

Da andere Energieverbrauchssektoren jedoch in der CO₂-Reduktion wesentlich weiter fortgeschritten sind als der Straßenverkehr, wird im Rahmen dieser Studie eine 20%ige Reduktion der Gesamtemissionen klimarelevanter Gase bis 2020 im Vergleich zu 1990 als Ziel fest gelegt. Dies entspricht in etwa dem Sinn der Zielsetzung der EU, bis 2020 eine 20%ige Substitution herkömmlicher Otto- und Dieselmotoren durch alternative Kraftstoffe zu erreichen, hier allerdings im Vergleich zum Jahr 2000.

Szenarien für die Entwicklung der Klimagasemissionen aus dem PKW-Straßenverkehr in Deutschland ergeben, dass bei Erreichen der ACEA-Ziele und Fortsetzung dieser Entwicklung bis zur maximalen Reduktion auf 128 g/km im Jahr 2012 eine Reduktion der Klimagasemissionen bis 2020 gegenüber 1990 von 13% erreichbar ist (siehe Abbildung 0-8). Weitere Minderungen durch Gewichtsreduktionen sind möglich; eine minimale CO₂-Emission von 110 g/km im Durchschnitt der verkauften PKWs scheint erreichbar.

Abbildung 0-8: Szenarien die Klimagasemissionen aus dem PKW-Verkehr in Deutschland



Die Einführung von Erdgas-Verbrennungsmotor-PKWs zusätzlich zur Effizienzsteigerung in den konventionellen Antrieben führt bei Erreichen des von der Europäischen Union formulierten Ziels, bis 2020 10% des Benzin- und Diesel-Verbrauchs im PKW-Verkehr durch Erd-

gas zu ersetzen, zu einer Reduktion der Klimagasemissionen um 14,6%, d.h. um zusätzliche 1,7 Prozent-Punkte gegenüber dem Basis-Szenario bei Erreichen und Fortführung des ACEA-Ziels.

Werden zusätzlich zur Effizienzsteigerung in den konventionellen Antrieben Wasserstoff-Brennstoffzellen-PKWs ab dem Jahr 2007 eingeführt und werden 50% bis 100% des Wasserstoffs aus erneuerbaren Energien bereit gestellt, so sind Reduktionen der Klimagasemissionen um 20% bis 30% im Jahr 2020 realistisch erreichbar. Bei vorsichtigen Annahmen kann bis 2025 der gesamte Kraftstoffverbrauch im PKW-Verkehr in Deutschland durch Wasserstoff aus erneuerbaren Energien gedeckt werden.

Keine andere Antriebs/Kraftstoff-Kombination hat ein höheres Reduktionspotenzial als die Kombination Wasserstoff-Brennstoffzelle. Wasserstoff-Verbrennungsmotor-PKWs haben annähernd das gleiche Reduktionspotenzial, wenn der Wasserstoff zu 100% aus erneuerbaren Quellen stammt. Auch Brennstoffzellen-PKWs, die über einen Reformier im Fahrzeug Methanol oder Ethanol als Kraftstoff nutzen, haben ein annähernd gleiches Reduktionspotenzial. Allerdings ist realistisch nur Biomasse als erneuerbare Quelle zur Herstellung dieser Kraftstoffe einsetzbar. Das Potenzial zur Substitution von fossilen Kraftstoffen durch Bio-Ethanol liegt in Deutschland bei maximal 16% bzw. in der Europäischen Union bei maximal 22%. Das Substitutionspotenzial für Methanol aus Biomasse liegt in Deutschland bei maximal 24%, in der EU bei maximal 33%. Im Gegensatz dazu kann Wasserstoff sowohl aus Biomasse als auch aus allen erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien (Wind, Wasser, Sonne etc.) hergestellt werden.

Ultimativ können die Klimagasemissionen mit Wasserstoff-Brennstoffzellen-PKWs vollständig vermieden werden.

Zusammenfassung

0.8 Antriebs/Kraftstoff-Kombinationen – Matrix der wichtigsten Ergebnisse für den Zeithorizont 2010 bis 2020

	Kraftstoff (Kette)	Antrieb	Primärenergiepotenzial	Klimagasemissionen (CO ₂ -Äquivalent) [g/km] Golf-Klasse				Kraftstoffkosten [Euro-€/km] Golf-Klasse	Zeithorizont Kraftstoff	Zeithorizont Antrieb
				Vorgelagerte Kraftstoffkette	Fahrzeugbetrieb	Fahrzeug- herstellung	Summe			
1	Benzin (Rohöl)	Verbrennungsmotor	Weltweites Fördermaximum vor 2010 erwartet; Ressourcen auf wenige Länder konzentriert	37 ± 11	140 ± 42	25	201 ± 52	1,35 ± 0,40	Eingeführt	Eingeführt
2	Benzin (Rohöl)	Brennstoffzelle		33 ± 10	126 ± 40	35 ± 10	193 ± 51	1,22 ± 0,39	Eingeführt	Ab 2007
3	Diesel (Rohöl)	Verbrennungsmotor		19 ± 5	131 ± 31	23	174 ± 36	1,42 ± 0,34	Eingeführt	Eingeführt
4	Diesel (Erdgas via Fischer-Tropsch- Synthese)	Verbrennungsmotor	Erdgas-Ressourcen auf wenige Länder konzentriert	42 ± 10	131 ± 31	23	197 ± 41	2,65 ± 0,63	In einzelnen Märkten eingeführt	Eingeführt
5	Diesel (Restholz via HTU)	Verbrennungsmotor	Lignocellulose in EU: Ersatz von 10- 50% des Kraftstoffverbrauchs heute	11 ± 3	131 ± 31	23	34 ± 3	2,76 ± 0,71	In Entwicklung (ab 2005)	Eingeführt
6	Ethanol (Zuckerrüben)	Brennstoffzelle	Zuckerrüben in EU: Ersatz von 2-25% des Kraftstoffverbrauchs heute	50 ± 16	0	35 ± 10	85 ± 19	4,01 ± 1,26	Verfügbar; Tankstellen- Infrastruktur fehlt	Ab 2007
7	Ethanol (Restholz via SSCF)	Brennstoffzelle	Lignocellulose in EU: Ersatz von 7-34% des Kraftstoffverbrauchs heute	17 ± 5	0	35 ± 10	51 ± 11	3,17 ± 1,05	In Entwicklung (ab 2005)	Ab 2007
8	Methanol (Erdgas)	Brennstoffzelle	s.o.	43 ± 14	94 ± 30	35 ± 10	172 ± 45	1,71 ± 0,55	Verfügbar; Tankstellen- Infrastruktur fehlt	Ab 2007
9	Methanol (Restholz)	Brennstoffzelle	Lignocellulose in EU: Ersatz von 10- 50% des Kraftstoffverbrauchs heute	13 ± 4	0	35 ± 10	48 ± 11	3,97 ± 2,17	In Entwicklung (ab 2005)	Ab 2007
10	Druckerdgas (Eingangsdruck 0,1 MPa)	Verbrennungsmotor	s.o.	35 ± 10	103 ± 31	24	162 ± 41	1,41 ± 0,42	Eingeführt (Nische)	Eingeführt
11	Druckerdgas (Eingangsdruck 4 MPa)	Verbrennungsmotor	s.o.	22 ± 7	103 ± 31	24	149 ± 37	1,30 ± 0,39	Eingeführt (Nische)	Eingeführt
12	Flüssigerdgas (Import)	Verbrennungsmotor	s.o.	22 ± 7	103 ± 31	24	149 ± 37	1,38 ± 0,42	Verfügbar; Tankstellen- Infrastruktur fehlt	Erste Fahrzeuge
13	Druckwasserstoff (Erdgas)	Verbrennungsmotor	s.o.	207 ± 62	0	24	231 ± 62	3,91 ± 1,43	Verfügbar; Tankstellen- Infrastruktur fehlt	Ab 2005
14	Druckwasserstoff (Restholz)	Verbrennungsmotor	Lignocellulose in EU: Ersatz von 10- 50% des Kraftstoffverbrauchs heute	12 ± 3	0	24	35 ± 3	5,55 ± 2,35	In Entwicklung (ab 2005)	Ab 2005

	Kraftstoff (Kette)	Antrieb	Primärenergiepotenzial	Klimagasemissionen (CO ₂ -Äquivalent) [g/km] Golf-Klasse				Kraftstoffkosten [Euro-¢/km] Golf-Klasse	Zeithorizont Kraftstoff	Zeithorizont Antrieb
				Vorgelagerte Kraftstoffkette	Fahrzeugbetrieb	Fahrzeugherstellung	Summe			
15	Druckwasserstoff (offshore Windkraft)	Verbrennungsmotor	Erneuerbare Energien EU: Ersatz von 50-100% des Kraftstoffverbrauchs heute	15 ± 5	0	24	39 ± 5	7,75 ± 2,46	In Kommerzialisierung (ab 2005)	Ab 2005
16	Flüssigwasserstoff (Erdgas)	Verbrennungsmotor	s.o.	220 ± 65	0	24	244 ± 65	4,05 ± 1,21	Verfügbar; Tankstellen-Infrastruktur fehlt	Ab 2005
17	Flüssigwasserstoff (Restholz)	Verbrennungsmotor	Lignocellulose in EU: Ersatz von 8-37% des Kraftstoffverbrauchs heute	15 ± 5	0	24	39 ± 5	6,54 ± 1,94	In Entwicklung (ab 2005)	Ab 2005
18	Flüssigwasserstoff (offshore Windkraft)	Verbrennungsmotor	Erneuerbare Energien EU: Ersatz von 43-90% des Kraftstoffverbrauchs heute	18 ± 5	0	24	41 ± 5	8,52 ± 2,58	In Kommerzialisierung (ab 2005)	Ab 2005
19	Flüssigwasserstoff (Solarthermisches Kraftwerk)	Verbrennungsmotor	Europa+Mittelmeerraum: Ersatz von >100% des Kraftstoffverbrauchs heute	13 ± 4	0	24	37 ± 4	13,58 ± 4,03	In Entwicklung (ab 2005)	Ab 2005
20	Druckwasserstoff (Erdgas)	Brennstoffzelle	s.o.	125 ± 39	0	33 ± 9	159 ± 40	2,37 ± 0,89	Verfügbar; Tankstellen-Infrastruktur fehlt	Ab 2007
21	Druckwasserstoff (Restholz)	Brennstoffzelle	s.o.	7 ± 2	0	33 ± 9	40 ± 9	3,36 ± 1,45	In Entwicklung (ab 2005)	Ab 2007
22	Druckwasserstoff (offshore Windkraft)	Brennstoffzelle	s.o.	9 ± 3	0	33 ± 9	42 ± 9	4,69 ± 1,55	In Kommerzialisierung (ab 2005)	Ab 2007
23	Flüssigwasserstoff (Erdgas)	Brennstoffzelle	s.o.	133 ± 41	0	33 ± 9	166 ± 42	2,45 ± 0,77	Verfügbar; Tankstellen-Infrastruktur fehlt	Ab 2007
24	Flüssigwasserstoff (Restholz)	Brennstoffzelle	s.o.	9 ± 3	0	33 ± 9	43 ± 9	3,95 ± 1,23	In Entwicklung (ab 2005)	Ab 2007
25	Flüssigwasserstoff (offshore Windkraft)	Brennstoffzelle	s.o.	11 ± 3	0	33 ± 9	44 ± 9	5,15 ± 1,63	In Kommerzialisierung (ab 2005)	Ab 2007
26	Flüssigwasserstoff (Solarthermisches Kraftwerk)	Brennstoffzelle	s.o.	8 ± 3	0	33 ± 9	41 ± 9	8,21 ± 2,55	In Entwicklung (ab 2005)	Ab 2007
27	Batterie (Strommix Deutschland)	Elektroantrieb		126 ± 37	0	Keine Angaben	Keine Angaben	1,23 ± 0,36	Eingeführt (Nische)	Eingeführt
28	Batterie (offshore Windkraft)	Elektroantrieb	Erneuerbare Energien EU: Ersatz von >100% des Kraftstoffverbrauchs heute	3 ± 1	0	Keine Angaben	Keine Angaben	Keine Angaben	In Kommerzialisierung (ab 2005)	Eingeführt